

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211421

基于一二次深度融合的多智能体 FTU 研究

雷杨¹, 杨帆¹, 沈煜¹, 杨志淳¹, 陈前臣², 郭瑶³, 王少荣³

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 豪迈电力自动化技术有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在主动配电网条件下, 馈线终端单元 FTU 的功能和性能都需要拓展与提升。针对以上背景, 提出了一种基于一二次深度融合的多智能体 FTU。这种 FTU 包括宽带电压传感器、宽带电流传感器、信号转换单元 ADCU 和主控单元 MCU 4 个部分。其中: ADCU 承担数据采集、电能计量及分合闸控制命令转换任务; MCU 配置了北斗/GPS 接收机, 承担 PMU、故障识别与隔离以及无线通信任务; MCU 与 ADCU 的数据交换采用高速光纤通信, 通信协议可以灵活选择或自定义; MCU 与 ADCU 之间仅工作电源有电气连接, 消除了电气连接环路, 有效地提高了抗干扰能力。详细设计了所提多智能体 FTU 的系统结构、基于文氏桥电路的宽带电压传感器和铁芯带气隙的宽带电流传感器。重点研究了多智能体的“环境”构建方法和同步协调机制、特定功能智能体的设计原则和结构。所提技术方案满足配电自动化设备集成化和智能化的设计理念, 拓展了 FTU 的功能, 提高了 FTU 的性能, 为本领域研究者提供了一种新的思路。

关键词: FTU; 一二次设备深度融合; 宽带传感器; 配电网 PMU; 电能计量; 多智能体

A multi-agent FTU based on deep-merging of primary and secondary equipment

LEI Yang¹, YANG Fan¹, SHEN Yu¹, YANG Zhichun¹, CHEN Qianchen², GUO Yao³, WANG Shaorong³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. Haomai Electric Power Automation Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In an active distribution network (ADN), the function and performance of a Feeder Terminal Unit (FTU) need to be improved and expanded. In this paper a multi-agent system (MAS) FTU based on deep-merging of primary and secondary equipment is proposed. The proposed FTU includes four parts: a wide-band voltage sensor, a wide-band current sensor, an analog to digital converter and control output unit (ADCU) and a main control unit (MCU). Among them, ADCU is responsible for data acquisition, electric energy metering and the conversion of switching control commands. The MCU with a Beidou /GPS receiver undertakes the tasks of PMU, fault identification, fault isolation and wireless communications. High-speed optical fiber communication is adopted for the data exchanging between the MCU and the ADCU, in which the communication protocol can be flexibly selected or customized. The only electrical connection between the MCU and ADCU is for working power supply, and this eliminates the electrical connection loop and effectively improves the anti-interference ability. The system structure of the proposed multi-agent FTU, the wide-band voltage sensor based on Wien bridge circuit, and the wide-band current sensor with iron core and air gaps are designed in detail. The key aspects studied are the construction method of the MAS environment, the design of the MAS synchronized coordination mechanism, and the design principles and structures of specific function agents. The proposed technical scheme fulfills the design concept of integration and intelligence of distribution automation equipment, expanding the functions of the FTU, improving the performance of the FTU, and providing a new idea for research in the field.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800).

Key words: FTU; deeply-merging of primary and secondary equipment; wide-band sensor; PMU for distribution network; electric energy metering; multi-agent system

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800)

0 引言

随着智能配电网建设的不断推进, 智能化开关设备需求不断加大。同时, 也使得传统意义上的一、二次设备的界限变得模糊, FTU 与开关本体、电压电流互感器/传感器的融合也在不断加深^[1-2]。作为配电自动化系统的核心设备之一, 馈线终端单元 (Feeder Terminal Unit, FTU) 不仅具有数据采集和数据传输功能, 而且, 与配电自动化主站配合, 能够实现配电网的故障识别和故障隔离等功能^[3]。进一步, FTU 将会整合配电网 PMU 功能和电能计量功能, 其与配电网其他系统不断融合应用已经成为发展趋势^[4-9]。

近十多年来, 我国学术界和工业界针对 FTU 的研究不断深入。文献[10]较深入地研究了 FTU 的健康状态评估问题, 构建了评估指标体系和评估模型, 并基于云模型确定基础层指标隶属度。文献[11]专门研究了 FTU 的人机交互接口和人机交互界面, 设计并实现了一种实用的 FTU 人机交互子系统。文献[12]专门研究 FTU 的无接触运行维护终端, 采用蓝牙通信实现 FTU 与 PDA 和手机的信息交互, 并开发了 PDA 终端维护软件和手机 APP。文献[13]研究实际配电网的馈线自动化系统, 对 FTU 的功能和性能作了比较清晰的描述, 并提及 FTU 采用光纤通信, 这使得 FTU 的数据交换的可靠性大为提高。文献[14]则研究基于故障可观性指标的 FTU 最优配置问题, 从应用的角度看, FTU 的功能和性能都应该满足相应的应用目标要求。

近年来, 业界出现了将电子式电压、电流传感器与数字化单元 ADMU 紧密结合, 形成了将 AD 转换单元与主控单元相分离的新型 FTU 结构模式。这种新结构模式的 FTU, AD 转换单元与主控单元之间采用 RS485 差分信号通信线连接, 并遵循 IEC 60870-5-1 的 FT3 协议, 在抗电磁干扰和接口标准化方面具有一定优势。但是, AD 转换单元与主控单元之间采用导线进行通信, 抗强电磁干扰能力仍然存在不足。此外, 由于采用 RS485 接口传输采样值数据, 对通信速率要求很高, 也容易产生误码。

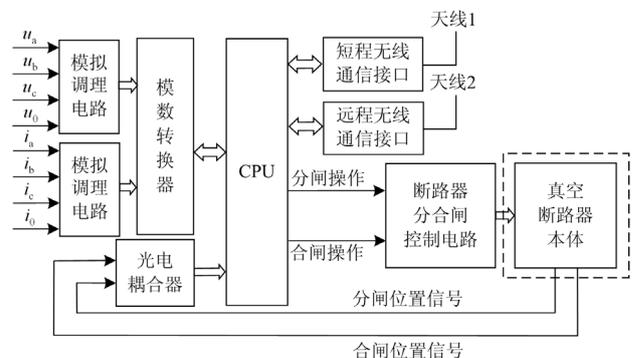
多年来, FTU 在实际应用中也暴露出一些不足或问题^[15-16]。例如: 柱上开关 FTU 安装在配电线路的杆塔上, 运行环境恶劣, 电磁干扰复杂, 长期运行的可靠性还不够理想; 在一些偏远山区, 远程无线通信系统比较薄弱, 数据交换误码率较高。此外, 可再生能源分布式发电在配电网层面的大量接入, 将大量电力电子装置引入配电网, 对配电网的 FTU 功能和性能提出了新要求。

此外, FTU 具有综合功能的重要设备, 将朝着智能化的方向发展, 且适合采用多智能体系统 (Multi-Agent System, MAS) 理念进行设计。多智能体系统是将复杂系统功能适当划分为多项子功能, 用多个设计复杂度较低的智能体完成各个子功能, 再用智能体之间的协作或博弈机制完成整个系统的复杂功能。实际上, 较早就有将多智能体系统的技术应用于电力系统的研究^[17-19]。近些年来, 随着人工智能、大数据技术等迅猛发展和推广应用, 将多智能体系统应用于电力系统的研究又有不少成果。比如: 文献[20]将多智能体迁移强化学习算法用于碳-能复合流求解; 文献[21]利用多智能体系统快速求解复杂问题的能力, 提出了一种基于多智能体竞价均衡的微电网优化运行方法; 文献[22]则研究了基于多智能体系统的微电网群内电力市场的交易策略; 文献[23]研究微电网有功功率分布式下垂控制问题, 提出了一种基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制方法; 文献[24]针对智能电网的自愈问题, 提出了一种基于多智能体的混合实时调度模型和求解方法; 文献[25]则将多智能体系统技术用于大规模空调负荷参与电力系统调峰的协同控制。从配电网的发展趋势看, 智能化是必由之路^[26-27]。然而, 有关多智能体 FTU 的研究, 目前尚未见报道。

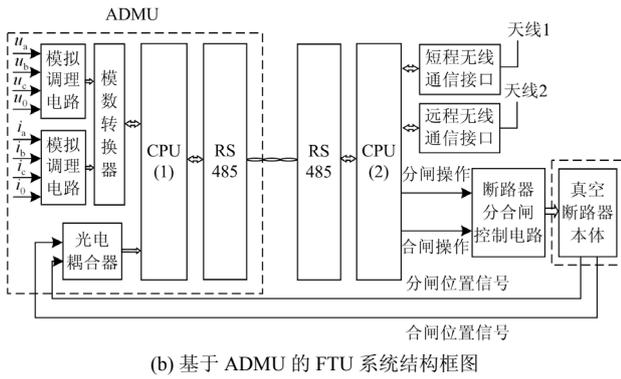
基于上述背景, 本文提出一种基于一二次深度融合的多智能体 FTU, 可以采用传统电压、电流互感器, 也可以采用电子式电压、电流传感器。本文详细设计了所提多智能体 FTU 的系统结构、基于文氏桥电路的宽带电压传感器、铁芯带气隙的宽带电流传感器、多智能体“环境”设计、多智能体同步协调机制以及特定功能智能体的设计原则和结构。

1 多智能体 FTU 的系统结构

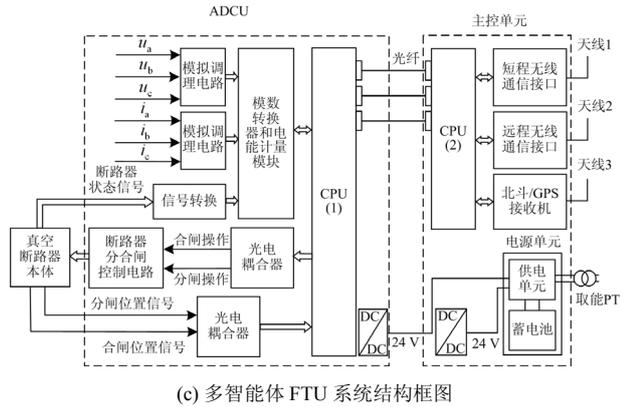
图 1 用于说明传统 FTU、基于 ADMU 的 FTU 与本文所提多智能体 FTU 在系统结构上的差异。



(a) 传统 FTU 的系统结构框图



(b) 基于 ADMU 的 FTU 系统结构框图



(c) 多智能体 FTU 系统结构框图

图 1 三种 FTU 的系统结构框图

Fig. 1 Systematic diagrams of three kinds of FTU

图 1(a)为传统 FTU 的系统结构框图，其输入的模拟量信号包括：三相电压 u_a 、 u_b 、 u_c 和零序电压 u_0 ；三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 和零序电流 i_0 。其输入的开关量信号为断路器分闸位置信号和合闸位置信号。其输出的控制信号为断路器的合闸电流脉冲和分闸电流脉冲。这种 FTU 有 2 个无线通信接口，一个用于短程无线通信，另一个用于远程无线通信。

图 1(b)为基于 ADMU 的 FTU 系统结构框图，其与传统 FTU 的区别有两点：一是采用电子式电压电流传感器，并配套采用模数转换模块化单元 ADMU 将输入的电压、电流模拟信号以及柱上断路器位置信号转换为数字量；二是采用曼彻斯特编码和 FT3 传输协议，通过 RS485 通信接口将采样值数据和断路器位置信息发送给主控单元。实际上，基于 ADMU 的 FTU 与传统 FTU 在功能和性能方面十分相似，其优点是采用了电子式电压电流传感器，减小了电压电流传感装置的体积，而配套采用 ADMU 和 RS485 通信较好地避免了电子式电压电流传感器输出弱模拟信号的长线传输问题。

图 1(c)为本文提出的基于一二次深度融合的多智能体 FTU 的系统结构框图，包括宽带电压传感器、宽带电流传感器、信号转换单元(Analog to Digital

Converter and Control Output Unit, ADCU)和主控单元 MCU(Main Control Unit, MCU) 4 个部分。所提的多智能体 FTU 技术方案，特别考虑了主动配电网条件下新型 FTU 在广域同步测量、高次谐波测量以及电能计量方面的需求。其中：ADCU 承担柱上断路器安装处的电压、电流信号和断路器状态的数据采集以及电能计量任务，并将来自 MCU 的分合闸控制命令转换为控制脉冲输出以实现对其柱上断路器的分合控制；MCU 则配置了北斗/GPS 接收机，承担配电网 PMU、配电网故障识别与隔离以及无线通信的任务。MCU 与 ADCU 之间，数据交换采用高速异步串行通信方式，通信介质采用光纤，通信协议可以灵活选用或自定义；ADCU 和 MCU 之间仅工作电源有电气连接，消除了电气连接环路，从而有效地提高了抗电磁干扰能力。为了与所提多智能体 FTU 配套，本文还新设计了基于文氏桥电路的宽带电压传感器和铁芯带气隙的宽带电流互感器。

图 2 为本文提出的基于一二次深度融合的多智能体 FTU 在配电线路杆塔上的布置示意图。

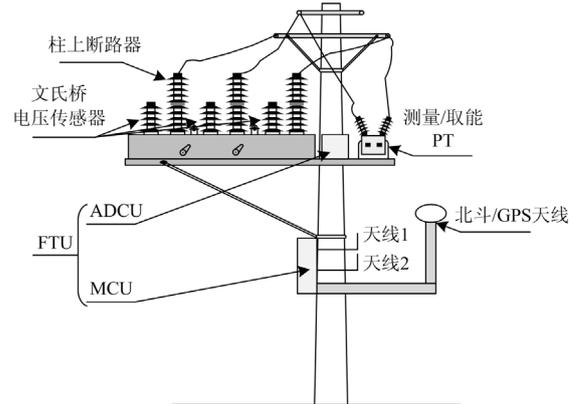


图 2 本文所提多智能体 FTU 在杆塔上的布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arrangement of the proposed multi-agent FTU on the tower

从图 2 可知，MCU 安装于杆塔的中部，而 ADCU 与真空断路器外壳集成，安装于杆塔上部。其中，基于文氏桥电路的 A、B、C 三相宽带电压传感器采用绝缘浇注成型与柱上真空断路器支柱并排布置，取能 PT 的布置方式与常规 FTU 相同。此外，由于铁芯带气隙的 A、B、C 三相宽带电流传感器安装在真空断路器的出线端，布置方式与传统的相同，位于背面，图 2 未能示出。

本文提出的基于一二次深度融合的多智能体 FTU 的特点在于：(1) 在系统结构方面，充分考虑了功能分解、空间临近布局和电气连接解环 3 个方面的因素，将所提多智能体 FTU 分为清晰的 ADCU

和 MCU 两个部分。两者之间采用光纤通信实现数据交换, 仅工作电源存在直接电气连接, 不仅大大减少了两者之间的连线, 并且因消除了电气连接环路而有效提高了 FTU 的抗强电磁干扰能力。同时, 这种系统结构方式还为 FTU 的升级与更新创造了有利条件。因为安装于杆塔上部的 ADCU 用于数据采集, 需要升级的概率很低, 而安装了主要功能软件的 MCU 则安装在杆塔中部, 升级与更新较为方便。(2) 在功能配置方面, 充分考虑了大量分布式电源通过电力电子换流器接入配电网之后, 监视、分析和诊断配电网及其设备对于数据采集的需要, 配套设计了宽带电压传感器和宽带电流传感器, 增加了谐波测量、配电网 PMU 和线路电能计量等功能, 拓展了 FTU 的用途, 提升了 FTU 的性能。(3) 在智能化方面, 所提多智能体 FTU 的软件采用多智能体架构, 在降低系统设计复杂度的同时, 提升了 FTU 的鲁棒性、可靠性和构建灵活性。

2 宽带电压电流传感器设计

FTU 的主要功能是采集配电网柱上断路器安装处的三相电压、三相电流、零序电压和零序电流, 以供配电自动化系统实施正常运行监视和故障识别功能。传统 FTU 采用常规电磁式电压、电流互感器, 但其电压、电流的传感精度不是很高, 通常还需配置专门零序电流互感器以提升对零序电流的传感精度。同时, 常规电磁式电压、电流互感器的高频分量传感误差过大, 难以满足主动配电网暂态过程的传感需要。基于 ADMU 的 FTU, 采用了电子式电压、电流传感器。常见的电子式电流传感器采用罗氏线圈, 应用于柱上断路器的 FTU 时, 其布置位置与断路器触头很近, 附近的一次电流产生的多个方向的磁力线将不可避免地与其部分小线圈匝链, 从而引起电流传感的较大误差。而常见的用于中压配电网的电子式电压传感器有电阻分压器和电容分压器两种。前者的传感精度受到杂散电容的影响, 并不易解决发热和带负载能力之间的矛盾; 后者虽然耐压比电阻分压器好, 但对高频分量呈现较低阻抗, 会放大配电网中的高次谐波电流。随着传感技术的不断发展, FTU 还采用阻容分压器实现对电压的传感。同时, 基于 ADMU 的 FTU 还利用阻容分压器取能为 ADMU 提供工作电源。虽然, 这种模式的数字化单元 ADMU 无需传统的取能 PT 提供工作电源, 但是, 从整个 FTU 的运行看, 取能 PT 还是需要的, 因为远程无线通信以及断路器分合闸控制均需要较大功率, 不可能依靠兼顾电压传感和取能的一组阻容分压器提供工作电源。

鉴于上述实际情况, 针对本文提出的多智能体 FTU 的配套使用, 提出了新的宽带电压传感器和宽带电流传感器的设计方案。

2.1 基于文氏桥电路的宽带电压传感器设计

根据文氏桥电路原理, 提出一种适用于 FTU 的宽带电压传感器方案, 其电路如图 3 所示。可推导出该宽带电压传感器的分压比为

$$\eta_V(j\omega) = \frac{jR\omega C}{n(1+jR\omega C)^2 + jR\omega C} \quad (1)$$

式中: n 为图 3 中每相电压传感器中 R 、 C 串联电路的组数; ω 为被测电压的频率。根据文氏桥电路原理, 在额定频率下取 $R\omega_N C = 1$, 则可得到如式(2)所示的计算额定频率下的基波电压分压比 $\eta_V^1(j\omega_N)$ 公式。

$$\eta_V^1(j\omega_N) = \frac{1}{2n+1} \quad (2)$$

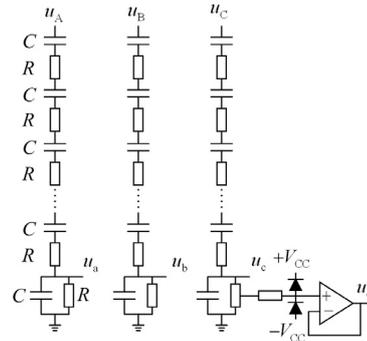


图 3 基于文氏桥电路的宽带电压传感器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of wide band voltage sensor based on Wien bridge circuit

不失一般性, 对于运行在额定电压下的 10 kV 配电线路, 取 $n = 12$, 在 A 相发生金属性接地故障时, 图 3 所示的 B、C 两相电压传感器输出电压 u_b 、 u_c 为 400 V。为了满足 ± 5 V 测量范围的 16 位 A/D 转换器对最大输入电压的约束, 以 C 相电压传感器为例, 取 u_c 电压的 0.8% 作为 A/D 转换器的输入电压, 并采用输入端带正、负钳位二极管的运算放大器跟随电路进行输出阻抗变换, 获得 u'_c 以供 A/D 转换器采样。这样, 在单相接地故障条件下, 图 3 中 u'_c 的有效值为 3.2 V, 最大值为 4.524 8 V; 而在正常运行条件下, u'_c 的有效值为 1.847 6 V, 最大值为 2.612 5 V。考虑在发生单相接地短路故障时, 非故障相电压传感器的额定工作电流为 2 mA, 则可计算出图 3 电压传感器的参数: $R = 282.9$ k Ω , $C = 11.257$ nF。

通过计算可知: 上述电压传感器在正常运行情况下每相功耗不超过 5 W; 在发生单相接地故障时,

非故障相电压传感器功耗也不超过 15 W。此外,采用高精度电阻、电容元件且对元件参数进行筛选,上述电压传感器在额定频率下具有满意的精度。并且,由于三相电压传感器特性一致,合成零序电压也有满意精度。

实质上,文氏桥电路是一种带通滤波器。当配电网运行频率偏离额定频率时,图 3 所示电压传感器的误差将会随频率偏移量的增大而增加。因此,需要采用软件补偿方法对 A/D 转换后的电压数据进行幅值修正和相位修正。下面介绍图 3 所示电压传感器随频率变化的基频分压比和谐波分压比的修正方法。

根据式(1),对于 k 次谐波,其分压比为

$$\eta_V^k = \frac{j k R \omega C}{n(1 + j k R \omega C)^2 + j k R \omega C} = \frac{1}{(2n+1) + j n(k R \omega C - \frac{1}{k R \omega C})} \quad (3)$$

考虑到 $R \omega_n C = 1$,则由式(3)可得

$$\eta_V^k = \frac{1}{(2n+1) + j n(k \omega_* - \frac{1}{k \omega_*})} \quad (4)$$

式中, ω_* 为基波电角频率的标幺值。由式(4)可知,非额定频率下的基波分压比和各次谐波的分压比均为复数,而分压比修正包括幅值修正和相位修正。

对于电力系统来说,11次以下的谐波主要为5次和7次。对这两次谐波的分压比修正,可直接将离线计算结果制成数据表,存入嵌入式系统存储器以供查询。比如,以 0.5 Hz 为间隔离线计算 45 Hz 至 55 Hz 之间各频率点的分压比和相位偏移量共 21 组数据,存入存储器中。而其他频率点的分压比和相位偏移量可以通过两个相邻的频率点数据线性插值得。

对于 11 次及以上次数谐波,由图 4 和图 5 可以看出,基波频率在 45 Hz 至 55 Hz 之间变化时各次谐波的分压比幅值和分压比相位与频率的关系基本为线性函数。因此,可以采用线性函数拟合 11 次及以上各次谐波的分压比幅值和分压比相位随频率变化的函数关系。

以 11 次和 50 次谐波为例,求得的分压比幅频特性和相频特性的线性拟合函数如式(5)和式(6)所示;对应的拟合函数的最大相对误差如表 1 所示。

$$\begin{cases} \eta_V^{11} = -0.000148f + 0.01493 \\ \varphi_V^{11} = -0.2159f - 68.35 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \eta_V^{50} = -3.349e^{-5}f + 0.003346 \\ \varphi_V^{50} = -0.04801f - 85.2 \end{cases} \quad (6)$$

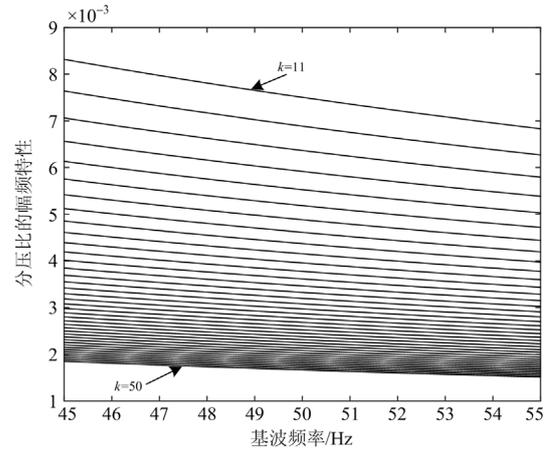


图 4 11 次及以上次数谐波分压比的幅频特性曲线
Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic curve of the 11th and above harmonic voltage divider ratio

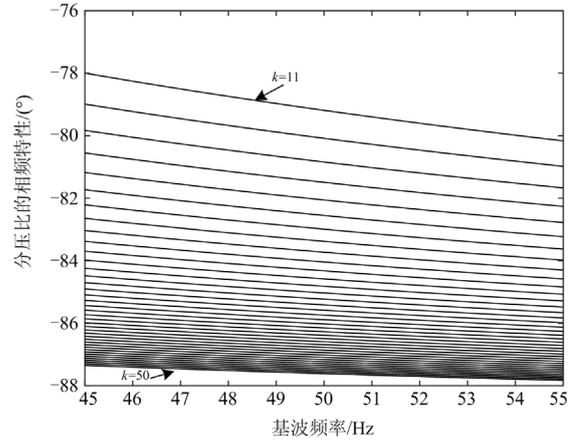


图 5 11 次及以上次数谐波分压比的相频特性曲线
Fig. 5 Phase-frequency characteristic curve of the 11th and above harmonic voltage divider ratio

表 1 第 11 次和 50 次谐波分压比拟合函数最大相对误差
Table 1 Maximum relative errors of fitting functions of voltage divider ratios of 11th and 50th harmonics

原函数与线性拟合函数的表达式	拟合函数最大相对误差	
$\eta_V = \sqrt{1 \div \left[(2n+1)^2 + n^2 \left(k\omega_* - \frac{1}{k\omega_*} \right)^2 \right]}$	11 次谐波	-0.62%
	$\begin{cases} \eta_V^{11} = -0.000148f + 0.01493 \\ \eta_V^{50} = -3.349e^{-5}f + 0.003346 \end{cases}$	50 次谐波
$\varphi_V = \arctan \left[n \left(\frac{1}{k\omega_*} - k\omega_* \right) \div (2n+1) \right]$	11 次谐波	-0.09%
	$\begin{cases} \varphi_V^{11} = -0.2159f - 68.35 \\ \varphi_V^{50} = -0.04801f - 85.2 \end{cases}$	50 次谐波

因此,对于 11 次及以上次数的谐波测量,图 3 所示基于文氏桥电路的电压传感器的分压比可存储

线性拟合函数关系, 而避免复杂计算或大的数据表格查询。

此外, 在参数 $R = 282.9 \text{ k}\Omega$ 情况下, 图 3 所示电压传感器的负载电路仅取 u_a 、 u_b 、 u_c 电压的 0.8%。根据电阻分压原理和戴维南等效电路可知, 基于文氏桥电路的电压传感器的内阻为 $2.263 \text{ k}\Omega$, 在负载阻抗大于 $3 \text{ M}\Omega$ 时, 其带来的误差将小于 0.1%。而图 3 所示跟随器电路的输入阻抗很容易做到大于 $30 \text{ M}\Omega$, 因而可以不考虑传感器负载接入带来的误差。

综上所述, 基于文氏桥电路的宽带电压传感器, 适用于工频电压传感和谐波电压传感, 具有功耗低、不会对高频分量呈现低阻抗等优点, 且结合软件补偿可以获得各次谐波电压的满意测量精度。

2.2 铁芯带气隙的宽带电流传感器设计

目前, 用于柱上开关 FTU 的电流互感器主要是带闭合铁芯的互感器, 分为单相电流互感器和零序电流互感器。这类电流互感器的特点是二次侧额定电流较大且禁止开路。通常, 需要加装中间电流互感器将上述电流互感器二次侧电流变换为小电流才能传送给 FTU 的模拟调理电路。而与 ADMU 配套的电子式电流互感器, 一般采用价格较低的罗氏线圈电流传感器, 极少采用昂贵的光纤电流互感器。由于柱上断路器安装处的电磁环境复杂, 罗氏线圈电流传感器测量精度会受到一定影响。在此, 提出一种铁芯带气隙的宽带电流传感器方案, 其电路如图 6 所示。

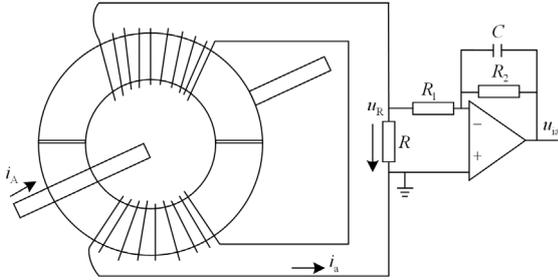


图 6 铁芯带气隙的电流传感器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of current sensor with iron core and air gaps

图 6 所示的电流传感器方案, 设铁芯截面积为 S , 每个气隙长度为 δ , C 型铁芯中心线的半径为 r , 并认为磁力线在铁芯中和气隙内为均匀分布。记磁通量为 ϕ , 则根据全电流定律可得到

$$\phi \left(\frac{2\pi r}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \right) = i_A - w_s i_a \quad (7)$$

式中: μ_0 为真空中的导磁率; μ_r 为铁芯所用材料的相对导磁率; w_s 是二次绕组总匝数。按照图 6 所示

的参考方向有

$$i_a = \frac{w_s}{R} \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

设 $i_A = I_{Am} \sin \omega t$ 和 $\phi = \phi_m \sin(\omega t - \theta_\phi)$, 则根据式(7)和式(8)得到

$$\begin{aligned} \phi_m \sin(\omega t - \theta_\phi) \left(\frac{2\pi r}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \right) = \\ I_{Am} \sin \omega t - \frac{w_s^2 \omega}{R} \phi_m \cos(\omega t - \theta_\phi) \end{aligned} \quad (9)$$

令

$$\begin{cases} a = \frac{w_s^2 \omega}{R} \\ b = \left(\frac{2\pi r}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \right) \end{cases} \quad (10)$$

于是, 可得到

$$\phi_m [a \cos(\omega t - \theta_\phi) + b \sin(\omega t - \theta_\phi)] = I_{Am} \sin \omega t \quad (11)$$

再令

$$\begin{cases} \sin \theta_\phi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ \cos \theta_\phi = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{cases} \quad (12)$$

于是, 可得到

$$\begin{cases} \phi = \frac{I_{Am}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \sin(\omega t - \theta_\phi) \\ i_a = \frac{w_s \omega I_{Am}}{R \sqrt{a^2 + b^2}} \cos(\omega t - \theta_\phi) \\ a = \frac{w_s^2 \omega}{R} \\ b = \frac{2\pi r + 2\delta \mu_r}{\mu_0 \mu_r S} \\ \theta_\phi = \text{tg}^{-1} \frac{a}{b} \end{cases} \quad (13)$$

作为 FTU 的电流传感器, 式(13)中的 $a \ll b$, 从而 $\theta_\phi \approx 0$ 且 $\sqrt{a^2 + b^2} \approx b$ 。例如, 当 $r = 0.05 \text{ m}$ 、 $\delta = 0.003 \text{ m}$ 、 $\mu_r = 5000$ 、 $w_s = 100$ 匝、 $S = 0.02 \times 0.02 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 以及 $R = 10 \text{ k}\Omega$ 时, 由 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 可计算得到 $a = 314$ 、 $b = 12\,067\,675$ 、 $\theta_\phi \approx 0.0015^\circ$ 以及 $\sqrt{a^2 + b^2} = 12\,067\,675$ 。这样, 忽略 a 和 θ_ϕ 时, 可由式(13)得到

$$i_a = \frac{w_s \omega \mu_0 \mu_r S I_{Am}}{R(2\pi r + 2\delta \mu_r)} \cos \omega t \quad (14)$$

式(14)就是本文所提电流传感器方案二次侧电

流的简化计算公式。从而可得到电阻 R 上的电压为

$$u_R \approx -\frac{w_s \omega \mu_0 \mu_r S I_{Am}}{(2\pi r + 2\delta \mu_r)} \cos \omega t \quad (15)$$

假设选择参数约束为 $R_2 \omega C \gg 1$ ，则图 7 中的运算放大器积分电路的输出电压与输入电压的关系为

$$\frac{u_R}{R_1} = -C \frac{du_{ia}}{dt} \quad (16)$$

求解式(16)可得到

$$u_{ia} = \frac{w_s \mu_0 \mu_r S I_{Am}}{(2\pi r + 2\delta \mu_r) R_1 C} \sin \omega t \quad (17)$$

从式(17)可知，图 7 中运算放大器输出电压与电流传感器一次电流成正比，且相位与一次电流相同。易知，只要合理选择设计参数，并配置适当的运算放大器电路的放大倍数，就可实现运算放大器输出电压与后级电路中 A/D 转换器的输入信号幅度匹配。

需要指出的是，图 6 所示电流传感器采用的铁芯是带气隙的，从而可以更准确地传感谐波分量，是一种宽带电流传感器。

3 多智能体 FTU 的智能体设计方法

与传统设计方法相比，基于多智能体概念的设计方法具有更大的灵活性，更适用于设计智能化系统。多智能体系统的设计目标是：让多个功能比较单一的智能体通过协作或博弈机制完成复杂的系统功能；在降低系统设计复杂度的同时，提高所设计系统的鲁棒性、可靠性和灵活性。本文提出的多智能体 FTU 采用协作机制，而采用协作机制的多个智能体系统应具有自主性、协作性、灵活性和容错性。

其中，自主性是指多智能体系统不仅具有高质量、及时地完成复杂系统功能的自主能力，而且其中的每个智能体也具有完成特定功能以及主动与其他智能体协作的自主能力。协作性是指多智能体系统中的每个智能体都朝着有利于完成预定复杂系统功能的方向行动，而不会出现不同智能体之间相悖的现象。灵活性是指多智能体系统需要更新或拓展功能时，不需要改变原有的系统结构，仅需要更新需要改变的已有智能体及其接口或拓展新的智能体。而容错性则包含两层意思：其一，出现容错能力范围内的错误或干扰时，系统仍能够高质量、及时地完成预定的复杂系统功能；其二，出现超过容错能力范围的错误或干扰时，只要硬件系统未损坏，系统不会产生错误的控制输出，并且，一旦错误或干扰消失，系统又能够快速恢复到正常运行状态。

本文正是按照上述“四性”设计多智能体 FTU。下文将重点介绍所提多智能体 FTU 的“环境”设计、同步协调机制设计、特定功能智能体的设计原则及系统结构设计。

3.1 多智能体 FTU 的“环境”设计

“环境”是多智能体系统的一个基本概念。多智能体系统中的每个智能体总是处于其特定的“环境”之中。对于“环境”的变化，每个智能体都将自主地进行感知，接着，进行判断和决策，并根据决策结果采取作用于“环境”的行动，从而使“环境”发生新的改变。采用协作机制的多智能体系统正是通过每个智能体感知“环境”变化、自主地采取有利于复杂系统功能完成的改变“环境”的行动，以达到协作的目的。

从 FTU 的作用看，多智能体 FTU 所处的“环境”是断路器所在配电网的运行状态、断路器的健康状态以及外部通信接口输入的命令状态构成的“状态空间”。当通过传感器和数据采集系统获得能够表征上述“状态空间”的数据集合时，则该数据集合即是“状态空间”的一种映射。因此，对于系统中的各个智能体来说，这种表征“状态空间”的数据集合就是其需要感知和采取行动进行改变的“环境”。本文基于上述思路，将表征“状态空间”的数据集合分成“采集数据子集”和“协调数据子集”两个互补子集，设计的多智能体 FTU 的“环境”如图 7 所示。

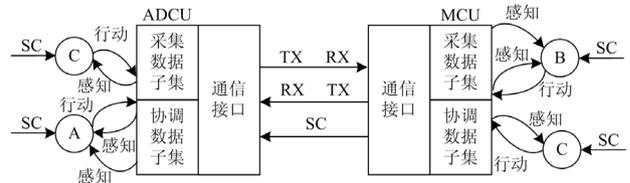


图 7 多智能体 FTU 的“环境”设计方案

Fig. 7 Design of the environment of multi-agent FTU

图 7 中：“采集数据子集”表征配电网运行状态和断路器健康状态，其数据由 ADCU 采集得到；“协调数据子集”表征输入的命令状态，其数据由 MCU 从外部通信接口接收的命令并进行解析得到。该“环境”设计采用了数据镜像概念，将 ADCU 中存储的“采集数据子集”镜像到 MCU 中，同时将存储在 MCU 中的“协调数据子集”镜像到 ADCU 中，使无论是处于 ADCU 中的智能体还是处于 MCU 中的智能体，均能感知相同的“环境”变化。

上述“环境”设计采用高速内部通信链路实现数据镜像，能够有效运行的前提条件是“镜像数据”与“原像数据”的一致性。为此，该“环境”设计

方案配置了由 MCU 生成并分发给 ADCU 的同步时钟信号 SC(Synchronous Clock, SC), 以同步驱动所有智能体作业。不言而喻, 为了完成数据镜像任务, 并保证“镜像数据”与“原像数据”完全一致, 必须配置一个专用智能体。在此, 把这个专用智能体称为“环境”同步控制智能体, 其结构如图 8 所示。

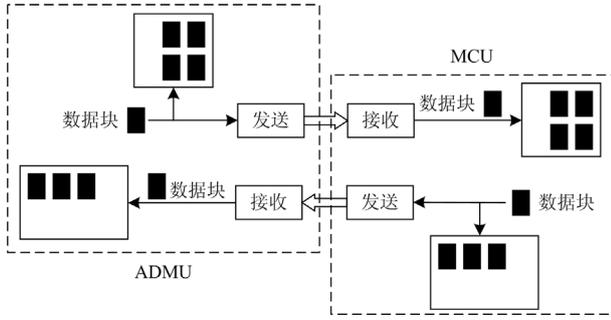


图 8 “环境”同步控制智能体的结构框图

Fig. 8 Structure diagram of the agent for environment synchronization control

此外, 图 7 所示的“环境”设计方案, 可以支持三种类型的智能体运行。这三种智能体分别是程序仅驻留在 ADCU 中的智能体(记为 A 类)、程序仅驻留在 MCU 中的智能体(记为 B 类)以及程序在 ADCU 和 MCU 中各驻留一部分的智能体(记为 C 类)。显然, 图 8 的“环境”同步控制智能体属于 C 类。

3.2 多智能体 FTU 的同步协调机制设计

除了前文所述的“环境”同步控制需要同步时钟信号以外, 多智能体 FTU 中的其他智能体也需要同步协调才能保证“因果关系”不会被颠倒。从时序上讲, 多个智能体的多线程同时推进, 倘若存在线程之间的结果引用关系, 那么, 智能体之间的同步协调机制是必不可少的。

假设多智能体系统有 n 个智能体, 其中最长的运行周期为 T_{\max} , 所有智能体中运行步骤最短的时间步长为 ΔT_{\min} , 则同步时钟信号周期 T_{SC} 和同步协调周期 T_{sm} 可按照式(18)选择。

$$\begin{cases} T_{\text{SC}} \leq \Delta T_{\min} \\ T_{\text{sm}} \geq \left\{ \left(\left\lfloor \frac{T_{\max}}{T_{\text{SC}}} \right\rfloor + 1 \right) + (2^k - 1) \right\} T_{\text{SC}} \\ M = \frac{T_{\text{sm}}}{T_{\text{SC}}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: 括号“【】”表示取整数; k 为正整数; 而 $(2^k - 1)T_{\text{SC}}$ 长度的时间预留留给后续增加的特定功能智能体。如果不考虑扩展, 取 $k = 0$ 时则按式(18)计

算得出的是最小同步协调周期。在确定同步时钟信号周期 T_{SC} 和同步协调周期 T_{sm} 后, 一个同步协调周期内的同步时钟周期数 M 随之确定。

将 n 个智能体的每个步骤按时序和结果引用关系分配到 M 同步时钟信号周期中的对应区段内, 即构成了同步协调机制, 如图 9 所示。

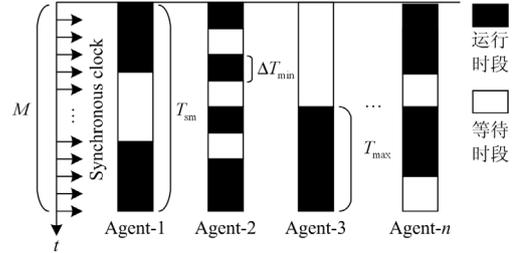


图 9 多智能体 FTU 的同步协调机制示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the synchronous coordination mechanism of proposed multi-agent FTU

在实际应用中, 直接应用上述的同步协同机制周期和同步时钟信号周期安排智能体的步骤, 会比较繁琐。对于多智能体 FTU, 一种可行的简化方法是, 将同步时间信号周期取为交流电压、电流信号的采样周期。假设针对 50 Hz 交流电压、电流信号, 每周采样 100 点, 则取同步时钟信号周期 $T_{\text{SC}} = 200 \mu\text{s}$ 。接着, 如果按每 10 个工频信号周期计算一次用于配电网监测的数据, 则相应的智能体可以按照 0.2 s 进行作业安排。但是, 对于实现保护功能和录波功能的智能体, 必须按照同步时钟信号周期安排作业时序。

需要再次强调的是, 本文提出的多智能体 FTU 需要配置北斗/GPS 接收机。这样, 多智能体 FTU 可获得高精度同步时间, 并且, 前述的同步时钟信号和同步协调机制将与卫星时间准确同步。

3.3 特定功能智能体的设计原则

本文提出的多智能体 FTU, 对于配电网, 可以实现数据采集、监视控制、故障识别及处理、电能计量、线损计算、PMU 等功能; 对于断路器, 可以实现健康状态检测与评估。因此, 多智能体 FTU 对应的特定功能智能体较多。显然, 逐一详细介绍所有特定功能智能体, 文章将过于冗长, 也无必要。因此, 下文以“数据采集智能体”和“断路器状态评估智能体”为例, 重点介绍特定功能智能体的设计原则。

1) 软硬件配套原则

尽管提出智能体的概念时, 首先针对软件系统, 但是对于电气工程应用, 智能体的实现必须软硬件配套。这也就是特定功能智能体设计的第一个原则。

以本文提出的多智能体 FTU 的“数据采集智能体”为例，其硬件系统包括电压传感器、电流传感器、模拟信号调理电路、16 位多路高速 ADC、DSP 系统(包括一定容量的 RAM、FLASH、ROM 和 EEPROM，以及硬件看门狗和时钟电路等)、光纤通信接口、光纤同步时钟信号接口、工作电源和抗电磁干扰电路等；其软件系统即驻留在 ADCU 中的与“数据采集智能体”对应的那部分程序代码。再以“断路器状态评估智能体”为例，首先需要检测断路器状态的传感器，如分合闸线圈电流传感器等；其次，需要数据采集电路，即使 ADC 可以与其他部分共用，模拟调理电路也必须专用。从上述可知，特定功能智能体的设计，需要从功能和性能要求入手，才能给出软硬件配套方案。

2) 基于可观性的数据子集构建原则

特定功能智能体需要通过检测“环境”中一个数据子集的数据来开展作业，并且其作业结果一定是对该数据子集的某种改变。这就要求，特定功能智能体对应的数据子集必须满足可观性要求。这也就是特定功能智能体设计的第二个原则。例如，对于“数据采集智能体”，如果需要计算 50 次谐波电压、电流，则对应的数据子集存储的数据必须是每周 100 或以上个采样点。又如，欲对断路器健康状态进行评估，则对应的数据子集应该存储断路器分合闸的时间参数。

3) 无缝对接的协作原则

在多智能体 FTU 中，大多数特定功能智能体的输入数据来自于其他智能体的输出，而它们的输出也很可能是另一些特定功能智能体的输入。这就要求，承上对接和启下对接均是无缝的。这是特定功能智能体设计的第三原则。比如，“数据采集智能体”输出的数据，其他智能体应该不需要经过格式转换就可以直接使用。

4) 阻断错误向下传递原则

长期运行中的设备，总会遇到各种干扰。对于多智能体 FTU 来说，运行环境比较恶劣，所以其特定功能智能体可能遇到输入数据存在错误的情况。阻断错误向下传递是特定功能智能体设计的第 4 个原则，其要求：当某个特定功能智能体发现输入数据有错时，应该避免根据错误的输入输出错误的结果。显然，这是多智能体系统容错的一种策略。

3.4 多智能体 FTU 的智能体结构设计

所提出的基于一二次深度融合的多智能体 FTU，其智能体结构如图 10 所示，其中的每个特定功能的智能体各司其职。比如，驻留在 ADCU 的数

据采集智能体负责数据采集，控制智能体负责控制真空断路器；驻留在 MCU 中的通信智能体负责外部通信。而多智能体系统的“环境”包括驻留在 ADCU 和驻留在 MCU 中的两个相互镜像的数据集，它们由“环境”同步控制智能体负责一致性维护。Agent1 和 Agent2 为特定功能智能体的通用模型，其架构分为信息处理层和功能决策层。

在特定功能智能体的信息处理层中，感知模块会感知“环境”中“采集数据子集”和“协调数据子集”中的相关信息，并将这些信息保存在存储模块中。同时，通过交互模块实时地将感知结果与其他智能体共享。

在特定功能智能体的功能决策层中，决策模块根据感知模块的感知结果进行分析计算，并输出相应的决策结果。然后，通过执行模块将决策结果作用于“环境”。同时，通过交互模块实时地将决策结果与其他智能体共享。

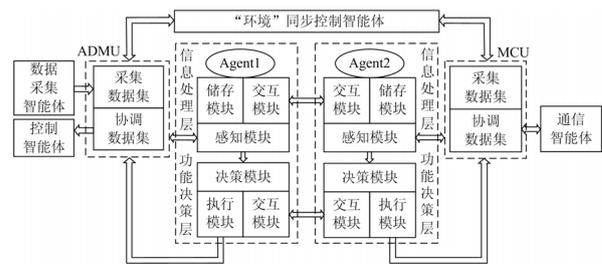


图 10 多智能体 FTU 的结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of multi-agent FTU

需要指出的是，对于不同的特定功能智能体，有着不同的感知算法和不同的决策算法。不一定每个特定功能智能体均具有上述通用模型中的所有模块。比如，驻留在 ADMU 中的数据采集智能体仅负责信号采样和信号参量求取，而没有功能决策层的相应模块。又如，控制智能体仅有功能决策层而不需要信息处理层。

在图 10 给出的多智能体 FTU 的特定功能智能体结构中，智能体之间的协作机制通过三种途径实现：其一是多智能体系统的“环境”，某些智能体对“环境”施加的影响被另一些智能体感知到而形成协作关系；其二是特定功能智能体的信息处理层中的交互模块，通过该交互模块，某些智能体对“环境”的感知结果与另一些智能体共享而形成协作关系；其三是特定功能智能体的功能决策层中的交互模块，通过该交互模块，某些智能体的功能决策结果与另一些智能体共享而形成协作关系。这样，所提出的多智能体 FTU 可以实现各类复杂系统功能。

4 结论

本文根据智能配电网的发展趋势和断路器一二次深度融合技术特点,提出了一种多智能体 FTU 技术方案,并探讨了相关的关键技术。其中,提出的基于文氏桥电路的宽带电压传感器,具有功耗低、不会对高频分量呈现低阻抗等特点,结合软件补偿可以获得各次谐波电压的满意测量精度。提出的铁芯带气隙的宽带电流传感器,具有线性传感特性且满足谐波电流测量要求。在上述基础上,本文着重研究了多智能体 FTU 的智能体设计方法。给出了基于数据集镜像概念的多智能体 FTU 的“环境”设计、基于同步时钟信号驱动的多智能体同步协调机制设计、特定功能智能体的设计原则和多智能体 FTU 的智能体结构设计。本文提出的技术方案和设计思路,针对配电网真空断路器一二次设备深度融合的 FTU 的智能化,希望能够起到抛砖引玉的作用,对本领域的相关研究者有参考价值。

参考文献

- [1] 张兰兰, 张敏, 曹融, 等. 一种实用新型配电网的智能馈线终端设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(9): 24-27.
ZHANG Lanlan, ZHANG Min, CAO Rong, et al. Design of new intelligent feeder terminal for distribution network[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2020, 20(9): 24-27.
- [2] 李辉, 田野, 陈江波, 等. 一二次融合成套断路器单相接地故障处置真型试验技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 158-165.
LI Hui, TIAN Ye, CHEN Jiangbo, et al. Research on a single-phase grounding fault handling true test of primary and secondary integration circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 158-165.
- [3] 张可华. 配电网调度自动化馈线终端单元的研究与设计[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
ZHANG Kehua. Research and design of feeder terminal unit of distribution network dispatching automation[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2016.
- [4] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [5] 李振钊, 王增平, 张玉玺, 等. 基于升维线性规划的主动配电网故障区段定位方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-16[2021-10-22]. DOI: 10.7500/AEPS20210512007.
LI Zhenzhao, WANG Zengping, ZHANG Yuxi, et al. Fault section location method for active distribution network based on linear programming of ascending dimension[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-16[2021-10-22]. DOI: 10.7500/AEPS20210512007.
- [6] 张文轩, 李京, 陈平, 等. 基于配电自动化终端的含 DG 配电网故障定位优化算法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 192-196.
ZHANG Wenxuan, LI Jing, CHEN Ping, et al. Optimal algorithm for fault location of distribution network containing DG based on distribution automation terminal[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(7): 192-196.
- [7] 孙可, 张全明, 郑朝明, 等. 能源互联网视角下的未来配电网发展[J]. 浙江电力, 2020, 39(1): 1-8.
SUN Ke, ZHANG Quanming, ZHENG Zhaoming, et al. Development of distribution network in the future from the perspective of energy internet[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1): 1-8.
- [8] 梁子龙, 李晓悦, 邹荣庆, 等. 基于 5G 通信智能分布式馈线自动化应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 24-30.
LIANG Zilong, LI Xiaoyue, ZOU Rongqing, et al. Intelligent distributed feeder automation application based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 24-30.
- [9] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115.
ZHANG Linli, XU Bingyin, XUE Yongduan, et al. Transient fault locating method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115.
- [10] 邢晓敏, 徐海瑞, 廖孟柯, 等. 基于云模型和 D-S 证据理论的配电终端健康状态综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 72-81.
XING Xiaomin, XU Hairui, LIAO Mengke, et al. Comprehensive evaluation method of distribution terminal units health status based on a cloud model and D-S evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 72-81.
- [11] 张强, 牟莉, 王茜, 等. 一种 FTU 人机交互子系统的设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16): 32-36.
ZHANG Qiang, MU Li, WANG Qian, et al. Implementation of MMI subsystem for an FTU[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(16): 32-36.
- [12] 王凯. FTU 无接触维护终端设计[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
WANG Kai. Implementation for non-contact maintenance terminals of FTU[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2019.
- [13] 范毅. 泾渭供电分公司馈线自动化研究与设计[D]. 西

- 安: 西安科技大学, 2018.
- FAN Yi. Research and design of feeder automation in Jingwei power supply company[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [14] 周勤, 么军, 姚远, 等. 基于故障可观性指标的配电网 FTU 最优配置模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 117-124.
- ZHOU Meng, MO Jun, YAO Yuan, et al. Research on FTU optimal configuration model of distribution network based on fault observability index[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 117-124.
- [15] 陈婷. 基于 FTU 检测方法在含 DG 配电网故障区段定位的应用综述[J]. 电气应用, 2020, 39(4): 30-37.
- CHEN Ting. Application summary of FTU detection method in fault location of distribution network with DG[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(4): 30-37.
- [16] 邵长亮. 镇江市配电网自动化提升项目的方案与应用设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- SHAO Changliang. The scheme and application design of distribution automation upgrade project in Zhenjiang city[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [17] 束洪春, 唐岚, 董俊. 多 Agent 技术在电力系统中的应用展望[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 27-31.
- SHU Hongchun, TANG Lan, DONG Jun. A survey on application of multi-agent system in power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 27-31.
- [18] 王少荣, 程时杰. 实现电力监控嵌入式系统可靠数据交换的串行通信 Agent[J]. 继电器, 2007, 35(19): 38-40.
- WANG Shaorong, CHENG Shijie. A reliable data exchange agent for embedded systems of power system monitoring and control[J]. Relay, 2007, 35(19): 38-40.
- [19] 谢睿, 王少荣. 基于多智能体与实时数据的合同能源管理决策支持系统[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 69-74.
- XIE Rui, WANG Shaorong. A decision support system of energy performance contracting based on multi-agent and real-time data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 69-74.
- [20] 陈艺璇, 张孝顺, 郭乐欣, 等. 基于多智能体迁移强化学习算法的电力系统最优碳-能复合流求解[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 863-872.
- CHEN Yixuan, ZHANG Xiaoshun, GUO Lexin, et al. Optimal carbon-energy combined flow in power system based on multi-agent transfer reinforcement learning[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 863-872.
- [21] 孔祥玉, 曾意, 陆宁, 等. 基于多智能体竞价均衡的微电网优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1626-1633.
- KONG Xiangyu, ZENG Yi, LU Ning, et al. Optimal bidding management for agent-based microgrid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1626-1633.
- [22] 窦春霞, 罗维, 岳东, 等. 基于多智能体的微网群内电力市场交易策略[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1735-1744.
- DOU Chunxia, LUO Wei, YUE Dong, et al. Multi-agent system based electricity market trading strategy within microgrid groups[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1735-1744.
- [23] 余志文, 艾芊. 基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略[J]. 电力系统自动化设备, 2017, 37(12): 150-156.
- YU Zhiwen, AI Qian. Adaptive droop control strategy for microgrid based on consensus of multi-agent system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 150-156.
- [24] 王娟娟, 王宏安. 基于多智能体混合调度的电网自愈系统[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(4): 720-730.
- WANG Juanjuan, WANG Hong'an. Multi-agent multi-criticality scheduling based self-healing system of power grid[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(4): 720-730.
- [25] 王蓓蓓, 胡晓晴, 顾伟扬, 等. 分层控制架构下大规模空调负荷参与调峰的分散式协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3514-3527.
- WANG Beibei, HU Xiaoqing, GU Weiyang, et al. Hierarchical control architecture and decentralized cooperative control strategy for large scale air conditioning load participating in peak load regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3514-3527.
- [26] 周兵凯, 杨晓峰, 李继成, 等. 多元融合高弹性电网关键技术综述[J]. 浙江电力, 2020, 39(12): 35-43.
- ZHOU Bingkai, YANG Xiaofeng, LI Jicheng, et al. Review on key technologies of multi-integration highly-resilient power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(12): 35-43.
- [27] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.
- ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.

收稿日期: 2021-10-24; 修回日期: 2021-12-21

作者简介:

雷 杨(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网运检、故障检测与诊断技术;

杨 帆(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网运检、故障检测与诊断技术;

郭 瑶(1998—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向谐波耦合分析以及机理建模. E-mail: 1004746309@qq.com

(编辑 张爱琴)