

DOI: 10.7667/PSPC161869

## 配网物理模拟系统控制单元设计与实现

杨华锋<sup>1</sup>, 洪翠<sup>1</sup>, 高源<sup>2</sup>, 黄建业<sup>2</sup>, 陈彬<sup>2</sup>, 高伟<sup>1</sup>

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 为控制配电网物理模拟系统以实现配电网正常运行及故障工况的模拟, 基于可编程控制器(PLC), 设计了配电网物理模拟系统的核心控制单元、故障模拟装置控制单元及燃弧故障装置控制单元。所完成的控制单元可实现模拟断路器通断控制、三遥数据采集控制、故障模拟控制、燃弧控制等功能, 并以中断方式切除系统产生的模拟故障, 响应时间不超过 10 个周波。PSCAD 仿真结果与系统运行实验结果一致, 表明所设计控制单元满足配电网物理模拟系统运行的控制要求。

**关键词:** 配电网物理模拟系统; PLC 控制器; 故障模拟装置; 燃弧故障装置; PSCAD 仿真

### Design and implementation of the control unit in a distribution network physical simulation system

YANG Huafeng<sup>1</sup>, HONG Cui<sup>1</sup>, GAO Yuan<sup>2</sup>, HUANG Jianye<sup>2</sup>, CHEN Bin<sup>2</sup>, GAO Wei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Automation Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Science and Research Institute, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Control units of the kernel module, the fault simulation module and the arcing fault device module used in a physical simulation system of distribution network are designed on the basis of Programmable Controller (PLC) with structured and modular software. The analog circuit breaker on-off control, three-remote data acquisition control, fault simulation control, arcing control are realized by using the designed units. And simulation fault of system can be removed by interruption way and the response time is no more than ten cycles. Results of PSCAD simulation are in accordance with the running experiment results of physical simulation system, which shows that these designed control units can meet the control requirements of the physical simulation system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677030) and Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2016J01218).

**Key words:** distribution network physical simulation system; PLC controller; fault analog device; arcing fault device; PSCAD simulation

## 0 引言

根据相似原理设计, 采用阻抗一致原则等效实际配网系统的配电网物理模拟系统, 是将实际系统缩影到实验室中的分布式模块化模拟系统<sup>[1-7]</sup>, 能如实反映实际配电网物理状态与参数, 方便配电网自动化设备和保护装置等直接接入该系统进行功能测试等。控制单元是配电网物理模拟系统的关键, 是整个系统的连接枢纽, 它必须能同时与远方控制系

统、就地控制终端、微机保护装置、数据采集装置等设备通信, 解析来自各设备数据, 并根据需求控制模拟断路器等元件动作。为保证模拟系统的稳定性、通用性及可扩展性, 控制单元必须采用性能稳定、简便易懂、具有成熟运行经验的控制技术。PLC 广泛应用于自动化控制<sup>[8-9]</sup>、信息化控制<sup>[10-11]</sup>、远程化控制<sup>[12-13]</sup>等控制领域, 已是当今工业自动化与企业信息化的重要支柱。

本文以可编程控制器设计并实现配电网物理模拟系统控制单元, 基于控制单元作用开展模拟系统实验, 实验结果与仿真结果一致, 验证了控制单元的有效性。

基金项目: 国家自然科学基金(51677030); 福建省自然科学基金(2016J01218)

## 1 配电网物理模拟系统

配电网物理模拟系统设计是根据相似理论, 将实际系统的参数在满足微分方程式的条件下缩小一个固定比例系数(模拟比)等效后实现的, 模拟系统设计阻抗模拟比 1:1, 电压模拟比 10000:380, 其他电流、功率等参数模拟比根据物理特性关系求得, 具有与实际系统同样的物理性质。

整个模拟系统由基础设备层、人机交互层和智能控制层组成。其中, 基础设备层是组成实物模型的各个独立单元, 包括模拟断路器、模拟线路、互感器、模拟负载等。在设备层中, 用 380 V 干式隔离变压器模拟实际变电站中主变, 设计参数以保证时间过渡过程和实际系统主变相似; 模拟线路采用 II 型等效, 特别设计了基于空心螺线型封闭磁路的抗电感饱和、防磁场耦合的电感模型; 各类开关以 PLC 控制的接触器实现; 配电负荷以阻感性负载等效。各配电线路均以开关分段并设置引出点, 便于故障模拟模块接入进行配电线路故障模拟。人机交互层根据使用设备不同, 可分为远方控制的监控平台和就地控制的集中控制设备等。智能控制层集合了模拟系统的各类控制单元, 本文采用 PLC 控制器实现, 可根据控制单元不同分为故障模拟装置、分布式控制模块等。其中数据采集模块通过分布式控制模块将数据传输给人机交互层设备, 保护控制模块通过分布式控制模块实现模拟断路器的控制。基于 PLC 控制的分布式模块化配电网物理模拟系统结构如图 1 所示。



图 1 配电网物理模拟系统结构图

Fig. 1 Structure of distribution network physical simulation system

## 2 控制系统架构

分布式模块化配电网物理模拟系统的控制系统架构如图 2 所示。

模拟正常运行工况时, PLC 接收信息处理系统(以上位机为例)经 TCP/IP 或集中控制设备(以触摸屏为例)经 RS-485 或保护控制模块、外接 FTU/DTU 等设备经输入 X 口下发的控制命令, 根据协议解析并控制模拟系统中相应模拟断路器分/合动作, 进行馈线/负荷投、切操作。PLC 通过输入 X 口获取模

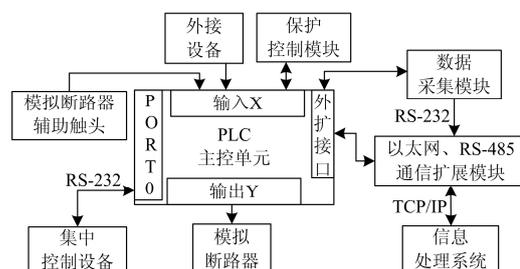


图 2 PLC 主控单元联络结构图

Fig. 2 Contact structure of PLC main control unit

拟断路器当前状态, 反馈给保护控制模块、触摸屏及上位机, 并扩展以供 FTU/DTU 等设备检测使用, 它与被控制模拟断路器采用继电器隔离, 防止因干扰、接线错误等, 造成 PLC 输出 Y 口被击穿。

模拟故障工况时, 先将模拟故障装置接入系统, 再由 PLC 接收上位机下发故障参数, 实现故障模拟。继电保护、外接设备等检测到故障后, 相应 PLC 接收命令并进入中断, 迅速改变相应模拟断路器的控制状态, 使模拟断路器动作切除故障。

PLC 控制单元一方面负责接收并解析来自上位机的控制指令, 同时与触摸屏通信, 实现检测进程的就地控制; 另一方面获取开关量输入信息与数据采集模块实时遥测数据, 并根据需要将数据转换为实验值或模拟值, 通过以太网方式, 传输给上位机, 完成通信控制指令的解析及执行操作。根据主要控制对象的不同, PLC 控制单元可以分为三种: 适用于模拟变电站、模拟线路、模拟环网柜的核心控制单元; 适用于故障模拟装置的逻辑控制单元; 适用于电弧生成装置的运动控制单元。

## 3 PLC 控制单元设计实现

为保证系统稳定可靠, 提高程序的可读性与扩展性, 本文采用梯形图语言编程, 并使用结构化、模块化的软件架构设计实现各 PLC 控制单元。

### 3.1 核心控制单元

作为决定模拟系统可靠性的关键部分, 核心控制单元主要实现模拟系统中模拟断路器开断和三遥数据上传下达的功能, 其主程序流程如图 3 所示。

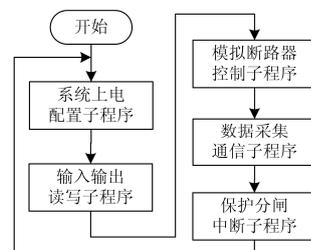


图 3 核心控制单元主程序流程图

Fig. 3 Main program flow chart of core control unit

系统初始化上电设置，包括设置模拟断路器的初始状态、模拟变比、弹簧储能模拟时间等。PLC 内置非保存线圈，掉电重置，以防因上一次实验后未恢复等情况，对下一次实验造成影响，保证系统安全。PLC 将需传输给上位机的数据乘以对应模拟变比，由上位机显示物理等效前的实际系统状态，使人机界面更加友好。通过 PLC 自带定时器延时，模拟弹簧储能信号，以更好地模拟实际断路器情况。储能信号闭锁模拟断路器正常开断控制回路，系统开发人员可根据需要设置储能时间。

输入输出读写，是将 PLC 输入 X 口、输出 Y 口同 PLC 内置线圈相关联，以提高程序通用性，防止输入输出口因意外情况无法使用，带来程序的巨大改动，同时也有利于后期功能扩展；模拟断路器控制，实现断路器功能，包括正常分合闸及相关实验；数据采集模块通信实现三遥数据的上传；保护分闸中断实现故障迅速切除。

### 3.1.1 断路器功能

模拟断路器控制子程序设置断路器多种工况，包括拒动、误动、抖动实验，实现流程如图 4 所示。

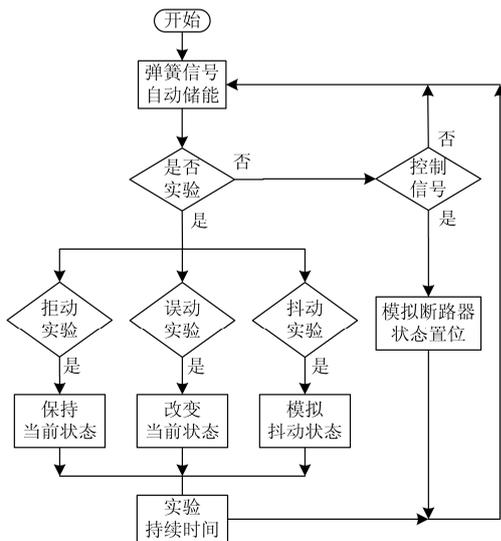


图 4 模拟断路器控制子程序图

Fig. 4 Control subroutine of simulation circuit breaker

实验类型通过寄存器 R7 设定，实验持续时间设置为 4 s。进入拒动实验后，在实验持续时间内，闭锁指定模拟断路器状态，上位机无法进行分、合闸控制；进入误动实验后，改变指定模拟断路器状态，并在实验持续时间内闭锁当前状态；进入抖动实验后，考虑模拟断路器的使用年限与分合闸次数有关，由 PLC 输出频率为 1 Hz 的方波开关信号，通过继电器引出，供给继电保护、FTU/DTU 等装置

使用。若无模拟验证实验，则模拟断路器状态仅取决于上位机、触摸屏或外接设备下发的控制信号，依照命令合闸/分闸。

### 3.1.2 三遥功能

配电网物理模拟系统中，由电流互感器、电压互感器将一次电流、电压信号转化为二次信号送给数据采集模块。系统采用模块化设计，若 PLC 辖下有多台数据采集模块，则数据采集模块接线拓扑采用总线方式，通过地址区分。数据采集模块与 PLC 通过 RS-485 连接，采用 Modbus 协议作为通讯标准，以 RTU(远程终端单元)通信传输方式，将采集数据传输给 PLC。数据采集模块传输给 PLC 的数据为 8 位二进制，需进行转换，转换如下：

$$\text{二次值} = \frac{\text{保护输入上限值}}{\text{传输数据长度}} \times \text{传输数据}$$

$$\text{模拟值} = \text{模拟比} \times \text{互感器变比} \times \text{二次值}$$

其中，二次值为 380 V 实际系统互感器输出，模拟值模拟 10 kV 系统的一次值。

一旦保护装置检测到故障，模拟断路器需在短时间内动作。因此，核心控制单元程序中使用中断的方式编写保护跳闸程序，并重置上位机控制信号。

### 3.2 逻辑控制单元

逻辑控制单元用于控制配电网物理模拟系统中的故障模拟装置。故障模拟装置以串联的方式接入物理模拟系统中配电线路引出的分段点中，可模拟配电网中常见的短路、接地、断线等故障，故障模拟装置内部结构如图 5 所示。

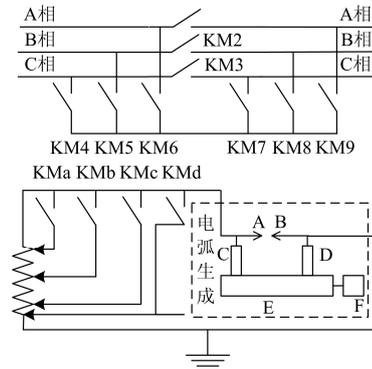


图 5 故障模拟装置连接图

Fig. 5 Connection diagram of fault simulation device

装置一共设有 13 个接触器控制开关，通过不同的开关切换，以生成不同类型的故障。故障类型与接触器状态密切相关，其中 KM1-KM9 控制故障类型，KMa-KMd 控制接地故障电阻。可模拟的常规故障类型如表 1 所示，其中：“1”表示接触器闭合，“0”表示断开。

表 1 常规故障类型  
Table 1 Normal fault type

KM	123	456	789	abcd
正常运行	111	000	000	0000
A 相直接接地	111	100	000	0001
B 相低阻接地	111	010	000	0010
C 相高阻接地	111	001	000	1000
BC 两相短路	111	011	000	0000
BC 两相接地	111	011	000	0001
ABC 三相短路	111	111	000	0000
A 相断线	011	000	000	0000
BC 两相断线	100	000	000	0000
ABC 三相断线	000	000	000	0000
A 断首端接地	011	100	000	0001
BC 断末端接地	100	000	110	0001

从持续时间上分, 故障模拟可分为瞬时性故障和永久性故障。瞬时性故障在短时间内可以自动恢复; 永久性故障在发生后不可自动恢复, 只能通过上位机发送指令进行恢复。短路故障属于瞬时性故障, 破坏性很大, 为了最大限度地保障模拟系统的安全性, 在故障发生 0.5 s 后, 故障自动恢复。故障模拟装置逻辑控制单元工作主流程如图 6 所示。

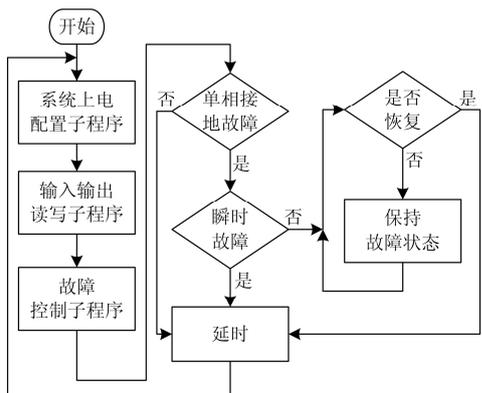


图 6 逻辑控制单元主程序图

Fig. 6 Main program of logic control unit

### 3.3 运动控制单元

图 5 中, 故障模拟装置的电弧生成模块 A(铜棒)、B(碳棒)所示为两个放电尖端, 用于生成电弧。D 支柱固定在 E 平台上, 支柱 C 固定在 E 平台上的活动块上。F 为步进电机, 电机被驱动旋转, 从而带动支柱 C 移动。运动控制单元同样利用 PLC 实现, 实现思路如图 7 所示。根据需要由驱动模块控制电机转动速度, 从而选择拉弧距离和拉弧速度, 在接地瞬间配合产生弧光接地故障。

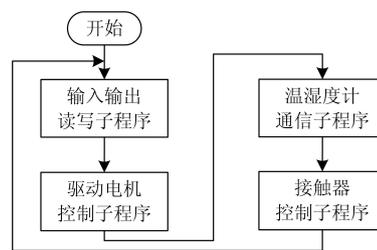


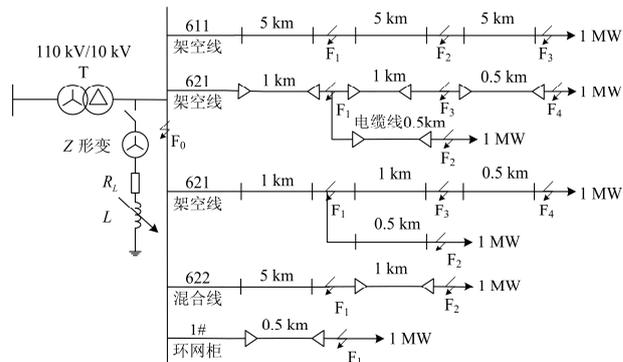
图 7 逻辑控制单元主程序图

Fig. 7 Main program of logic control unit

为了更加精准控制电弧间隙, 采用点控方式, PLC 通过控制继电器分合向电机驱动正转反接口输入高电平信号, 从而驱动电机前进后退。通过 RS-485 方式与温湿度计通信, 获取当前实验环境, 并将信息传递给上位机。通过控制接触器的分合闸, 切换燃弧接地电阻值及散热风扇。

### 4 仿真与实验

图 8(a)所示为一典型辐射式配电网, 根据相似性原理实现的物理仿真系统如图 8(b), 使用本文所设计控制单元。采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对图 8(a)所示系统建模, 以 622 馈线为例, 对比不同工况下的系统仿真与物理模拟系统实验结果。



(a) 配电网接线拓扑



(b) 物理仿真系统

图 8 配电网物理仿真系统

Fig. 8 Distribution network physical analog system

### 4.1 正常运行工况

系统正常运行负荷投切的仿真和实验波形如图 9 所示。其中仿真电压等级 10 kV，实验电压等级 380 V，实验数据与仿真数据间满足模拟比关系。

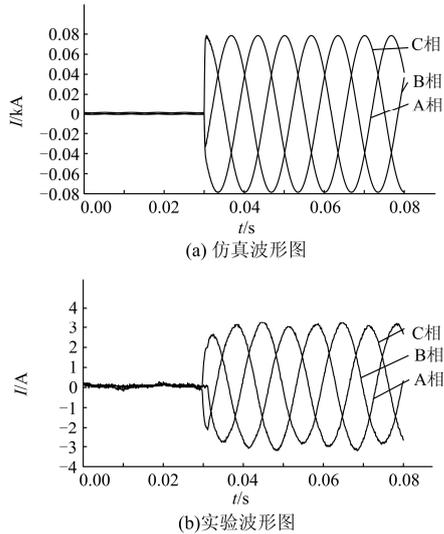


图 9 馈线负荷投入时电流波形

Fig. 9 Current waveform when feeder load is switched in

可见，通过 PLC 控制单元实现的模拟系统正常馈线负荷投切具有同仿真相似的暂稳态过程，即满足模拟系统的要求。

### 4.2 配电网常见故障

建立物理模拟系统旨在模拟配电网故障运行工况下的物理现象，提供与实际模型相似的电气信号，促进配电网自动化与保护设备的研究与设计。

由逻辑控制单元、接触器(模拟开关)、继电器、直流电源组成的可移动式故障模拟装置，串接于图 8(a)所示系统的故障点，模拟在模拟系统中发生故障的工况。其中，逻辑控制单元解析上位机下发的故障参数，控制接触器动作，发生指定故障。一旦保护控制模块检测到故障，即下发分闸命令给对应核心控制单元，核心控制单元进入中断，将对应模拟断路器断开。

以下故障模拟时，采用中性点不接地运行方式，投入全部 5 条馈线，故障点选择图 8 中 622 混合线中 F1 为例。若无特殊说明，均为金属性故障。

#### 4.2.1 相间短路

如图 10 所示，当系统发生 BC 相短路故障时，故障相电流大小相等，方向相反，并急剧增加。

对于模拟系统，保护实际动作时间决定于预先给定整定值、核心控制单元执行时间、继电器动作时间、模拟断路器固有时间。如图 10 所示，当系统发生两相短路时，保护切除时间为 5 个周波。

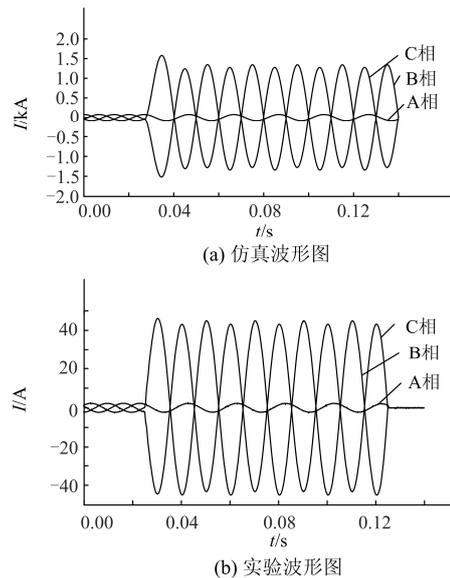


图 10 BC 相短路时馈线电流波形

Fig. 10 Current waveform of feeder when BC phase short-circuit

如图 11 所示，当系统发生三相不接地短路时，系统仍然保持对称，但三相电流会同时增大。系统在 0.034 s 时刻发生三相短路故障，三相电流突增，在 0.153 s 左右将故障线路切除。

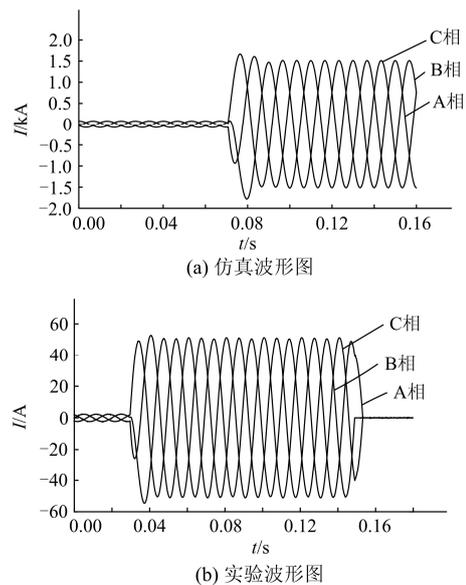


图 11 三相短路时馈线电流波形

Fig. 11 Current waveform of feeder when three-phase short-circuit

可见，通过逻辑控制单元可以有效实现短路故障模拟，且暂稳态过程与仿真结果相似。当系统发生故障时，核心控制单元采用中断方式，保证故障切除时间不多于十个周波，满足模拟系统的要求。

#### 4.2.2 断线故障

10 kV 中压配电线路所处地理环境复杂，在外

部气候温度变化的长期影响下容易发生断线故障。按照断线处导线落地情况, 单相断线故障可分为两端悬空、电源端落地、负荷端落地、两端落地等。

如图 12 所示, 当系统发生 A 相断线故障时, A 相电流为零。

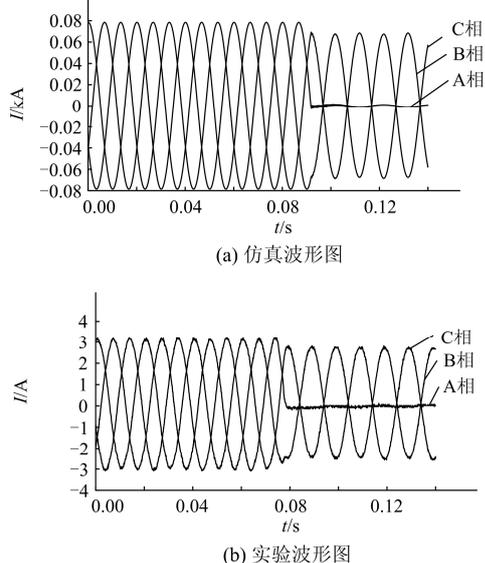


图 12 A 相断线时馈线电流波形

Fig. 12 Current waveform of feeder when A-phase breakage

如图 13 所示, 当系统发生两相断线, 相当于故障馈线切除两相, 其负载无法形成回路, 则故障馈线电流为零。

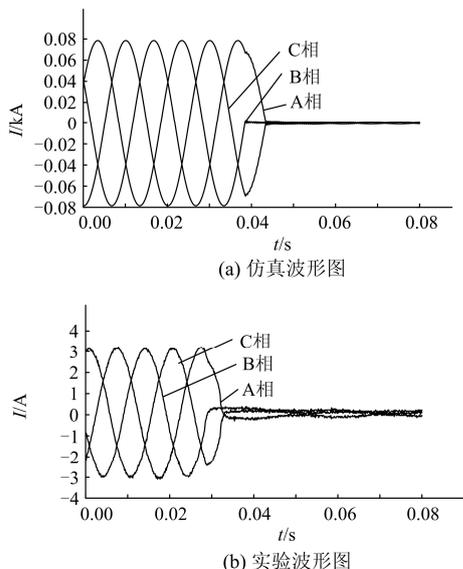


图 13 BC 相断线时馈线电流波形

Fig. 13 Current waveform of feeder when BC phase-breakage

可见, 通过逻辑控制单元实现的断线故障, 在模拟系统上表征的物理特征同仿真一致, 满足模拟系统的要求。

#### 4.2.3 接地故障

配电网中单相接地约占总故障数的 80%, 严重影响系统供电可靠性和连续性。

如图 14 所示, 系统发生 A 相低阻接地故障时, A 相的对地有残压, BC 两相电压上升为线电压。各线电压在故障初始时刻将产生振荡, 进入稳态后与正常运行时相同。

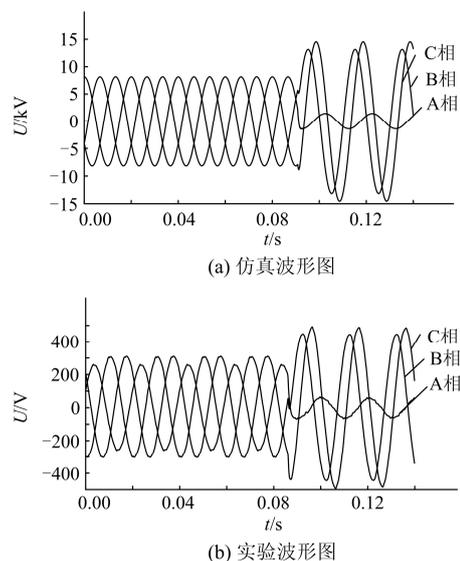


图 14 A 相低阻接地时母线电压波形

Fig. 14 Voltage waveform of bus when A-phase low resistance grounding

如图 15 所示, 对于不接地系统, 馈线末端发生两相接地短路时, 非故障相电压升高为正常电压的 1.5 倍。由于是线路末端发生故障, 母线有残压。

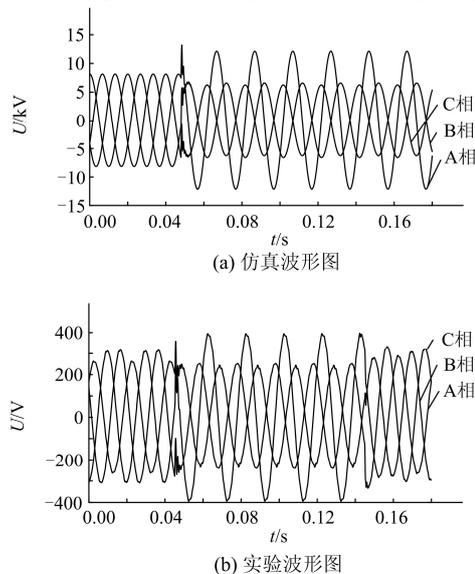


图 15 BC 相接地时母线电压波形

Fig. 15 Voltage waveform of bus when BC-phase grounding

可见，通过逻辑控制单元在模拟系统上实现的接地故障同仿真具有相似的物理现象，即满足模拟系统的要求。

### 4.3 弧光接地

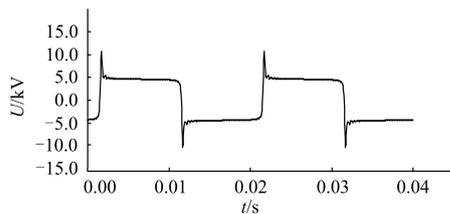
10 kV 中压配电线路单相接地故障率较高，且常伴随弧光现象，引起的弧光接地过电压常常危害电力系统的安全运行<sup>[14-15]</sup>。在物理模拟系统中，通过运动控制单元实现合理的碳棒间隙，从而产生稳定性的电弧接地。如图 16 所示，在模拟系统中串入燃弧装置，通过逻辑控制单元使系统发生单相接地，令运动控制单元工作，拉开电弧间隙，使其产生稳定性的弧光接地，模拟实际配网中的弧光接地故障。



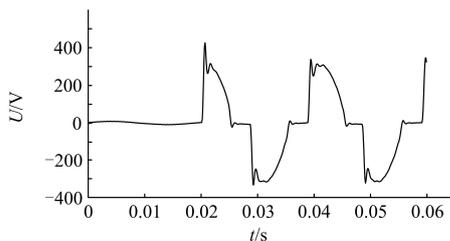
图 16 实物模型 A 相弧光接地故障

Fig. 16 Physical model A phase arc ground fault

如图 17 所示，当系统发生弧光接地时，电弧电压在过零期间急剧变化，波形近似马鞍形状。



(a) 仿真波形图



(b) 实验波形图

图 17 电弧性故障时电弧电压波形

Fig. 17 Arc voltage waveform of arc fault

可见，通过不同控制单元间的配合，可以在模拟系统上实现弧光接地故障，其故障信息与仿真基本一致，满足模拟系统的要求。

## 5 结论

本文基于 PLC 设计实现了配电网物理模拟系统的控制单元，主要包括：核心控制单元、逻辑控制单元和运动控制单元。配电网物理模拟系统实验与 PSCAD/EMTDC 仿真结果对比表明，所设计 PLC 控制单元，可作为构建分布式模块化配电网物理模拟系统的枢纽、故障模拟单元的逻辑核心、稳定弧光接地故障的控制主干，它们协同作用下的配电网物理模拟系统，能正确反映实际系统正常运行和故障工况，为配电网保护和自动化设备研究与测试提供有力平台支撑。

## 参考文献

[1] 杨德先, 陈德树, 张凤鸽, 等. 现代电力系统动态模拟实验室建设和运行[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 118-121.  
 YANG Dexian, CHEN Deshu, ZHANG Fengge, et al. Construction and operation of modern power system dynamic simulation laboratory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 118-121.

[2] 何志鹏, 郑永康, 李迅波, 等. 智能变电站二次设备仿真培训系统可视化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 111-116.  
 HE Zhipeng, ZHENG Yongkang, LI Xunbo, et al. Research on visualization of secondary equipment simulation training system for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 111-116.

[3] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.  
 LIU Chunfang. Integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.

[4] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 配电网多级继电保护配合的关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 35-41.  
 LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Study on key technologies of multi-level relay protection coordination in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 35-41.

[5] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.  
 DOI 10.1186/s41601-016-0024-y

[6] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying

- protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0023-z
- [7] 邱德锋, 李钢, 田杰, 等. 柔性直流配电网动态模拟系统设计及实现[J]. 供用电, 2016, 33(8): 50-56.  
QIU Defeng, LI Gang, TIAN Jie, et al. Design and implementation of dynamic simulation system for flexible DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(8): 50-56.
- [8] ALAYÓN S, GONZÁLEZ C, TOLEDO P. A laboratory experiment for teaching automation inspired by the smart home[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2013, 21(S1): 121-131.
- [9] 念丽波, 张文斌, 苏适, 等. 全开放可实时监控式双馈风力发电实验平台研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 104-111.  
NIAN Libo, ZHANG Wenbin, SU Shi, et al. Full-scale real-time monitoring of double-fed wind power generation experimental platform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 104-111.
- [10] GARDEL VICENTE A, BRAVO MUNOZ I, GALILEA J L L, et al. Remote automation laboratory using a cluster of virtual machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3276-3283.
- [11] 翟瑞聪, 高雅. 电力设备远程监测诊断中心系统遥视信息联动应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 150-154.  
ZHAI Ruicong, GAO Ya. Study on application of tele-information linkage in remote monitoring and diagnosis center of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 150-154.
- [12] 吕卫阳. PLC 技术综述[J]. 自动化博览, 2008(增刊 1): 16-19.  
LÜ Weiyang. Review of PLC technology[J]. Automation Expo, 2008(S1): 16-19.
- [13] SYSALA T, POSPICAL M, NEUMANN P. Monitoring and control system for a smart family house controlled via programmable controller[C] // 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC), Tatranska Lomnica, 2016: 706-710.
- [14] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.  
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Study on modeling and simulation of single-phase grounding arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [15] 郭谋发, 严敏, 陈彬, 等. 基于波形时域特征聚类法的谐振接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 59-66.  
GUO Moufa, YAN Min, CHEN Bin, et al. Fault line selection of resonant grounding system based on waveform time domain clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 59-66.

收稿日期: 2016-11-09; 修回日期: 2017-04-12

作者简介:

杨华锋(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化;

洪翠(1972—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统与配电网自动化、新能源发电。E-mail: hongcui@fzu.edu.cn

(编辑 张爱琴)