

文章编号: 1001-0920(2012)12-1881-04

基于滑模控制的单域电力系统负荷频率控制

米 阳, 吴 晓, 楚 瀛, 李正辉

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘 要: 针对一类包含非匹配参数不确定和负荷干扰的电力系统, 提出一种负荷频率滑模控制器的设计方法. 所设计的积分型切换面有效地改善了系统到达阶段的动态性能, 提高了系统的鲁棒性; 基于趋近律方法设计了滑模控制器, 以保证系统运动轨线在有限时间内到达滑动模态; 给出了单区域电力系统仿真模型, 分别考虑了不同参数不确定条件下的仿真问题. 仿真结果表明了所设计的控制器的有效性和鲁棒性.

关键词: 负荷频率控制; 滑模控制; 趋近律

中图分类号: TP273.4

文献标志码: A

Load frequency control for one area power systems based on sliding mode control

MI Yang, WU Xiao, CHU Ying, LI Zheng-hui

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China.
Correspondent: MI Yang, E-mail: miyangmi@163.com)

Abstract: A sliding mode load frequency controller is proposed for a power system with mismatch parameter uncertainties and load disturbance. The switching surface is designed the integral function, which can improved the dynamic performance during the hitting condition and the system robust. The sliding mode controller is derived from the reaching law, which can assure that the hitting condition is satisfied. The one area power system model is proposed by simulation with uncertain parameters. The simulation results show the effectiveness and robustness of the designed controller.

Key words: load frequency control; sliding mode control; reaching law

1 引 言

负荷频率控制是电力系统设计和运行中重要的课题之一, 是最主要的系统频率控制手段. 对于电力系统而言, 负荷总是不断变化的, 而且可能会随时发生各种故障, 有必要设计一个负荷频率控制系统, 使得电力系统依赖频率对发电机的负荷进行控制; 因此, 针对具有参数不确定的电力系统, 如何将频率控制在一个可接受的范围内, 始终是一个极具挑战性的研究课题^[1-14].

在过去的几年中, 具有较好动态性能的负荷频率控制器设计问题受到了学者们的关注, 并且已经在负荷频率控制领域展开了很多相关研究^[1-5]. 文献 [6] 最早将现代控制理论应用于 LFC 问题; 在各种负荷频率控制器的设计中, 比例积分控制已被广泛地应用于调速系统的设计^[15]. 然而, 电力系统作为一种工业过程, 它包含各种由系统参数变化、负荷波动和建模误

差等引起的不确定性. 特别地, 考虑到由于阀门位置变化而引起调速器速度受限制时, 比例积分控制器不能够实现较好的控制效果^[11,16]. 为了保证供电质量, 有必要基于电力系统负荷和频率的变化设计鲁棒控制器. 文献 [4] 基于 LFC 控制策略针对系统参数的变化设计了鲁棒自适应控制器. 文献 [16-17] 证明了鲁棒性和稳定性问题在 LFC 设计中的重要性. 文献 [8,10,13,17] 分别讨论了模糊控制算法、遗传算法和优化算法在 LFC 控制中的应用.

滑模控制作为一种控制器的设计方法, 具有鲁棒性的优点, 尤其当系统状态到达滑动模态阶段时, 对参数摄动和外界干扰具有不敏感性^[18-20], 因此可以用来有效处理电力系统中负荷扰动的变化和由发电机变化率受限所产生的非线性问题^[2,9-10]. 文献 [9-10] 针对互联电力系统设计了滑模负荷频率控制器, 但并没有考虑不确定参数项的影响. 文献 [14] 提出了

收稿日期: 2011-09-14; 修回日期: 2011-12-22.

基金项目: 上海市自然科学基金项目(09ZR1413200); 上海市教委重点学科建设项目(J51303).

作者简介: 米阳(1976-), 女, 教授, 博士从事变结构控制、电力系统稳定控制等研究; 吴晓(1986-), 男, 硕士生, 从事电力系统稳定控制的研究.

基于 Ackermann 公式的分散滑模 LFC 方法, 对于一个由 N 个区域组成的互联电力系统, 考虑不确定参数的影响并将关联项作为系统的扰动, 要求集结扰动项满足匹配条件.

本文针对一类非匹配不确定单域电力系统, 设计了积分型切换面, 可以优化系统到达阶段的动态性能, 同时基于趋近律到达条件设计了相应的变结构控制器, 使系统状态在有限时间内到达切换面, 以保证系统频率趋于稳定.

2 电力系统模型

电力系统是复杂的非线性动态系统. 本文应用滑模控制方法设计新的鲁棒负荷频率控制器, 系统的线性化模型如图 1 所示.

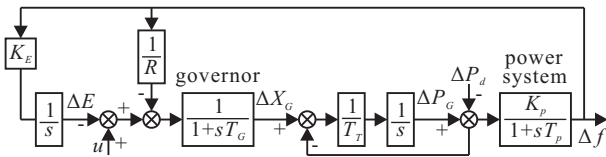


图 1 单一控制区方块图

考虑模型满足如下方程^[10-11]:

$$\Delta \dot{f} = -\frac{1}{T_p} \Delta f + \frac{K_p}{T_p} \Delta P_G - \frac{K_p}{T_p} \Delta P_d, \quad (1)$$

$$\Delta \dot{P}_G = -\frac{1}{T_T} \Delta P_G + \frac{1}{T_T} \Delta X_G, \quad (2)$$

$$\Delta \dot{X}_G = -\frac{1}{RT_G} \Delta f - \frac{1}{T_G} \Delta X_G - \frac{1}{T_G} \Delta E + \frac{1}{T_G} u, \quad (3)$$

$$\Delta \dot{E} = K_E \Delta f. \quad (4)$$

其中: $\Delta f(t)$ 是频率偏差增量 (Hz); $\Delta P_G(t)$ 是发电机输出功率的增量变化 (P.u., MW); $\Delta X_G(t)$ 是调节阀位置的增量变化 (P.u., MW); ΔE 是积分控制的变化量; $\Delta P_d(t)$ 是负荷干扰 (P.u., MW); T_G 是调速器时间常数 (s); T_T 是汽轮机时间常数 (s); T_p 是电厂模型时间常数 (s); K_p 是电厂增益; R 是由调速器动作引起的速率调节 (Hz P.u., MW-1); K_E 是积分控制增益.

方程 (1)~(4) 可表示为如下向量模型:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + H\Delta P_d. \quad (5)$$

其中

$$x(t) = [\Delta f(t) \quad \Delta P_G(t) \quad \Delta X_G(t) \quad \Delta E(t)]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_p} & \frac{K_p}{T_p} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_T} & 0 \\ -\frac{1}{RT_G} & 0 & -\frac{1}{T_G} & -\frac{1}{T_G} \\ K_E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_G} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad H = \begin{bmatrix} -\frac{K_p}{T_p} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

当电力系统工作点发生变化时, 系统的参数也随之发生变化, 从而产生系统参数不确定性. 所以系统 (5) 可以扩展为包含参数不确定和负荷干扰的电力系统模型, 即

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + (H + \Delta H)\Delta P_d. \quad (6)$$

其中: 矩阵 A, B 和 H 是常数矩阵; $\Delta A, \Delta B, \Delta H$ 是参数不确定项.

3 滑模控制器设计

为了方便滑模控制器的设计, 定义如下集结不确定项:

$$f(x, t) = \Delta Ax(t) + \Delta Bu + (H + \Delta H)\Delta P_d,$$

从而系统 (6) 可表示为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(x, t). \quad (7)$$

为了证明的需要, 首先给出如下假设.

假设 1 存在已知的正函数 $\beta(x, t)$, 使 $\|f(x, t)\| \leq \beta(x, t)$, $\|*\|$ 表示欧几里德范数.

在实际电力系统中, 负荷会在一定范围发生波动变化, 所以集结的参数不确定项是一个有界函数, 假设 1 在实际系统中是满足的.

假设 2 系统矩阵 (A, B) 是可控的.

本文针对不确定电力系统设计滑模控制器, 滑模控制器的设计原理可以参见文献 [18]. 滑模控制器的设计需要满足以下 2 个条件: 1) 切换面设计; 2) 控制律设计. 所设计的控制器应保证系统的状态轨迹可以从任意初始值到达切换面并保持在滑动模态附近.

3.1 切换面设计

在本研究中, 所设计的积分型滑模面满足如下方程^[20]:

$$s(t) = Cx(t) - \int_0^t (CA - CBL)x(\tau) d\tau. \quad (8)$$

其中: 矩阵 $C \in R^{1 \times 4}$ 和矩阵 $L \in R^{1 \times 4}$ 是常数矩阵, 矩阵 L 满足 $\lambda(A - BL) < 0$, 并选择矩阵 C 使得 CB 是非奇异矩阵.

易知, 当系统进入滑动模态时满足 $s(t) = 0$, 因此可通过使 $\dot{s}(t) = 0$ 得到等效控制 $u_{eq}(t)$.

$$\dot{s}(t) = C\dot{x}(t) - \{CA - CBL\}x(t) = 0. \quad (9)$$

选择矩阵 C 使得矩阵 CB 非奇异, 求得如下等价控制器:

$$u_{eq}(t) = -Lx(t) - (CB)^{-1}Cf(x, t). \quad (10)$$

将方程 (10) 代入 (7), 得到系统滑动模态下的等价方程

$$\dot{x}(t) = (A - BL)x(t) + \{I_n - B(CB)^{-1}C\}f(x, t). \quad (11)$$

定理 1 如果条件 $\|\tilde{F}(x, t)\| \leq \beta_1(x, t)$ 成立, 则存在 $\eta = \frac{2\beta_1(x, t)\|P\|}{\lambda_{\min}(Q)}$, 使得对于所有的 t 和 $x \in B^c(\eta)$, 不确定电力系统在滑模面 $s(t) = 0$ 上保持稳定.

证明 令

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= A - BL, \\ \tilde{F} &= \{I_n - B(CB)^{-1}C\}f(x, t), \end{aligned} \quad (12)$$

则式 (11) 可表示为

$$\dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{F}(x, t). \quad (13)$$

构造李雅普诺夫函数

$$v(t) = x^T(t)Px(t). \quad (14)$$

对 $v(t)$ 求导并将方程 (13) 代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{v}(t) &= x^T(t)[\tilde{A}^T P + P\tilde{A}]x(t) + \\ &\tilde{F}^T(x, t)Px(t) + x^T(t)P\tilde{F}(x, t) = \\ &-x^T Qx + \tilde{F}^T Px + x^T P\tilde{F}^T, \end{aligned} \quad (15)$$

其中 P 是李雅普诺夫方程 $\tilde{A}^T P + P\tilde{A} = -Q$ 的解. 对于给定的正定对称矩阵 Q , 可以证明方程 (15) 可归纳为

$$\dot{v}(t) \leq -\lambda_{\min}(Q)\|x(t)\|^2 + 2\beta_1(x, t)\|P\|\|x(t)\|. \quad (16)$$

因为 $\lambda_{\min}(Q) > 0$, 所以对于所有 t , 当 $x \in B^c(\eta)$ 时, 系统是稳定的. 其中 $B^c(\eta)$ 是以 $x=0$ 为球心, η 为半径的封闭球面 $B(\eta)$ 的补.

3.2 控制器设计

方程 (7) 中的不确定系统满足假设, 利用如下趋近律^[18]设计变结构控制器:

$$\dot{s}(t) = -ns(t) - m \operatorname{sgn} s(t). \quad (17)$$

其中: n 和 m 是正常数, $\operatorname{sgn} *$ 表示符号函数.

定理 2 设计滑模控制器满足如下方程:

$$u = -Lx - (CB)^{-1}C\beta - ns - m \operatorname{sgn} s,$$

则系统满足到达条件.

证明 由式 (8) 和 (17) 可得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= C\dot{x}(t) - \{CA - CBL\}x(t) = \\ &CAx(t) + CBu + Cf - CAx - CBLx = \\ &-ns - m \operatorname{sgn} s, \end{aligned}$$

则 $s\dot{s} < 0$, 系统满足到达条件. \square

综上, 控制器能够使系统的运动轨迹保持在滑动模态附近.

4 仿真算例

为了阐述本文提出的控制器的性能, 考虑如下单域系统仿真模型^[11]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + \Delta A(t))x(t) + (B + \Delta B)u(t) + \\ &(H + \Delta H)\Delta P_d. \end{aligned}$$

其中参数值变化范围和标称参数满足如下定义:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_p} &\in [0.033 \ 0.1], \quad \frac{K_p}{T_p} \in [4 \ 12], \\ \frac{1}{T_T} &\in [2.564 \ 4.762], \quad \frac{1}{T_G} \in [9.615 \ 17.857], \\ \frac{1}{RT_G} &\in [3.081 \ 10.639], \quad \Delta P_d = 0.01, \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.0665 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & -3.663 & 3.663 & 0 \\ -6.86 & 0 & -13.736 & -13.736 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 13.736 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} -8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

为了证明所提出的控制器在非匹配不确定条件下具有鲁棒性, 下面针对两种不同情况进行仿真研究.

1) 如果系统矩阵仅包含标称参数, 不确定项 $f(x, t) = 0$, 则设计控制器参数满足如下条件:

$$n = 10, \quad m = 0.6, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{13.736} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\lambda(A - BL) = \operatorname{diag}\{-4 \ -6 \ -8 \ -10\},$$

$$L = [2.5147 \ 3.8406 \ 0.7669 \ 6.9499].$$

系统的频率偏差 $\Delta f(t)$ 和切换函数 $s(t)$ 的仿真结果如图 2 和图 3 所示.

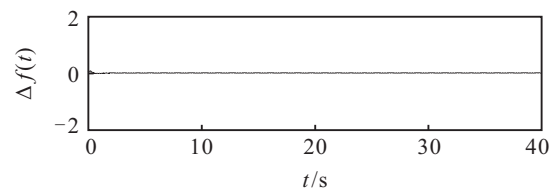


图 2 标称系统中 $\Delta f(t)$ 的响应

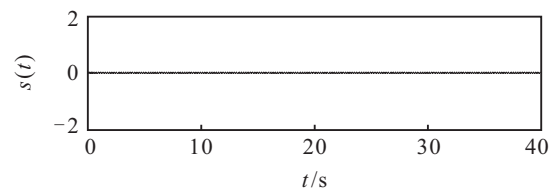


图 3 标称系统中 $s(t)$ 的响应

2) 考虑 $f(x, t) \neq 0$, 其中 ΔA 是非匹配参数不确定项, $\Delta B = \beta(t)B$ 满足匹配条件, 通过极点配置选择矩阵

$$L = [12.0783 \ 8.8405 \ 1.6420 \ 31.4506],$$

系统的频率偏差 $\Delta f(t)$ 和切换函数 $s(t)$ 的仿真结果如图 4~图 7 所示.

由图 2~图 7 的仿真结果可以看出, 在本文设计的变结构控制器作用下, 系统频率偏差趋于稳定. 由图 6 和图 7 的仿真结果也可以看出, 应用变结构控制

时,对系统存在一定的抖振影响,但所设计的控制律是基于等式趋近律到达条件得到的,所以通过对参数 m 和 n 的综合选取,最终能够保证系统频率偏差趋于零.今后的研究工作还可以通过优化变结构控制器来减弱抖振的影响,保证电力系统更加平稳地运行.

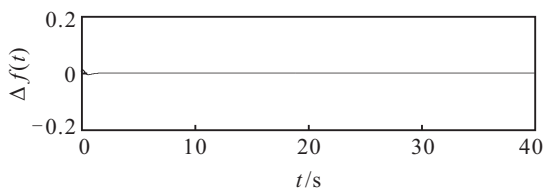


图 4 系统中存在 ΔA_1 不确定项时 $\Delta f(t)$ 的响应曲线

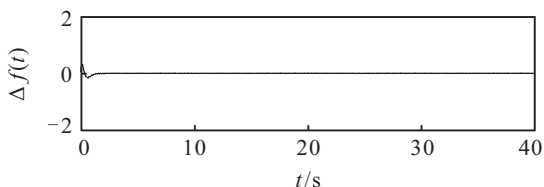


图 5 系统中存在 ΔA_2 不确定项时 $\Delta f(t)$ 的响应曲线

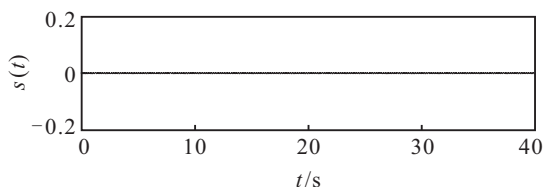


图 6 系统中存在 ΔA_1 不确定项时 $s(t)$ 的响应曲线

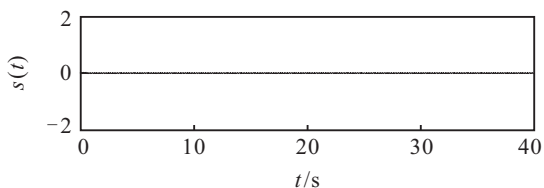


图 7 系统中存在 ΔA_2 不确定项时 $s(t)$ 的响应曲线

5 结 论

本文针对一类包含非匹配不确定的单域电力系统,考虑了负荷频率控制问题,基于极点配置设计了积分型滑模面,改善了系统到达阶段的动态性能.利用趋近律设计的滑模控制器,不仅能够保证系统在有限时间内到达滑模面,而且控制器的设计方式有效简单,便于工程实现.本文的设计方法可以推广应用于多域互联复杂电力系统和离散不确定电力系统的频率控制问题的研究.

参考文献(References)

[1] Fuller J F, Fuchs E F, Roesler K J. Influence of harmonics on power distribution system protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(2): 549-557.
 [2] Sivaramakrishnan A Y, Hariharan M V, Srisailam M C. Design of variable structure load-frequency controller using pole assignment technique[J]. Int J Control, 1984, 40(3): 487-498.

[3] Davison E J, Tripathi N K. The optimal decentralized control of a large power system: Load and frequency control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1978, 23(2): 312-325.
 [4] Pan C T, Liaw C M. An adaptive controller for power system load frequency control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1): 122-128.
 [5] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
 [6] Elgerd O I, Fosha C E. Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89(4): 556-563.
 [7] Vrdoljak K, Peric N, Petrovic I. Sliding mode based load-frequency control in power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(5): 514-527.
 [8] Kocaarslan. Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control[J]. Int J of Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(8): 542-549.
 [9] Al-hamouz Z M, Abdel Magid Y L. Variable structure load frequency controller for multiarea interconnected power systems[J]. Int J Electric Power Energy System, 1993, 15(4): 293-300.
 [10] Al-Hamouz Z M, Al-Duwaish H N. A new load frequency variable structure controller using genetic algorithms[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 55(1): 1-6.
 [11] Wang Y, Zhou Z, Wen C. Robust load-frequency controller design for power systems[J]. IEE Proc Part C, 1993, 14(1): 11-16.
 [12] Moon Y-H, Ryu H-S, Lee J-G, et al. Extended integral control for load frequency control with the consideration of generation-rate constraints[J]. Electr Power Energy System, 2002, 24(4): 263-269.
 [13] Jawd Talaq, Fadel Al-Basri. Adaptive fuzzy gain scheduling for load frequency control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 145-150.
 [14] 孟祥萍, 薛昌飞, 张化光. 多区域互联电力系统的PI滑模负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 6-11.
 (Meng X P, Xue C F, Zhang H G. PI sliding mode load frequency control of multi-area power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 6-11.)
 [15] Nishikawa Y N, Sannomiya N, Ohta T, et al. A method for auto-tuning of PID control parameters[J]. Automatica, 1984, 20(1): 321-332.
 [16] Pintelon R, Schoukens J. Parametric identification of transfer functions in the frequency domain — A survey[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(11): 2245-2259.