

DOI: 10.7667/PSPC171411

一种新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置

吴斌, 陈纲, 金云奎, 李国

(国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 准确地计算电容电流是消弧线圈自动跟踪补偿装置应用基础。采用一种简单实用的带阻尼电阻的消弧线圈电容电流计算方法, 只需通过投切消弧线圈接地系统的阻尼电阻便可求解电容电流。研发了基于多核控制器的自动跟踪补偿装置, 多核分工协调完成自动跟踪补偿装置的复杂任务, 避免了传统补偿装置需要多个控制器的繁琐设计。具体介绍了各个控制核的功能, 并搭建了消弧线圈自动跟踪补偿装置 IEC61850 模型。实验测试所研发装置满足 IEC61850 一致性要求, 而且装置的电容电流补偿具有良好的精度。

关键词: 消弧线圈; 阻尼电阻; 电容电流; 补偿装置; 通信模型

A new type of arc-suppression coil automatic tracking compensation device

WU Bin, CHEN Gang, JIN Yunkui, LI Guo

(Taian Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Taian 271000, China)

Abstract: Accurately calculating the capacitance current is the application base of the arc suppression coil automatic tracking compensation device. This paper uses a simple and practical method of calculating the capacitance current of arc suppression coil with damping resistance. This method only needs to solve the capacitor current by cutting the damping resistance of the arc suppression coil grounding system. Automatic tracking compensation device based on multi-core controllers is developed. Multi-core finishes labor division to complete the automatic tracking compensation device complex tasks, which avoids the cumbersome design of traditional compensation device that requires a number of controllers. This paper specifically describes the functions of each control kernel and builds the IEC61850 model of arc suppression coil automatic tracking compensation device. The experimental test meets the IEC61850 conformance requirements and the capacitor current compensation has good accuracy.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 520609170005).

Key words: arc suppression coil; damping resistance; capacitor current; compensation device; communication model

0 引言

小电流接地系统的配电网系统中发生单相接地时, 故障相对地电压降为零, 非故障相的对地电压将升高到线电压, 但系统的线电压维持不变。国家标准规定这类电网在发生单相接地故障后允许短时间(当前允许 2 个小时)带故障运行, 以提高电网的供电的可靠性^[1]。

但单相接地故障为弧光接地时, 配电网可能遭受高达 3.5 倍相电压的过电压损害, 同时随着配电网规模的增大带来的电流增加, 配电网安装消弧线

圈将有助于利于故障点电弧的自行熄灭, 可使故障点的危害程度降低^[2]。

发生单相接地时, 消弧线圈产生的电流将补偿因单相接地而形成的电容电流, 使得接地电流减小, 同时使得故障相恢复电压速度减小, 治理电容电流过大所造成的危害。

我国从 80 年代便开始了配电网采用消弧线圈研究, 并研制了诸多消弧线圈补偿装置, 在电力工程实践中取得了一定的效果, 但目前还存在两个亟需解决的问题: (1) 精确、方便的电容电流实测方法; (2) 智能电网背景下的消弧线圈补偿装置的智能化发展。

消弧线圈补偿装置根据配电网所需的电容电流

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目资助(520609170005)

进行补偿, 所测量的电容电流越精确, 补偿效果越好。实测出精确的电容电流大小是提高消弧线圈补偿装置性能的基础, 消弧线圈补偿装置如果能够测量出准确的电容电流数字, 这将为补偿容量的大小提供客观依据, 从而有望实现较好的补偿效果。

消弧线圈补偿装置经历了手工操作、半自动化和自动化水平不断提高的发展过程^[3], 当前的消弧线圈补偿装置已经有了较高的智能化程度, 但还普遍存在功能孤立、信息孤岛等问题, 不同厂家的消弧线圈补偿装置还无法做到互相兼容, 实现“即插即用”的功效, 越来越难以适应电力系统自动化发展要求。

针对当前消弧线圈补偿装置的发展关键技术, 本文将根据简便的调整中性点接地阻抗的电容电流测量方法, 采用单芯集成了 4 个 ARM 核和 1 个 DSP 核的高集成度控制器, 研发新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置, 该装置遵循当前电力系统自动化领域最全面的 IEC61850 协议, 具有良好的兼容性和扩展性。

1 电容电流的测量方法

配电网电容电流测量方法可归纳为有源测量法和无源测量法两大类。有源测量法通过向电压互感器或电容器等输入特定信号实现, 因此又称注入信号法, 该方法需要额外的特定信号灌入和检测装置。无源测量法则依靠电力系统的不对称实现电容电流测量, 谐振法、中性点接地阻抗调整法等方法直接利用电力系统自身具有的不对称, 实现方法简单; 偏置电容法、偏置阻抗法等偏置法通过将偏置元件接入电力系统, 人为地制造不对称实现电容电流的测量, 但只适用于离线测量^[4-6]。

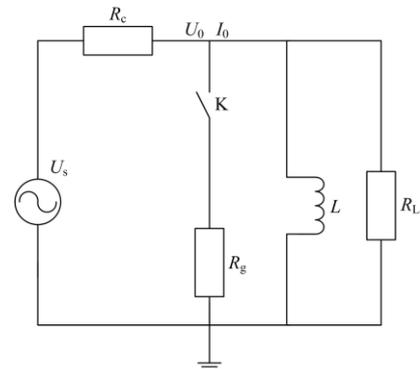
由于我国配电网的复杂性, 配电网三相之间几乎都存在一定程度的不平衡, 这时可通过改变消弧线圈支路上的阻尼电阻, 从而实现中性点位移电压的改变, 进而计算出电容电流^[7]。该方法可以实现简单方便, 无需添加额外设备便可在在线计算出较为精准的电容电流。

当前电力工程实践中, 消弧线圈接地的阻尼电阻以串联或并联两种形式接入系统中, 带阻尼电阻的消弧线圈等效电路如图 1 所示。

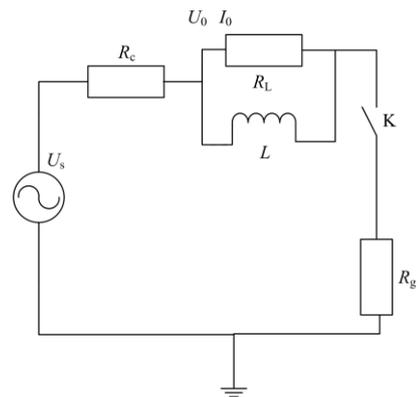
等效电路中, U_s 为等效电压源, R_c 为系统三相对地电阻, 包含了对地电容的容值大小, 为系统三相对地总电导, R_g 为阻尼电阻, L 为消弧线圈电感值, R_L 为消弧线圈自身并联等效电阻, 开关 K 控制着阻尼电阻的投入或退出。

上述等效参数中, 消弧线圈电感值 L 、消弧线圈自身并联等效电阻 R_L 和阻尼电阻 R_g 为设备出厂

时数据, 是已知量。因此, 等效电路中只有等效电压源 U_s 和系统三相对地电阻 R_c 两个未知量需要求解。



(a) 并联阻尼消弧线圈等效电路



(b) 串联阻尼消弧线圈等效电路

图 1 带阻尼电阻的消弧线圈等效电路

Fig. 1 Arc suppression coil with damping resistance equivalent circuit

由于消弧线圈中性点电压 U_0 以及流经消弧线圈中性点的电流 I_0 , 可通过现场运行测量得到; 因此, 通过操作开关 K 实现阻尼电阻 R_g 的投入和退出, 便可得到两组关于 U_0 和 I_0 的方程。通过这两个方程可方便求得所需等效电压源 U_s 和系统三相对地电阻 R_c 两个变量, 从而也可以求得等效电路的电容电流大小。

本方法采用投、切消弧线圈的阻尼电阻所形成的回路求解电容值, 从而得到电容电流。所采用的电路符合实际情况, 没有做过多的近似假设, 具有较好的精度, 而且实现过程中不需要调整消弧线圈的电感等复杂步骤, 实现简单方便。

2 装置结构

2.1 设计思路

消弧线圈自动跟踪补偿装置, 涉及电气量数据的采集以及处理、电容电流计算和补偿算法等多个任务, 当前的消弧线圈自动跟踪补偿装置主流设计

中, 通常采用 DSP+FPGA、DSP+ARM、DSP+FPGA+ARM 等多个独立的控制器芯片组合起来, 以便能及时处理上述的多个功能^[8-9]。

每个独立的控制器芯片, 除了芯片自身需占据装置的空间外, 通常还需配备电源模块、晶振模块、存储模块和调试接口等多个回路。装置中包含过多独立的控制器芯片, 会导致装置的空间过大, 设计过于复杂; 而且多个独立的控制器芯片, 如何有效地组织起来实现高效的任務, 装置设计上也具有较大的难度。

随着电力自动化协议 IEC61850 的深入应用, 电力自动装置配备 IEC61850 协议也逐步由“最好有”变成了“应该有”, 否则将难以应用到实际电力工程中。而 IEC61850 涉及软件上的面向对象编程、硬件上的多个以太网接口、需要采用操作系统等实现难点, 这对于以嵌入式为主的消弧线圈自动装置来说, 进一步增加了设计难度^[10]。

本文采用高性能的 66AK2H14 芯片作为主控制器, 研发新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置。相较于一般的控制器, 66AK2H14 芯片具有如下突出特征^[11]:

1) 单芯集结了 4 个 ARM 核和 8 个 DSP 核, 芯片内部的多个控制器可以进行高效的信息交换, 并共享外设, 避免了多个控制器各自所需的配套过多带来的弊端。

2) 提供全面、灵活的以太网支持。IEC61850

当前采用以太网作为通信网络, 消弧线圈自动跟踪补偿装置作为间隔层的智能电子设备, 需要具备同时接入到站控层网络和过程层网络, 而且 SV、GOOSE 网存在各自组网或多网合一等多种模式, 对以太网接口要求较高。

66AK2H14 芯片内部集结了两个以太网通信接口, 刚好适应所需接入的站控层网络和过程层网络, 同时两个以太网接口分别提供 5 个端口和 3 个端口, 从硬件层面满足以太网的接口数量需求。

尤其需要注意的是, 66AK2H14 的以太网模块具备 IEEE1588 对时功能, 能直接应用于 IEC61850 的同步对时要求。

2.2 具体设计

由于 66AK2H14 芯片的外围设计较为经典, 已有多篇文献详细介绍, 本文将重点分析 66AK2H14 芯片的多核设计这一关键技术。

66AK2H14 内部集结 4 个 ARM 核和 8 个 DSP 核, 充分利用 ARM 核专长于事务管理和 DSP 专长于计算分析的特点。ARM 能方便地移植 Linux 等操作系统, 主要满足装置功能的多样化; 而 DSP 实现装置的实时操作和计算等功能, 主要满足装置的实时性功能。

结合消弧线圈自动跟踪补偿装置所需完成的功能, 合理分配各个控制核的任务, 如图 2 所示(其中阴影部分为 66AK2H14 芯片自身已有的功能), 各个控制核的主要任务包括:

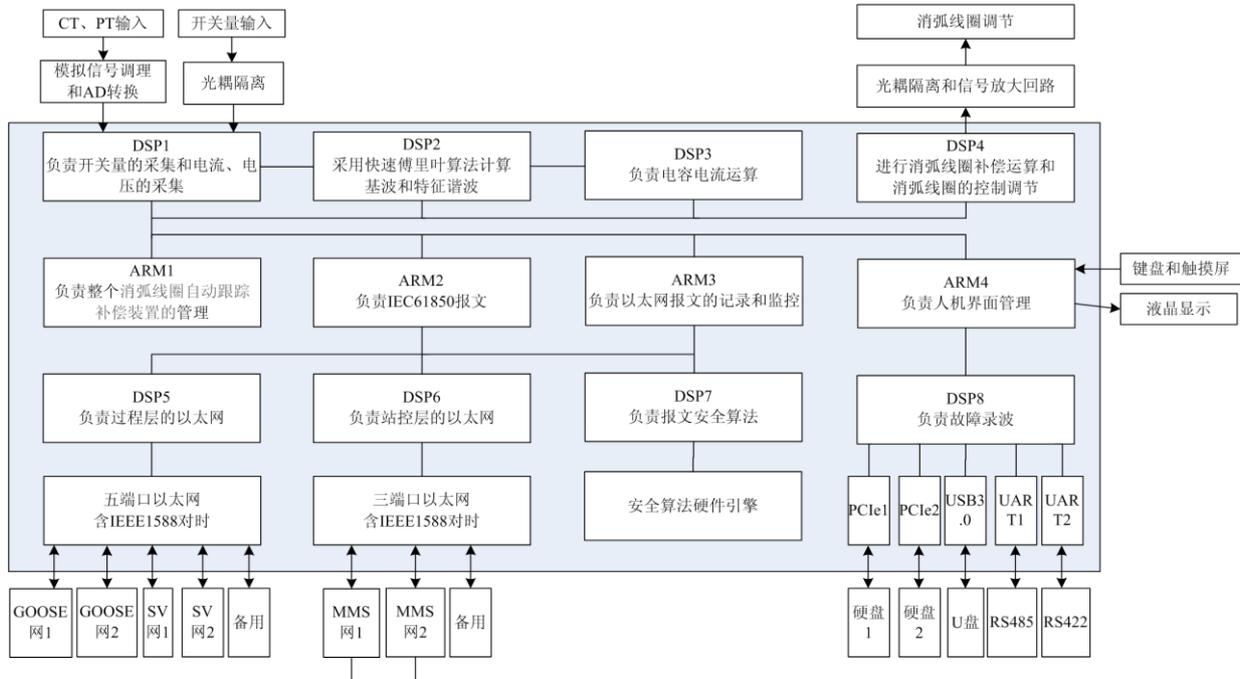


图 2 多核设计

Fig. 2 Multi-core design

ARM1 作为整个消弧线圈自动跟踪补偿装置的主控制器，负责装置的整体功能管理和各个控制核的功能协调。

ARM2 专门负责 IEC61850 发送报文的组帧和 IEC61850 发送报文的解析等功能。考虑到 IEC61850 报文采用面向对象技术，并采用 asn.1 进行解析，实现较为复杂。第三方 MMS-LITE 软件提供了 IEC61850 的开发框架，成为当前 IEC61850 的主流开发模式之一，ARM2 基于 MMS-LITE 软件进行 IEC61850 报文处理，以降低开发难度。

当采用 IEC61850 全数字电力系统时，将会产生大量的 IEC61850 报文，这些报文表征装置的运行状况，具有重要的分析价值。采用 ARM3 专门记录装置的以太网报文，并对报文分析后进行相关的预警。一方面直接分析以太网报文流量特点，预警通信网络的网络风险；另一方面，通过分析以太网报文内容表征的装置采样值和动作情况等信息，记录消弧线圈自动跟踪补偿装置运行状况。

ARM4 负责人机界面管理，通过键盘和触摸屏等多种灵活输入方式实现参数配置等功能，通过液晶显示实现装置的图形化显示功能。为了界面的友好性，ARM4 运行在嵌入式 Linux 基础上，采用 GUI 技术将消弧线圈自动跟踪补偿装置的运行情况进行图形化界面显示。

虽然 IEC61850 提出合并单元就地采集电气量和智能开关就地操作，并以通信网络取代二次电缆“硬接线”的传统方式实现电力信息共享，逐步成为当前电力自动化发展方向，但当前还有大量需要消弧线圈自动装置自身直接采集电力信息并操作调节的情况，因此 DSP1 和 DSP4 专门用于处理装置的电力信息输入和输出调节的任务。

其中，DSP1 负责开关量的输入采集和电流、电压的采集。分别从 CT 和 PT 进来的电流和电压模拟量，经信号调理回路和 AD 转换后，以数字量的形式被 DSP1 采用定时中断查询的方式读入到装置中，同时，DSP1 也采集通过光耦隔离进入装置的开关量信息。

减少算法耗时是提高消弧线圈自动跟踪补偿装置响应速度的关键，专门采用 DSP2 至 DSP4 的三个 DSP 实现不同的运算任务。其中，DSP2 采用快速傅里叶算法，将 DSP1 所采集的电流和电压采样值，计算对应的基波值以及关键特征谐波值。DSP3 专职负责电容电流运算。

DSP4 进行消弧线圈补偿运算和消弧线圈的控制调节功能。对于采用电缆传送输出信号的传统控制方法，DSP4 将控制调节输出信号经光耦隔离和

信号放大回路后，直接输出到消弧线圈；对于 IEC61850 采用 GOOSE 报文进行消弧线圈控制调节信号输出的情况，DSP4 则将控制调节结果经芯片内部总线发送给负责 IEC61850 报文的 ARM2 控制核，ARM2 组织好相应的 GOOSE 报文后，由负责过程层以太网的 DSP5 将报文发送到对应的以太网端口。

针对符合 IEC61850 的消弧线圈自动装置的应用场合，DSP5 负责过程层的以太网收发任务，进行过程层 SV、GOOSE 和 IEEE1588 报文的实时收发。过程层的 SV 和 GOOSE 分别组网且需要备用网络时，消弧线圈自动装置需要多达 4 个以太网接口，因此消弧线圈自动装置的过程层接口选用 66AK2H14 芯片内置的五端口以太网模块，以灵活适应过程层网络中 SV、GOOSE 分别组网或合网等多种情况。其中，两个以太网接口用于 SV 网络，两个以太网接口用于 GOOSE 网络，一个装置的备用以太网接口。

同理，DSP6 负责站控层网络的 MMS 等报文的收发；由于站控层的网络情况相对简单，选用 66AK2H14 芯片内置的三端口以太网模块用作站控层的以太网接口，其中，两个以太网接口用于 MMS 网络，一个装置的备用以太网接口。

DSP5 和 DSP6 所涉及的 IEC61850 处理，则交由专门负责 IEC61850 报文的 ARM2 解析报文或组帧报文。

需要注意的是，IEEE1588 时钟同步对时需要由以太网底层硬件对所接收的报文打印时间戳，很多旧式的以太网接口并不支持^[12-13]。而 66AK2H14 芯片内置的以太网模块具备 IEEE1588 对时功能，可以方便地完成 IEC61850 建议的 IEEE1588 同步对时功能。

乌克兰信息网络遭受攻击导致的大停电等事件，表明了电力通信网络风险正在逐步增加，IEC61850 报文的安全性也日益得到重视，而 IEC61850 报文的加密等安全方法又会带来运算耗时^[14]。因此，发挥 DSP 强大的计算能力，设置 DSP7 专门负责报文的安全算法，同时充分利用 66AK2H14 芯片内置的安全算法硬件引擎，加快安全算法的运算速度。

DSP8 负责故障录波，将消弧线圈自动装置产生的数据，以 COMTRADE 形式存储，存储到 66AK2H14 芯片提供的硬盘接口或 USB 接口，并扩展 RS485 和 RS422 模块，适应特殊情况下电力现场的应用需要。

3 IEC61850 模型

随着 IEC61850 第二版的发布, 已经由原先的智能变电站范围扩展到整个电力自动化系统, IEC61850 已经成为了当前电力系统自动化领域最全面和最有发展前途的协议。

IEC61850 应用基础是建立统一的信息模型, 主要体现在 IEC61850 中所提供的逻辑节点。由于 IEC61850 将更广泛应用于配电网、新能源等多样化的领域中, 需要发展更多的逻辑节点来适应各种复杂的应用场合。本文将结合 IEC61850 最新发展的逻辑节点, 结合消弧线圈自动跟踪补偿装置的功能, 建立如图 3 所示的 IEC61850 逻辑节点^[15]。

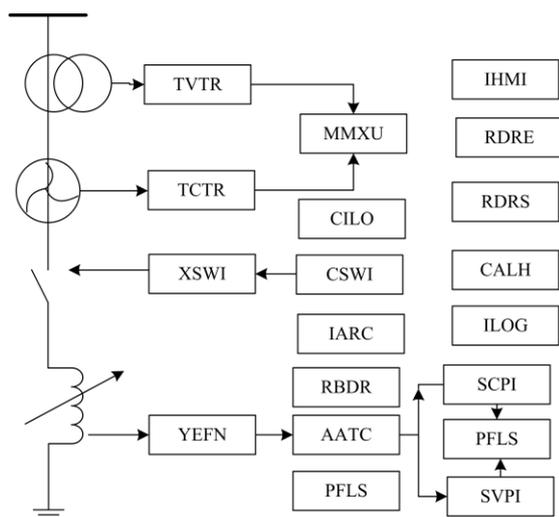


图 3 IEC61850 模型
Fig. 3 IEC61850 model

消弧线圈自动跟踪补偿装置的逻辑节点, 包括以下几大类: (1) 电气量测量逻辑节点, 包括测量逻辑节点 MMXU、电压互感器逻辑节点 TVTR 和电流互感器逻辑节点 TCTR; (2) 阻尼电阻的开关控制逻辑节点, 主要包括刀闸逻辑节点 XSWI、刀闸操作逻辑节点 SSWI 和闭锁逻辑节点 CILO; (3) 消弧线圈直接相关的逻辑节点, 包括调谐记录逻辑节点 (记录消弧线圈档位) RBDR、自动调谐功能逻辑节点 AATC、故障选线功能逻辑节点 PFLS、消弧线圈逻辑节点 YEFN; (4) 数据存储和分析告警等辅助功能节点, 包括人机接口逻辑节点 IHMI、报警处理逻辑节点 CALH、数据存档逻辑节点 (历史数据长期存档) IARC、日志记录逻辑节点 (历史数据短期存档) ILOG、故障记录功能逻辑节点 RDRE、波形数据的计算与分析逻辑节点 RDRS。具体的逻辑节点如表 1 所示。

表 1 消弧线圈自动装置逻辑节点

Table 1 Arc suppression coil automatic device logic node

序号	逻辑节点	
1	MMXU	测量逻辑节点
2	TVTR	电压互感器逻辑节点
3	TCTR	电流互感器逻辑节点
4	IHMI	人机接口逻辑节点
5	CALH	报警处理逻辑节点
6	IARC	数据存档逻辑节点 (历史数据长期存档)
7	ILOG	日志记录逻辑节点 (历史数据短期存档)
8	RDRE	故障记录功能逻辑节点
9	RDRS	波形数据的计算与分析逻辑节点
10	XSWI	刀闸逻辑节点
11	SSWI	刀闸操作逻辑节点
12	CILO	闭锁逻辑节点
13	RBDR	调谐记录逻辑节点 (记录消弧线圈档位)
14	AATC	自动调谐功能逻辑节点
15	PFLS	故障选线功能逻辑节点
16	YEFN	消弧线圈逻辑节点
17	SFPI	故障指示逻辑节点
18	SVPI	电压指示逻辑节点
19	SCPI	电流指示逻辑节点

其中, 表 1 中序号 17 到 19 的逻辑节点, 即电流指示逻辑节点 SCPI、电压指示逻辑节点 SVPI、故障指示逻辑节点 SFPI, 是国际电工委员会第 57 技术委员会(IEC TC57)第 17 工作组(WU17)新定义的故障指示相关逻辑节点。

消弧线圈自动跟踪补偿装置发现有馈线出现故障后, 根据所计算的电容电流进行补偿。消弧线圈调制补偿过程中, 故障点依然存在, 这不同于继电保护相关的逻辑节点, 继电保护逻辑节点用于检测故障后跳闸以切除故障。因此, 继电保护相关的逻辑节点并不完全适用于消弧线圈自动跟踪补偿装置的调制补偿过程。

针对配电网故障点可能存在较长一段时间的情况, IEC 61850-90-6 最新定义的一种故障指示类的逻辑节点, 主要包括电流指示逻辑节点 SCPI、电压指示逻辑节点 SVPI、故障指示逻辑节点 SFPI 三大类。

配电网出现单相接地时, 消弧线圈自动跟踪补偿装置发现电流或电压发生了变化, 不同于保护动作, 消弧线圈自动跟踪补偿装置除了进行电容电流补偿外, 还产生电流或电压故障指示信号直至该故障消失。

需要注意的是, 电流指示逻辑节点 SCPI 和电压指示逻辑节点 SVPI 表征故障电流(电压)存在或消失, 属于具有连续性质的指示事件信号, 跟继电

保护逻辑节点的短时间非连续的动作信号不一样。

电流指示逻辑节点 SCPI 和电压指示逻辑节点 SVPI 可以触发故障指示逻辑节点 SFPI, 故障指示逻辑节点 SFPI 能够表征故障性质(永久性故障或间歇性故障等)、类型(电流类故障或电压类故障)和故障程序时间等, 而且故障指示逻辑节点 SFPI 还具有计数器, 能够对故障次数进行统计。

SCPI、SVPI 和 SFPI 等故障指示相关逻辑节点, 刚好符合消弧线圈自动跟踪补偿装置的情况, 弥补了 IEC61850 第一版对消弧线圈故障指示方面的不足, 丰富了消弧线圈自动跟踪补偿装置的 IEC61850 模型。

4 测试应用

4.1 IEC61840 测试

搭建如图 4 所示的 IEC61850 测试平台, 由 IEC61850 过程层端测试仪、消弧线圈自动跟踪补偿装置、IEC61850 站控层端测试仪和报文分析仪组成, 其中, IEC61850 过程层端测试仪模拟合并单元, IEC61850 站控层端测试仪模拟后台管理系统, 报文分析仪可由运行报文捕捉软件 Wireshark 的 PC 机组成。



图 4 IEC61850 测试系统

Fig. 4 IEC61850 testing system

首先测试过程层的报文一致性^[16], 模拟合并单元根据事先设定的参数, 发送符合 IEC61850-9-2LE 的报文给消弧线圈自动跟踪补偿装置, 消弧线圈自动跟踪补偿装置均能正确识别报文, 并提取所需的电气量信息。

进一步测试变电站层的报文一致性, 模拟后台管理系统以 MMS 报文形式, 向消弧线圈自动跟踪补偿装置请求消弧线圈的电流录波信息, 消弧线圈自动跟踪补偿装置均能正确地发回包含消弧线圈电流录波信息的 MMS 报文。

整个测试过程中, 运行报文捕捉软件 Wireshark 的 PC 机同时捕捉网络报文, 并实时分析和校验报文的正确性。

4.2 电容电流测试

进行本文所研发的消弧线圈自动跟踪补偿装置的电容电流实验。由于实验条件所限, 线路分布电

容的实际值不容易获得, 也为了实验方便, 用三个大小相等的电容模拟线路的对地电容, 跟消弧线圈自动跟踪补偿装置一起挂到实验线路上进行测试, 消弧线圈自动跟踪补偿装置所测算的电容值如表 2 所示。

表 2 实验测得的电容比值

Table 2 Measured capacitance ratio

实际的电容值	计算得到的电容值	误差/%
1	0.973	2.70
2	1.865	1.75
4	3.634	2.65
6	6.012	0.20
8	7.967	0.41
10	9.793	2.07
12	11.639	3.01

从表 2 的实验结果可以看出, 该消弧线圈自动跟踪补偿装置测算出来的电容值比较接近于实际的电容值, 误差普遍在百分之三以内, 具有较好的精度。但实验结果也反映了电容误差并不稳定, 具有较大的偏差性, 主要原因有: (1) 实验过程用固定的电容来表征系统的对地电容, 这跟实际的的对地电容存在一定的误差; (2) 实验过程中所用的消弧线圈电感大小、消弧线圈支路上的阻尼电阻等都采用设备出厂时的标称值, 运行环境不同时存在一定的波动偏差。

5 结语

本文研发一种新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置, 算法上采用通过投切消弧线圈接地系统的阻尼电阻求解电容电流, 方法实现简单方便; 硬件上采用 4 个 ARM 核和 8 个 DSP 核的高性能控制器, 通过多个控制核的分工协调, 完成传统上需要多种控制器才能完成的繁琐任务。并根据当前电力设备自动化发展趋势, 所研发的消弧线圈自动跟踪补偿装置不仅能兼容传统消弧线圈补偿装置接口, 而且可无缝应用于遵循 IEC61850 的电力工程。

参考文献

- [1] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current traveling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [2] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电

- 机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
- XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin, et al. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [3] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 靳维, 张栋梁, 张洋, 等. 一种基于阻抗角差对地电容测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 121-125.
- JIN Wei, ZHANG Dongliang, ZHANG Yang, et al. A method of ground capacitance measurement based on impedance angle difference[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 121-125.
- [5] 赵军, 袁雪琼, 扈海泽, 等. 基于变电阻电压扰动的配电网对地参数精确测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 51-56.
- ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, HU Haize, et al. A new method of accurately measuring ground parameters of distribution network based on variable resistor voltage disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 51-56.
- [6] 曾祥君, 易文韬, 刘张磊, 等. 注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 77-80.
- ZENG Xiangjun, YI Wentao, LIU Zhanglei, et al. A novel technique of capacitive current resonance measurement with signal injected for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [7] 滕昊. 带阻尼电阻的谐振接地系统电容电流精确测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 97-102.
- TENG Hao. Accurate measurement method of capacitive current in resonant grounding system with damping resistance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 97-102.
- [8] 邵国君, 蔡旭. 基于 DSP 和 FPGA 的消弧线圈数字励磁调节器[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 75-77.
- SHAO Guojun, CAI Xu. Digital excitation regulator based on DSP and FPGA for arc-suppression coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 75-77.
- [9] 自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术: DL/T1057—2007[S].
- [10] 梅德冬, 樊瑞, 周斌. IEC 61850 模型信息的规则表达与校验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 131-136.
- MEI Dedong, FAN Rui, ZHOU Bin. Research on regular expressions and check of IEC 61850 model information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 131-136.
- [11] TI.com.66AK2H14 multicore DSP+ARM keystone II system-on-chip[EB/OL].http://www.ti.com/product/66AK2H14.
- [12] 贺春, 陈光华, 张道农. IEEE Std 1588-2008 精确时间同步协议行业规范在电力系统的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 133-138.
- HE Chun, CHEN Guanghua, ZHANG Daonong. Research on standard profile for use of IEEE Std 1588-2008 precision time protocol in power system applications[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 133-138.
- [13] 李俊刚, 刘星, 张爱民, 等. 智能变电站 IEEE1588 时钟同步冗余技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 97-101.
- LI Jungang, LIU Xing, ZHANG Aimin, et al. Research on redundant technology of IEEE1588 clock synchronization system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 97-101.
- [14] 王智东, 王钢, 许志恒, 等. 一种改进的 GOOSE 报文 HMAC 认证方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3627-3634.
- WANG Zhidong, WANG Gang, XU Zhiheng, et al. An HMAC based authenticated method for GOOSE packets[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3627-3634.
- [15] IEC 61850-6 communication networks and systems for power utility automation: part 6 configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]. 2008.
- [16] 王忠, 张晓莉, 李忠安, 等. 继电保护装置自动测试系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 130-135.
- WANG Zhong, ZHANG Xiaoli, LI Zhongan, et al. Design of automatic test system for relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 130-135.

收稿日期: 2017-09-20; 修回日期: 2017-11-28

作者简介:

吴斌(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: yyju245@163.com

陈纲(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电网线路设计、施工、带电作业、电网建设及工程管理;

金云奎(1975—), 男, 本科, 高级技师, 主要研究方向为配电设备运维检修和带电作业。

(编辑 张爱琴)