

光纤电流互感器系统的鲁棒控制器设计

李 慧, 张春熹, 李立京, 许文渊

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了减少系统增益的不确定性对系统动态性能的影响, 笔者根据系统性能指标的要求, 利用鲁棒控制理论设计控制器, 改善了光纤电流互感器系统的动态性能, 提高了系统的鲁棒性。同时分析了光纤电流互感器的闭环检测原理, 建立了系统的数学模型。最后, 通过计算机仿真对鲁棒控制器进行了仿真验证。仿真结果表明, 改进的控制器设计提高了光纤电流互感器的鲁棒性, 可使系统在较大范围参数变化时仍具有良好的频率特性和阶跃响应速度。

关键词: 光纤电流互感器; 不确定性; 控制器; 鲁棒控制

中图分类号: TM452.94

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0028-03

Design of a Robust Controller for Fiber Optic Current Transformer System

LI Hui, ZHANG Chun-xi, LI Li-jing, XU Wen-yuan

(School of Instrument and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: For improving fiber optic current transformer system's dynamic response, the closed-loop detection principle of the fiber optic current transformer was analyzed, a system model was established, and its parameter uncertainty was considered. Therefore, a robust controller was designed with robust control theory according to the suitable performance index for the system. The simulation results indicate that the robust controller achieves high dynamic and robust performances when the parameters of the fiber optic current transformer system vary in a wide range.

Key words: fiber optic current transformer; uncertainty; controller; robust control

0 引言

随着电力系统的容量越来越大, 电压等级越来越高, 传统的电磁式电流互感器呈现出不可克服的问题: 绝缘困难、制造成本高、体积大、质量大, 以及由于其固有的磁饱和、铁磁谐振、动态范围小、频带窄和有油易燃易爆等缺点, 不能满足新一代电力系统的要求^[1]。与此同时, 光纤电流互感器因为采用光纤作为信号感应和传输的媒介, 不仅有绝缘性能好、受电磁干扰影响小的优势, 而且还有结构简单、体积小、质量轻、成本低等独特优势, 近十几年来受到国内外研究人员的重视。

随着电力系统的发展, 对电流互感器的动态范围和频率响应范围等动态性能的要求也是越来越高, 并且待测量的线路上电流存在高次谐波, 因此, 提高光纤电流互感器的动态特性成为迫切需要解决的关键技术。然而由于光纤电流互感器系统中光功

率、探测器增益和前放电路增益随温度的变化而引起系统前向通道增益的变化, 影响系统的频率特性, 降低了系统测量的准确度。因此, 为满足实际应用, 分析闭环光纤电流互感器系统的数学模型, 并根据鲁棒控制理论设计控制器, 提高系统的鲁棒性, 改善系统的动态性能。

1 闭环光纤电流互感器系统原理分析

1.1 工作原理分析

光源发出的光经过单模耦合器后由起偏器起偏成为线偏光, 线偏光以 45° 注入保偏光纤后成模式正交的两束, 分别沿 X 轴和 Y 轴向前传播。当这两束正交模式的光经过 $\lambda/4$ 波片后, 分别变为左旋和右旋的圆偏振光, 进入传感光纤。由于 Faraday 磁光效应的作用, 两束圆偏光的传输速度不同, 从而引起光波相位变化。光在由传感光纤端面的镜面反射后, 这两束圆偏振光的偏振模式互换, 再次通过传感光纤而再次受到磁场作用, 使受到的作用效果加倍。这两束返回的光再次通过 $\lambda/4$ 波片后, 恢复为线偏振

收稿日期: 2009-06-10

基金项目: 航空科学基金项目支持(2008ZC51030)。

作者简介: 李 慧(1981), 女, 山东人, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术及其信号检测。

光,并在起偏器处发生干涉。最后,携带相位信息的光由耦合器耦合进探测器,因此到达探测器的光携带了由于 Faraday 效应产生的非互易相位差 $\Delta\varphi_s$ ^[2]。光纤电流互感器工作原理图见图 1。

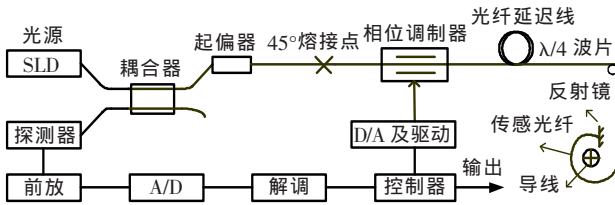


图 1 光纤电流互感器工作原理图

借鉴 In-line Sagnac 型光纤电流互感器的闭环检测方案^[3],其检测原理见图 2,携带了由于 Faraday 效应产生的非互易相位差 $\Delta\varphi_s$ 的光依次通过探测器、前放电路、A/D 转换器、数据解调环节、控制器得到输出信号;控制器同时将输出信号作为反馈信号依次通过 D/A 转换器及 D/A 驱动器和相位调制器,抵消光纤电流互感器系统的输入信号由 Faraday 效应产生的非互易相位差 $\Delta\varphi_s$,形成闭环控制。

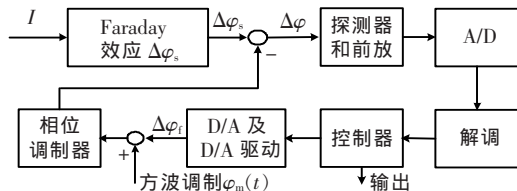


图 2 闭环检测原理图

1.2 系统数学模型

1.2.1 光路模型

由 Faraday 效应知, $\Delta\varphi_s=4NVI$, N 是传感光纤的匝数, V 是传感光纤的 Verdet 常数, I 是导线中传输的电流值。相位差 $\Delta\varphi_s$ 和电流值成正比,检测相位的大小就能检测电流的大小,因此闭环光纤电流互感器系统的输入信号可等效为相位信息。

1.2.2 探测器、前放电路和 A/D 的模型

然而光纤电流互感器系统并不是理想的线性定常系统,这就不可避免地导致在能够获得的系统模型和实际对象之间存在误差,在系统控制理论中,这种误差称为模型的不确定性。产生光纤电流互感器系统模型的不确定因素主要为:光源光功率、探测器和前放增益随温度的变化,导致了系统前向通道增益的变化。设到达探测器的光功率、探测器的光电转换与前放电路增益的乘积为比例环节 $K_1+\Delta K_1$, ΔK_1 为增益随温度变化的模型,不考虑 A/D 量化误差,设其模型为 K_2 。

1.2.3 调制与解调环节

因为携带由 Faraday 效应产生 $\Delta\varphi_s$ 的非互易相位差的光强是相位的余弦函数,并且当采用闭环方案阶梯波反馈时,系统输入的相位信息 $\Delta\varphi_s$ 和反馈

相位 $\Delta\varphi_r$ 抵消,相位差 $\Delta\varphi=\Delta\varphi_s-\Delta\varphi_r$ 近似为 0。此时系统灵敏度很低,为了提高系统的灵敏度加入方波调制 $\varphi_m(\pm\frac{\pi}{2}$ 的相位),余弦函数变为正弦函数,系统处于灵敏度最大的工作点。进入控制器之前的信号为通过解调环节得到的相位差 $\Delta\varphi$ 。

解调环节

$$K_2 \times (K_1 + \Delta K_1) \times [1 + \sin(\Delta\varphi)] - K_2 \times (K_1 + \Delta K_1) \times [1 - \sin(\Delta\varphi)] = 2K_2 \times (K_1 + \Delta K_1) \times \sin(\Delta\varphi) \quad (1)$$

当 $\Delta\varphi \approx 0$ 时, $\sin\Delta\varphi \approx \Delta\varphi$,解调环节为比例环节。设 $k_1=2K_1 \times K_2$, $\Delta k_1=2\Delta K_1 \times K_2$,则 $k_1+\Delta k_1$ 即为前向通道增益。

1.2.4 D/A 和 D/A 放大驱动电路

以 D/A 的台阶高度作为系统的输出和反馈,从模型分析 D/A 为零阶保持器,零阶保持器的时域表示为 $g_h(t)=1(t)-1(t-T)$,频域表示为 $\frac{1-e^{-sT}}{s}$ 。D/A 模拟驱动电路环节模型为 K_3 ,求 Z 变换为

$$Z(1-e^{-sT}) \times Z(\frac{K_3}{s}) = (1-Z^{-1}) \times (K_3 \frac{Z}{Z-1}) = K_3 \quad (2)$$

相位调制器为比例环节设为 K_4 ,设 $k_2=K_3 \times K_4$, k_2 即为反馈系数。

由于光纤电流互感器系统中前向通道增益的变化,增加了系统的不稳定性,同时也增加了控制器设计的难度。从实际应用的角度,保证系统具备适当的鲁棒性,并满足系统动态性能指标要求,笔者利用鲁棒控制理论设计了闭环控制算法。

2 基于 LMI 的鲁棒控制器设计方法

电流互感器系统的状态方程如下

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= x_2(k) \\ x_2(k+1) &= -10(k_1+\Delta k)k_2x_1(k) - \\ &\quad 4(k_1+\Delta k)k_2x_2(k) + 10(k_1+\Delta k)u(k) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, $x(k) \in R^n$ 是系统的状态变量, $u(k)$ 为控制向量,因为光纤电流互感器系统为单输入单输出系统,所以 $u(k)$ 为一维。

由于 Δk 的存在,引入了系统参数的不确定性。考虑由以下状态方程描述光纤电流互感器系统

$$x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) \quad (4)$$

式(4)中, A 和 B 是已知实常数矩阵, ΔA 和 ΔB 是反映系统模型中参数 Δk 不确定性的未知实矩阵,因为在实际系统中 Δk 的变化是有界的,所以 ΔA 和 ΔB 是范数并有界,且具有以下形式

$$[\Delta A \ \Delta B] = DF[E_1 \ E_2] \quad (5)$$

式(5)中, F 满足 $F^T F \leq I$ 的不确定矩阵, D , E_1 和 E_2 是已知的常数矩阵,反映了不确定参数的结构信息。

针对式(4)系统的数学模型和系统参数的不确定性,定义闭环系统的一个性能指标

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)] \quad (6)$$

式(6)中, Q 和 R 是给定的对称正定加权矩阵, 式(6)不仅保证了闭环不确定系统是二次稳定的, 而且还保证了闭环的二次性能指标不超过某个确定的上界。设计一个状态反馈控制律 $u(k)=Kx(k)$, 使得如式(5)所示的所有参数不确定性, 闭环系统都能满足以上设计指标, $u(k)$ 称为不确定系统的二次保性能控制律。

定理 1^[4] 式(4)系统存在二次保性能控制律, 当且仅当存在常数 $\varepsilon > 0$ 、矩阵 W 和对称正定矩阵 X 使得

$$\begin{bmatrix} \varepsilon DD^T - X & AX + BW & 0 & 0 & 0 \\ (AX + BW)^T & -X & (E_1 X + E_2 W)^T & X & W^T \\ 0 & E_1 X + E_2 W & -\varepsilon I & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & -Q^{-1} & 0 \\ 0 & W & 0 & 0 & -R^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

当矩阵不等式(7)有解 W 和 $X > 0$ 时, $u(k) = WX^{-1}x(k)$ 是式(4)系统的一个二次保性能控制律, 相应的系统性能指标上界是 $\bar{J} \leq \text{Trace}(X^{-1})$ 。

考虑电流互感器系统中参数的取值: $k_1=0.1, k_2=1$ 以及式(3)、(4)可知

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -0.4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -10\Delta k k_2 & -4\Delta k k_2 \end{bmatrix}, \Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ 10\Delta k \end{bmatrix}$$

经实验测试结果知, 系统前向通道增益随温度变化不超过 20%。又因为 $k_1=0.1$, 所以, $|\Delta k| \leq 0.02$ 。得到 $D=[0 \ 1]^T, E_1=[-0.2 \ -0.08], E_2=0.2$ 。矩阵不等式(7)是一个线性矩阵不等式, 因此, 可应用 LMI 工具箱中的求解器 Feasp 来求解该线性矩阵不等式。解得保性能控制律 $u(k)=[0.839 \ 6 \ 0.310 \ 3]x(k)$, 则 $K=[0.839 \ 6 \ 0.310 \ 3]$ 对所有允许的参数不确定性, 光纤电流互感器系统性能指标满足 $\bar{J} \leq 6.7307$ 。

3 系统仿真分析

光纤电流互感器加入控制律 $u(k)$ 后, 得到系统的输出方程和传递函数

$$x(k+1) = [A + BK + DF(E_1 + E_2K)]x(k) + Bv(k) \quad (8)$$

已知系统的输出方程 $y(k)=x_1(k)$ 。式(8)中, $v(k)$ 为系统的输入, $y(k)$ 为系统的输出。

为了更为真实地反映鲁棒控制器的控制效果, 把鲁棒控制算法加入到光纤电流互感器仿真系统中, 使系统前向通道增益变化 20%, 分析了系统频率特性曲线, 并对阶跃输入信号仿真分析。系统频率特性曲线见图 3, 图 3 中 $L(w)$ 为幅频特性, $\varphi(w)$ 为相频特性。系统的 -3 dB 带宽为 8 kHz, 并且 8 kHz 时的相频滞后为 54°; 与文 [5] 所述的频带宽度相

比, 提高了 2 kHz; 提高了线路上高次谐波测量的准确度。为了进一步检验系统的动态特性, 对阶跃输入信号进行的仿真, 结果见图 4。系统具有较好的动态响应速度, 并且从图 4 中可看到, 当系统前向通道增益变化 $\pm 20\%$ 时, 鲁棒控制器仍具有很好的控制效果。

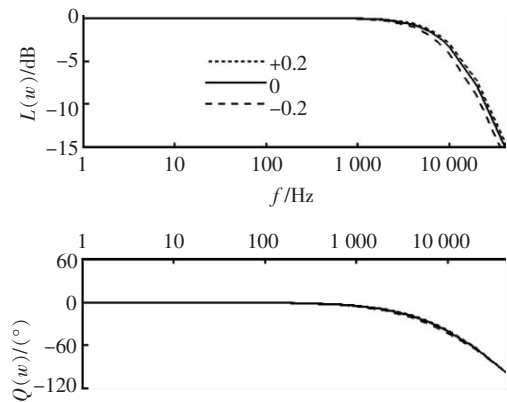


图 3 频率特性曲线

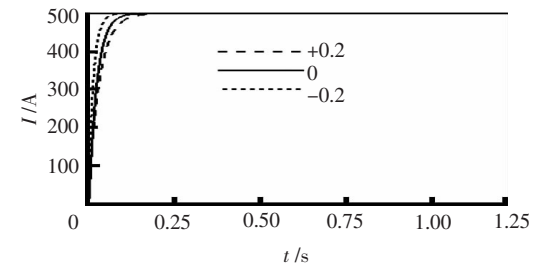


图 4 阶跃特性曲线

4 结语

分析了闭环光纤电流互感器的工作原理以及数学模型传递函数, 并且为了解决系统前向通道增益的变化对系统动态特性的影响, 利用鲁棒控制理论, 根据系统的性能指标要求设计控制器, 提高了系统的鲁棒性。最后从频率特性分析当系统前向通道增益变化 $\pm 20\%$ 时, 鲁棒控制器仍具有很好的控制效果, 并且仿真证明了阶跃信号输入时, 设计的控制器有较好的响应速度, 对前向通道增益的变化具有鲁棒性。

参考文献:

- [1] 邱志刚, 张庆凌, 贾春荣, 等. 电子式电流互感器传感头的相位差研究[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 346-347.
- [2] BLAKE J, TANTASWADI P, CARVALHO R T. In-line Sagnac Interferometer Current Sensor[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.
- [3] 王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 77-79.
- [4] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 反射式光纤电流传感器频率特性的计算和测试[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 88-91.