

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200835

基于有理函数逼近的光耦合隔离放大器宽频域建模方法

左航¹, 李小鹏², 徐方维¹, 舒勤¹, 邱进³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
3. 中国电力科学研究院武汉分院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 目前光耦合隔离放大器频率特性的获取方法多是基于额定参数推算, 但经过长时间运行后, 内部元件参数因老化发生改变, 隔离放大器内部元件不再以额定参数工作, 导致基于额定参数得到的频率特性不再准确。针对这一问题, 提出一种光耦合隔离放大器宽频域建模方法。在不依赖其元件参数的情况下, 通过测量不同频率下隔离放大器传递函数值, 基于有理函数逼近拟合原理构造误差函数, 采用粒子群优化算法对该误差函数进行迭代求取最优解及拟合传递函数表达式。在不同噪声水平下对算法的准确性进行研究, 基于仿真与实测数据验证了所提方法在宽频域下具有较高的准确性和良好的抗噪能力。

关键词: 有理函数逼近; 光电耦合隔离放大器; 直流电压互感器; 粒子群算法; 宽频频率特性

Wide frequency domain modeling method of an OCIA based on rational function approximation

ZUO Hang¹, LI Xiaopeng², XU Fangwei¹, SHU Qin¹, QIU Jin³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 3. Wuhan Branch, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Many existing methods of obtaining Optically Coupled Isolation Amplifier (OCIA) frequency characteristics are based on the estimation of rated parameters. The internal component parameters change after a long period of operation, and the internal components of the transformer no longer work with the rated parameters. As a result, the frequency characteristics obtained based on the rated parameters are no longer accurate. To solve this problem, this paper proposes a new OCIA wide frequency domain modeling method without relying on OCIA parameters. The OCIA transfer function values at different frequencies are obtained by measurement, and the error function is constructed based on the rational approximation fitting principle. Then the particle swarm optimization algorithm is used to optimize the error function, and obtain the expression of the fitting transfer function. The accuracy of the algorithm is studied in different frequency sampling ranges and noise levels. Simulation and measured data verify that the proposed method has high accuracy and good anti-noise ability in the wide frequency domain.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5200-201926078A).

Key words: rational function approximation; optically coupled isolation amplifier (OCIA); DC voltage transformer (DCVT); particle swarm optimization (PSO); wide-band frequency characteristics

0 引言

直流电压互感器作为测量特高压输电系统电压的重要设备, 为特高压直流输电系统的控制和实时保护提供了准确可靠的电压测量信息。在直流电压

互感器设计中, 为避免将高电压引入二次侧以及信号和电源因共地而引起测量误差, 需将一次电压传感器和二次电子电路进行隔离^[1-3]。目前常用的隔离放大器按耦合方式可以分为变压器耦合、电容耦合和光电耦合三种^[4-5]。变压器耦合具有动态范围宽、长期稳定性好等优点, 但体积较大、不能直接传输直流信号、频带范围有限限制了它的应用场景; 电容耦合具有使用方便、性能稳定、体积小等优点,

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5200-201926078A)

但电路内部结构复杂,放大器的带宽难以提高且成本较高;光电耦合与变压器、电容耦合相比具有体积小、价格便宜、隔离电路简单、信号单向传输、磁场抗干扰能力强等优点^[6]。最大的缺点是线性度和温度稳定性不好,现在多是利用反馈控制电路来改善这些方面问题^[7-9]。

目前对于光耦合隔离放大器频率特性研究相对滞后,且主要集中在隔离放大器等值电路仿真建模及理论分析,未有文献对光耦合隔离放大器频率特性的建模做出研究。文献[10]提出了分析隔离放大器频率特性的方法,揭示了其振荡的原因,为设计隔离放大器提供了指导;文献[11-12]讨论了光电耦合隔离放大器的频率特性与组成放大器的元器件参数以及外接元件参数的关系;文献[13-15]设计了适用于 J-TEXT 装置的光耦合隔离放大电路,仿真并结合理论分析了 I-V 转换电路补偿电容对电路频率特性的影响。隔离放大器因其截断频率难以获取,导致二次分压系统的传递函数难以确定,只能根据厂家给定额定参数确定。在长时间运行后中,光耦合隔离放大器因元器件老化,其传递函数会发生改变,基于额定参数推算得到的传递函数与实际的传递函数会产生较大的误差^[16]。

针对运行中的光耦合隔离放大器在长时间工作后参数变化、性能下降,宽频频率特性改变的问题,本文在不依赖额定参数的情况下提出一种新的隔离放大器宽频域建模方法。通过将隔离放大器等效为一个二端口系统,再通过在隔离放大器的一次侧输入不同频率的电压信号,进而测量二次侧同频电压,从而实现隔离放大器的传递函数值采样;同时构造拟合传递函数,利用有理函数逼近原理构造拟合传递函数与测量值的误差函数,通过粒子群优化算法求取该误差函数最小值来确定拟合传递函数的系数,将所求系数代入拟合传递函数,便可准确得到隔离放大器的传递函数。同时,在采样数据中加入噪声以评估所提方法的抗噪能力,基于实测数据和仿真验证了本文方法在宽频域下具有较高的准确性与良好的抗噪能力。

1 光耦合隔离放大器简介

1.1 HCNR201 光耦简介

HCNR201 是 AGILENT 公司生产的一种高精度线性光耦元件,其结构如图 1 所示,它由一个发光二极管 LED 和两个光电二极管 PD1、PD2 构成。当 LED 中有电流流过时,LED 发出的光耦合到 PD1 和 PD2,PD1 和 PD2 产生与光强成正比的输出电流,其中 PD2 用于产生输出电流,PD1 用于伺服回授机

制上,对 LED 上的导通电流予以补偿,改善输入和输出的线性和温度特性。定义电流传输比 $K_1 = i_{PD1} / i_{LED}$ 、 $K_2 = i_{PD2} / i_{LED}$,两个光电二极管严格匹配,有 $K_1 = K_2 = 0.4816\%$ 。

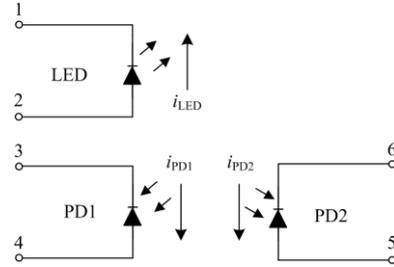


图 1 HCNR201 等效电路图

Fig. 1 HCNR201 equivalent circuit diagram

1.2 光耦合隔离放大器

光耦合隔离放大器由运算放大器和光耦元件构成,其电路结构如图 2 所示。

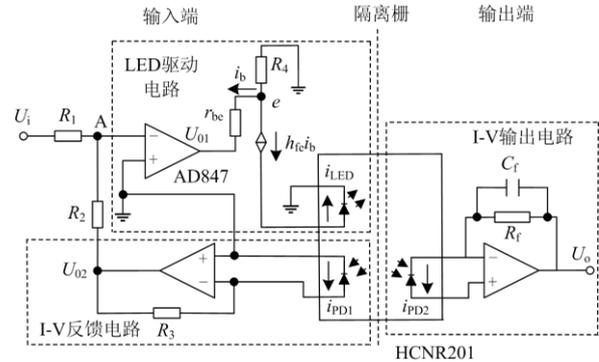


图 2 光耦合隔离放大器电路图

Fig. 2 Circuit diagram of OCIA

图中,隔离栅将整体电路划分为输入端和输出端。输入端将 PD1 检测 LED 的发光通量产生的光电流作为反馈信号,经 I-V 反馈电路回流输入端以消除 LED 的非线性和漂移特性。输出端则是一个典型的光电检测电路,通过反馈电阻 R_f 和反馈电容 C_f 将光电流 i_{PD2} 经 I-V 转换电路转换为输出电压,反馈电容 C_f 的主要作用是通过补偿相位来消除振荡。

运放 AD847 是单极点运算放大器,其开环响应可表示为

$$A_{ol} = \frac{\omega_c}{s} \quad (1)$$

式中, ω_c 为运放 AD847 的单位增益交叉频率, ω_c 的数值为 3.14×10^8 。在节点 A 处,可以得到

$$\frac{U_i - U_A}{R_1} + \frac{U_{02} - U_A}{R_2} = 0 \quad (2)$$

在 LED 驱动电路中, 由于 i_b 的数值很小, 所以 U_{01} 约等于 U_e , 通过 U_{01} 可以得到

$$A_{ol} \times U_A = -U_{01} = -U_e = i_{LED} \times R_4 \quad (3)$$

在 I-V 反馈电路中, 光电电流 i_{PD1} 通过电阻 R_3 输出电压 U_{02} , 考虑开环响应可以得到

$$U_{02} = -i_{PD1} \times \frac{R_3}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \quad (4)$$

在 I-V 输出电路中, 同理可以得到 U_{02} 和 i_{PD2} 的关系为

$$U_o = i_{PD2} \times \frac{R_f}{\frac{R_f C_f}{\omega_c} s^2 + (R_f C_f + \frac{1}{\omega_c})s + 1} \quad (5)$$

根据式(1)~式(5), 可以得到图 3 的输入电压到输出电压的传递函数模型。

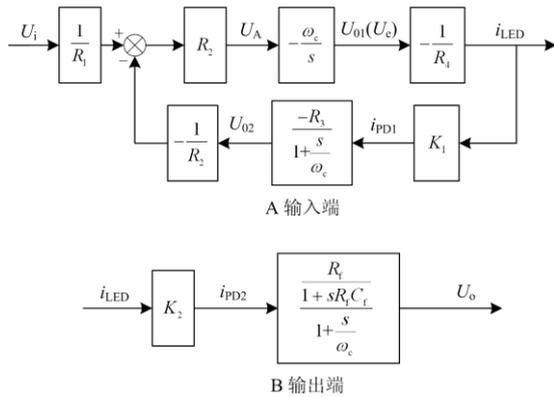


图 3 光耦合隔离放大器传递函数框图

Fig. 3 Block diagram of transfer function of optically coupled isolated amplifier

光耦合隔离放大器典型参数如表 1 所示。

表 1 光耦合隔离放大器元件参数

Table 1 Element parameters of OCIA

参数	数值	参数	数值
$R_1/k\Omega$	51	R_4/Ω	220
$R_2/k\Omega$	20	$R_f/k\Omega$	510
$R_3/k\Omega$	200	C_f/Pf	510

基于定量分析法的原理, 分别研究各个元件参数变化对隔离放大器频率特性的影响。在每次仿真情况下改变其中一个参数, 其余参数值固定不变。各个元件参数的变化对光耦合隔离放大器频率特性影响情况如图 4 所示。

由图 4 可看出, 在电阻的改变会影响光耦合隔离放大器频率特性幅值大小, 反馈电容的变化会改变光耦合隔离放大器的截止频率。

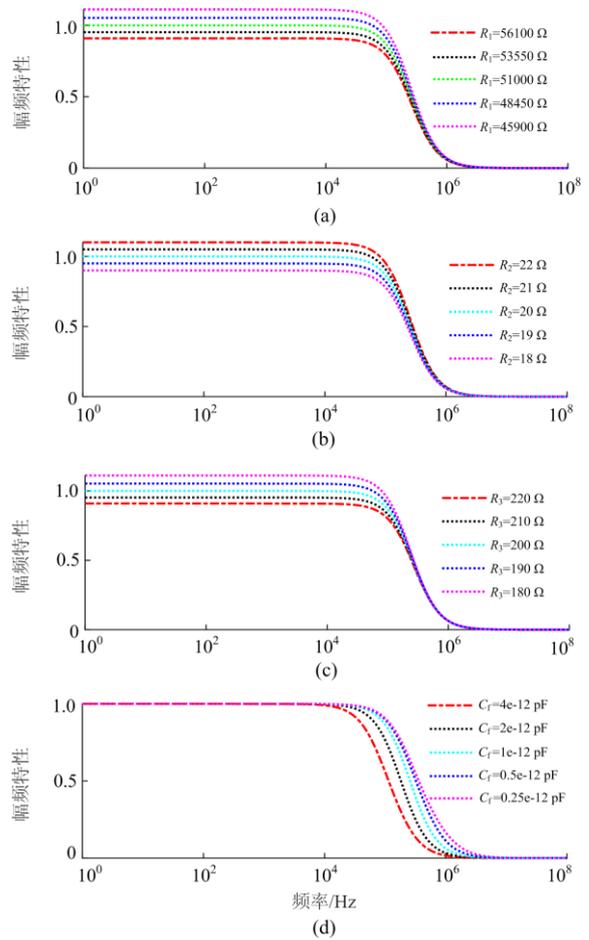


图 4 各元件参数变化对光耦合隔离放大器频率特性影响

Fig. 4 Influence of parameter variation of each component on OCIA frequency characteristics

2 算法理论

2.1 基于有理函数逼近原理构建误差函数模型

将隔离放大器考虑为一个二端口系统, 在输入端施加不同频率的电压信号, 在隔离放大器输出端测量同频电压信号, 求输入端电压值和输出端电压值之比, 获得该频率点的传递函数值, 实现传递函数数值采样。

$$\hat{H}(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{b_0 + b_1 j\omega + b_2 j^2 \omega^2 + b_3 j^3 \omega^3 + \dots + b_p j^p \omega^p}{a_0 + a_1 j\omega + a_2 j^2 \omega^2 + a_3 j^3 \omega^3 + \dots + a_q j^q \omega^q} \quad (6)$$

式中: $b_i (i=0,1,2,3,\dots,p)$ 为 $j^i \omega^i (i=0,1,2,3,\dots,p)$ 对应的系数; $a_i (i=0,1,2,3,\dots,q)$ 为 $j^i \omega^i (i=0,1,2,3,\dots,q)$ 对应的系数; 若已知光耦合隔离放大器的等效电路结构, 则 p 和 q 的值便能够确定。在未知放

大器的等效电路时,需自拟 p 和 q 的值。综合考虑幅频误差和相频误差,利用有理函数逼近原理构造拟合传递函数和测量值的误差函数。

$$J = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N |H(j\omega_i) - \hat{H}(j\omega_i)|^2 \quad (7)$$

式中: ω_i 为第 i 个采样频率; $\hat{H}(j\omega_i)$ ($i=1,2,3,\dots,N$) 为实际传递函数的一系列离散的传递函数值, $H(j\omega_i)$ 为拟合传递函数; N 为采样个数。当误差函数 J 最小时,可以得到拟合传递函数中的系数,完成对光耦合隔离放大器传递函数的逼近拟合。

2.2 粒子群优化(PSO)算法

2.1 节构造的误差函数 J 是以拟合传递函数的系数 b_i ($i=0,1,2,3,\dots,p$) 和 a_i ($i=0,1,2,3,\dots,q$) 为自变量的函数,本文研究目的是通过某种方式获得误差函数 J 的最小值及拟合传递函数的系数,这是一个优化问题。对这类优化问题,需采用拟牛顿法或智能算法。拟牛顿法是一种非常有效的局部搜索迭代算法,但对初始值比较敏感,如果初始值选择不当会导致收敛失败^[17]。常用的智能算法有遗传算法(GA),模拟退火算法(SA),粒子群算法(PSO)等^[18-19]。模拟退火的收敛速度慢,执行时间长,算法性能与初始值有关且参数敏感^[20]。粒子群算法相对遗传算法少了编码解码等步骤,收敛速度更快,原理更简单、参数更少、实现更容易^[21-23]。本文选择粒子群算法来求取误差函数 J 的最优解及拟合传递函数的系数值。

2.2.1 粒子群算法简介

粒子群算法是一种智能优化算法,具有原理简单,寻优能力强,不依赖初始值,收敛速度快等优点。目前 PSO 算法已在电力系统中各种复杂优化问题中得以应用,取得了较好的效果^[24-27]。优化过程为初始化粒子群个数 N ,第 i 个粒子用 d 维向量 x_i 和 v_i 分别表示其位置和速度,将位置代入优化目标函数计算出适应值,更新粒子的速度和位置,通过迭代寻求目标函数的最优解。每个粒子的速度和位置更新计算公式为

$$v_{id}^{m+1} = wv_{id}^m + c_1r_1(p_{id}^m - x_{id}^m) + c_2r_2(p_{gd}^m - x_{id}^m) \quad (8)$$

$$x_{id}^{m+1} = x_{id}^m + v_{id}^{m+1} \quad (9)$$

式中:第 i 个粒子用 d 维向量表示, $i=1,2,3,\dots,N$, N 为粒子种群数量; x_{id}^m 和 v_{id}^m 分别为粒子 i 在第 m 次迭代时个体位置和速度; p_{id}^m 为第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置; p_{gd}^m 为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置; w 为惯性权重系数,使粒子继承当前速度具有惯性; c_1 、 c_2 为加速常数分别决定粒子个体经验和群体经验对粒子运行轨迹的作用权重; r_1 、 r_2 为保持种群多样性的随机数。

惯性权重 w 控制着算法的开发和探索能力, w 越大,微粒将以较大的步长进行全局搜索; w 越小,微粒步长小,趋向于精细的局部搜索。为了平衡 PSO 算法的全局搜索能力和局部搜索能力,采用随机权重策略的 PSO 算法, w 的计算公式为

$$\begin{cases} w = u + \sigma \times N(0,1) \\ u = u_{\min} + (u_{\max} - u_{\min}) \times \text{rand}(0,1) \end{cases} \quad (10)$$

式中: u 随机惯性权重; u_{\min} 是随机惯性权重的最小值; u_{\max} 是随机惯性权重最大值; $\text{rand}(0,1)$ 为 $[0,1]$ 均匀分布随机数; $N(0,1)$ 为正太分布的随机数; σ 是随机权重平均值的方差。

2.2.2 求解流程及参数设置

求解误差函数 J 的最优解的步骤如下所述。

1) 初始化粒子群的群体规模 N ,初始化每个粒子的速度和位置(每个粒子的位置就是拟合传递函数的系数),设置最大迭代次数和适应度函数的阈值。

2) 将每个粒子的位置代入误差函数 J 中计算其适应度值 $fit(i)$ (误差函数值)。

3) 对于每个微粒,将其适应值 $fit(i)$ 与微粒自身所经历过的最好位置 $pbest(i)$ 进行比较,若 $fit(i) < pbest(i)$,则将 $fit(i)$ 替换 $pbest(i)$ 。

4) 对于每个微粒,将其适应度值 $fit(i)$ 与整个群体所经历过的最好位置 ($gbest$) 进行比较,若 $fit(i) < gbest$,则将 $fit(i)$ 替换 $gbest$ 。

5) 根据式(7)、式(8)更新微粒的速度与位置。

6) 若满足终止条件(误差函数足够小或达到最大循环次数),则停止迭代,否则返回到步骤 2)。

本文将使用 Matlab 软件对误差函数 J 进行最优解求解,对涉及的相关参数设定如下:群体规模 $N=1500$, r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间随机数, $c_1=3$, $c_2=1$, $u_{\max}=0.8$, $u_{\min}=0.1$, $\sigma=0.1$,最大迭代次数 600 次。

3 仿真实验

3.1 算法可行性验证

利用表 1 中的光耦合隔离放大器典型参数结合图 3 传递函数框图,可以得到光耦合隔离放大器实际的传递函数。由图 2 光耦合隔离放大器电路结构可知其传递函数分子分母分别为 1 阶和 4 阶,可设拟合传递函数为

$$\hat{H}(j\omega) = \frac{b_0 + b_1j\omega}{a_0 + a_1j\omega + a_2j^2\omega^2 + a_3j^3\omega^3 + a_4j^4\omega^4} \quad (11)$$

对实际传递函数进行采样以仿真工程中测量不同频率下的光耦合隔离放大器传递函数值,将采样值和拟合函数(11)代入式(7)中,构造出拟合传递函

数与测量值的误差函数 J 。利用粒子群优化算法求取误差函数 J 的最小值得到拟合传递函数分子分母系数, 本次仿真中在低频($\omega=0$ 至 3000 rad/s)进行采样时, 间隔频率 $\Delta\omega=5$ rad/s, 共 601 个采样点。

在工程中用求得的拟合传递函数 $\hat{H}(j\omega)$ 代替实际的传递函数 $H(j\omega)$, 除了保证在采样频率范围内两个传递函数误差很小, 还需考虑求得的逼近拟合传递函数 $\hat{H}(j\omega)$ 的泛化能力, 即保证在电网中各次谐波包含的频率误差同样很小。在本文仿真中, 考虑从直流到 200 次谐波, 换算到角频率 ω 约为 0 到 $63\,000$ rad/s, 用平均相对误差来衡量算法的准确性, 定义平均相对误差为

$$\sigma = \frac{1}{\omega_b - \omega_a} \sum_{\omega=\omega_a}^{\omega_b} \left| \frac{H(j\omega) - \hat{H}(j\omega)}{H(j\omega)} \right| \times 100\% \quad (12)$$

角频率 $\omega_a=0$ 到 $\omega_b=63\,000$ rad/s 的每个频率点对应的平均相对误差为 $2.1908e-16\%$, 绘制的频率特性对比图如图 5 所示, 每个频率对应的幅值相对误差如图 6 所示。

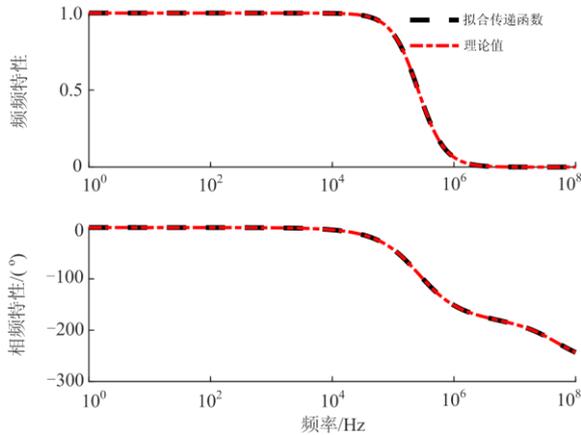


图 5 理论值和拟合传递函数频率特性对比

Fig. 5 Comparison of frequency characteristics between theoretical value and fitted transfer function

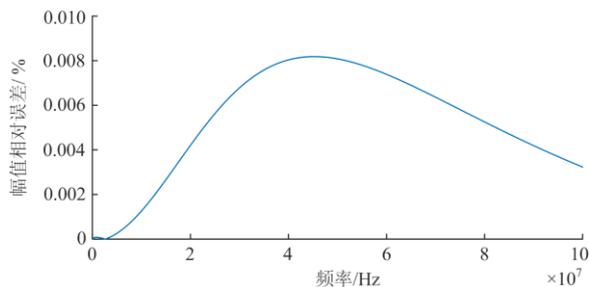


图 6 理论值和拟合传递函数幅值相对误差

Fig. 6 Relative error between the theoretical value and the amplitude of the fitted transfer function

由图 5 可知, 通过有理逼近原理得到的拟合传递函数与实际传递函数频率特性曲线几乎一致。从图 6 可知, 求得的拟合传递函数与实际的传递函数在每个频率下对应的幅值相对误差极小。从仿真结果中验证了此算法具有可行性, 通过有理函数逼近拟合求得的拟合传递函数能够准确反映隔离放大器的频率特性。

3.2 仿真参数及算法可行性验证

在工程中光耦合隔离放大器实际参数无法准确地测量出来, 只能通过厂家提供的额定参数算出隔离放大器的传递函数, 但是长时间工作在高温、湿润条件下, 元件腐蚀老化参数发生变化, 改变仿真参数如表 2。

表 2 改变后的仿真参数

Table 2 Changed simulation parameters			
$R_1/k\Omega$	R_2/Ω	R_3/Ω	C_f/pF
51.5	18	208	4

用仿真参数的改变仿真经过长时间工作后隔离放大器参数发生的变化。由采样点拟合得到的拟合传递函数、根据额定参数计算得到的传递函数、改变参数后实际传递函数的频率特性对比图如图 7 所示。

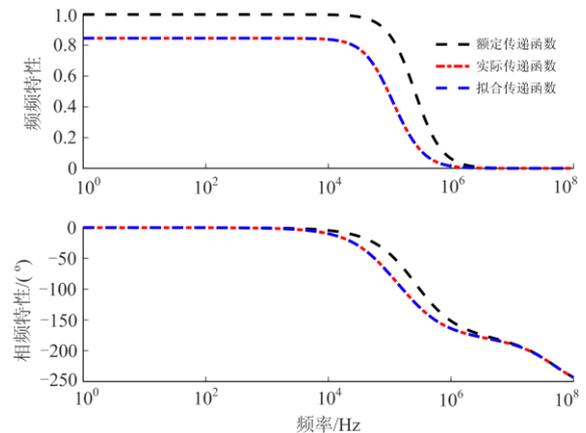


图 7 频率特性对比

Fig. 7 Frequency characteristics comparison

由图 7 可知, 当隔离放大器内部参数发生了变化后, 因隔离放大器本身幅度很小的特点, 幅频变化绝对量虽然很小, 但测量一次侧电压时产生的相对误差很大, 利用额定参数并不能再正确反映隔离放大器实际的频率特性, 而对采样点进行有理函数逼近拟合得到的拟合传递函数能够有效准确地反映隔离放大器的实际频率特性。

4 实例仿真

本文以德宝换流站直流电压互感器备用平衡板、分压板和隔离放大器进行试验。直流电压互感器结构电路图如图 8 所示。

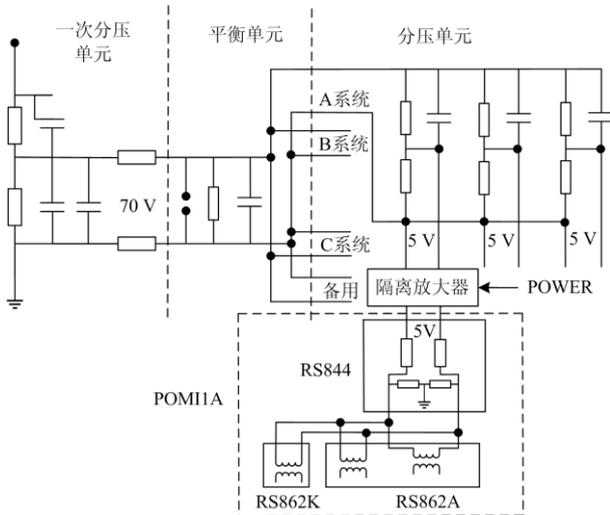


图 8 特高压直流输电工程直流分压器结构图

Fig. 8 Structure diagram of DC voltage divider of UHV DC transmission project

试验所用的二次信号传输模块如图 9 所示。

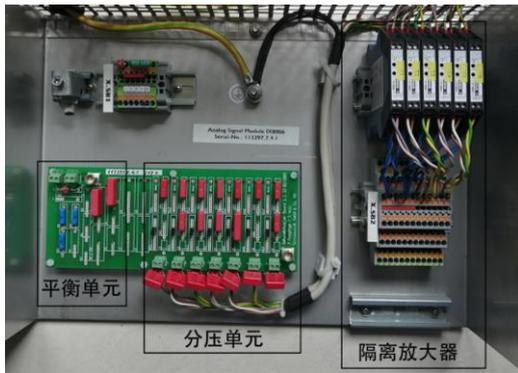


图 9 二次信号传输模块

Fig. 9 Secondary signal transmission module

按图 10 搭建试验平台，其中，信号发生器作为模拟信号源通过同轴电缆接入平衡单元，平衡单元输出信号依次接入分压单元和隔离放大器，同时利用示波器测量信号发生器输出信号与隔离放大器的输出信号。

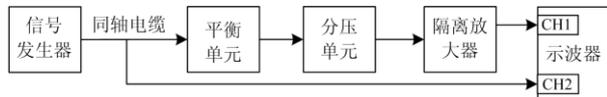


图 10 试验接线图

Fig. 10 Test wiring diagram

从 DC~50 kHz 每隔 50Hz 改变信号发生器的输出频率，示波器 CH1 和 CH2 两通道同时测量记录同频信号得到不同频率下的传递函数值。拟和传递函数分子分母阶数都自设为 4 阶，通过逼近拟合得到拟合传递函数与测量传递函数对比图如图 11 所示，在不同频率下拟合传递函数与测量值的幅值相对误差如图 12 所示。

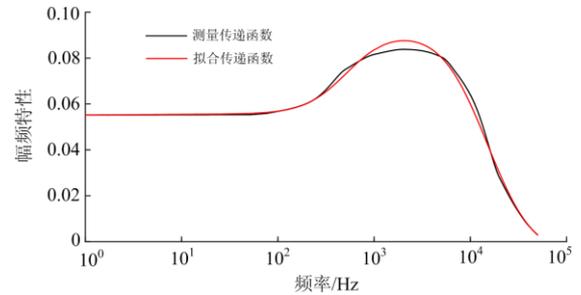


图 11 测量值和拟合传递函数幅频特性对比图

Fig. 11 Comparison of amplitude-frequency characteristics of measured value and fitted transfer function

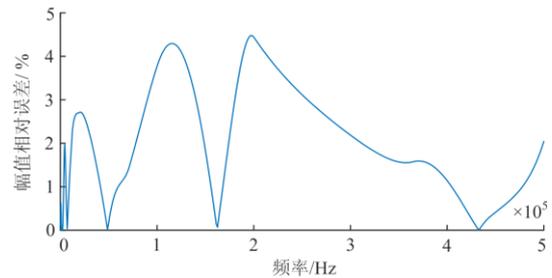


图 12 测量值和拟合传递函数幅值相对误差

Fig. 12 Relative error of the measured value and the amplitude of the fitted transfer function

由图 11 和图 12 可以看出，在实际应用中本文提出的通过逼近拟合原理求得传递函数，能比较准确反映隔离放大器实际的频率特性。

5 噪声影响

在工程应用中，采样得到的数据会存在一定的噪声，为了研究算法抗噪能力，将仿真数据采样点加入 1~30 dB 信噪比的高斯白噪声，以实际的传递函数作为标准值，利用式(12)的平均相对误差来衡量不同强度下的噪声对算法的影响情况，如表 3 所示。

表 3 噪声影响

Table 3 Influence of noise

信噪比/dB	1	2	3	6	10	20	30
相对误差/%	4.43	3.58	2.15	1.99	1.41	0.91	0.07

由表 3 可知，此算法有着良好的抗噪能力，在信噪比大 6 dB 的时候能够将误差控制在 2%。信噪

比为 30 dB 时误差极小, 能够非常准确地还原直流隔离放大器的频率特性。

6 结论

本文首次提出一种隔离放大器宽频域建模方法, 在不依赖其内部参数的情况下利用少量采样点通过有理函数逼近拟合得到的传递函数具有良好的泛化能力, 克服了目前利用额定参数推算得到的传递函数与实际的传递函数存在较大误差的问题。通过实测数据与仿真证明了所提方法具有较高准确性和良好的抗噪能力, 在采样点信噪比大于 30 dB, 利用此算法能够得到光耦合隔离放大器非常准确的频率特性。在特高压输电系统中, 有利于改善测量电压信息的准确度, 为特高压直流输电系统的控制和实时保护提供准确可靠的电压测量信息。

本文的不足之处是在未知光耦合隔离放大器等效电路图时, 其传递函数分子分母阶数无法确定, 在拟合过程中只能自设阶数。如何在未知隔离放大器等效电路图的情况下, 得到拟合传递函数合适的分子分母阶数有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 尹永强, 韦盟杰, 余宏伟. 基于高线性光耦 HCNR201 的交流信号隔离电路的实现[J]. 电测与仪表, 2008, 45(11): 50-54.
YIN Yongqiang, WEI Mengjie, YU Hongwei. The realization of AC signal isolation circuit based on the high linearity analog optocoupler HCNR201[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(11): 50-54.
- [2] 陈琳依, 李登云, 刘开培, 等. 1 100 kV 直流电阻标准分压器电场仿真分析和方案设计[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 140-147.
CHEN Linyi, LI Dengyun, LIU Kaipei, et al. Electric field simulation analysis and scheme design of 1 100 kV DC resistance standard voltage divider[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 140-147.
- [3] 滕予非, 李小鹏, 焦在滨, 等. 特高压直流分压器传变特性及其对电压突变量保护影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 122-130.
TENG Yufei, LI Xiaopeng, JIAO Zaibin, et al. Analysis of the transfer characteristic of DC voltage divider in UHVDC system and its effects on undervoltage sensing protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 122-130.
- [4] 徐志跃. 隔离放大器及其应用[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(6): 53-56.
XU Zhiyue. Isolated amplifier and its applications[J]. Experimental Technology and Management, 2011, 28(6): 53-56.
- [5] KLIGER R. Integrated transformer-coupled isolation[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2003, 6(1): 16-19.
- [6] 李应辉, 陈春霞, 蒋城, 等. 光电耦合器总剂量辐照的噪声表征[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1707-1711.
LI Yinghui, CHEN Chunxia, JIANG Cheng, et al. Noise denoting for radiation total dose of optocoupler[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1707-1711.
- [7] HOU A S. A wide bandwidth isolation amplifier design using current conveyors[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2004, 40(1): 31-38.
- [8] 李霆霆, 张明, 潘明俊. 一种 MHz 光耦隔离放大器的设计与分析[J]. 电子学报, 2014, 42(7): 1398-1402.
LI Tingting, ZHANG Ming, PAN Mingjun. Design and analysis of an optocoupler isolation amplifier with MHz bandwidth[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1398-1402.
- [9] LI Shuhan, YANG Ning, CHENG Li, et al. A high-speed and high-linearity BiCMOS optically coupled isolation amplifier[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 241: 2200-2203.
- [10] AHN H, SUNG Y, KIM S. Frequency analysis method for linear optically coupled isolation amplifier[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2007, 56(12): 2240-2246.
- [11] 张邵华, 施红军, 林言方. 光电耦合隔离放大器的频率响应研究[J]. 半导体光电, 2003, 24(1): 57-60.
ZHANG Shaohua, SHI Hongjun, LIN Yanfang. Frequency response of optically coupled isolation amplifier[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(1): 57-60.
- [12] 王毅, 石志勇, 全振中, 等. 基于非线性双路光耦的光耦放大器频响分析[J]. 半导体光电, 2011, 32(5): 621-624.
WANG Yi, SHI Zhiyong, QUAN Zhenzhong, et al. Frequency response of optically isolation amplifier based on twin-channel optocoupler[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(5): 621-624.
- [13] 潘明俊, 张明, 李霆霆, 等. 基于 J-TEXT 装置的光耦隔离放大器设计与分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2015, 35(3): 265-271.
PAN Mingjun, ZHANG Ming, LI Tingting, et al. Design and analysis of optical coupling isolation amplifier for J-TEXT tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2015, 35(3): 265-271.
- [14] SKOLNIK H L. Design considerations for linear optically

- coupled isolation amplifiers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1982, 17(6): 1094-1101.
- [15] PAN Mingjun, ZHANG Ming, LI Tingting, et al. Wide-band optical coupling isolation amplifier for the Joint TEXT tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 96: 1026-1032.
- [16] CHENG Li, YANG Ning, ZHOU Xiaodi, et al. A novel low power consumption and quasilinear CMOS optically coupled isolation amplifier[C] // 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, August 24-26, 2010, Changchun, China: 175-178.
- [17] 屈颖爽. 基于拟牛顿法和遗传算法求解非线性方程组的混合算法[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
QU Yingshuang. A hybrid genetic algorithm for nonlinear equations based in quasi-Newton method and genetic algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [18] CHANANE A, HOUASSINE H, BOUCHHIDA O. Enhanced modelling of the transformer winding high frequency parameters identification from measured frequency response analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(8): 1339-1345.
- [19] 刘伟, 韩彦华, 王荆, 等. 基于粒子群算法优化支持向量机的变压器绕组变形分类方法[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 72-78.
LIU Wei, HAN Yanhua, WANG Jing, et al. Transformer winding deformation classification method based on particle swarm algorithm optimizing support vector machine[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 72-78.
- [20] 李金旭, 黄悦悦, 朱广帧. 模拟退火算法及其改进算法的研究[J]. 计算机光盘软件与应用, 2014, 17(22): 141-142.
LI Jinxu, HUANG Yueyue, ZHU Guangzhen. Research on simulated annealing algorithm and its improved algorithm[J]. Computer CD Software and Application, 2014, 17(22): 141-142.
- [21] 刘述奎, 陈维荣, 李奇, 等. 基于自适应聚焦粒子群优化算法的电力系统多目标无功优化[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 48-53.
LIU Shukui, CHEN Weirong, LI Qi, et al. Power system multi-objective reactive power optimization based on adaptive focusing particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 48-53.
- [22] 陆玉玉, 王波, 王晓飞, 等. 考虑公平性的智能电网实时电价收益均衡模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 41-46.
LU Yuyu, WANG Bo, WANG Xiaofei, et al. Real-time pricing revenue equilibrium model considering fairness in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 41-46.
- [23] KERDPHOL T, QUDAIH Y, MITANI Y. Optimum battery energy storage system using PSO considering dynamic demand response for microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 58-66.
- [24] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [25] 季宇, 熊雄, 寇凌峰, 等. 基于经济运行模型的储能系统投资效益分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 143-150.
JI Yu, XIONG Xiong, KOU Lingfeng, et al. Analysis of energy storage system investment benefit based on economic operation model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 143-150.
- [26] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-75.
PAN Chao, JIAO Weiyu, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-75.
- [27] HU Bo, WANG He, YAO Sen. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.

收稿日期: 2020-07-14; 修回日期: 2020-09-23

作者简介:

左航(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统信号与信息处理; E-mail: 1007004313@qq.com

李小鹏(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为特高压直流输电控制保护; E-mail: lxpbsd@163.com

徐方维(1978—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量及谐波责任划分等。E-mail: xufangwei@scu.edu.cn

(编辑 姜新丽)