

基于非凸稳定区域的广域阻尼鲁棒控制策略

马 静,王 彤,王增平,杨奇逊

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要: 针对区间振荡模式频率低、阻尼小、持续时间长的特点,在李雅普诺夫理论的基础上,利用 Gutman 定理对稳定区域进行推广,定义可使系统迅速进入稳定状态的非凸稳定区域;利用特征值转移因子将非线性的非凸稳定区域转化为线性可求解区域;考虑到系统和扰动的不确定性,重构基于非凸稳定区域的混合 H_2/H_∞ 多目标鲁棒控制约束条件,并转化为一组线性不等式,最终优化得到反馈控制向量。以 4 机 2 区域系统作为测试系统,针对不同运行工况,分别进行时域和频域仿真,结果表明该控制策略在阻尼性能和鲁棒性能方面,均较传统的 H_2/H_∞ 控制策略有明显优势。

关键词: 电力系统; 区间振荡; 非凸稳定区域; 特征值转移因子; 阻尼; 鲁棒控制; 稳定性

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.003

0 引言

区间振荡多存在于联系较薄弱的互联电力系统中,波及范围广,持续时间长,且难以利用局部信息加以抑制^[1],已成为困扰电网安全稳定运行的最突出的问题之一。常规的控制方法多基于传统控制理论^[2],包括相位补偿法、极点配置法、灵敏度分析法等。随着现代控制理论的日益成熟,许多新型控制方法也逐渐被引入到电力系统阻尼控制设计中,如线性最优控制^[3]、自适应控制^[4-5]、鲁棒控制^[6-7]等方法。其中线性最优控制将状态量和控制量的平方和作为性能指标,通过求解黎卡梯方程获取该指标的极值,以实现最优控制。自适应控制则根据系统运行条件的变化,不断调整控制规律,从而保证系统的性能指标接近于参考模型的性能指标。上述 2 种方法在精确获取系统和扰动模型的情况下,均具有较好的阻尼特性,但一旦模型具有不确定性时,将很难保证阻尼效果。相比较而言,鲁棒控制方法在应对电力系统参数和外界扰动等不确定性方面具有不可比拟的优势^[8]。其中,混合 H_2/H_∞ 控制理论更是由于综合考虑

了系统的稳定性及鲁棒性等因素,受到众多专家和学者的青睐^[9-11]。在设计混合 H_2/H_∞ 控制器的过程中,为了保证闭环系统的动态和稳态性能,需要将系统的振荡模式转移到左半平面或预先设定的稳定区域,传统方法是利用 Gutman 定理^[12]进行振荡模式的转移,但由于该定理求解的稳定区域必须是凸区域,因此在某种程度上限制了振荡模式转移的范围。

针对区间振荡模式频率低、阻尼小、持续时间长的特点,本文首先利用特征值转移因子对稳定区域进行拓展,定义了可使系统迅速进入稳定状态的非凸稳定区域。在此基础上,考虑系统和扰动的不确定性,设计了基于非凸稳定区域的混合 H_2/H_∞ 多目标鲁棒控制策略。最后,以 4 机 2 区域系统作为测试系统,分别进行时域和频域仿真,结果表明该方法不仅具有更好的阻尼性能,而且具有更强的鲁棒性能。

1 基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 控制策略

引理 1^[13] 李雅普诺夫第一法,对于系统 $\Sigma: (A, B, C, D)$ 有:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\quad (1)$$

其中, x 为系统状态向量, u 为控制输入向量, y 为输出向量, A 为系统状态矩阵, B 为控制输入矩阵, C 为输出矩阵, D 为前馈矩阵。

平衡状态 $x_e=0$ 的情况下,系统渐近稳定的充要条件是矩阵 A 的所有特征根均具有负实部。

引理 2^[14] 矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 的所有特征根均具有负实部,等价于存在对称矩阵 $X > 0$,使得 $AX + XA^T < 0$ 。

利用引理 1 和引理 2,可将系统的振荡模式转移到左半平面的稳定区域,但该方法无法保证所有的振荡模式都具有足够的阻尼。为此, Gutman 定理^[12]提出只要存在正定对称矩阵 X 满足式(2),那么矩阵 A 的所有特征根都将位于由式(3)描述的稳定区域

收稿日期: 2012-07-13; 修回日期: 2013-03-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012-CB215200); 国家自然科学基金资助项目(51277193, 50907021, 50837002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11MG01); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2011]1139); 河北自然科学基金资助项目(E2012502034); 中国电机工程学会电力青年科技创新项目([2012]46); 河北省电力公司科技项目(KJ[2012]278-280)

Project supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2012CB215200), the National Natural Science Foundation of China(51277193, 50907021, 50837002), Chinese University Scientific Fund Project(11MG01), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry([2011]1139), Hebei Natural Science Foundation(E2012502034), Electric Power Youth Science and Technology Creativity Foundation of CSEE([2012]46) and Science Foundation of Hebei Electric Power Corporation(KJ[2012]278-280)

M 中。

$$\sum_{k,l} c_{kl} A^k X (A^T)^l < 0 \quad (2)$$

$$M = \left\{ z \in \mathbb{C}: \sum_{0 \leq k, l \leq m} c_{kl} z^{k-1} \bar{z}^l < 0 \right\} \quad (3)$$

其中, z 为复平面任意一点, M 为实对称矩阵, c_{kl} 为矩阵 M 中第 k 行第 l 列元素, m 为矩阵 M 的阶数。

Gutman 定理将稳定区域由左半平面推广到可预先设定的区域, 不仅改善了系统的阻尼性能, 还在一定程度上提高了稳定区域选择的灵活性。但应注意, 该定理仅适用于求解凸区域, 对于非凸区域, 由于不存在正定对称矩阵 X 满足式(2), 因此无法确定该区域是否为稳定区域。针对该问题, 本文提出利用特征值转移因子对稳定区域进行拓展, 在图 1(a) 的 λ 平面上设计了一个非凸区域 R_1 , 如图 1(a) 中阴影部分所示, 该区域对应的集合 M_{R_1} 可表示为:

$$M_{R_1} = \{ z \in \mathbb{C}: |z - c_0| - r > 0, \text{Re}(z) < 0 \} \quad (4)$$

其中, r 为圆半径, $(c_0, 0)$ 为圆心坐标, $d = \sqrt{r^2 - c_0^2}$ 为非凸区域与虚轴的交点。

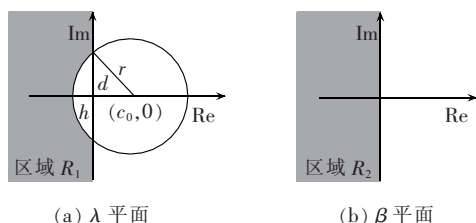


图 1 复平面映射示意图

Fig.1 Schematic diagram of complex plane mapping

系统调节时间与闭环特征根的实部成反比, 特征根距虚轴越远, 系统的调节时间越短^[15]; 同时, 区间模式的频率越低, 参与机组越多, 能量越集中于联络线, 振幅越明显。为此, 本文选用非凸区域 R_1 , 一方面, 可以保证频率越低的区间模式距虚轴越远, 获得的阻尼越大, 调节时间越短, 越容易进入稳定状态; 另一方面, 对于频率较高的区间振荡模式, 其阻尼比虽然有所降低, 但仍能满足阻尼控制的要求。一般情况下, 区间振荡模式的频率为 0.1~0.8 Hz, 为了保证频率较高的 0.8 Hz 振荡模式满足阻尼控制的要求, 由 $d = 2\pi f$ 及 $h = r - c_0$, 可计算出 $d = 7.6, h = 0.9$ 。此时, 可保证 0.8 Hz 的振荡模式对应的边界阻尼比为 0.1, 符合振荡模式的阻尼比不小于 0.1~0.3^[13]的要求。

多目标鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制问题的线性时不变系统可描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + Bu(t) \\ z_\infty = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ z_2 = C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中, w 为外部扰动输入向量, z_∞ 和 z_2 分别为与 H_∞ 和 H_2 性能指标相关的被控向量, B_1 为 w 输入的增益矩阵, C_1, D_{11} 和 D_{12} 分别为与 H_∞ 性能指标相关的

状态变量、扰动输入和控制输入的权矩阵, C_2, D_{21} 和 D_{22} 分别为与 H_2 性能指标相关的状态变量、扰动输入以及控制输入的权矩阵。

建立基于特征值转移因子的反馈控制律:

$$u(t) = FB^T x(t) \quad (6)$$

其中, 考虑到 F 起权重系数作用, 同时与映射有关系, 本文将其定义为特征值转移因子。

将式(6)代入式(5), 可得闭环系统方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + BFB^T)x(t) + B_1 w(t) \\ z_\infty = (C_1 + D_{12}FB^T)x(t) + D_{11}w(t) \\ z_2 = (C_2 + D_{22}FB^T)x(t) + D_{21}w(t) \end{cases} \quad (7)$$

该闭环系统对应的特征根方程为:

$$|\lambda I - (A + BFB^T)| = 0 \quad (8)$$

考虑到闭环特征根满足在非凸区域 R_1 稳定的约束条件下很难在 λ 平面获取, 本文将区域 R_1 映射到 β 的左半平面 R_2 上, 如图 1(b) 中阴影部分所示。区域 R_1 和区域 R_2 之间的映射关系如下:

$$\beta = \frac{r - c_0 + \lambda}{r + c_0 - \lambda}, \quad \lambda = \frac{r(\beta - 1)}{\beta + 1} + c_0 \quad (9)$$

由式(9)的映射关系, 可得 β 平面上的闭环系统特征方程:

$$|U(F)\beta + V(F)| = 0 \quad (10)$$

其中, $U(F)$ 和 $V(F)$ 都是以 F 为变量的系数矩阵, $U(F) = (r + c_0)I - (A + BFB^T)$, $V(F) = -(r - c_0)I - (A + BFB^T)$ 。

由式(9)可知, λ 平面的振荡模式位于区域 R_1 的充要条件是 β 平面对应的振荡模式位于左半平面 R_2 。而在 β 平面中, 由引理 1 可知, 系统稳定的充要条件是所有特征根的实部均为负数, 即存在非负定的特征值转移因子矩阵 F 满足:

$$U^{-1}(F)V(F) > 0 \quad (11)$$

因此, 满足闭环系统是渐近稳定的条件可以表示为:

$$G = \{F \in \mathbb{R}^{n \times n}: V(F) > 0 \| U(F) < 0\} \quad (12)$$

其中, “ $\|$ ”表示逻辑关系“或”。

由引理 2 可得式(12)的等价条件为存在对称矩阵 $X > 0$, 使得下式成立:

$$G = \{F \in \mathbb{R}^{n \times n}: G_1 < 0 \| G_2 > 0\} \quad (13)$$

其中, $G_1 = VX + XV^T$, $G_2 = UX + XU^T$ 。

需要注意的是, 图 1(a) 中圆弧范围外虚轴上的点对应于无阻尼的区内振荡模式。文中发电机采用详细模型, 因此区内振荡模式都具有一定的阻尼并满足稳定要求。再者, 本文主要针对区间振荡进行广域阻尼控制, 对于频率较高的区内振荡模式, 可结合当地控制器(如 PSS)加以抑制。因此, 不需要考虑图 1(a) 中圆弧范围外虚轴上的点, 即图 1(b) 中稳定区域仅对应图 1(a) 中圆弧的部分以虚轴为界。

对系统进行多目标鲁棒控制, 除了满足系统渐

近稳定的条件式(13)外,还需要使闭环系统满足以下条件。

a. H_∞ 性能:当 w 被看作是一个具有有限能量的扰动信号时,从 w 到 z_∞ 的闭环传递函数 $T_{wz_\infty}(s)$ 的 H_2 范数不超过给定的上界 γ ,即 $\|T_{wz_\infty}(s)\| < \gamma$,以保证闭环系统具有鲁棒稳定性。

b. H_2 性能:当 w 被看作是一个具有单位谱密度的白噪声信号时,从 w 到 z_2 的闭环传递函数 $T_{wz_2}(s)$ 的 H_2 范数不超过给定的上界 η ,即 $\|T_{wz_2}(s)\| < \eta$,以保证用 H_2 范数度量的系统性能处于良好的水平。

满足目标 **a** 和 **b** 的充要条件为:

$$\begin{bmatrix} A_d X + X A_d^T & B_1 & X(C_1 + D_{12} F B^T)^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1 + D_{12} F B^T) X & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2 + D_{22} F B^T) X \\ X(C_2 + D_{22} F B^T)^T & Q^T \end{bmatrix} > 0 \quad (15)$$

$$\text{Trace}(Q) < \eta^2 \quad (16)$$

其中, $A_d = A + B F B^T$, $\text{Trace}(Q)$ 为矩阵 Q 的迹。

由式(13)~(16)可将基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 控制问题转换为式(17)的线性不等式组的优化问题,其指标 $\alpha\gamma + \beta \text{Trace}(Q)$ 为 H_2 性能和 H_∞ 性能的加权组合, α 和 β 分别表示性能指标中 H_2 性能和 H_∞ 性能的权重。

$$\min_{\gamma, X, N, Q} [\alpha\gamma + \beta \text{Trace}(Q)]$$

$$G_1 < 0 \| G_2 > 0$$

$$\begin{bmatrix} Q & C_2 X + D_{22} N B^T \\ X C_2 + D_{22} N^T B^T & Q^T \end{bmatrix} > 0 \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} A X + X A^T + B N B^T + B N^T B^T & B_1 & X C_1^T + B N^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 X + D_{12} N B^T & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0$$

$$\text{Trace}(Q) < \eta^2$$

其中, $G_1 = -2(r - c_0)X - AX - XA^T - BNB^T - BN^TB^T$, $G_2 = 2(r + c_0)X - AX - XA^T - BNB^T - BN^TB^T$ 。

令 $FB^T X = NB^T$, $MB^T = B^T X$, 利用上述不等式的约束条件可算出 N 和 X , 进而可得 $M = B^T X B (B^T B)^{-1}$, 以及特征值转移因子 $F = NM^{-1}$ 。将 F 代入式(6), 最终可推导出反馈控制向量 $u(t) = NM^{-1} B^T x(t)$ 。

2 应用算例

2.1 测试系统

以 4 机 2 区域的系统^[16]为例, 利用可控串补 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) 设计基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 阻尼控制器, 并对其阻尼性能和鲁棒性能进行分析。如图 2 所示, 发电机采用 6 阶暂态模型, 励磁系统采用快速励磁, 基准模型下的

负荷采用 50% 的恒阻抗和 50% 的恒电流混合模型, TCSC 位于联络线 8-9 之间, 补偿度为 40%。TCSC 附加控制器采用图 3 所示的控制结构^[16], 其中 $\tau = 0.05$ s 为一阶惯性常数, $\tau_a = 0.4$ s 为超前时间常数, $\tau_b = 0.02$ s 为滞后时间常数, $X_{\max} = 3$ 和 $X_{\min} = -3$ 分别输出最大值和最小值。本文针对区间低频振荡, 利用 TCSC 实现基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 控制, 以 4 号机组为参考机组, TCSC 的广域反馈信号采用各发电机相对于 4 号机组的转速差。

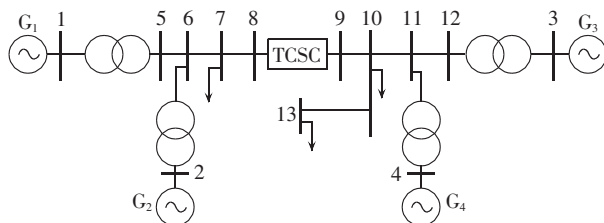


图 2 4 机 2 区域系统结构图

Fig.2 Structure of 4-machine 2-area system

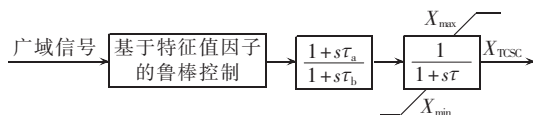


图 3 TCSC 附加控制器结构

Fig.3 Structure of supplementary controller of TCSC

在系统中的附加控制器处于开环运行状态下, 利用模态分析方法对此系统进行分析, 得到低频振荡的主导模式及其阻尼。从表 1 中得到, 4 机系统中存在 2 个区内模式和 1 个具有弱阻尼的区间模式, 在系统受到干扰时, 系统不能快速恢复到稳定状态。如不加以有效抑制, 会对系统造成严重危害。本文利用 MATLAB 中的 PST (Power System Toolbox) 进行仿真验证。

表 1 未加控制器时 4 机系统主导模式

Tab.1 Dominate modes of 4-machine system without controller

模式	振荡频率/Hz	阻尼比	模式分类
1	0.491 2	0.009 3	区间模式
2	1.088 7	0.074 6	区内模式
3	1.095 3	0.075 1	区内模式

2.2 仿真结果及分析

在以下各类扰动中, 通过与传统的 H_2/H_∞ 控制器进行对比, 验证本方法的有效性和优越性。

a. 稳态时联络线传输功率为 421 MW, 扰动为 0.1 s 时, 线路 4-13 的母线 4 侧发生瞬时性三相短路, 0.2 s 后故障消失。

b. 稳态时联络线传输功率为 421 MW, 扰动为 0.1 s 时, 线路 4-13 的母线 4 侧发生永久性三相短路, 0.2 s 后将故障线路切除。

c. 负荷采用 60% 的恒阻抗和 40% 的恒电流,

扰动为 0.1 s 时,线路 9-10 的母线 10 侧发生瞬时性三相短路,0.15 s 后故障消失。

d. 负荷采用 40% 的恒阻抗和 60% 的恒电流,扰动为 0.1 s 时,线路 9-10 的母线 10 侧发生瞬时性三相短路,0.15 s 后故障消失。

分别对基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 阻尼控制器和传统的鲁棒 H_2/H_∞ 阻尼控制器进行闭环

控制,得到振荡模式如表 2 所示。由表 2 可以看出,2 种控制器均能将阻尼比不足的振荡模式转移到稳定区域,但需要注意的是,控制器 1 对系统的阻尼效果要远优于控制器 2。这表明,基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 控制在抑制区间低频振荡过程中具有明显的优势。在以上 4 种扰动情况下,闭环系统的特征根均分布在非凸稳定区域中,如图 4 所示,其中空心

表 2 开环系统和闭环系统下的区间振荡模式

Tab.2 Inter-area oscillation mode of open-loop and closed-loop systems

控制器	扰动 a		扰动 b		扰动 c		扰动 d	
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
无控制器	0.491 2	0.009 3	0.523 8	0.009 1	0.491 1	0.009 0	0.491 0	0.009 6
控制器 1	0.474 0	0.286 3	0.512 1	0.230 1	0.474 6	0.281 2	0.472 9	0.292 1
控制器 2	0.487 4	0.130 1	0.521 2	0.105 8	0.487 5	0.128 8	0.487 1	0.132 9

注:控制器 1 为基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 阻尼控制器,控制器 2 为传统的鲁棒 H_2/H_∞ 阻尼控制器。

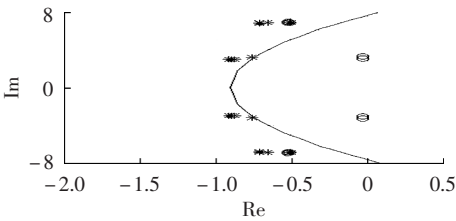
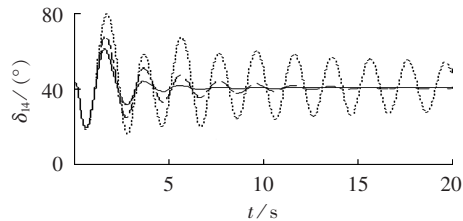


图 4 开环和闭环系统特征根分布

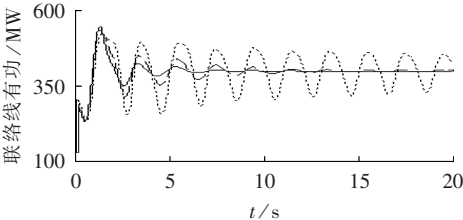
Fig.4 Eigenvalue distribution of open-loop and closed-loop systems

圆为开环系统特征根,星花为利用控制器 1 得到的闭环系统特征根。

2 区域发电机之间的功角差和联络线功率在 4 种扰动下的时域仿真波形如图 5—8 所示。可以看出,在不同运行状态下,发生不同扰动时,基于非凸稳定区域的鲁棒 H_2/H_∞ 阻尼控制器均能快速有效地抑制区间低频振荡,且阻尼性能和鲁棒性能均明



(a) G_1 - G_4 功角差的时域仿真波形

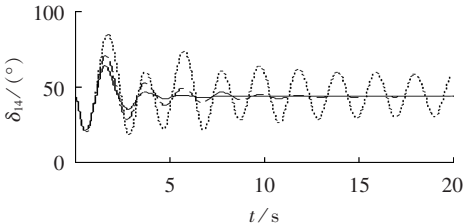


(b) 联络线功率的时域仿真波形

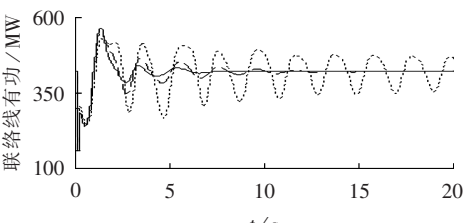
.....无控制器,——控制器 1,———控制器 2

图 6 扰动 2 下的系统动态响应

Fig.6 System dynamic response to disturbance 2



(a) G_1 - G_4 功角差的时域仿真波形

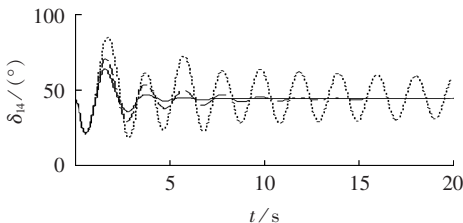


(b) 联络线功率的时域仿真波形

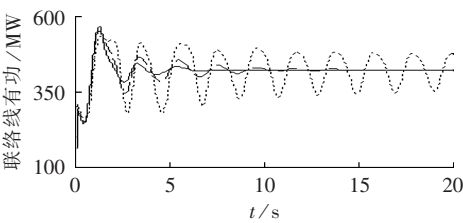
.....无控制器,——控制器 1,———控制器 2

图 5 扰动 1 下的系统动态响应

Fig.5 System dynamic response to disturbance 1



(a) G_1 - G_4 功角差的时域仿真波形

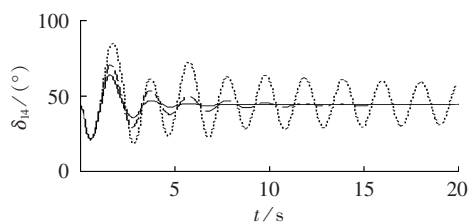
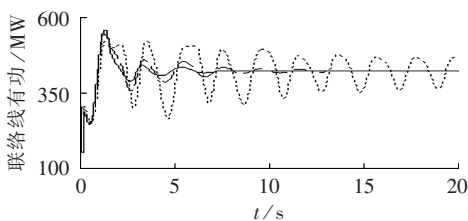


(b) 联络线功率的时域仿真波形

.....无控制器,——控制器 1,———控制器 2

图 7 扰动 3 下的系统动态响应

Fig.7 System dynamic response to disturbance 3

(a) G_1 - G_4 功角差的时域仿真波形

(b) 联络线功率的时域仿真波形

..... 无控制器, —— 控制器 1, --- 控制器 2

图 8 扰动 4 下的系统动态响应

Fig.8 System dynamic response to disturbance 4

显优于传统的 H_2/H_∞ 阻尼控制器。

3 结论

a. 针对区间振荡模式频率低、所需阻尼大的特点,利用特征值转移因子对稳定区域进行推广,定义了可使系统迅速进入稳定状态的非凸稳定区域。

b. 在此基础上,考虑到系统和扰动的不确定性,设计了基于非凸稳定区域的混合 H_2/H_∞ 多目标鲁棒控制器。

c. 以 4 机 2 区域系统作为测试系统,分别进行时域和频域仿真,结果表明相比于传统的 H_2/H_∞ 阻尼控制策略,该控制策略具有更好的控制效果和更强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):1-7.
ZHU Fang,ZHAO Hongguang,LIU Zenghuang,et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(1):1-7.
- [2] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:1127-1160.
- [3] 颜伟,朱继忠,徐国禹. UPFC 线性最优控制方式的研究及其对暂态稳定性的改善[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):45-49.
YAN Wei,ZHU Jizhong,XU Guoyu. Enhancement of power system stability using linear optimal control strategy of UPFC [J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(1):45-49.
- [4] 陆超,吴超,王天,等. 多元自回归滑动平均模型辨识与电力系统自适应阻尼控制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):31-36.
LU Chao,WU Chao,WANG Tian,et al. Auto regressive moving averaging vector model identification and power system adaptive damping control [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(19): 31-36.

- [5] 付俊,赵军,乔治·迪米罗夫斯基. 静态无功补偿器鲁棒控制的一种新自适应逆推方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):7-11.
FU Jun,ZHAO Jun,DIMIROVSK G M. Robust control of SVC:a new adaptive backstepping methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(10):7-11.
- [6] 吴捷,刘永强,陈巍. 现代控制技术在电力系统控制中的应用(一)[J]. 中国电机工程学报,1998,18(6):377-382.
WU Jie,LIU Yongqiang,CHEN Wei. The application of modern control techniques in power system control(I)[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(6):377-382.
- [7] 吴捷,刘永强,陈巍. 现代控制技术在电力系统控制中的应用(二)[J]. 中国电机工程学报,1998,18(6):383-387.
WU Jie,LIU Yongqiang,CHEN Wei. The application of modern control techniques in power system control(II)[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(6):383-387.
- [8] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008:68-93.
- [9] 孙宜标,金石,王成元. 基于线性矩阵不等式的环形永磁力矩电机的 H_2/H_∞ 静态输出反馈控制[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):8-14.
SUN Yibiao,JIN Shi,WANG Chengyuan. LMI-based H_2/H_∞ static output feedback control for ring permanent magnet torque motor [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(15):8-14.
- [10] 王进华. 混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2004,21(1):45-53.
WANG Jinhua. Design of mixed H_2/H_∞ controller[J]. Control Theory & Applications,2004,21(1):45-53.
- [11] 马燕峰,赵书强,顾雪平. 基于输出反馈和区域极点配置的电力系统阻尼控制器研究[J]. 电工技术学报,2011,26(4):175-184.
MA Yanfeng,ZHAO Shuqiang,GU Xueping. Research on power system damping controllers based on output feedback and region poles assignment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(4):175-184.
- [12] MAHMOUD C,PASCAL G. H_∞ design with pole placement constraints:an LMI approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1996,41(3):358-367.
- [13] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:252-258.
- [14] 刘豹. 现代控制理论[M]. 北京:机械工业出版社,2007:170-173.
- [15] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2007:82-83.
- [16] ROGERS G. Power system oscillations [M]. Boston,USA:Kluwer Academic Publishers,2000:7-10.

作者简介:

马 静(1981-),男,山西阳泉人,副教授,博士后,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:hdmajing@yahoo.com.cn);

王 彤(1985-),女,河北石家庄人,博士,主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究;

王增平(1964-),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化;

杨奇逊(1937-),男,上海人,中国工程院院士,博士研究生导师,研究方向为电力系统保护与控制。

(下转第 25 页 continued on page 25)

Application Society Annual Meeting, Chicago, USA: [s.n.], 1976: 91-107.

[18] WILDRICK C M, LEE F C. A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(3): 280-285.

[19] FENG Xiaogang, YE Zhihong, XING Kun, et al. Individual load impedance specification for a stable DC distributed power system[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Dallas, USA: [s.n.], 1999: 923-929.

[20] LIU Jinjun, FENG Xiaogang, LEE F C, et al. Stability margin monitoring for DC distributed power systems via perturbation approaches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6): 1254-1261.

[21] SUDHOFF S D, GLOVER S F, LAMM P T, et al. Admittance space stability analysis of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 965-973.

作者简介:

姜世公(1983-),男,黑龙江鸡西人,博士研究生,研究方向为分布式发电技术、微电网技术等(E-mail:jiangshigong602@yahoo.cn);

王卫(1963-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,研究方向为分布式发电技术、智能电网、照明电子技术、软开关变换技术等。

Admittance specification stability of islanded microgrid

JIANG Shigong, WANG Wei, LIU Guihua, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The output impedance model of voltage-source inverter is established based on the analysis of its topology and control strategy. The influence of its filter parameters and control loop gain on its output impedance, equivalent loop gain and system stability is analyzed by the impedance analysis method, the correctness of which is verified by the time-domain analysis method. Since the multiple inverters of islanded microgrid are connected in parallel, a method to judge the stability of admittance domain is proposed and the quantized criterion of stability between inverter output admittance and load input admittance is given. The system stability of microgrid can be ensured by the proper design of micro-source output admittance. Simulative and experimental results demonstrate the correctness and feasibility of the proposed method.

Key words: microgrid; stability; output impedance; admittance specification; electric inverters; models

+++++

(上接第 18 页 continued from page 18)

Wide-area damping robust control based on non-convex stable region

MA Jing, WANG Tong, WANG Zengping, YANG Qixun

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the theory of Lyapunov and due to the characteristics of inter-area oscillation mode: low-frequency, low damping and long duration, the theory of Gutman is used to extend the stability region for redefining a non-convex stable region to quickly promote the system to stable state. The eigenvalue shift factor is applied to convert the nonlinear non-convex region into a feasible linear space. With the consideration of the uncertainties of system and disturbance, the constraints of hybrid H_2/H_∞ multi-objective robust control are reformed based on the non-convex stable region and transformed into a series of linear inequality set, which are optimized to obtain the feedback control vectors. Time-domain and frequency-domain simulations are respectively carried out for a 4-machine 2-area system under different operating conditions, and results show that, the proposed control strategy is superior to traditional H_2/H_∞ control strategy in damping performance and robustness.

Key words: electric power systems; inter-area oscillation; non-convex stable region; eigenvalue shift factor; damping; robust control; stability