

10 kV 线路保护测控装置的同期合闸功能实现

徐玉琴¹, 聂 暘¹, 高 原², 王 雪¹, 康 慧³, 焦彦军¹

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

3. 北开电气集团有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 分析了同期合闸方式, 给出了实现同期合闸的详细条件和实现方案。采用周期计算频率, 利用以 CPU STM32F407 为核心的线路保护测控装置硬件平台开发了同期合闸软件, 实现了同期合闸功能。微机继电保护系统测试和动模实验结果表明, 所提同期合闸实现方案合理, 能够快速准确地实现同期合闸功能, 提高馈线保护性能。

关键词: 继电保护; 线路保护; 测控装置; 同期合闸; 软件开发; 硬件

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.05.016

0 引言

随着能源政策的调整, 一些与主电网并网的地方小电源(如小水电站、自备电厂等)日益增多, 10 kV 配电网结构日益复杂。电网对 10 kV 线路保护、测控装置的功能配置要求越来越多, 性能要求越来越高^[1-4]。其中, 实现同期合闸已是 10 kV 线路保护测控装置的必备功能之一。

文献[5-6]分析了变电站测控装置的硬件结构设计及同期点预报警算法, 但并未具体介绍同期合闸原理及软件实现流程。文献[7]提出并实现了一种新型微机自动准同期装置, 采用频率差和电压差的自适应控制方法, 以及单向频率差和单向相角差并列原则, 但该方法测量精度较低, 并且运行不够稳定, 在较大冲击下容易发生并列的情况。

本文说明了同期合闸方式, 给出了实现同期合闸的详细条件约束及实现方案, 介绍了所研发的以 CPU STM32F407 为核心的线路保护测控装置硬件系统, 包括主 CPU 处理器系统模块、模数采集与处理模块、开入/开出量模块、人机接口模块、通信模块及电源模块等, 它也是实现同期合闸功能的硬件平台。同时, 本文说明了同期合闸中所采用的频率测量方法及实现方案, 确定了完整的同期合闸软件流程, 采用 C++ 开发语言完成了软件开发。通过微机继电保护测试实验和动模实验验证了同期合闸功能的准确性。

1 同期合闸原理

对带有地方电源的 10 kV 线路, 为了满足运行方式的需要, 线路保护测控装置中需配备同期合闸功

能, 实现电网互联^[8-9]。进行同期合闸操作时, 必须考虑两侧频率、电压之间是否满足同期条件, 避免冲击电流给电网带来的振荡和冲击^[10]。

理想同期合闸条件为断路器两侧电压幅值相等、频率相同, 断路器合闸的瞬间相角差为 0°。但实际同期合闸操作并不能完全满足上述条件。本文结合电网运行情况, 具体分析同期合闸方式及所需满足条件。

1.1 自动检无压合闸

检无压合闸即断路器两侧均没有电压或其中任意一侧没有电压, 需要测量母线侧电压 U_m 和线路侧电压 U_x , 同时判断是否有电压互感器(TV)断线闭锁信号。自动检无压合闸分为以下 2 种情况。

a. 当线路侧电压 U_x 与母线侧电压 U_m 都小于无压定值, 且电压互感器断线没有发出闭锁信号时, 满足同期合闸条件。

b. 当线路侧电压 U_x 与母线侧电压 U_m 有且只有一侧有电压, 且电压互感器断线没有发出闭锁信号时, 满足同期合闸条件。

在两侧都有电压的情况下, 同期合闸程序自动识别是同频并网还是差频并网。由于测量过程中两侧的频率存在误差 $|\Delta f|$, 因此, 当 $|\Delta f| < 0.05$ Hz 时就认为是同频并网, 否则就认为是差频并网。

1.2 同频并网

同频并网即断路器两侧是同一系统的两部分, 合上断路器后电网在此处增加 1 个联络点, 并网时应同时满足以下 3 个条件:

a. 母线电压、线路电压、母线侧频率和线路侧频率在正常范围内, 并且满足 $|\Delta f| < 0.05$ Hz;

b. 母线侧电压和线路侧电压的差值 $|\Delta U|$ 小于最大允许电压差值;

c. 母线侧电压相角与线路侧电压相角差 $|\Delta \phi|$ 小于最大允许相角差。

收稿日期: 2015-02-01; 修回日期: 2015-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51367059)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51367059)

1.3 差频并网

差频并网是 2 个无联系的系统并网或发电机组并网,并网时应同时满足以下 5 个条件。

a. 母线电压、线路电压、母线侧频率和线路侧频率均在正常范围内。

b. 母线侧频率和线路侧频率的差值满足式(1):
$$0.05 < |\Delta f| < |\Delta f_{\max}| \quad (1)$$

其中, $|\Delta f_{\max}|$ 为最大允许频率差。

c. 母线侧电压和线路侧电压的差值 $|\Delta U|$ 小于最大允许电压差值。

d. 母线侧电压与线路侧电压的相角差逐渐减小。

e. $|\phi - \phi_{\text{da}}| < \varepsilon$, 其中 ϕ 为导前角测量值, ϕ_{da} 为导前角, ε 为误差精度。导前角计算公式如式(2)所示:

$$\phi_{\text{da}} = 2\pi \Delta f t_{\text{da}} \quad (2)$$

其中, t_{da} 为导前时间。

2 同期合闸实现方案

2.1 频率计算方法

频率测量是同期合闸的重要内容之一,本装置采用周期法计算频率。周期法是一种基于硬件电路测频的方法,容易实现,而且电力系统的频率变化具有一定惯性。因此,周期法测频在精度和时间上都满足要求^[11-12]。周期法测频原理如图 1 所示。

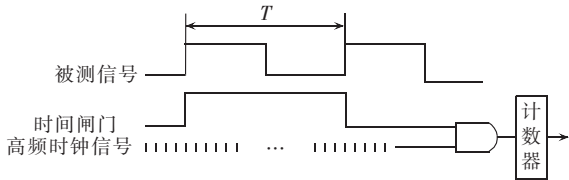


图 1 周期法测频原理图
Fig.1 Schematic diagram of cyclic frequency measuring

时间闸门的开放时间为被测信号的周期 T , 高频时钟信号每隔 t_{CLK} 发 1 次信号, 记录时间 T 内所发高频信号的个数 N , 则周期 T 可用式(3)进行计算, 测量频率如式(4)所示。

$$T = N t_{\text{CLK}} \quad (3)$$

$$f = 1/T = 1/(N t_{\text{CLK}}) \quad (4)$$

周期法只需 1 个周期就可以测量频率, 高频信号频率越高, 测量就越准确。

2.2 同期合闸软件程序流程

本装置中同期合闸程序按照图 2 编写。

3 硬件系统设计

3.1 硬件系统构成

同期合闸功能是在线路保护测控装置的统一硬件平台上实现的。硬件电路采用模块化设计, 主要由主 CPU 处理器系统模块、数据采集与处理模块、开

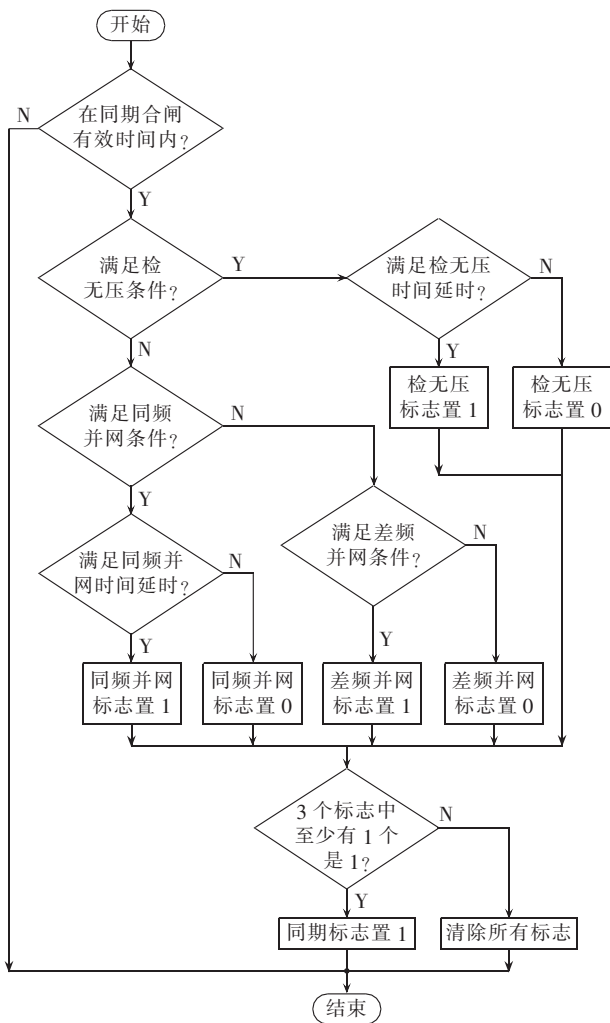


图 2 同期合闸程序流程图

Fig.2 Flowchart of synchronous closing routine

入/开出量模块、人机接口模块、通信模块及电源模块等组成,如图 3 所示。

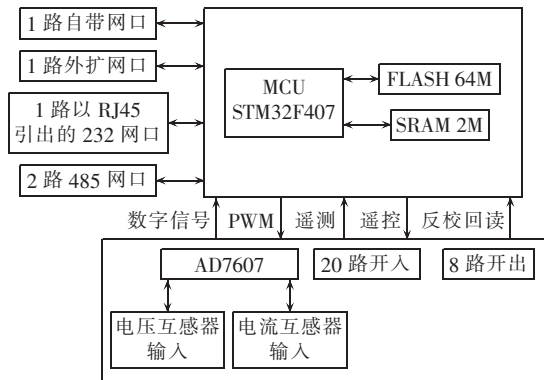


图 3 硬件系统构成图

Fig.3 Composition of hardware system

系统 CPU 为 MCU STM32F407 芯片,采用 STM32F 系列的 ARM-cortex4 内核,具有浮点运算能力和增强的数字信号处理(DSP)指令,新增信号处理的功能,提高了运行速度。另外,以 MCU STM32F407 芯片为核心的硬件系统主要负责人机对话的管理以及与

内/外部进行通信联络的任务,其主要硬件设计电路包括 2 路 DM9000A 以太网接口、3 个串行接口和 1 个对时接口。

线路保护测控装置需要对三相电压、三相电流、不平衡电压、不平衡电流及零序电流等进行 12 路交流采样,为保证数据采样的速度和精度,采样电路选用了外部模数转换芯片 AD7606。

3.2 开关量输入/输出板

开关量输入电路主要完成外部信号状态的输入任务,主要包括断路器与隔离开关的辅助触点及跳合闸的位置、继电器的接点输入等。本装置接收 DC 24 V 开入信号,共有 20 路开关量输入。开关量输入信号经过光耦隔离,再通过 74HCT245 驱动传入 CPU。

开关量输出板的输出继电器采用高容量型继电器,节点容量高达 AC 220 V、16 A,可保证硬件输出回路的可靠性。继电器驱动采用 24 V 驱动,并具有完善的防误闭锁功能。

3.3 模拟量输入板

模拟量输入板共有 12 路交流输入,即:三相电压、三相电流、三相测量电流、1 路零序电流、1 路不平衡电流、1 路不平衡电压。电压互感器输入采用 300 V/7.07 V 电压互感器,电流互感器输入采用 50 A/7.07 V 电流变换器将电压和电流分别转化为小电压信号传输至 CPU 板,供 AD7606 采样。同期合闸母线电压、线路电压都通过该模块选择、转换。

3.4 通信接口

本装置共有 2 路以太网接口,其中 1 路为 CPU 自带,另外 1 路通过并行总线扩展。选用 DM9000A 芯片作为以太网的物理层接口芯片。

3.5 频率测量电路

线路保护测控装置测频原理如图 4 所示。测频电路将电压正弦波信号经过光耦隔离输入互感器和比较电路,最终输出与正弦波频率相等的方波信号。

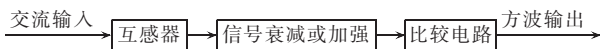


图 4 测频原理图

Fig.4 Schematic diagram of frequency measuring

4 同期合闸实验测试

利用 PW30AE 型继电保护测试仪对线路保护测控装置进行了测试,为检验同期合闸功能的实现,主要测试内容如下。

a. 线路侧检无压元件定值校验。

测试方法:投入同期功能和检无压合闸功能,设置无压检测时间定值为 0 s。A、B、C 三相电压正常,按照表 1 数据设置线路侧电压,测试装置动作行为。表中测量值分别取 $0.975U_{set}$ 和 $1.025U_{set}$, U_{set} 为相电压整定值。

表 1 线路侧检无压元件定值校验

Table 1 Setting calibration of line-side no-voltage check element

整定值/V	测量值/V	动作结果
5.77	5.63	动作
	5.91	不动作
17.32	16.89	动作
	17.75	不动作
28.87	28.15	动作
	29.59	不动作

分析表 1 测试结果可知,当测量电压小于整定值时,满足检无压合闸条件,发出同期合闸命令;反之,装置不动作,与所编写程序的逻辑相符合。

b. 同频检测元件定值校验。

测试方法:两侧电压有效值均在正常范围内,电压差为 0,初始相位差为 0°,按照表 2 数据设置电压频率,测试装置动作行为。

表 2 同频检测元件定值校验

Table 2 Setting calibration of same-frequency check element

频率差/Hz	母线频率/Hz	线路频率/Hz	动作结果
0.03	50.00	50.03	动作
	49.97	50.00	动作
0.05	50.00	50.05	不动作
	49.95	50.00	不动作
0.07	50.00	50.07	不动作
	49.93	50.00	不动作

由表 2 测试结果可知,当频率差小于设定频率差 0.05 Hz 时,能够实现同频并网;大于等于设定频率差时,装置不动作。测试结果与理论分析相符。

c. 差频检测元件定值校验。

测试方法:两侧电压有效值均在正常范围内,电压差为 0,两侧频率在正常范围内,按表 3 设置频率值,初始相位差设置为较大数值,测试装置动作行为。

表 3 差频检测元件定值校验

Table 3 Setting calibration of different-frequency check element

频率差/Hz	母线频率/Hz	线路频率/Hz	动作结果
0.03	50.00	50.03	不动作
	49.97	50.00	不动作
0.05	50.00	50.05	不动作
	49.95	50.00	不动作
0.07	50.00	50.07	动作
	49.93	50.00	动作

由表 3 测试结果可知,当频率差大于设定频率差 0.05 Hz 时,能够实现差频并网;小于等于设定频率差时,装置不动作。测试结果与理论分析相符。

5 动模实验

为了进一步验证线路保护测控装置的同期合闸性能,搭建如图 5、图 6 所示的测试系统进行动模

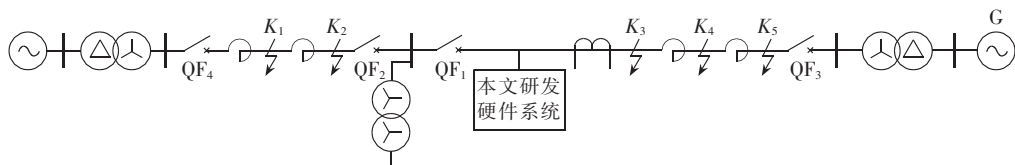


图 5 检无压、差频合闸实验系统

Fig.5 Test system of no-voltage check and different-frequency closing

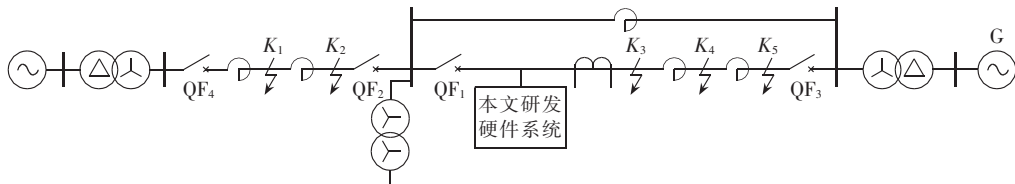


图 6 同频合闸实验系统

Fig.6 Test system of same-frequency closing

实验。本文装置接在 QF_1 处。设置最大允许频率差为 1 Hz。以下波形图中 U_x 表示线路侧电压, U_a 表示 A 相母线电压。

a. 检无压合闸。

采用图 5 所示系统, 在 QF_2 、 QF_4 闭合, QF_1 、 QF_3 断开的情况下接入同期合闸开入, 此时母线侧有电压, 线路侧没有电压。利用 DF1024 录波仪进行录波, 试验波形如图 7 所示。

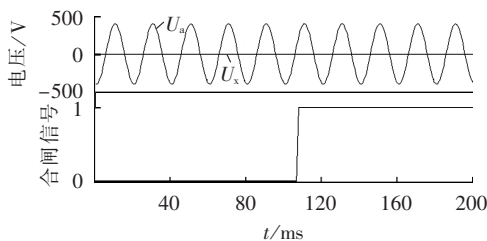


图 7 检无压实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of no-voltage check

由图 7 可知, 母线侧有电压, 线路侧没有电压时可以合闸。

b. 差频合闸。

采用图 5 所示系统。令 QF_2 、 QF_3 、 QF_4 闭合, QF_1 断开。

调节发电机转速, 使发电机侧频率在同频检测门槛值 (0.05 Hz) 和最大允许频率差之间, 接入同期合闸开入, 实验波形如图 8 所示。

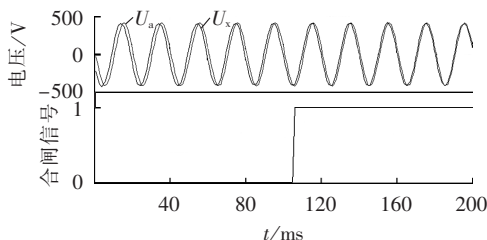


图 8 差频合闸实验波形(1)

Fig.8 Experimental waveforms of different-frequency closing(1)

调节发电机转速, 使发电机侧频率大于最大允许频率差, 接入同期合闸开入, 实验波形如图 9 所示。

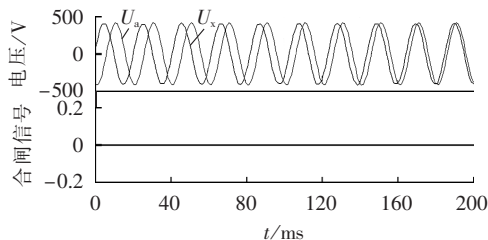


图 9 差频合闸实验波形(2)

Fig.9 Experimental waveforms of different-frequency closing(2)

由图 8、图 9 可知, 频率小于最大允许频率差时可以在合适时刻发出合闸命令, 对应合闸时刻的相位差很小; 频率大于最大允许频率差值时不会发出合闸命令。

c. 同频合闸。

采用图 6 所示系统, QF_2 、 QF_3 、 QF_4 闭合, QF_1 断开。设置最大允许相位差为 30° , 并联线路带较轻负荷, 测试线路断路器两侧电压相位差小于最大允许相位差时, 接入同期合闸开入, 实验波形如图 10 所示。

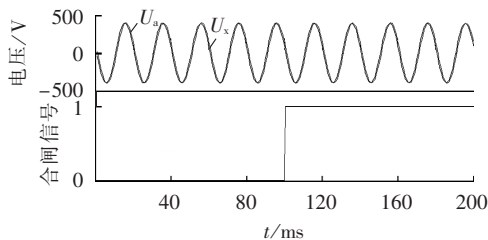


图 10 同期合闸实验波形(1)

Fig.10 Experimental waveforms of synchronous closing(1)

设置最大允许相位差为 10° , 并联线路带较重负荷, 测试线路断路器两侧电压相位差大于最大允许相位差时, 接入同期合闸开入, 实验波形如图 11 所示。

由图 10、图 11 可知, 并联线路轻载且相位差小

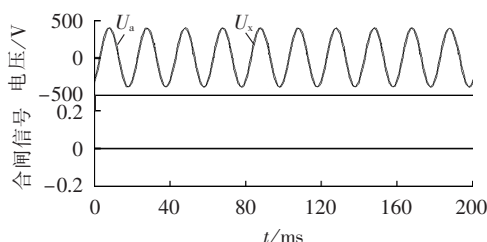


图11 同期合闸实验波形(2)

Fig.11 Experimental waveforms of synchronous closing(2)

于定值时会发出合闸命令,重载时不满足合闸条件,故没有发出合闸命令。

动模实验波形表明本文所提同期合闸方案能够快速准确地识别同期合闸方式,实现预期目标。相较于文献[7-8]中所提方法,本文方案细化了同期合闸程序流程,全面考虑了同期合闸的不同方式,降低了装置的误动及拒动概率,保证配电网安全可靠运行。

6 结论

本文分析了同期合闸方式,细分了同期合闸条件,利用线路保护测控装置硬件平台实现了同期合闸功能。

本装置CPU模块采用MCU STM32F407芯片,可准确完成数据采集和信号处理任务,提高了系统运行速度。利用硬件电路测频,易于实现,频率及频率滑差误差较小。微机继电保护测试和动模实验结果表明,装置能够正确完成同期合闸功能,具有良好的实用价值。

参考文献:

- [1] 单卫民,梁志瑞,郭海全. 10 kV 馈线自动化实现方式分析[J]. 河北电力技术,2012,31(2):28-30.
SHAN Weimin,LIANG Zhirui,GUO Haiquan. 10 kV feeder automation model analysis[J]. Hebei Electric Power,2012,31(2):28-30.
- [2] TAN Zhihai,GE Liang,SUN Qiupeng,et al. Distribution automation system modeling based on information sharing[C]//China International Conference on Electricity Distribution. Shenzhen, China:[s.n.],2014:1000-1004.
- [3] 张延辉,郑栋梁,熊伟. 10 kV 馈线自动化解决方案探讨[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(16):150-152.
ZHANG Yanhui,ZHENG Dongliang,XIONG Wei. Discussion of 10 kV feeder automation solutions[J]. Power System Protection and Control,2010,38(16):150-152.
- [4] 韩晋,黄健. 同期捕捉算法的改进及实现[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):108-112.
HAN Jin,HUANG Jian. Improved and implementation of sync-capture algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):108-112.
- [5] 周斌,张斌,闫承志. 数字化变电站同期功能的实现[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):57-60.
ZHOU Bin,ZHANG Bin,YAN Chengzhi. Realization of quasi-synchronization function in digitalized substations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):57-60.
- [6] 周斌,鲁国刚. 具有检同期合闸功能的变电站测控装置[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):91-93.
ZHOU Bin,LU Guogang. Substation measuring and control device with synchronization function[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(1):91-93.
- [7] 彭晓涛,王少荣,程时杰. 高性能微机自动准同期装置[J]. 电力系统自动化,2002,26(9):75-77.
PENG Xiaotao,WANG Shaorong,CHENG Shijie. A high performance microprocessor device[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(9):75-77.
- [8] 邓金启. “四遥”站遥控检同期合闸功能的实现[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):79-80.
DENG Jinqi. Realization of remote switch-on function with synchronism check[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(8):79-80.
- [9] 金光哲,徐殿国,高强,等. 基于自适应复合控制的同步电机软启动自动准同期并网控制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):93-98.
JIN Guangzhe,XU Dianguo,GAO Qiang,et al. Automatic quasi-synchronization based on adaptive complex control for synchronous motor soft starting system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):93-98.
- [10] 沙建峰,韩潇,李永敬,等. 变电站同期合闸功能原理及典型故障的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(19):141-144.
SHA Jianfeng,HAN Xiao,LI Yongjing,et al. Study about synchronization brake function principle and type fault in the transformer substation[J]. Power System Protection and Control,2011,39(19):141-144.
- [11] 王拔群,周孟然. 一种基于傅氏变换算法的系统频率变化求取方法[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):54-57.
WANG Baqun,ZHOU Mengran. An algorithm for striking method of system frequency changes based on Fourier transform[J]. Power System Protection and Control,2009,37(23):54-57.
- [12] 牟华龙,邢锦磊. 基于傅里叶变换的精确频率测量算法[J]. 电力系统自动化,2008,32(23):67-70.
MU Longhua,XING Jinlei. An accurate frequency measuring algorithm for power systems based on Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(23):67-70.
- [13] SEZI T. A new method for measuring power system frequency [C]//1999 IEEE Transmission and Distribution Conference. New Orleans,LA,USA:IEEE,1999:400-405.
- [14] 张同尊,邵俊松,方永杰. 一种基于离散傅里叶变化的频率测量算法[J]. 电力系统自动化,2007,31(22):70-72.
ZHANG Tongzun,SHAO Junjie,FANG Yongjie. An algorithm for frequency measurement based on DFT[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(22):70-72.
- [15] 商国才. 电力系统自动化[M]. 天津:天津大学出版社,1999:210-220.
- [16] 程肖. 10 kV 馈线智能控制箱的设计与研究[D]. 保定:华北电力大学,2012.
CHENG Xiao. Design and research intelligent control box of 10 kV feeder[D]. Baoding:North China Electric Power University,2012.

[17] 程干江. 智能馈线自动化方案[J]. 电力系统自动化,2001,25(9): 42-44.
CHENG Ganjiang. An intellective scheme for pursuance of feeder automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(9):42-44.

作者简介:

徐玉琴(1964—),女,江西新余人,教授,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制,分布式发电技术,电力系统继



徐玉琴

电保护与自动化(E-mail:xuyuqin_ncepu@126.com);

聂 暘(1991—),女,天津人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护与自动化(E-mail:nyncepu@126.com);

高 原(1990—),男,山西兴县人,硕士研究生,主要研究方向为遥感与地理信息系统(E-mail:1282312398@qq.com)。

Implementation of synchronous closing for protection,measuring & control device of 10 kV line

XU Yuqin¹,NIE Yang¹,GAO Yuan²,WANG Xue¹,KANG Hui³,JIAO Yanjun¹

- (1. School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
2. College of Urban and Environmental,Northwest University,Xi'an 710127,China;
3. Northern Electric Group Corporation,Jiading 314000,China)

Abstract: The synchronous closing mode is analyzed,and its detailed conditions and implementation scheme are given. With the cyclic frequency measuring,the hardware platform of line protection,measuring & control device,with CPU STM32F407 as its core,is used to develop the synchronous closing software and realize the function. The results of test and dynamic simulative experiment for microcomputer-based relay protection system show that,the proposed implementation scheme is reasonable,which can quickly and accurately realize the synchronous closing function to enhance the performance of feeder protection.

Key words: relay protection; line protection; measuring & control device; synchronous closing; software development; hardware

(上接第 90 页 continued from page 90)

DU Zhaoman,ZHAO Fang. A new fault location algorithm using asynchronized two-terminal data[J]. Relay,2004,32(7):7-9.
[16] 桂勋,刘志刚,韩旭东,等. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(19): 63-69.
GUI Xun,LIU Zhigang,HAN Xudong,et al. An accurate algorithm of two-terminal fault location based on the distribution of line voltage along HV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(19):63-69.

作者简介:



陈 旭

陈 旭(1989—),男,河南商丘人,硕士,主要研究方向为输电线路故障定位(E-mail:chenxu89@126.com);

朱永利(1963—),男,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为输变电设备在线监测、智能分析与智能电网。

Dual-terminal asynchronous fault location algorithm for two parallel overhead lines on same pole

CHEN Xu,ZHU Yongli,GUO Xiaohong,ZHAO Lei,GAO Yanfeng

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

Abstract: A dual-terminal asynchronous fault location algorithm is proposed for two parallel overhead lines on same pole,which eliminates the effect of asynchronous phase based on the principle that the quotient of the common positive-sequence voltage to the common positive-sequence fault voltage of one terminal is equal to that of the opposite terminal,and adopts the bisection method or the secant method to locate the fault. The results of qualitative analysis and simulation with EMTP show that,without false roots and immune to the transition resistance and the fault type,the proposed algorithm does not need data synchronization between two terminals and has high fault location accuracy.

Key words: distributed parameter; two parallel overhead lines on same pole; electric fault location; false roots