

# 小型微电网系统电能计量表自动化控制研究

裘 星,尹仕红,张之涵,潘深琛,江敏丰,杨建明

(深圳供电局有限公司,广东 深圳 518001)

**摘要:**小型微电网系统电能智能管理过程中,依靠基础的 PID 算法对电能计量表进行自动化控制,易受震荡作用影响,导致该控制模式下电能计量表的示值误差较大。因此,该文研究了一种新型小型微电网系统电能计量表自动化控制方法。考虑电能计量表工作原理,运用均值偏移算法实时跟踪计量表运行参数。建立 CAN 大数据通信协议,实现运行参数和控制指令的高质量传输。以 PLC 控制思想为核心,结合遗传优化 PID 整定算法搭建自动化控制框架。再引入多目标优化思想,完成对电能计量表多目标协同自动化控制。实验结果表明:应用新研究方法对电能计量表运行状态进行自动化控制后,远程自动抄表的示值误差不超过  $\pm 0.5\%$ ,满足了电能计量的准确性要求。

**关键词:**微电网;电能计量表;自动化;运行偏移算法;控制指令;遗传优化 PID 整定算法

中图分类号:TM933

文章编号:1000-0682(2024)05-0055-05

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.011

## Research on automatic control of energy meter in small microgrid system

QIU Xing, YIN Shihong, ZHANG Zhihan, PAN Shenchun, JIANG Minfeng, YANG Jianming

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518001, China)

**Abstract:** In the process of intelligent management of electric energy in small microgrid systems, relying on basic PID algorithms for automatic control of electric energy meters is easily affected by oscillation, resulting in significant reading errors in the electric energy meters under this control mode. Therefore, a new type of automatic control method for energy metering meters in small microgrid systems is studied. Consider the working principle of electric energy meters and use the mean shift algorithm to track the operating parameters of the meters in real time. Establish a CAN big data communication protocol to achieve high-quality transmission of operating parameters and control instructions. Build an automation control framework with PLC control concept as the core, combined with genetic optimization PID tuning algorithm. Further introduce the concept of multi-objective optimization to achieve multi-objective collaborative automation control of electric energy metering meters. The experimental results show that after applying the new research method to automatically control the operation status of electric energy meters, the indication error of remote automatic meter reading does not exceed  $\pm 0.5\%$ , meeting the accuracy requirements of electric energy metering.

**Keywords:** microgrid; electricity metering meter; automation; run offset algorithm; control instructions; genetic optimization PID tuning algorithm

## 0 引言

微电网系统能够整合各种分布式电源,如光伏、风电、小型燃气轮机等<sup>[1]</sup>,实现能源的互补和优化

利用,从而满足局部区域的电力需求。其中,小型微电网系统以其灵活、高效、环保的特点,在偏远地区、城市新区以及工业园区等领域具有广阔的应用前景。电能计量表作为微电网系统中的关键设备,对小型微电网系统的稳定运行和能效分析至关重要<sup>[2]</sup>。因此,研究电能计量表的自动化控制技术,提高电能计量的准确性和实时性,成为当前小型微

收稿日期:2024-03-21

第一作者:裘星(1990—),男,汉族,学士,助理工程师,主要研究方向为电能计量技术检测研究工作等。

电网系统发展的重要课题。

文献[3]结合监控设备、通信系统、数据传输协议和控制系统,组成智能化控制框架。根据实时采集的运行数据和远程控制要求,实现目标设备的自动化控制。但是,该系统实际运行过程中可能受到设备故障、软件错误、通信中断等影响,出现崩溃或异常运行,说明该自动化控制方法的稳定性较差。文献[4]提出在大数据环境下,设计基于 CAN 总线的通信协议。结合实时采集的运行参数和自动化控制指标,生成具体的控制指令,并对其进行编码转换处理,所得编码结果通过通信协议传输到执行终端,完成具体的控制行为。实验结果表明,随着系统规模的扩大和功能的增加,自动化机械仪表控制系统的复杂性也会增加,其对海量数据的处理速度较慢,无法满足自动化控制的实时性要求。文献[5]以神经网络为核心,设计一种自适应分散控制算法。针对控制要求和当前运行参数进行匹配,并推理出具体的控制参数,经由自触发机制执行具体的控制方案。但是,在实际应用中,该方法可能受到学习速度、收敛速度的限制,导致其应用拓展性较差。文献[6]依托于全驱动系统理论,设计考虑时滞特点的自适应控制器,并提出具体的控制约束条件。根据系统状态参数绝对值与未知非线性参数的乘积,推导出控制过程中涉及的不确定参数,将其代入自适应控制过程中,保证控制器的稳定运行。应用结果显示,因为时滞的存在可能导致该方法应用时参数估计的不准确或不稳定,从而导致自动化控制误差较大。

遗传整定 PID 算法作为一种结合了遗传算法和 PID 控制算法的优化方法,具有全局搜索能力强、收敛速度快、鲁棒性高等优点,在控制领域得到了广泛应用。将遗传整定 PID 算法应用于小型微电网系统电能计量表的自动化控制中,可以实现对电能计量表参数的智能整定和优化,提高电能计量的准确性和稳定性。

## 1 设计方法

### 1.1 建立电能计量表运行参数跟踪方案

针对小型微电网系统电能计量表的工作模式进行深入分析,并绘制得到图 1 所示的工作原理图。

图 1 中,电能计量表工作过程中需要经历多个操作环节,任意一个环节的运行参数出现问题,都会影响计量表示数结果的准确程度。因此,在自动化控制方法研究过程中,先运用均值偏移算法,对电能

计量表实时运行参数进行跟踪<sup>[7]</sup>。先建立一个简单的电能计量表数学模型,如式(1)所示:

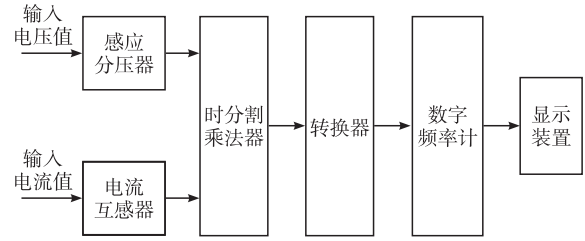


图 1 小型微电网系统电能计量表工作原理图

$$A = \{a_o\}_{o=1,2,3,\dots,n} \quad (1)$$

式中, $A$  表示设备数学模型, $a$  表示基本运行参数值, $o$  表示维, $n$  表示参数总维度。

引入核直方图思想,定义式(2)所示的运行参数跟踪目标数学模型:

$$B(\varepsilon) = \{b_o(\varepsilon)\}_{o=1,2,3,\dots,n} \quad (2)$$

式中: $B$  表示跟踪目标数学模型; $\varepsilon$  表示直方图值; $b$  表示跟踪得到的基本参数值。

采用相似函数,计算基本运行参数与跟踪参数之间的相似程度:

$$d(\varepsilon) = d[b_o(\varepsilon), a_o] \quad (3)$$

式中: $d$  表示相似度。

随后,代入一个核权值,用以分析两个数学模型中特征出现概率,得到:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m k(\|\chi_i\|^2)} \\ a_o = c_1 \sum_{i=1}^m k(\|\chi_i\|^2) g[h(\chi_i) - o] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} c_2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m k\left(\left\|\frac{\varepsilon - \chi_i}{\varphi}\right\|^2\right)} \\ b_o = c_2 \sum_{i=1}^m k\left(\left\|\frac{\varepsilon - \chi_i}{\varphi}\right\|^2\right) g[h(\chi_i) - o] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $c_1, c_2$  表示标准化因子; $\chi$  表示电能计量表数学模型中的标准化参数; $i$  表示参数编号; $m$  表示标准化参数总量; $k$  表示核轮廓函数; $g, h, \Phi$  分别表示 Kronecker delta 函数、量化函数和带宽。

获取电能计量表运行参数跟踪值时,需要确保两个数学模型之间的距离最小。因此,从均值偏移算法给出的矢量梯度信息入手,在直方图上对两个模型的参数值进行初始化处理,并根据初始特征值附近变化情况,给定合理的特征权值<sup>[8]</sup>,由此来确定跟踪目标值。

$$\varepsilon_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \chi_i w_i \left( \left\| \frac{\varepsilon_0 - \chi_i}{\varphi} \right\|^2 \right)}{\sum_{i=1}^m w_i \left( \left\| \frac{\varepsilon_0 - \chi_i}{\varphi} \right\|^2 \right)} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_0$  表示初始化参数值;  $\varepsilon_1$  表示下一个跟踪目标值;  $w$  表示特征权值。

将式(6)计算结果代入式(3)内进行重新计算,若所得出的相似函数和初始参数条件下的相似函数相比更大,代表此时计算出的参数皆为电能计量表运行参数跟踪结果。

### 1.2 设计控制指令传输方法

在电能计量表自动化控制方法研究过程中,以 CAN 大数据通信协议为基础<sup>[9]</sup>,设计一种控制指令传输方法,用以实现在大数据环境中将运行参数跟踪结果传输到控制终端,并进终端控制指令映射到主动、被动控制终端<sup>[10]</sup>。在通信协议的辅助下,控制指令的传输执行过程可以描述为图 2。

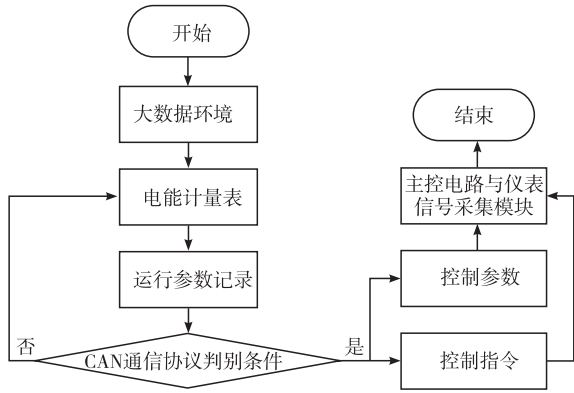


图 2 CAN 通信协议执行流程图

图 2 中,小型微电网系统电能计量表自动化控制质量传输的终点是主控电路与仪表信号采集模块,求出电能计量表管控信号输出值和控制电流传输均值。这种物理条件下,CAN 通信协议的连接作用能力可以通过公式(7)表述出来:

$$R = \frac{\delta_{\max} |\Delta T| - \frac{1}{3} \gamma G^3}{\int_{-\infty}^{+\infty} (p_2 - p_1)^2} \quad (7)$$

式中:  $R$  表示通信协议连接作用能力;  $\delta_{\max}$  表示管控信号最大输出值;  $\Delta T$  表示电能计量表运行周期;  $\gamma$  表示设备工作参数;  $G$  表示控制电流传输均值;  $p_1, p_2$  分别表示电能计量表工作指标取值条件。

### 1.3 基于遗传优化 PID 整定算法构建自动化控制架构

根据电能计量表运行参数跟踪结果确定设备运行状态后,对比当前电能计量表运行要求,设计一种

结合 PLC 和 PID 算法的自动化控制架构,如图 3 所示。通过该结构内的逻辑运算、顺序控制等模块,执行传输过来的控制指令。

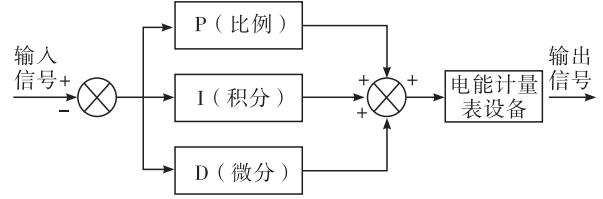


图 3 PLC 自动控制器结构图

图 3 中,电能计量表运行状态自动化控制指令的执行,主要通过 PID 算法包含的比例、积分和微分控制参数来实现,具体的自动化控制规律如公式(8)所示:

$$\theta(t) = K_1 + K_2(t) + K_3 \quad (8)$$

式中:  $t$  表示控制时间;  $\theta$  表示自动化控制输出结果;  $K_1, K_2, K_3$  分别表示比例、积分和微分控制参数。

引入离散化处理思想,对上述自动化控制规律进行优化,得到改进后的控制参数。

$$\tilde{\theta}(t) = K_1 [e(t) - e(t-1)] + K_2 e(t) + K_3 [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (9)$$

式中:  $\tilde{\theta}$  表示改进后的控制输出参数;  $e$  表示离散化处理系数。

为了增强电能计量表自动化控制效果,保证小型微电网系统电能计量装置稳定运行,在基础的 PID 控制算法之上,结合遗传优化算法,通过不断迭代寻优处理,找到最优控制参数<sup>[11]</sup>,将其带回至 PLC 自动控制器中,完成 PID 控制参数的整定处理。遗传算法寻优过程中,将解空间内所有可能应用的控制参数组合方案看作一个个独立的个体,组成初始种群后,根据适应度实现种群个体的选择。再展开交叉和变异处理,避免遗传算法寻优结果陷入局部最优。正常状态下,交叉和变异概率的自适应变化曲线如图 4 所示。

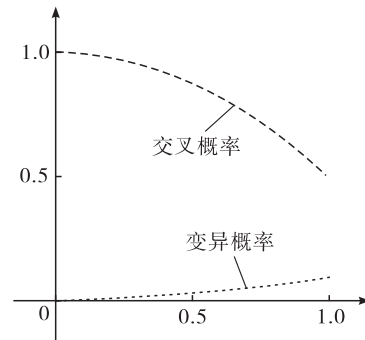


图 4 交叉和变异概率自适应曲线

从图 4 可知,种群迭代过程中交叉概率处于不断下降的趋势,变异概率则处于不断上升趋势,需要找到一个变异概率较大且交叉概率较小的指标值,留下群体内较为优质的个体,进入下一次迭代寻优计算,直到满足最大迭代次数要求,即可输出最佳控制参数,实现电能计量表运行模式自动化控制。

#### 1.4 实现电能计量表多目标协同控制

由于电能计量表工作环境复杂,可能存在一次性自动化控制多目标的情况,这种情况下,引入集散控制法思想<sup>[12]</sup>,定义电能计量表多目标协同控制输出结果为:

$$V_j = \tau_j(\psi_1, \psi_2, L) \quad (10)$$

式中: $j$  表示待控制的电能计量表数量; $V$  表示集散控制输出结果; $\tau$  表示搜索空间; $L$  表示比例因子; $\psi_1, \psi_2$  分别表示偏差和偏差变化率量化因子。

设置输出能量、偏差值、偏差方差等几个自动化协同控制优化目标,生成公式(11)所示的电能计量表自动化控制优化多目标函数。

$$\min F(\varpi) = [\zeta_1(\varpi) \zeta_2(\varpi) \zeta_3(\varpi)] \quad (11)$$

式中: $\min$  表示最小值; $F$  表示多目标优化函数; $\varpi$  表示决策变量; $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  表示自动化控制优化目标函数。

在微电网系统电能计量表多目标协同控制背景下,求出上述多目标优化函数的最优解,即可生成最优自动化控制指令,通过 CAN 通信协议将其传递至自动化控制架构中,实现目标设备的远程自动化控制。

## 2 仿真实验

### 2.1 实验平台

针对小型微电网系统电能计量表,开发出一种基于遗传优化 PID 算法的新型自动化控制方法后,为了检验该方法的实践应用效果,展开一系列实验参数。在实验平台搭建阶段,参考小型微电网系统真实架构,搭建图 5 所示的平台结构。

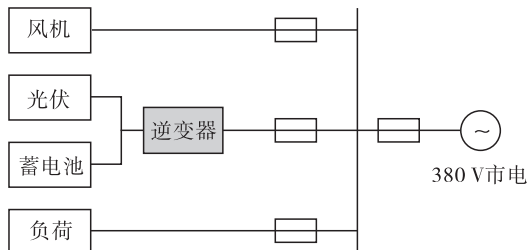


图 5 实验平台结构图

上述实验平台中应用的各种模拟设备参数,都仿照真实微电网系统按比例设置,最终得到各个设

备的型号、容量参数设置结果如表 1 所示。

表 1 设备参数

设备	型号	容量/W
光伏	—	100
蓄电池	—	100
逆变器	—	300
发电机(风机)	M08	400
原电机(风机)	M24	400
负荷	—	200

按照上述实验结果搭建实验用小型微电网系统架构后,最终形成的实物如图 6 所示。图 6 中,框图标注的区域是电能计量表安装区域,该装置内部结构也标注在图内。在上述实验平台上,分别运用新研究方法和文献[3]、文献[4]提出方法对电能计量表运行状态进行自动化控制,并获取每种方法自动化控制后的远程自动抄表结果,观察电能计量表显示数值与真实值之间的误差,以此来度量不同控制方法的应用效果。

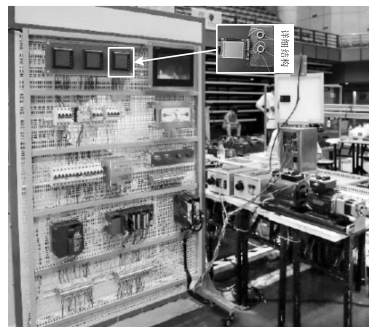


图 6 实物图

### 2.2 自动化控制结果

在电能计量表自动化控制过程中,需要运用遗传算法优化 PID 控制参数。其中,遗传算法迭代求解得到的最优目标函数值收敛结果如图 7 所示。从图 7 可知,经过 15 次迭代运算后,最优目标函数值达到稳定值,此时求出的控制参数为最佳 PID 控制参数,得到比例、积分和微分控制常数分别为 1.051 1、0.167 7、1.647 4。

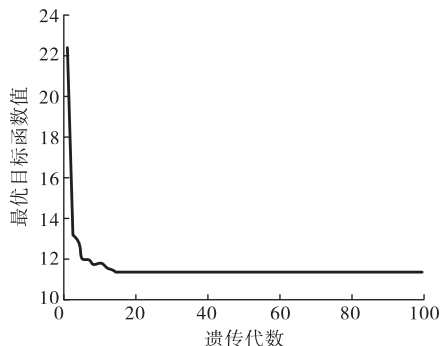


图 7 最优目标函数值迭代曲线图



在上述控制参数条件下,驱动电能计量表正常运行,并在远程抄表自动化控制指令下,得到图8所示的示值结果。从图8可以看出,新研究自动化控制方法应用后,电能计量表可以正常运行,并根据具体的控制指令得出贴合实际情况的示值结果,证明了新研究方法是可行的。



图8 电能计量表自动化控制下示值结果

### 2.3 控制方法应用性能对比

以小型微电网系统实验平台上任意一个电能计量表为例,新研究方法和两种文献提出控制方法应用后,统计电能计量表示值结果与当前状态下真实检测数值,通过公式(12)计算出每种自动化控制方法应用后,电能计量表示值误差。

$$\rho = \frac{\Gamma - \Gamma'}{\Gamma'} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $\rho$ 表示示值误差; $\Gamma$ 表示自动化控制后得出的远程抄表结果; $\Gamma'$ 表示真实检测数值。

从频率示数、电压示数和电流示数三方面入手,不同自动化控制方法实施后,远程抄表结果示值误差对比结果如图9所示。从图9可知,新型自动化控制方法应用后,电能计量表给出的示值结果更加准确,频率示值、电压示值和电流示值的误差均不超过 $\pm 0.5\%$ ,误差相比另外两种方法有了大幅度降低,充分证明了自动化控制新方法的优越性能。

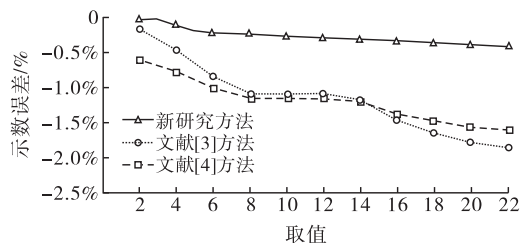
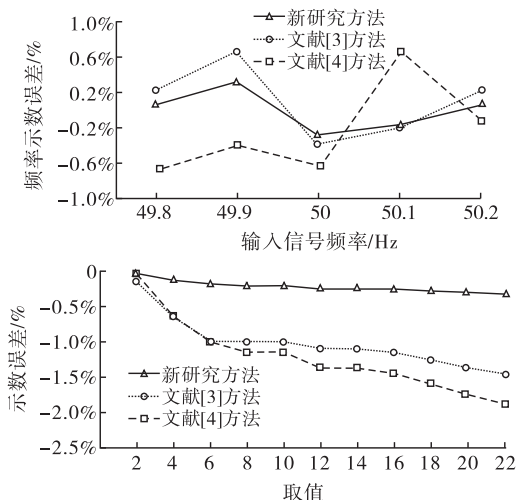


图9 不同方法自动化控制远程抄表结果示值误差对比

### 3 结束语

该文深入探讨了基于遗传整定PID算法的电能计量表自动化控制方法,旨在提高电能计量的准确性和实时性。通过该方法的应用,微电网系统的运行效率和能源管理水平得到了显著提升。

#### 参考文献:

- [1] 韩玉环,秦志沁,张毅,等. 基于深度学习的电能计量装置运行状态评估模型研究[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(01): 111-119.
- [2] 李亮波,解金芳,耿睿,等. 基于 INSGA- II 的电能计量器具自动化检定系统期间核查方案研究[J]. 计量学报, 2023, 44(08): 1248-1255.
- [3] 王世侠. 煤矿变电站自动化控制系统[J]. 工矿自动化, 2023, 49(S2): 150-151.
- [4] 周巍,陈帅,侯丹. 面向大数据环境的自动化机械仪表控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2022, 44(01): 206-208+212.
- [5] ZHU Z, ZHU Q. Fixed-time adaptive neural self-triggered decentralized control for stochastic nonlinear systems with strong interconnections[J]. Neurocomputing, 2023, 523(28): 92-102.
- [6] NING P J, HUA C C, MENG R. Adaptive control for a class of nonlinear time-delay system based on the fully actuated system approaches[J]. Journal of Systems Science & Complexity, 2022, 35(2): 522-534.
- [7] 陈祉如,代燕杰,杜艳,等. 基于小样本故障率的智能电能表可靠度预估模型[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(01): 218-225.
- [8] 朱铮,陈海滨,蒋超,等. 一类电压采样电阻异常的电能表计量失准研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2022, 41(06): 682-688.
- [9] 齐霖,李威,宁亮,等. 基于模糊神经网络的电网调度自动化控制系统[J]. 制造业自动化, 2022, 44(01): 118-122.
- [10] 许涛,张闯,刘洋,等. 基于 LoRa 技术的智能电能表研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(08): 194-200.
- [11] 刁瑞朋,王强,卢志俊. 零线断接对三相四线电能表计量影响机理分析[J]. 计量学报, 2023, 44(05): 750-757.
- [12] 陈昊,杜新纲,葛得辉,等. 基于期望最大化算法的电能表误差估计技术[J]. 中国测试, 2023, 49(03): 47-52.