

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240437

基于 PSA 的中压电力线载波通信自适应阻抗匹配

谢志远, 曹通

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 在中压电力线通信中, 针对复杂电器元件的种类、数量不断变化等因素导致线路阻抗不匹配而影响通信质量的问题, 提出了一种中压电力线载波通信自适应阻抗匹配方法。首先, 建立了中压阻抗匹配系统模型, 在该模型的基础上提出了一种 π 型自适应阻抗匹配电路。然后, 根据该电路设计了符合阻抗共轭匹配原理的目标函数, 通过 PID 搜索算法(PID-based search algorithm, PSA)寻找最优元件参数, 实现目标函数最优。最后, 在此模型基础上仿真分析了 PSA 算法、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和遗传算法(genetic algorithm, GA)的优劣性。结果表明, PSA 算法在收敛速度和寻优精度方面优于 PSO 和 GA 算法, 能够有效实现阻抗匹配进而改善载波通信质量, 为中压电力线通信进一步研究提供了可行性方案。

关键词: 中压电力线通信; 阻抗匹配; PSA; 自适应

Adaptive impedance matching of medium voltage power line carrier communication based on PSA

XIE Zhiyuan, CAO Tong

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In medium voltage power line communication, an adaptive impedance matching method for medium voltage power line carrier communication is proposed to solve the problem that line impedance mismatch caused by the variety and quantity of complex electrical components will influence the quality of communication. First, a model of a medium voltage impedance matching system is established, and a π -type adaptive impedance matching circuit is proposed based on the model. Then, an objective function conforming to the impedance conjugate matching principle is designed according to the circuit, and the optimal component parameters are found out by PID-based search algorithm (PSA) based on proportional integral differential (PID) to achieve the optimal objective function. Finally, based on this model, the advantages and disadvantages of PSA, particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithms (GA) are simulated and analyzed. The results show that the PSA is superior to PSO and GA algorithms in terms of convergence speed and optimization accuracy, and can effectively realize impedance matching and improve carrier communication quality. This provides a feasible scheme for further research on medium voltage power line communication.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52177083).

Key words: medium voltage power line communication; impedance matching; PSA; self-adaptation

0 引言

电力线载波通信(power line communication, PLC)以 10 kV 中压线路为智能配电系统中重要的数据传输媒介, 进而完成相应的智能电表数据采集、收发等功能, 是电力系统特有的一种通信方式, 该技术经过几十年发展已逐渐成熟^[1-5], 而线路阻抗匹配问题一直是电力载波通信技术的研究难点^[6-10],

电路元器件的连接、电器的开关接入都是变化的, 很难实现线路输入和输出阻抗的匹配, 进而造成信号的衰减^[11-13], 因此研究中压电力线载波通信阻抗匹配具有重要意义。在中压电力线阻抗匹配中分为两大类: (1) 信号源阻抗、负载阻抗与传输线特性阻抗相匹配; (2) 信号源阻抗与输入阻抗相匹配, 由于中压线路的特点, 在中压载波通信中阻抗匹配应尽可能满足信号源阻抗与电路输入阻抗相匹配, 使得信号衰减最小, 增加传输信噪比^[14-16]。阻抗匹配技术最初仅由电容和电阻组成的负载阻抗手动调

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52177083)

节技术发展电阻性激励源与无源负载之间的阻抗匹配技术，随着技术要求的不断提高，手动调节已无法满足需求，因此研究学者提出自动匹配理论^[17]，由于智能优化算法的发展，自适应阻抗匹配技术逐渐出现，其通过采用微控制器根据传感器传来的信息，利用智能优化算法计算出最优的元件参数并进行调节，进而实现阻抗匹配^[18]。在智能优化算法选择中，大部分研究学者采用粒子群算法、遗传算法等较多，文献^[19]采用遗传算法优化策略，调整变容二极管，实现 L 型匹配网络的阻抗匹配。文献^[20]采用粒子群算法，实现 π 型无源网络的阻抗匹配。而文献^[21]在粒子群算法的基础上，采用量子改进处理，有效地减少了匹配“禁区”，提高了算法精度和收敛速度。

本文主要工作如下所述。

1) 在中压载波通信研究背景下，建立阻抗匹配模型并进行阻抗分析。

2) 通过分析中压阻抗匹配电路模型，设计了一种 π 型阻抗匹配网络电路，相比于其他匹配网络有效地解决了匹配“禁区”的问题，并在此网络基础上设计了适用于该阻抗匹配模型的目标函数，通过此函数能更加准确地描述该模型的输入阻抗与信号源内阻的共轭匹配。

3) 将新型元启发式 PSA 优化算法应用到自适应阻抗匹配中，该算法基于 PID 控制原理，并增加莱维飞行函数和调整系数避免算法陷入局部最优。

4) 通过微控制器，采用 PSA、PSO 和 GA 算法调整 π 型匹配网络的元件值，达到目标函数最优，实现自适应阻抗匹配，有效地减少阻抗变化带来的信号衰减，比较 3 种算法在此阻抗匹配模型上的性能，结果表明 PSA 算法相比于在阻抗匹配中所用的粒子群算法、遗传算法等匹配精度更高，收敛速度更快且算法复杂度更小。

1 阻抗匹配系统模型

1.1 电力线载波通信自适应阻抗匹配原理

电力线端耦合器为宽窄带自适应耦合器，变压器将电力线端阻抗成比例变换为接近通信端阻抗，进而通过自适应阻抗匹配网络调节，实现与载波机端的阻抗匹配，最大化传输功率。10 kV 电力线载波通信自适应阻抗匹配原理如图 1 所示。

1.2 自适应阻抗匹配网络

自适应阻抗匹配网络包括微处理器模块、传感器模块以及可调阻抗匹配电路。可调阻抗匹配电路有 L 型、T 型、 π 型等结构，考虑到存在匹配“禁区”的问题，所以采用 π 型网络结构实现本文的自

适应阻抗匹配网络设计，自适应阻抗匹配网络如图 2 所示。

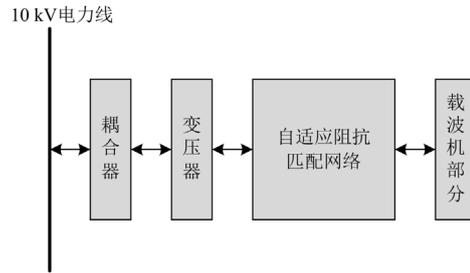


图 1 10 kV 电力线载波通信自适应阻抗匹配原理图

Fig. 1 Adaptive impedance matching schematic diagram of 10 kV power line carrier communication

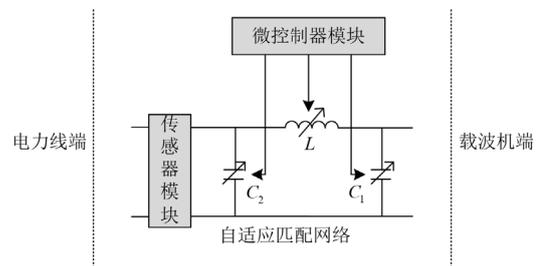


图 2 自适应阻抗匹配网络图

Fig. 2 Adaptive impedance matching network diagram

由图 2 可以看出：自适应阻抗匹配网络模块将电力线端的阻抗值信息传给微控制器模块，通过其内部的智能优化算法迭代计算得到匹配网络中可调电容 C_1 、 C_2 及可调电感 L 的最优值，通过步进电机脉宽调制信号改变可变电容大小，实现电力线载波阻抗自适应匹配。

1.3 阻抗匹配等效电路模型

由于在实际电路中，载波机端含有运算放大器元件，导致即使载波机端阻抗等于电力线端等效输入阻抗的共轭时，也不能以最大功率传输。因此，本文主要分析了基于 PSA 算法的自适应匹配，主要比较 3 种算法的优劣性，所以在本文中简化电路模型，假设载波机端阻抗为恒定值 75Ω ，等效电路模型如图 3 所示。

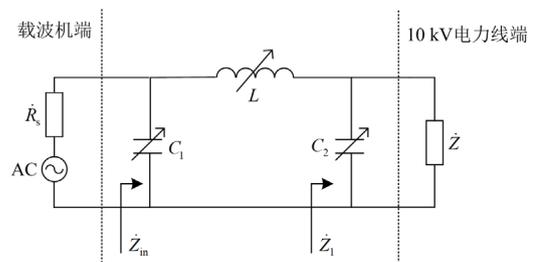


图 3 等效电路模型图

Fig. 3 Equivalent circuit model diagram

图 3 中 \dot{Z} 为 10 kV 电力线经耦合器、变压器转换后的负载阻抗, 其中 $\dot{Z} = R + jX$; \dot{R}_s 为载波机端内阻; \dot{Z}_{in} 为输入阻抗。

由图 3 可知, \dot{Z}_1 阻抗值计算如式(1)所示。

$$\dot{Z}_1 = \frac{R + jX}{1 - j\omega XC_2 + j\omega C_2 R} \quad (1)$$

式中: R 为电力线端负载阻抗电阻值; X 为电力线端负载阻抗电抗值; ω 为载波机信号角频率。

输入阻抗 \dot{Z}_{in} 如式(2)所示。

$$\dot{Z}_{in} = \frac{j\omega L + \dot{Z}_1}{1 + j\omega C_1(j\omega L + \dot{Z}_1)} \quad (2)$$

2 PSA 算法优化电力线载波通信自适应阻抗匹配

传统智能优化算法如遗传算法、粒子群算法等曾在各个领域得到广泛应用, 具有全局搜索能力强、收敛速度快的特点。但随着时代的发展和科学技术的不断进步, 对算法的收敛精度和速度有更高的要求, 现采用 PID 搜索算法(PID-based search algorithm, PSA), 利用递归思想实现电力载波自适应阻抗匹配。

2.1 PID 算法

PID 算法是控制工业领域中最常用的算法之一, 其将比例模块、积分模块以及微分模块融合为一体^[22], 实现将温度、流量等控制系统尽可能达到稳定状态的效果, 其控制原理如图 4 所示。

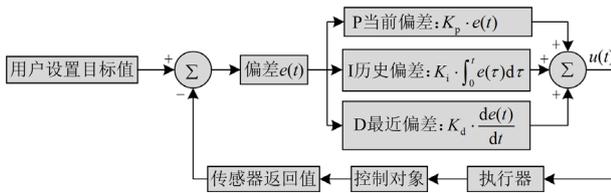


图 4 PID 算法原理图

Fig. 4 PID algorithm schematic diagram

用户通过设定目标值, 与传感器观测到的返回值作差得到偏差 $e(t)$, 并通过比例、积分和微分模块后作和得到输出 $u(t)$, 进而通过控制器调整控制对象的值, 最后通过传感器返回给 PID 控制模块, 构成闭环系统, 最后达到稳定状态, 如式(3)所示。

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

式中: K_p 为比例系数; $e(t)$ 为目标值与返回值之差; t 为时间; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

将式(3)化简为式(4)。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: K_i 为积分常数, $K_i = \frac{K_p}{T_i}$; K_d 为微分常数,

$$K_d = K_p T_d。$$

当比例模块在产生偏差时, 立即发挥作用, 使得控制量逐渐向减少偏差的方向变化。比例系数 K_p 越大, 减少偏差的作用越大, 过渡过程越快, 但是更加容易产生振荡, 影响系统稳定性, 所以需要选择合适的 K_p 大小。积分模块的作用体现在只要存在偏差, 其控制作用就会不断增加, 直到消除系统偏差, 但若积分系数 K_i 过大, 会降低系统的响应速度, 使得系统消除偏差花费时间较长。微分模块会根据偏差的变化趋势进行修正, 有助于减小超调量, 改善振荡情况, 使系统更加稳定。

2.2 PSA 算法

PSA 是一种新的元启发式算法, 其基于传统的 PID, 通过不断调整系统偏差将整个群体收敛到最佳状态。PSA 优化算法分为计算系统偏差和 PID 调节两部分^[23]。

1) 计算系统偏差

实际中工程问题转化为目标优化问题时需要初始化决策变量、约束条件等以及设置相应的目标函数, 从而利用优化算法得到函数最小值。算法初始化种群如式(5)所示。

$$x_{ij} = (\mathbf{u}_j - \mathbf{l}_j) \cdot r_i + \mathbf{l}_j, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, d \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个个体的第 j 个变量; \mathbf{u}_j 和 \mathbf{l}_j 分别为第 j 个变量的上、下限; r_i 为 [0,1] 内随机数; n 为种群数量; d 为决策变量个数。

在本文中, 优化目标为使函数值达到最小, 因此假设在迭代 t 次时, 与此对应的总体偏差 $e_k(t)$ 如式(6)所示。

$$e_k(t) = \mathbf{x}^*(t-1) - \mathbf{x}(t-1) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}^*(t-1)$ 为最佳个体, 即前一次迭代时使总体历史达到最优值的个体; $\mathbf{x}(t-1)$ 为前一次迭代时的个体。

但由于式(6)在迭代更新时会增加计算的复杂度, 所以用 $e_{k-1}(t)$ 表示前一次迭代的总体偏差, 用 $e_{k-2}(t)$ 表示前两次迭代的总体偏差, 因此当 $t > 1$ 时, $e_{k-2}(t) = e_{k-1}(t-1)$ 。由于在 PSA 中每次迭代后的最佳值并不总是一致的, 所以不能利用 PID 算法中等式 $e_{k-1}(t) = e_k(t-1)$ 。根据定义, $e_{k-1}(t)$ 如式(7)所示。

$$e_{k-1}(t) = \mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t-1) \quad (7)$$

式中, $e_{k-1}(t)$ 为最佳值与系统中上一时刻的真实值之差; $x^*(t)$ 为迭代 t 次时的最佳个体。

为了降低算法空间复杂度, 将 $x(t-1)$ 替换为 $x^*(t-1) - e_k(t-1)$, 如式(8)所示。

$$e_{k-1}(t) = e_k(t-1) + x^*(t) - x^*(t-1) \quad (8)$$

式中, $e_k(t-1)$ 为迭代 $t-1$ 次时的最佳个体与实际个体之差。

2) PID 调节

当迭代 t 次时, PID 调节的输出值 $\Delta u(t)$ 如式(9)所示。

$$\Delta u(t) = K_p \cdot r_2 \cdot [e_k(t) - e_{k-1}(t)] + K_i \cdot r_3 \cdot e_k(t) + K_d \cdot r_4 \cdot [e_k(t) - 2e_{k-1}(t) + e_{k-2}(t)] \quad (9)$$

式中, r_2 、 r_3 和 r_4 均为 n 行 1 列从 0 到 1 的随机数矩阵。

2.3 PSA 算法优化步骤

为了防止算法陷入局部最优, 引入由莱维飞行函数和调整系数组成的零输出条件因子来进行种群更新, 零输出条件因子 $o(t)$ 的定义如式(10)所示。

$$o(t) = (\cos(1 - \frac{t}{T}) + \lambda r_5 \cdot L) \cdot e_k(t) \quad (10)$$

式中: T 为最大迭代次数; λ 为调整系数; r_5 为 n 行 d 列从 0 到 1 的随机数矩阵; L 为莱维飞行函数, λ 、 L 的定义分别如式(11)和式(12)所示。

$$\lambda = [\ln(T - t + 2) / \ln(T)]^2 \quad (11)$$

$$\begin{cases} L = \frac{u\sigma}{|v|^{1/\beta}} \\ \sigma = \left[\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma((1+\beta)/2) \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{1/\beta} \end{cases} \quad (12)$$

式中: u 、 v 分别为服从标准正态分布的 n 行、 d 列随机数矩阵; β 为莱维分布的形状参数, 取值 1.5; “ Γ ” 为伽马运算符。因此种群更新公式如式(13)所示。

$$x(t+1) = x(t) + \eta \cdot \Delta u(t) + (1 - \eta) \cdot o(t) \quad (13)$$

式中, $x(t+1)$ 为迭代 $t+1$ 次时的个体; η 为 n 行 1 列的矩阵, $\eta = r_6 \cos(t/T)$, 其中 r_6 为 n 行 1 列从 0 到 1 的随机数矩阵。

PSA 算法流程如图 5 所示。个体在空间中随机移动过程中, 引入莱维飞行函数使得个体移动的步长和方向由莱维分布决定, 其具有重尾特性即概率密度函数的尾部以幂律形式衰减, 使得飞行轨迹由多数短距离跳跃和少数长距离跳跃组合在一起, 两者相互交替, 进而增加种群多样性。另外 λ 随着迭代次数的增加而缓慢减小, 因此由莱维飞行函数和 λ 调整系数组成的零输出条件因子有利于实现该算

法的全局最优。

3 实验仿真及分析

本文采用的基于 PID 的 PSA 算法具有收敛速度快、精度高的特点, 分析电路模型, 设计符合实验条件的目标函数, 并通过与 PSO 算法、GA 算法比较, 验证本文所提方法在负载阻抗分别为阻性、感性、容性以及不同载波频率条件下的算法寻优能力。



图 5 PSA 算法流程图

Fig. 5 PSA algorithm flow diagram

3.1 目标函数设计

当电力线端负载阻抗发生变化时, 微处理器模块需要及时设置匹配网络中 C_1 、 C_2 、 L 使得负载阻抗与载波机端阻抗实现共轭匹配, 即实部相等, 虚部互为相反数。约束条件需保证 C_1 、 C_2 、 L 均不为负数。因此, 设计目标函数 f_x 为

$$f_x = [(\text{real}(\dot{Z}_{in}) - \text{real}(\dot{R}_s))^2 + (\text{imag}(\dot{Z}_{in}) + \text{imag}(\dot{R}_s))^2] / 2 \quad (14)$$

式中: real 为取变量的实部值; imag 为取变量的虚部值。当输入阻抗 \dot{Z}_{in} 与载波机端内阻 \dot{R}_s 的实部相等, 虚部互为相反数时, 目标函数的两个二次项均趋向于 0, 此时实现共轭匹配。

3.2 算法参数设置

在种群数量和迭代次数相同条件下, 进行 3 种算法的性能对比, 迭代次数分别设置为 100、150、

200。在文献[17-18]和相关阻抗匹配测量经验基础上,种群大小通常设置为 30 时能够满足实验分析要求,因此相关参数及变量上、下限设置如表 1 和表 2 所示。

表 1 相关参数设置

Table 1 Related parameter setting

算法	种群大小	维数
PSA	30	3
PSO	30	3
GA	30	3

表 2 变量上、下限设置

Table 2 Variable upper and lower limit setting

边界	L	C_1	C_2
上限	10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}
下限	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}

3.3 电路参数设置

由于本文载波机端通信频段为窄带,所以为了实现通信频率在窄带范围的自适应阻抗匹配,载波频率取值范围为 50~500 kHz;而为了包含各种负载情况,将负载阻抗设置为阻性、容性及感性 3 种情况。

为了充分验证实验的可行性,将实验分为两种情况:(1)在同一频率不同负载阻抗情况下的阻抗匹配;(2)在同一负载阻抗不同频率情况下的阻抗匹配。采用 PSA、PSO 和 GA 算法分别进行实验,为保证实验的一致性,软件运行环境等其他条件保持一致。电路参数设置如表 3 所示。

表 3 电路参数设置

Table 3 Circuit parameter setting

负载阻抗/ Ω	载波频率/kHz		
50	200	300	400
$50 + j25$	200	300	400
$50 - j25$	200	300	400

3.4 实验结果分析

1) 在载波机端阻抗为 75Ω 电力线端负载阻抗为 $50 + j25 \Omega$ 情况下,分别设置载波频率为 200 kHz、300 kHz 和 400 kHz,实验结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出:在固定电力线端负载阻抗情况下,面对不同的载波通信频率 PSO 与 GA 算法具有相似的收敛精度,PSA、PSO 和 GA 算法都能够很好地实现阻抗匹配。纵向来看随着迭代次数的增加,3 种算法收敛精度逐渐增加,其中 PSA 算法迭代每增加 50 次精度最高增加 10^7 ,而 PSO 和 GA 算法迭代每增加 50 次精度分别最高增加 10^3 和 10^2 ,可见 PSA 算法相比另外两种算法收敛速度更快。横

表 4 固定电力线端负载不同载波频率下阻抗匹配结果

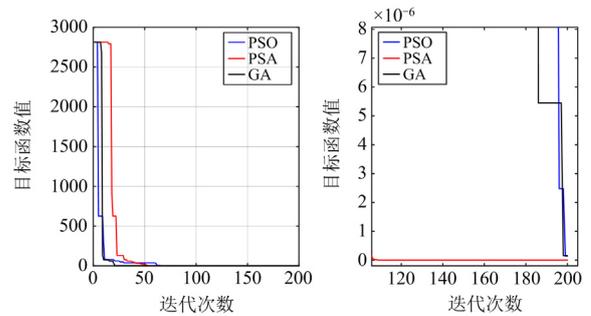
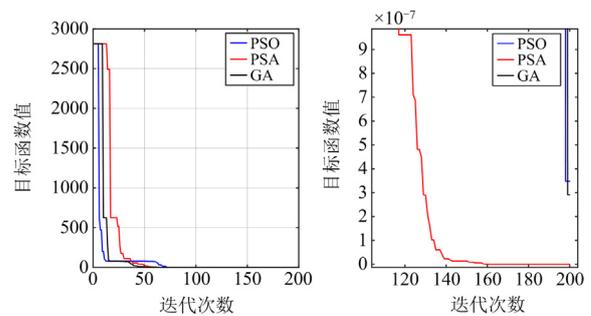
Table 4 Impedance matching results of fixed power line end load with different carrier frequencies

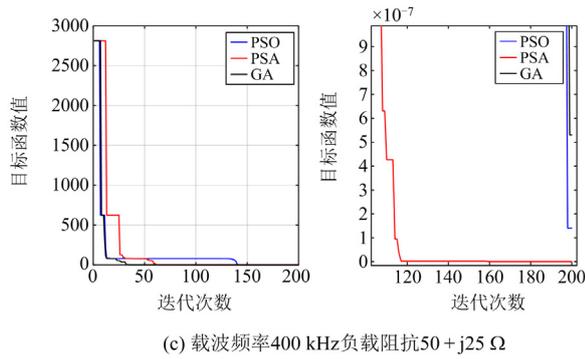
载波频率/kHz	迭代次数	PSA 最优值	PSO 最优值	GA 最优值
200	100	4.9898×10^{-9}	5.8313×10^{-5}	9.3366×10^{-5}
	150	4.0620×10^{-14}	4.0374×10^{-6}	3.4764×10^{-7}
	200	7.2505×10^{-18}	1.4716×10^{-7}	1.5650×10^{-7}
300	100	3.8846×10^{-9}	2.5881×10^{-4}	3.0447×10^{-4}
	150	1.5210×10^{-15}	5.1736×10^{-6}	9.0130×10^{-6}
	200	1.4600×10^{-17}	3.4784×10^{-7}	2.9066×10^{-7}
400	100	2.5644×10^{-8}	7.5820×10^{-4}	6.0218×10^{-5}
	150	1.5788×10^{-15}	3.0286×10^{-7}	5.7845×10^{-7}
	200	2.0897×10^{-17}	1.4071×10^{-7}	5.3043×10^{-7}

向来看,PSA 算法相比于 PSO 和 GA 算法在迭代 100 次时收敛精度高 10^5 左右,在迭代 200 次时最高达到 10^{11} 左右,可见 PSA 算法在本文自适应阻抗匹配中匹配精度远高于另外两种算法。

其中,当电力线端负载阻抗为 $50 + j25 \Omega$ 时不同的载波频率情况下,PSA、PSO 和 GA 算法目标函数值随着迭代次数的增加收敛对比如图 6(a)~图 6(c)所示,其中左图为整体收敛图,右图为局部收敛图。

由图 6 可以看出:在迭代前 40 次左右,虽然 PSO 和 GA 算法的收敛速度相比于 PSA 算法较快,但之后收敛速度减缓,而且随着迭代次数的增加,两种算法收敛精度远远不如 PSA 算法。同时,随着载波频率的增大,算法收敛速度相对减缓。

(a) 载波频率 200 kHz 负载阻抗 $50 + j25 \Omega$ (b) 载波频率 300 kHz 负载阻抗 $50 + j25 \Omega$



(c) 载波频率400 kHz负载阻抗 $50 + j25 \Omega$

图 6 固定电力线端负载不同载波频率下 3 种算法收敛对比图

Fig. 6 Convergence comparison diagram of the three algorithms of fixed power line end loads with different carrier frequencies

2) 在载波机端阻抗为 75Ω 载波通信频率为 300 kHz 情况下, 分别设置电力线端负载阻抗为 50Ω 、 $50 + j25 \Omega$ 和 $50 - j25 \Omega$, 实验结果如表 5 所示。

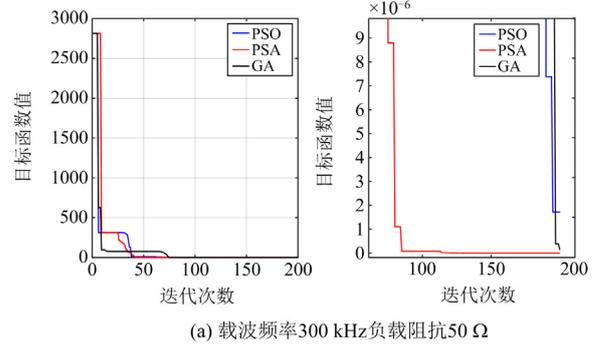
表 5 固定载波频率不同电力线端负载下阻抗匹配结果

Table 5 Impedance matching results of different power line end loads with fixed carrier frequency

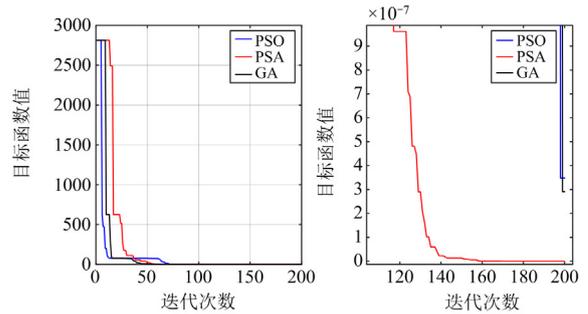
负载阻抗/ Ω	迭代次数	PSA 最优值	PSO 最优值	GA 最优值
50	100	6.7231×10^{-8}	1.2875×10^{-4}	1.9099×10^{-4}
	150	1.9380×10^{-11}	8.0134×10^{-5}	1.3061×10^{-5}
	200	2.2544×10^{-22}	1.7169×10^{-6}	1.4934×10^{-7}
$50 + j25$	100	3.8846×10^{-9}	2.5881×10^{-4}	3.0447×10^{-4}
	150	1.5210×10^{-15}	5.1736×10^{-6}	9.0130×10^{-6}
	200	1.4600×10^{-17}	3.4784×10^{-7}	2.9066×10^{-7}
$50 - j25$	100	5.4954×10^{-8}	6.2652×10^{-4}	3.5772×10^{-4}
	150	7.3053×10^{-14}	1.4783×10^{-6}	3.4194×10^{-6}
	200	2.5967×10^{-19}	3.2419×10^{-7}	1.6366×10^{-6}

由表 5 可以看出: 在固定载波通信频率情况下, 面对阻性、容性和感性的电力线端负载阻抗, PSA、PSO 和 GA 算法也都能够很好地实现阻抗匹配。随着迭代次数的增加, PSA 算法的收敛速度显然优于 PSO、GA 算法, 其中迭代每增加 50 次精度最高增加 10^{11} , 而 PSO、GA 算法迭代每增加 50 次精度最高增加 10^2 ; 同样 PSO、GA 算法在迭代 40 次后收敛速度减缓, 而 PSA 算法相比于 PSO、GA 算法在迭代 100 次时收敛精度高 10^5 左右, 在迭代 200 次时收敛精度远远高于另外两种算法, 其中最高达到 10^{16} 左右。

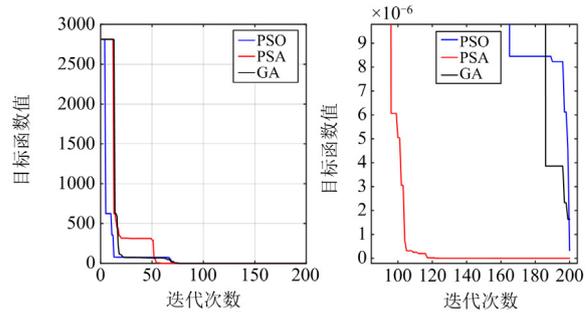
在固定载波频率为 300 kHz、不同电力线端负载阻抗情况下, PSA、PSO 和 GA 算法目标函数值随着迭代次数的增加收敛对比如图 7(a)~图 7(c)所示, 其中左图为整体收敛图, 右图为局部收敛图。



(a) 载波频率300 kHz负载阻抗 50Ω



(b) 载波频率300 kHz负载阻抗 $50 + j25 \Omega$



(c) 载波频率300 kHz负载阻抗 $50 - j25 \Omega$

图 7 固定载波频率不同电力线端负载下 3 种算法收敛对比图
Fig. 7 Convergence comparison diagram of the three algorithms of different power line end loads with fixed carrier frequency

由图 7 可以看出: 在固定载波频率、不同性质的电力线端负载情况下, PSA 算法性能表现依旧优于 PSO、GA 算法, 虽然在图 7(b)、图 7(c)中显示 PSO 和 GA 算法在迭代次数为 20 次时目标函数值相比于 PSA 算法更接近于 0, 但是随着迭代次数的增加, PSA 算法的收敛精度逐渐高于另外两种算法。可见 PSA 算法相比于另外两种算法有更好的全局搜索能力和寻优精度。同时在电力线端阻抗为阻性条件下, 3 种算法收敛速度相较于电力线端负载阻抗为感性 and 容性条件下更快。

通过使用 tic 和 toc 语句记录 3 种算法运行时间, 如图 8 所示。

由图 8 可以看出: 在相同迭代次数下 PSA 算法

运行时间远远小于 PSO、GA 算法, 其中迭代 100 次时算法运行时间分别为 0.0094 s、0.0841 s、0.0863 s, 且随着迭代次数的增加, PSA 算法运行时间的增幅相较于其他两种算法更小, 验证了 PSA 算法复杂度更小, 性能更加优异。

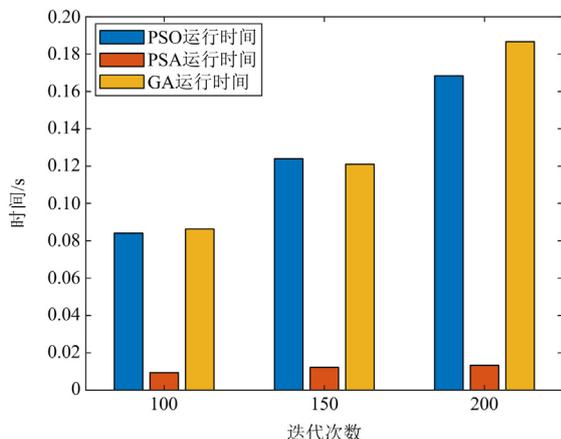


图 8 3 种算法运行时间比较图

Fig. 8 Comparison diagram of running time of three algorithms

仿真结果表明, PSA 算法相较于 PSO、GA 算法在电力线载波通信自适应阻抗匹配应用中性能更优, 在收敛速度和优化精度方面表现出色, 能够满足工程需要。

4 总结

本文从电力线阻抗匹配技术发展历程入手, 分析了中压电力线复杂阻抗环境, 提出一种基于微处理器控制的 π 型阻抗匹配系统模型, 并分析模型设计了一种实现载波机端阻抗和电力线端负载阻抗共轭匹配的目标函数, 并采用 PSA 算法在规定载波机端阻抗的情况下, 对阻抗匹配网络的元件参数进行最优化处理, 进而实现目标函数达到最优值。同时在阻抗匹配模型基础上, 对比 PSA、PSO 和 GA 算法的性能表现, 得出 PSA 算法收敛速度和优化精度表现更佳的结论, 验证了算法在该阻抗匹配模型上的有效性。随着电力线通信的发展, 电力线载波通信阻抗匹配是保证通信效率的重要一环, 因此实现算法应用化、提高算法在工程应用上的有效性是下一步研究方向。

参考文献

- [1] 王艳, 陈子璇, 赵洪山, 等. 中压配电网电力线载波通信组网优化方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 88-93, 99. WANG Yan, CHEN Zixuan, ZHAO Hongshan, et al. Optimization method of PLC communication network in medium voltage distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 88-93, 99.
- [2] 高鸿坚, 谢宏伟, 陆旭, 等. 长距离电力线载波通信数字前端技术[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 128-136. GAO Hongjian, XIE Hongwei, LU Xu, et al. Digital front end technology for long-distance power line communication[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 128-136.
- [3] 张文远, 李天昊. 电力线传输特性和噪声干扰对通信性能的相对影响[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 145-152. ZHANG Wenyuan, LI Tianhao. Relative impacts of channel characteristics and noise characteristics on the performance of a power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 145-152.
- [4] 张培玲, 赵可可. 基于单频通信的低压电力线通信系统设计与实现[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 118-127, 136. ZHANG Peiling, ZHAO Keke. Design and implementation of low voltage power communication system based on single frequency communication[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 118-127, 136.
- [5] 杨挺, 何子阳, 孙兆帅, 等. 面向并发多业务的宽带电力线载波通信跨层资源分配算法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3257-3267. YANG Ting, HE Ziyang, SUN Zhaoshuai, et al. Research on cross-layer resource allocation algorithm for concurrent multi-service in broadband power line carrier communication[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3257-3267.
- [6] SIBANDA M P, JANSE VAN RENSBURG P A, FERREIRA H C. Impedance matching with low-cost, passive components for narrowband PLC[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, April 3-6, 2011, Udine, Italy: 335-340.
- [7] 谢志远, 刘倩, 郭以贺, 等. 三相架空电力线上载波信号的传输规律[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 57-60. XIE Zhiyuan, LIU Qian, GUO Yihe, et al. Carrier signal transmission law of three-phase overhead power line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 57-60.
- [8] 黄伟, 彭显刚, 邓小康, 等. 一种可自适应多通信模块的智能电表设计[J]. 陕西电力, 2017, 45(2): 43-48. HUANG Wei, PENG Xiangang, DENG Xiaokang, et al. Design of intelligent electric meter with self-adaption multi-communication module[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(2): 43-48.
- [9] WANG Bingting, CAO Ziping, SONG Fei. Design and evaluation of a T-shaped adaptive impedance matching system for vehicular power line communication[J]. IEEE Access, 2020, 8: 73843-73854.

- [10] 胡文婧. 中压电力线载波通信自适应阻抗匹配算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
HU Wenjing. Research on adaptive impedance matching algorithm for power line carrier communication[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [11] WANG Yang, TANG Junmiao, SI Jiandong, et al. Power quality enhancement in islanded microgrids via closed-loop adaptive virtual impedance control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 163-179.
- [12] 周灵锋, 杨善水, 王莉, 等. 阻性负载下含分段噪声的间歇性直流电弧阻抗模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 85-94.
ZHOU Lingfeng, YANG Shanshui, WANG Li, et al. Intermittent DC arc impedance model with segmented noise under resistive loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 85-94.
- [13] 刘琼, 王文, 范必双, 等. 计及线路阻抗与负荷影响的不平衡配电网电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 24-31.
LIU Qiong, WANG Wen, FAN Bishuang, et al. Voltage-type arc suppression method for an unbalanced distribution network considering the influence of line impedance and load[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 24-31.
- [14] 郭以贺. 中压电力线通信关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
GUO Yihe. Research on key technologies of medium voltage power line communication[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [15] 王贤辉, 徐鲲鹏, 李铮, 等. 低压电力线载波通信零线耦合方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 222-229.
WANG Xianhui, XU Kunpeng, LI Zheng, et al. Research of neutral line coupling method in low voltage power line carrier communication[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 222-229.
- [16] 陈家玉. 中压配网载波通信卡式电感耦合器耦合原理及阻抗匹配研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
CHEN Jiayu. The coupling principle and impedance matching research of the clamp inductive coupler on medium voltage distribution network carrier communication[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [17] MAZZA N M. Automatic impedance matching system for RF sputtering[J]. IBM Journal of Research & Development, 2010, 14(2): 192-193.
- [18] 易如方. 射频天线的遗传算法自适应阻抗匹配[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
YI Rufang. RF antenna adaptive impedance matching based on genetic algorithms method[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [19] 范函, 张浩. 一种电力线载波通信自适应阻抗匹配方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 79-82.
FAN Han, ZHANG Hao. A solution of adaption impedance matching for power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 79-82.
- [20] 肖元强, 曹敏, 李川, 等. 基于 PSO 的低压电力线载波通信阻抗自适应匹配[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 133-137.
XIAO Yuanqiang, CAO Min, LI Chuan, et al. Adaptive impedance matching of the PLC based on PSO[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 133-137.
- [21] 宋建立, 谭阳红, 张海霞, 等. 基于 QPSO 算法的电力载波通信自适应阻抗匹配[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(1): 228-233.
SONG Jianli, TAN Yanghong, ZHANG Haixia, et al. Adaptive impedance matching for power line communication based on quantum particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(1): 228-233.
- [22] ASHRAF T S H, NARIMAN Z N, JAMALI A. Multi-objective parametric design of PI/PID controllers via multi-level game-theoretic optimization for systems with time delay[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(13): 2532-2544.
- [23] GAO Y. PID-based search algorithm: a novel metaheuristic algorithm based on PID algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 232: 120886.

收稿日期: 2024-04-12; 修回日期: 2024-06-11

作者简介:

谢志远(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为互感器、电气信息分析与处理; E-mail: zhiyuanxie@ncepu.edu.cn

曹通(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力线通信。E-mail: 1106342168@qq.com

(编辑 张颖)