

考虑饱和影响的电力系统广域阻尼控制器设计

聂永辉¹, 李兵兵², 高磊³, 金国彬², 张鹏宇²

(1. 东北电力大学 教务处, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012;
3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:广域阻尼控制器是抑制电力系统区间低频振荡的一种有效方法,但实际系统中执行器一般存在饱和现象。为此提出一种抗饱和补偿器设计方法。首先通过引入饱和函数建立考虑执行器饱和的电力系统模型;其次采用现代抗饱和技术,分2步进行抗饱和和补偿器设计。第一步不考虑饱和环节,采用鲁棒控制理论对闭环电力系统进行 H_∞ 控制器设计,以确保系统的稳定性;第二步针对饱和环节,基于Lyapunov稳定理论提出抗饱和补偿器设计方法,设计抗饱和补偿器进行补偿,以抑制执行器饱和对控制器性能的影响。最后,将该抗饱和控制器应用到2区4机电力系统模型。仿真结果表明,相比不考虑执行器饱和的线性控制器,根据所提方法设计的抗饱和补偿器可以有效抑制饱和环节对线性控制器性能的影响,能够显著提高电力系统对饱和的抑制能力。

关键词:电力系统;区间低频振荡;广域阻尼控制; H_∞ 回路成形;抗饱和补偿器;阻尼

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008029

0 引言

电网规模不断扩大,使得电力系统的区间低频振荡问题成为制约电网发展的关键因素之一,其不仅限制了区间的输送功率,而且严重威胁到电力系统的安全稳定运行^[1-3]。

抑制低频振荡的传统解决方法是采用本地测量的发电机信号作为输入信号设计阻尼控制器为励磁系统提供额外的阻尼,这种设计方法对区间振荡模式的抑制效果不太理想,不能确保电力系统的稳定^[4]。随着广域测量系统(WAMS)的逐渐成熟,采用广域信号设计广域阻尼控制器成为比较普遍的抑制区间低频振荡的方法^[5]。但是,由于能量限制等因素使得广域阻尼控制器发生饱和现象,导致控制器输出与系统输入信号产生误差,影响广域控制器性能。因此设计抗饱和补偿器对饱和环节进行补偿很有实际意义。

实际上,大多数物理系统中都存在饱和现象,它将全局渐近稳定转化为局部渐近稳定,是控制系统中比较常见的控制约束^[6]。输入饱和及输出饱和是2种比较常见的饱和现象。其中输出饱和中的执行器饱和普遍存在于电力系统中,比如励磁控制以及电力系统稳定器的输出限制^[7-8]。若设计控制器时

不考虑饱和问题,则会导致执行器的输出与控制器的输出存在差异,进而影响控制系统的动态性能。

对于包含饱和环节的系统,其控制策略一般有直接法和抗饱和法2种^[9-10]。直接法是直接针对饱和环节,首先确定一个性能指标,设计相应的控制律使系统保持稳定,然后通过最优控制理论找出最优的控制律和吸引域。抗饱和法的基本思路是首先不考虑饱和进行线性控制器设计,其次根据Lyapunov稳定性理论推导出设计抗饱和补偿器的线性矩阵不等式(LMI),通过LMI工具箱求解相关抗饱和补偿器参数,减少饱和环节对控制器性能的影响。抗饱和控制已有不少研究成果,如基于鲁棒性和 H_∞ 最优控制理论的系统方法已经被提出^[11],并且基于LMI工具箱已经开发了广泛的数值设计算法。其中,文献[12]研究了动态控制器的一般情况,外部输入直接进入执行器并且在控制器的输出方程中存在校正项;文献[13]考虑执行器饱和影响及外界扰动,提出了一种基于扩张状态观测器的动态抗饱和补偿器设计方法;文献[14]进一步提出了一种基于LMI的合成方法,用于构建动态抗饱和补偿器,保证被控对象的性能。

本文采用现代抗饱和法,首先不考虑饱和现象设计广域 H_∞ 控制器,使得闭环系统稳定,并具有良好的性能;然后考虑执行器饱和现象,基于LMI方法设计抗饱和补偿器,将其应用到广域 H_∞ 控制器上,在不影响线性控制器控制性能的前提下,通过对饱和环节进行补偿,以改善具有饱和和执行器的线性控制系统的区域性能和稳定性,减小饱和问题对系统的影响,提高系统的动态性能。

收稿日期:2020-02-17; **修回日期:**2020-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61973072,51577023);吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(JJKH20180445KJ)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61973072,51577023) and the “13th Five-Year” Scientific and Technology Research Project of Jilin Province Department of Education(JJKH20180445KJ)

1 考虑饱和影响的电力系统模型

可以用一组非线性微分-代数方程来描述广域电力系统的动态行为,具体可以描述成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{u}) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{f}(\cdot)$ 为有动态特性如发电机等元件的微分方程; $\mathbf{g}(\cdot)$ 和 $\mathbf{h}(\cdot)$ 为网络方程,即代数方程; $\mathbf{x}$ 为发电机转速、转子角等状态变量; $\mathbf{w}$ 为母线电压变量; $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{y}$ 分别为输入变量和输出变量。假设系统受到扰动后仍然处在正常运行状态足够小的邻域内,可以根据 Lyapunov 线性化第一理论,将实际非线性的电力系统微分-代数方程线性化来研究稳定性。若在电力系统的平衡点 $(\mathbf{x}_0, \mathbf{w}_0, \mathbf{u}_0)$ 处对其进行泰勒级数展开并略去高阶项,所得的代数方程雅可比矩阵为非奇异,则可将代数方程中的代数变量消去。得到矢量矩阵式(1)线性化后的状态空间表达式为:

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

其中, $\mathbf{A}_p$ 、 $\mathbf{B}_p$ 、 $\mathbf{C}_p$ 、 $\mathbf{D}_p$ 分别为广域电力系统线性化后的状态、输入、输出和前馈矩阵; $\mathbf{x}_p$ 为状态变量; $\mathbf{u}_p$ 为输入变量; $\mathbf{y}_p$ 为系统输出变量。

假设控制器的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_{c,u} \mathbf{y}_p + \mathbf{B}_{c,w} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{y}_c = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_{c,u} \mathbf{y}_p + \mathbf{D}_{c,w} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{v}_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{x}_c$ 为线性控制器的状态变量; $\mathbf{y}_c$ 为线性控制器输出变量; $\boldsymbol{\omega}$ 为控制器的干扰输入信号; $\mathbf{v}_1$ 、 $\mathbf{v}_2$ 为抗饱和和补偿器的输出信号; $\mathbf{A}_c$ 为控制器的状态矩阵; $\mathbf{B}_{c,u}$ 为控制器输入矩阵; $\mathbf{B}_{c,w}$ 为干扰输入矩阵; $\mathbf{C}_c$ 为控制器输出矩阵; $\mathbf{D}_{c,u}$ 和 $\mathbf{D}_{c,w}$ 分别为控制器输入和干扰输入的前馈矩阵。

在实际电力系统中,往往由于控制器输出限制等约束条件,使得控制器的输出限制在有界范围内,典型的饱和非线性如图1所示。

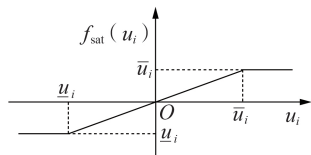


图1 饱和函数

Fig.1 Saturation function

图1所示饱和函数的数学描述为:

$$f_{\text{sat}}(u_i) = \begin{cases} \bar{u}_i & u_i > \bar{u}_i \\ u_i & \underline{u}_i \leq u_i \leq \bar{u}_i \\ \underline{u}_i & u_i < \underline{u}_i \end{cases} \quad (4)$$

其中, $f_{\text{sat}}(\cdot)$ 为标准饱和函数; u_i 为第 i 个控制器的输出信号; $\bar{u}_i$ 为控制器输出信号上限; $\underline{u}_i$ 为输出下限。

图2为考虑执行器饱和的控制系统框图。图中, u_{ref} 为参考输入; z 为系统测量输出。由于饱和环节的存在,控制器的输出受到约束,导致控制器性能变差,往往使得控制器达不到预期的控制效果^[15-16]。

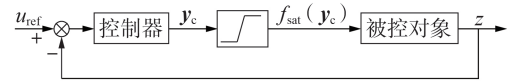


图2 考虑执行器饱和的控制系统框图

Fig.2 Block diagram of control system considering actuator saturation

当控制器输出发生饱和现象时,控制器持续根据误差值进行控制量的累加,导致控制量 y_c 会变得非常大,但是对已经饱和的执行器却不会产生影响,从而导致控制器性能恶化,甚至影响系统的稳定性。为了避免或最小化由饱和引起的性能下降,闭环系统可以通过以下抗饱和补偿器进行增强:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\text{aw}} = \mathbf{A}_{\text{aw}} \mathbf{x}_{\text{aw}} + \mathbf{B}_{\text{aw}} \mathbf{u}_{\text{aw}} \\ \mathbf{v} = \mathbf{C}_{\text{aw}} \mathbf{x}_{\text{aw}} + \mathbf{D}_{\text{aw}} \mathbf{u}_{\text{aw}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{A}_{\text{aw}}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{aw}}$ 、 $\mathbf{C}_{\text{aw}}$ 、 $\mathbf{D}_{\text{aw}}$ 分别为补偿器的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵以及前馈矩阵; $\mathbf{x}_{\text{aw}}$ 为抗饱和补偿器的状态变量; $\mathbf{u}_{\text{aw}}$ 为补偿器输入信号; $\mathbf{v}$ 为补偿器的输出, $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2]^T$ 。 $\mathbf{v}_1$ 用于对输出反馈量进行修正,补偿由于控制量饱和引起的输出损失,发生饱和时, $\mathbf{v}_1$ 越小,说明执行器饱和环节对控制器性能影响越小,控制结果越理想。 $\mathbf{v}_2$ 作用于控制器输出,以消除因饱和导致的控制量累加。补偿器的输入 $\mathbf{u}_{\text{aw}} = \mathbf{y}_c - f_{\text{sat}}(\mathbf{y}_c)$,即以控制器理想输出信号与实际输出信号之间的误差值作为补偿器的输入。取状态变量 $\mathbf{x}_{\text{cl}} = [\mathbf{x}_p^T \ \mathbf{x}_c^T]^T$,则由控制器和被控对象构成的闭环系统可以用式(6)所示,其中各个参数矩阵为将式(3)和式(5)代入式(2)中得到的相对应的参数矩阵。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\text{cl}} = \mathbf{A}_{\text{cl}} \mathbf{x}_{\text{cl}} + \mathbf{B}_{\text{cl},w} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{B}_{\text{cl},q} \mathbf{u}_{\text{aw}} + \mathbf{B}_{\text{cl},v} \mathbf{v} \\ \mathbf{y}_{\text{cl}} = \mathbf{C}_{\text{cl}} \mathbf{x}_{\text{cl}} + \mathbf{D}_{\text{cl},w} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{D}_{\text{cl},q} \mathbf{u}_{\text{aw}} + \mathbf{D}_{\text{cl},v} \mathbf{v} \end{cases} \quad (6)$$

2 考虑饱和影响的控制器设计

广域测量系统的发展为解决区间低频振荡提供了契机,利用广域信号对同步发电机的励磁系统进行附加阻尼控制,可以提高励磁系统对区间低频振荡的阻尼特性,同时增强互联电网的稳定性^[17-18]。

考虑到饱和环节对控制器性能造成的影响,本文首先在不考虑执行器饱和的情况下采用 H_∞ 回路成形法来设计线性控制器;再考虑执行器饱和环节,设计抗饱和补偿器以减小执行器饱和对控制器控制

性能的不良影响。图3为本文抗饱和控制框图,其中对控制器和抗饱和补偿器分别进行设计。图中, V_{ref} 为参考输入电压; V_1 为机端电压; u_g 为控制器输出信号。

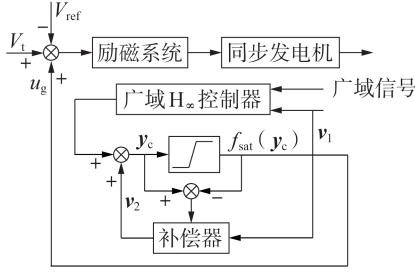


图3 基于抗饱和补偿器的广域控制器框图

Fig.3 Block diagram of wide-area controller based on anti-saturation compensator

2.1 回路成形法

为了使系统具有较强的鲁棒性和较好的稳定性,采用 H_∞ 回路成形法设计控制器,该方法主要包含以下3个步骤。

(1)回路成形。选取合适的权函数 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ 对开环电力系统 $G(s)$ 进行整形,使得系统的奇异值增益曲线为期望的理想形状。回路成形后的系统为:

$$G_p(s) = W_2(s)G(s)W_1(s) \quad (7)$$

(2)鲁棒镇定。设 $G_p(s) = M^{-1}(s)N(s)$,且满足 $N(s)N^T(s) + M(s)M^T(s) = I$,则称 $N(s)$ 和 $M(s)$ 为 $G_p(s)$ 的正规化左互质分解。计算系统最大稳定裕度 $\varepsilon_{\max}$:

$$\varepsilon_{\max} = \left(\inf_k \left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty(s) \end{bmatrix} (I + G_p(s)K_\infty(s))^{-1} M^{-1}(s) \right\|_\infty \right)^{-1} = \sqrt{1 - \|N(s)M(s)\|_H^2} < 1 \quad (8)$$

其中, $\|\cdot\|_H$ 为Hankle范数; I 为单位矩阵。一般认为,当 $\varepsilon_{\max}$ 的取值满足 $[0.2, 1]$ 时,系统满足鲁棒稳定性要求。选取系统的稳定裕度 $\varepsilon < \varepsilon_{\max}$,镇定控制器 $K_\infty(s)$ 可以通过式(9)求解出。

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty(s) \end{bmatrix} (I - G_p(s)K_\infty(s))^{-1} M^{-1}(s) \right\|_\infty \leq \varepsilon^{-1} \quad (9)$$

该控制器可以镇定被控对象的不确定扰动模型集 $G_\Delta(s) = (M(s) + \Delta_M(s))^{-1}(N(s) + \Delta_N(s))$,其中 $\Delta_M(s)$ 、 $\Delta_N(s)$ 为被控对象模型 $G_p(s)$ 的不确定性,且满足 $\|\Delta_M(s)\Delta_N(s)\|_\infty \leq \varepsilon$ 、 $[\Delta_M(s), \Delta_N(s)] \in RH_\infty$ (RH_∞ 为由在右半平面内无极点的真实有理函数矩阵全体构成的空间)。

(3)控制器的成形。由计算得到的 H_∞ 控制器 $K_\infty(s)$ 以及选取的权函数 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$,对控制器进

行回路成形,可以得到最终的输出反馈控制器 $K(s)$ 如下:

$$K(s) = W_2(s)K_\infty(s)W_1(s) \quad (10)$$

当控制器的输出在区间 $[\underline{u}_i, \bar{u}_i]$ 时,系统处于线性区,此时无需进行抗饱和补偿。当控制器的输出超过上限或下限时,为了保证控制器的性能尽可能不受饱和现象的影响,需设计相应的抗饱和补偿器。

2.2 抗饱和补偿器设计

本节采用现代抗饱和法,基于Lyapunov稳定性理论针对饱和环节设计抗饱和补偿器,使得在未出现饱和现象时,所设计的补偿器不会对系统的性能造成影响,而出现饱和现象时,补偿器发挥作用,减小饱和对控制器的影响。首先通过求解LMI分析抗饱和补偿器的可行性,基于该可行性分析的最优解,给出定理1,通过求解相应的LMI,可得到抗饱和补偿器的具体参数矩阵。

2.2.1 引理1(可行性分析)

首先分析抗饱和设计的可行性问题,以确定系统是否具有最佳 L_2 增益性能。设 γ^2 为 L_2 性能指标,对于式(2)所示线性化后的系统和式(3)所示线性控制器,假设初始条件 $x_p(0) = 0$ 、 $x_c(0) = 0$,当存在矩阵 $R = R^T = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^T & R_{22} \end{bmatrix} > 0$ 、对称矩阵 S 和 Z ,LMI最优问题如下:

$$\begin{cases} \min_{R, Z, \gamma^2} \gamma^2 \\ \text{s.t.} \quad \text{He} \begin{bmatrix} A_p R_{11} + B_p Z & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{I}{2} & 0 \\ C_p R_{11} + D_p Z & D_p & -\frac{\gamma^2 I}{2} \end{bmatrix} < 0 \\ \text{He} \begin{bmatrix} A_{cl} R & B_{cl, w} & 0 \\ 0 & -\frac{I}{2} & 0 \\ C_{cl} R & D_{cl, w} & -\frac{\gamma^2}{2} \end{bmatrix} < 0 \\ \begin{bmatrix} u_i^2/4 & Z_i \\ Z_i^T & R_{11} \end{bmatrix} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_u \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\text{He}[X] = X + X^T$; n_u 为控制器个数。若该最小化问题存在最优解 $[R, Z, \gamma^2]$,则说明系统具有最优 L_2 性能。基于该最优解,通过Lyapunov稳定性理论,推导出定理1。

2.2.2 定理1(抗饱和补偿器设计)

假设存在矩阵 $H \in \mathbf{R}^{(n_{aw} + n_u) \times (n_c + n_u + n_{aw})}$ 、 $U \in \mathbf{R}^{n_u \times n_u}$ 、 $G_U \in \mathbf{R}^{(n_{aw} + n_u) \times (n_c + n_u + n_{aw})}$ 、 $A_U \in \mathbf{R}^{(n_c + n_{aw}) \times (n_{aw} + n_u)}$ 以及 $\Psi_R \in \mathbf{R}^{(n_{aw} + n_c + n_u) \times (n_c + n_u + n_{aw})}$,满足如下LMI:

$$\Psi_R + G_U^T A_U^T H + H^T A_U G_U < 0 \quad (12)$$

$$\Psi_R = \text{He} \begin{bmatrix} A_0 Q & B_{q0} U - Y^T & B_w & Q C_{y0}^T \\ C_{y0} Q & D_{yq0} U - U & D_{yw} & U D_{yq0}^T \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} I & D_{yw}^T \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\gamma^2}{2} I \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & I_{n_{aw}} & 0 & 0 & 0 \\ B_{cl,v}^T & 0 & D_{cl,w}^T & 0 & D_{cl,v}^T \end{bmatrix}$$

$$Y = [Z \ ZR_{11}^{-1} R_{12}]$$

$$G_U = \begin{bmatrix} N^T & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_0 = \begin{bmatrix} A_{cl} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{q0} = \begin{bmatrix} B_{cl,q} \\ 0 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} B_{cl,w} \\ 0 \end{bmatrix}, C_{y0} = [C_{cl} \ 0]$$

$$D_{yq0} = D_{cl,q}, D_{yw} = D_{cl,w}, Q = R$$

其中, $I_{n_{aw}}$ 为与 A_{aw} 阶数相同的单位矩阵。

则有:

$$\begin{bmatrix} A_{aw} & B_{aw} \\ C_{aw} & D_{aw} \end{bmatrix} = A_U \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & U^{-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

综上所述,抗饱和控制器的设计流程大致如下:

(1) 建立考虑饱和影响的电力系统仿真模型,在稳定运行点处对其进行线性化得到开环线性电力系统模型,并对系统进行模型降阶;

(2) 对开环电力系统进行模态分析,采用留数矩阵法选择合适的广域控制信号,确定控制器安装地点;

(3) 通过改进粒子群优化算法选取合适维度的权函数对系统进行整形,使得整形后的系统开环增益曲线满足要求,并求取线性控制器;

(4) 通过LMI工具箱,求解满足式(11)中约束条件的最优解问题,得到最优解 $[R, Z, \gamma^2]$,并将求解得到的最优解矩阵代入LMI(式(12)),再对其进行求解,可以得到抗饱和补偿器相应的系数矩阵;

(5) 在2区4机系统模型中进行非线性仿真验证。

3 算例分析

为了验证本文设计的抗饱和和广域控制器对互联电力系统低频振荡阻尼以及执行器饱和的补偿效果,本文采用IEEE 2区4机系统为测试系统,具体参数参考文献[18]。建立测试系统的非线性模型,并在平衡点处进行线性化分析,得到系统的开环电力系统模型,通过MATLAB中的hankelmr函数对原68阶模型进行模型降阶,得到9阶电力系统模型。

图4为降阶前、后系统的开环频率响应对比曲线。由图可知,在所研究的频率范围内,系统模型降阶前、后的频率响应很接近,即降阶后的模型可以较为精确地描述原测试系统的频率响应。

求取特征根,分析系统的模态,得到系统的振荡模式如表1所示。

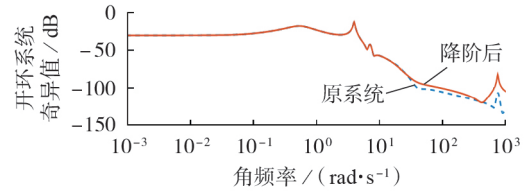


图4 降阶前、后频率响应曲线

Fig.4 Curve of frequency response before and after order reduction

表1 系统模态分析结果

模式	特征值	阻尼比	频率 / Hz
1	-0.6760+j7.0458	0.0955	1.1214
2	-0.6684+j7.2672	0.0916	1.1566
3	0.1079+j4.0265	-0.0268	0.6408

由表1可知,模式1和模式2为局部振荡模式,而模式3为区间振荡模式,因此必须加入广域阻尼控制器来抑制模式3的低频振荡才能保证系统稳定运行。通过留数矩阵法进行计算,对于模式1,1号机组为主导机组,所以1号机组安装一个PSS;对于模式2,3号机组为主导机组,所以3号机组安装一个PSS;对于模式3,以测试系统中3号机组的和2号机组的转速差作为输出信号,以2号机组励磁系统输入端作为控制器控制位置,进而构成广域控制回路。

3.1 抗饱和补偿器设计

在对测试系统进行 H_∞ 控制器设计之前,要先选取合适的加权函数对被控对象进行回路成形,针对加权函数选取困难的问题,本文采用改进粒子群优化算法对权函数参数进行优化设计,权函数取以下形式:

$$W_1(s) = c, W_2(s) = \frac{\alpha s + \eta}{\beta s^2 + \gamma' s + \zeta} \quad (14)$$

选取目标函数为:

$$f(\theta) = [f_\varepsilon, f_L, f_H] \quad (15)$$

$$\theta = [\alpha, \beta, \eta, \gamma', \zeta, c] \quad (16)$$

$$f_\varepsilon = \varepsilon_{\max}^{-1} \quad (17)$$

$$f_L = g_L - \min_{\omega < \omega_L} G_p(s) \quad (18)$$

$$f_H = \min_{\omega > \omega_H} G_p(s) - g_H \quad (19)$$

其中, $c, \alpha, \eta, \beta, \gamma', \zeta$ 均为权函数的参数; g_L 为低频段 $[0, \omega_L]$ 内可以接受的最小增益值; g_H 为高频段 $[0, \omega_H]$ 内可以接受的最大增益值。

图5为权函数参数优化过程中的目标函数最优值迭代曲线。最终可以得到权函数为:

$$W_1(s) = 1, W_2(s) = \frac{9(s + 0.05)}{s(s + 6)} \quad (20)$$

图6比较了整形后的被控对象和原始被控对象的开环增益特性。由图可知,整形后的被控对象相

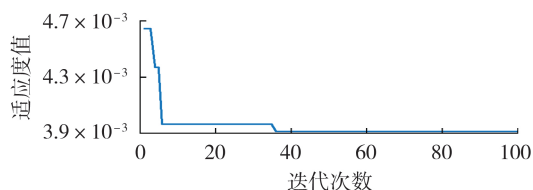


图5 适应值变化曲线

Fig.5 Fitness curve

比于原始对象,在低频段有更高的开环增益,在高频段有更低开环增益。

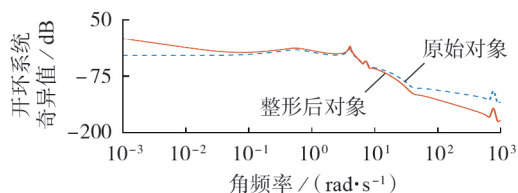


图6 开环增益曲线

Fig.6 Curve of open-loop gain

在不考虑饱和的情况下,结合 MATLAB 鲁棒控制工具箱进行 H_∞ 控制器设计,再由式(10)得到回路成形后的控制器,由于所设计的控制器阶数较高,需要先应用 Hankel 平衡截断法对得到的控制器进行降阶处理。然后得到七阶线性 H_∞ 控制器如下:

$$K_\infty(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (21)$$

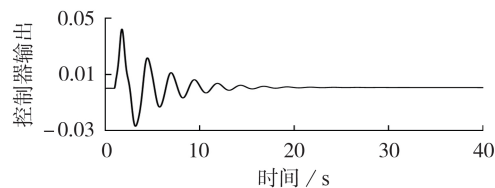
$$\begin{cases} N(s) = -9.805s^6 - 102.7s^5 - 712.6s^4 - 1961s^3 - \\ \quad 8382s^2 - 407.5s - 2.55 \times 10^{-8} \\ D(s) = s^7 + 18.52s^6 + 136.7s^5 + 678.5s^4 + 2004s^3 + \\ \quad 5429s^2 + 3.398 \times 10^{-7}s + 2.406 \times 10^{-27} \end{cases}$$

在此基础上,单独设计抗饱和和补偿器,根据第 2.2.2 节中的定理 1,采用 MATLAB 中的 LMI 工具箱对其进行求解,可以得到抗饱和和补偿器状态空间表达式中的各个参数矩阵,具体见附录。

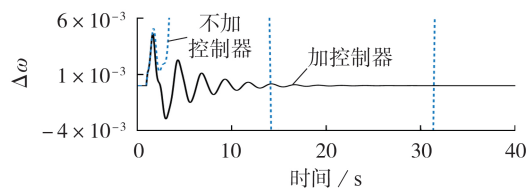
3.2 非线性仿真验证

为了验证所设计的抗饱和和补偿器对执行器饱和和环节的补偿作用,将不考虑饱和影响的线性 H_∞ 控制器与被控对象构成闭环系统。图 7 为 2 区 4 机系统在所设计的线性 H_∞ 控制器作用下,在 1 s 发生三相短路故障且持续 0.2 s 时,理想情况(即不考虑输出饱和)下控制器和系统的输出信号波形。图中, $\Delta\omega$ 为区域 1 中 2 号机组和区域 2 中 3 号机组的转速差;控制器输出和 $\Delta\omega$ 为标么值,后同。

由图 7 可知,当不考虑执行器饱和时,控制器的输出等于系统的输入,系统时域响应曲线收敛,这是由于本文设计线性控制器时,首先对系统进行了回路整形,使得被控对象的开环系统奇异值频率特性曲线得到改善。在低频段增益足够高,使被控对象具有较好的抑制干扰的能力;而在高频段增益足够低,使系统具有较好的鲁棒性能。分析此时的系统



(a) 控制器输出



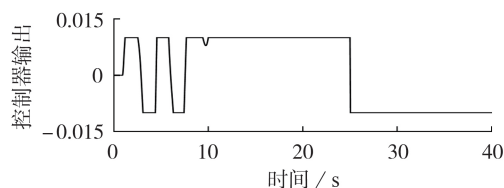
(b) 系统输出

图7 不考虑执行器饱和时的输出

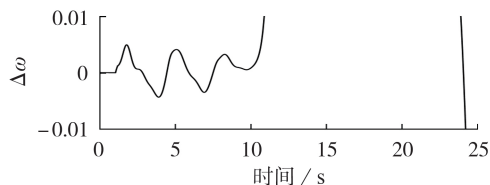
Fig.7 Output without considering actuator saturation

模态,得到区间模式为 $-0.0541 + j4.2069$,对应的区间振荡模式阻尼比为 0.0129,对比表 1 所示的分析结果可知,该控制器可以提高系统阻尼,对扰动具有一定的鲁棒性,可以维持系统稳定。

当加入控制器输出饱和环节时,图 8 为控制器和系统输出信号波形。由图 8 可知,考虑执行器饱和时,控制器的输出信号与系统的输入信号会产生较大的偏差,进而导致控制器性能下降。分析系统此时的振荡模态,系统的区间振荡模式变为 $0.1259 + j4.1305$,对应的区间阻尼比变为 -0.0305 ,结合图 8(b)可以看出,在没有对执行器饱和进行补偿的情况下,系统的阻尼比变小,时域响应曲线发散,系统失去稳定。



(a) 控制器输出



(b) 系统输出

图8 考虑执行器饱和时的输出

Fig.8 Output with considering actuator saturation

针对执行器饱和环节,基于定理 1 设计抗饱和和补偿器对执行器进行饱和补偿,图 9 为在相同故障条件下,系统不考虑控制器输出饱和的理想控制效果,以及考虑饱和但没有进行抗饱和补偿、采用本文设计的抗饱和和补偿器进行补偿、采用文献[12]中补偿器进行补偿这 4 种情况下的输出响应对比曲线。

由图 9 可以看出,饱和和补偿器对执行器饱和环

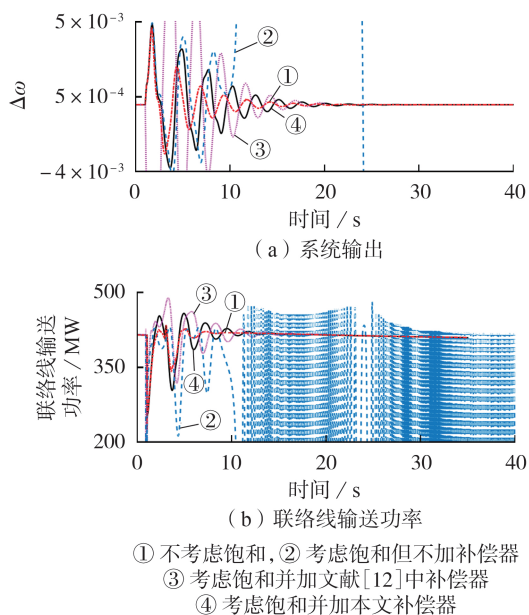


图9 输出响应对比

Fig.9 Comparison of output responses

节进行补偿之后,系统的输出和联络线输送功率都接近于理想曲线。分析系统的振荡模态,此时系统的区间振荡模式为 $-0.0439+j4.1524$,对应的区间振荡模式阻尼比为0.0106,这是因为控制器输出超过限值,使得控制器的输出和系统实际输入信号产生如图10所示的误差(标么值),可知该误差信号触发了抗饱和补偿器工作,抗饱和补偿器通过输出2个控制信号分别对控制器的状态和输出信号进行动态调整。相比文献[12]将输出信号只反馈到控制器状态方程进行调节的设计方法,本文对系统输出反馈信号和控制器输出信号同时进行调节,可以更快地使控制器退出饱和状态,有效减小了执行器饱和环节带来的不利影响,提高了系统阻尼,保证了系统的稳定性和暂态性能。

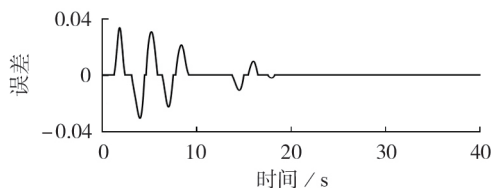


图10 误差信号

Fig.10 Error signal

经过分析比较可知,考虑执行器饱和环节设计的补偿器增强了闭环系统耐受饱和的能力。由此可见,本文所提出的考虑饱和环节影响的抗饱和控制器对因执行器饱和和对系统造成的影响具有一定的鲁棒能力。

4 结论

为了削弱系统运行点改变等不确定因素引起的

执行器饱和对控制器性能的影响,本文针对考虑执行器饱和影响的电力系统模型,提出一种广域抗饱和和补偿器设计方法。通过选取合适的加权函数矩阵对被控对象进行整形,使得系统具有期望的奇异值曲线,在不考虑饱和情况下设计 H_∞ 控制器,在此基础上,考虑执行器饱和设计饱和补偿器,通过求解相关的LMI得到抗饱和补偿器的各个参数矩阵。与传统的控制器相比,该方法设计的广域 H_∞ 控制器考虑了实际电力系统中饱和环节的影响,针对饱和环节设计抗饱和补偿器,使其在执行器发生饱和时,能够保证线性控制器的控制效果,有效提高控制器性能。基于2区4机电力系统的仿真结果表明:该抗饱和控制器在电力系统发生饱和现象时,能够有效提高电力系统的阻尼比,进而保证电力系统稳定性。在今后工作中,将进一步研究非线性电力系统的非线性控制。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 秦超,曾沉,苏寅生,等. 基于安全域的大规模风电并网系统低频振荡稳定分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):100-106.
QIN Chao,ZENG Yuan,SU Yinsheng,et al. Low frequency oscillatory stability analysis based on security region for power system with large scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(5):100-106.
- [2] 孟凡超,董晓亮,高志强,等. 一种基于 WAMS/PMU 的 PSS 在线评估方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):146-149.
MENG Fanchao,DONG Xiaoliang,GAO Zhiqiang,et al. Online PSS evaluation based on WAMS/PMU technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):146-149.
- [3] 韩润,滕予非,谢剑,等. 基于改进STD法的电力系统低频振荡辨识[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):58-63.
HAN Run,TENG Yufei,XIE Jian,et al. Power system low-frequency oscillation identification based on improved STD method[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(3):58-63.
- [4] 刘青,张立娜. 多机系统发电机时滞反馈励磁与 STATCOM 的非线性鲁棒协调控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):102-108.
LIU Qing,ZHANG Lina. Nonlinear robust coordinated control of time-delay feedback excitation and STATCOM for multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(4):102-108.
- [5] 丁贵立,林涛,陈汝斯,等. 基于参量Lyapunov理论的广域时滞阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):81-87.
DING Guili,LIN Tao,CHEN Rusi,et al. Design of wide-area time-delay damping controller based on parametric Lyapunov theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):81-87.
- [6] CRAWSHAW S,VINNICOMBE G. Anti-windup for local stability of unstable plants[C]//American Control Conference. Anchorage,AK,USA:[s.n.],2002:645-650.
- [7] 丁贵立,林涛,陈汝斯,等. 抗饱和和广域时滞阻尼控制器参量Lyapunov设计策略[J]. 电工技术学报,2019,34(20):4347-4357.
DING Guili,LIN Tao,CHEN Rusi,et al. Research on design method of anti-windup wide-area time-delay damping controller

- [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20):4347-4357.
- [8] 辛焕海,甘德强,钟德成,等. 一种饱和和电力系统稳定器控制效果的判断方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):18-23.
XIN Huanhai, GAN Deqiang, CHUNG Takshing, et al. A method for determining the effectiveness of power system stabilizer with saturation non-linearity[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10):18-23.
- [9] 查苗,何汉林. 抗饱和和研究历史与发展综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2017,9(4):423-429.
ZHA Miao, HE Hanlin. An overview of anti-windup design development[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition), 2017, 9(4):423-429.
- [10] PARK J K, CHOI C H, CHOO H. Dynamic anti-windup method for a class of time-delay control systems with input saturation[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2015, 10(6):457-488.
- [11] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:465-552.
- [12] HERRMANN G, MENON P, TURNER M, et al. Anti-windup synthesis for nonlinear dynamic inversion control schemes[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2010, 20(13):1465-1482.
- [13] 刘晨,董朝阳,王青,等. 基于扩张状态观测器的动态抗饱和和补偿器设计方法[J]. 控制与决策,2018,33(11):2087-2093.
LIU Chen, DONG Chaoyang, WANG Qing, et al. Dynamic anti-windup compensator design based on ESOs[J]. Control and Decision, 2018, 33(11):2087-2093.
- [14] 彭秀艳,贾书丽,张彪. 一类具有执行器饱和的非线性系统抗饱和和方法研究[J]. 自动化学报,2016,42(5):798-804.
PENG Xiuyan, JIA Shuli, ZHANG Biao. An anti-saturation method for a class of nonlinear systems with actuator saturation[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(5):798-804.
- [15] 王康,辛焕海,雷金勇,等. 考虑控制器饱和与扰动的电力系统稳定域估计[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):70-76.
WANG Kang, XIN Huanhai, LEI Jinyong, et al. Stability region estimation of power systems with consideration of controller saturation and disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31):70-76.
- [16] 李江,李国庆,李筱婧. 计及饱和和环节的励磁系统吸引域研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(9):111-115.
LI Jiang, LI Guoqing, LI Xiaojing. Study on region of attraction for excitation system with saturation element[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9):111-115.
- [17] 倪斌业,向往,鲁晓军,等. 基于状态反馈附加阻尼控制的柔性直流电网抑制低频振荡[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):45-50.
NI Binye, XIANG Wang, LU Xiaojun, et al. Low frequency oscillation suppression using flexible DC grid based on state feedback supplementary damping control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):45-50.
- [18] 石颀,王成山. 基于线性矩阵不等式理论的广域电力系统状态反馈控制器设计[J]. 电网技术,2008,32(6):36-41.
SHI Jie, WANG Chengshan. Design of state feedback controller for wide-area power system based on linear matrix inequalities theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(6):36-41.

作者简介:



聂永辉

聂永辉(1970—),男,吉林吉林人,教授,博士,研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail:yonghui_n@aliyun.com);

李兵兵(1992—),男,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail:Lee2464@163.com)。

(编辑 李莉)

Design of wide-area damping controller for power system considering saturation

NIE Yonghui¹, LI Bingbing², GAO Lei³, JIN Guobin², ZHANG Pengyu²

(1. Academic Administration Office, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Wide-area damping controller is an effective method to suppress low-frequency oscillation in power system, but the controllers generally saturate in actual systems. Therefore, a design method of anti-saturation compensator is proposed. Firstly, a model of power system considering actuator saturation is established by introducing saturation function. Secondly, a modern anti-saturation technique is adopted to design the anti-saturation compensator in two steps. In the first step, the robust control theory is used to design the H_∞ controller for closed-loop power system without considering the saturation link, so as to ensure the stability of the system. In the second step, the anti-saturation compensator design method based on the Lyapunov stability theory is proposed for the saturation link, and the anti-saturation compensator is designed to suppress the influence of actuator saturation on controller performance. Finally, the anti-saturation controller is applied to the model of two-area four-machine power system. The simulative results show that compared with the linear controller without considering actuator saturation, the anti-saturation compensator designed by the proposed method can effectively suppress the influence of saturation on the performance of linear controller, and can significantly improve the ability of power system to suppress saturation.

Key words: electric power systems; inter-area low-frequency oscillation; wide-area damping control; H_∞ loop shaping; anti-saturation compensator; damping

附录

$$\mathbf{A}_{\text{aw}} = \begin{bmatrix} -5.99 & -0.003 & -1.485 & -1.318 & -0.832 & 0 \\ 0 & -0.005 & -0.002 & -0.003 & -9 \times 10^{-7} & 0 \\ 0 & 0 & -0.268 & -1.151 & -0.721 & 0 \\ 0 & 0 & 0.237 & -0.268 & 0.118 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.294 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.62 \times 10^{-22} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\text{aw}} = \begin{bmatrix} -1.520 \\ 0.222 \\ -0.102 \\ -0.019 \\ -0.033 \\ 0.366 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{\text{aw}} = \begin{bmatrix} 7.776 & -0.829 & -0.108 & -0.297 & 5.868 & 7.092 \\ 8.869 & 1.342 & 9.647 & 3.061 & -1.571 & 6.917 \\ -0.476 & 4.562 & 9.486 & 8.988 & 8.189 & 2.706 \\ 8.960 & 9.490 & 3.824 & 7.506 & 9.207 & 5.865 \\ 5.588 & 9.578 & 7.603 & 9.513 & 6.144 & 0.054 \\ 1.587 & -0.223 & 0.3125 & 0.233 & 0.165 & 0.094 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{\text{aw}} = \begin{bmatrix} 2.4064 \\ -0.3862 \\ -1.6098 \\ 0.1669 \\ -0.1881 \\ 0.0946 \end{bmatrix}$$