

# 数字化集成保护与控制系统结构设计方案研究

董新洲, 丁磊

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 介绍了一种以多功能保护控制器 MPCU 为核心的数字化集成保护与控制系统 DIPC。DIPC 适用于数字化变电站, 通过非传统互感器、合并单元、以太网和多功能保护控制器实现整个变电站的保护和控制功能。其中的核心元件 MPCU 是一台集中式的多功能数字装置, 从过程层总线接收多个设备的信息, 完成变电站内全部或部分设备的保护、控制、量测等功能, 并利用冗余的广域信息提高保护与控制的性能。文章着重介绍了过程层总线的配置、MPCU 的功能和结构。

**关键词:** 数字化变电站; 数字化集成保护与控制系统; 多功能保护控制器

## Research on design of digital integrated protection and control system

DONG Xin-zhou, DING Lei

(State Key Laboratory on Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A digital integrated protection and control system(DIPC) with a multifunctional protection and control unit(MPCU) as the core is presented. In a digital substation, all protection and control functions can be realized by DIPC, which consists of the non-conventional instrument transformers, merging units, Ethernet and MPCU. MPCU is a centralized digital device with multifunctions. It gets the electrical data from process bus and integrates the functions of protection, control and metering of several electrical equipments. The performance of the protection and control can be improved by the integration of information. The configuration of the communication network, the principle, architecture and functions of the MPCU are also introduced.

**Key words:** digital substation; digital integrated protection and control system; multifunctional protection and control unit

中图分类号: TM76; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)01-0001-05

## 0 引言

目前的变电站二次设备主要采用分层分布式结构, 面向间隔, 功能独立。监视、控制、保护、故障录波、量测与计量等都是功能单一、相互独立的装置。这种按功能和间隔划分的模式可靠性较高, 任一装置故障不会影响其他功能和对象, 系统的可扩展性和开放性好。但硬件重复配置、CT 和 PT 负载重、接线复杂、信息不共享、缺乏整体的协调和功能优化、投资成本大、运行维护成本高<sup>[1]</sup>。这些装置一般基于单点信息, 不具有全局视角, 是一种硬件冗余而非信息冗余的系统模式, 往往因有效信息不足作出错误的或局部最优而非全局最优的判断, 影响系统的稳定运行, 制约了变电站自动化技术的发展。

集成保护并不是一个新概念, 在计算机被引入继电保护的初期, 就有学者提出利用一台中央计算机实现整个变电站继电保护功能的设想<sup>[2]</sup>。文献[3]介绍了多功能继电器 (Multifunctional Relay), 在多

功能继电器中, 各种保护功能只是不同的软件包, 可以在同一个微处理器平台上综合实现。如果解决了可靠性问题, 完全可以使用一台微机装置集成整个变电站的保护和控制。这种集成唯一的缺点是失去了硬件冗余, 而这一点可以通过装置的双重配置来解决。受当时计算机处理能力和可靠性的制约, 这些设想未能实现。

70 年代末微处理器引入后, 出于可靠性的考虑, 继电保护装置逐渐向面向间隔、面向对象独立设置的模式发展, 但人们对硬件集成、功能集成和信息集成的尝试从未停止过。文献[4]介绍了面保护; 文献[5]提出了广域差动保护, 将差动原理应用到广域范围内; 文献[6]讨论了广域保护系统及其在电力系统中的应用; 文献[7]提出了广域后备保护系统, 利用专家系统思想计算保护的动作因子, 确定故障位置; 文献[8]、[9]则提出了输电线路集合保护和集成网络保护的概念。

这些思想均体现了信息应用的集成化。对继电保护而言, 相邻间隔的元件信息是十分关键的, 利

用故障相邻区内的广域的、冗余的信息，可以准确的反映出故障状态，提供快速可靠的主保护和后备保护功能，简化保护装置之间定值和动作时间的配合。对控制系统而言，通过获取全局冗余信息，有助于实现更优化的控制措施，各种控制措施之间能有机地配合协调，最大限度的减小扰动带来的影响和损失。

但上述保护原理均是由多个保护装置通过通信网络构成一个分布式系统，受限于通信的速度和可靠性，难以实现全局信息的有效利用；分布式的硬件结构也造成了配置重复，影响了信息处理速度，降低了保护控制的实时性和可靠性。

微电子技术和网络通信技术的发展给集成保护控制的发展带来了新的契机。微处理器的计算速度和可靠性大大提高，使得在一个装置内集成多个元件的多个功能成为可能，而变电站进行数字化改造后，更便于数据和信息的集中采集与共享。

因此，在低电压等级的配电变电站，如果将变电站全部或部分设备的保护、控制、量测和监控等多种功能通过一台多功能数字装置完成，构成集成保护与控制系统，则可以降低投资成本，减少运行维护的工作量，并提高保护与控制的性能，提高变电站运行的安全性和可靠性。

### 1 数字化集成保护与控制系统

数字化集成保护控制系统 DIPC (Digital Integrated Protection and Control System) 是指在数字化变电站中，通过非传统互感器、合并单元 MU (Merging Unit)、以太网和多功能保护控制器 MPCU (Multifunctional Protection and Control Unit)，实现整个变电站保护和控制功能的系统。

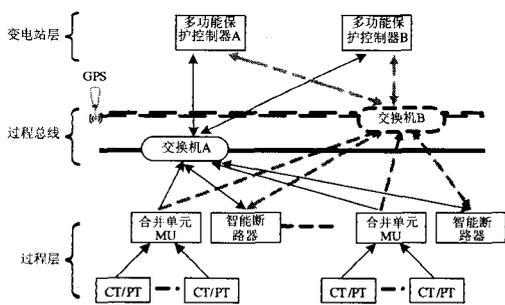


图1 数字化集成保护与控制系统示意图

Fig.1 The scheme of digital integrated protection and control system

DIPC 由三部分组成：

1) 过程层设备：非传统式互感器、智能开关、数据采集单元 MU；

2) 网络设备：光纤以太网、交换机等；

3) 多功能保护控制器 MPCU：是 DIPC 的核心，从以太网上接收变电站所有元件的信息，实现所有元件的保护、控制和量测等功能，并利用冗余的广域信息提高保护与控制的性能。

数字化集成保护控制系统的主要特征有：

1) 应用于数字化变电站，取消了二次接线，数据便于传输和共享。

2) 硬件集成。集成保护控制系统突破了间隔的限制，一台装置涵盖多个保护对象，实现对多个电气设备的保护和控制，可以简化硬件设置，降低投资成本，减少现场运行维护的难度和工作量。

3) 功能集成。对每一个保护对象，均可实现保护、控制和量测等多种功能，并进行功能优化协调，这同时也是一种硬件集成和间隔内的信息集成。

4) 信息集成。主要是不同间隔间的信息集成，利用相邻元件的冗余广域信息来提高保护性能、优化控制功能，保证全系统的安全稳定运行。

目前的数字化变电站中，间隔层设备已经基本实现了数字化，实现集成保护与控制系统需要重点研究多功能保护控制器 MPCU 的开发及过程层总线的配置方式，变电站内数据流的传输共享、MPCU 装置的结构和基于集成信息的保护控制算法则是研究的难点。

### 2 多功能保护控制器

多功能保护控制器是一个集中式的多功能数字装置，从过程层总线上接收多个设备的信息，实现对多个设备（变压器、母线、线路等）的保护、控制、量测等，是 DIPC 的核心部分。

#### 2.1 数学模型

如图 2 所示，MPCU 实际上是一个多输入多输出的多变量控制器，输入量为各个设备的电压、电流采样值及开关节点的状态，输出量则为报警提示信号、调节控制量和开关跳合闸命令。MPCU 所实现的继电保护功能是一种开环的离散控制，而对设备参数的调节控制则是一种闭环的连续控制。

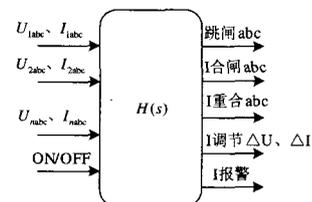


图2 多输入多输出控制器模型

Fig.2 The model of multivariable controller with multi-input and multi-output

## 2.2 主要功能及结构

MPCU 所完成的主要功能有:

1) 从过程层总线上接收多个设备的 SMV 报文 (Sampled Measured Values, 采样值报文) 和 GOOSE 报文 (Generic Object Oriented Substation Event, 面向通用对象的变电站事件) 等周期性数据;

2) 对数据进行预处理, 包括数字滤波、采样率转换、频率跟踪、傅里叶计算等;

3) 实现基于本地信息量和相邻元件信息的继电保护算法, 包括线路保护、母线保护或变压器保护;

4) 实现基于广域冗余信息的控制算法和安全自动措施, 如减载、电容器投切、电抗器投切、各自投等;

5) 实现对所涵盖设备电气量的测量, 如电压、电流、频率、功率等;

6) 实现故障录波、接地选线、异常状态检测与报警等监察功能;

7) 与变电站管理后台通信, 接收定值设定和操作命令, 上传故障录波数据、操作记录等。

在变电站中实现集成保护, 关键在于装置的处理能力和可靠性, 由于其保护范围覆盖多个间隔, 需要接收的数据量比传统二次装置要多很多倍。在数字化变电站中, 采样值和开关动作信息是由 MU 和智能开关采集后通过过程层总线传送给二次装置的。装置通过以太网口从总线上接收采样值报文的过是串行的, 这就使 MPCU 的通信接口成为速度瓶颈。接收到 SMV 报文和 GOOSE 报文后, MPCU 还需要在采样间隔内进行信号预处理和逻辑判据等大量计算, 其计算量也数倍于常规保护, 给 MPCU 自身的处理能力和处理容量提出了很高的要求。

基于以上考虑, MPCU 应当采用多网口通信、多 CPU 并行处理的模式。如图 3 所示, MPCU 由功能模块、监控模块和 I/O 模块构成, 各模块间通过内部数据总线 Data Bus 联系, 根据内部数据交换量的大小, Data Bus 可使用 CAN 总线或内部以太网。功能模块为 MCU 和 DSP 构成的双 CPU 系统, 每个功能模块负责 4 个 MU 和 4 个智能开关的数据处理, 通过以太网口从过程层交换机接收相应的采样值报文和 GOOSE 报文, 对数据进行预处理和判据计算, 并基于本地信息作出相应的决策。当需要其他设备的信息时, 多个功能模块通过内部数据总线 Data Bus 交换计算中间量, 由其中的两个功能模块进行逻辑判断并作出决策。监控模块完成人机接口、装置运行监测和后台通信等功能。I/O 模块为

可选组件, 适用于没有智能开关的数字化变电站, 用于开关的状态输入和跳合闸信号输出。

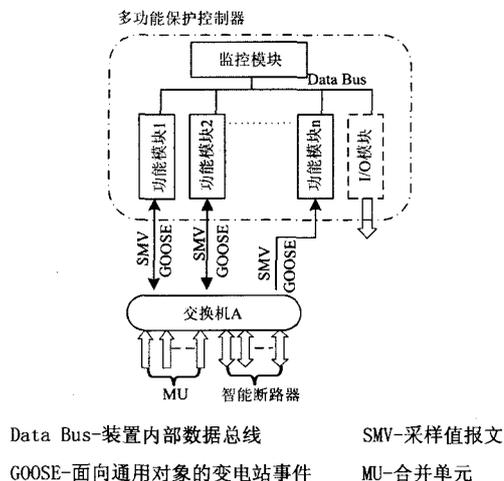


图 3 多功能保护控制器结构示意图

Fig.3 The scheme of multifunctional protection and control unit

## 3 过程层总线配置及系统实现

### 3.1 系统的实现形式

根据 MPCU 的处理能力及涵盖的区域, DIPC 可分为三种不同的实现形式:

1) 单 MPCU 的全变电站集成保护与控制系统: 如图 4 所示, 通过一台 MPCU 实现对全站设备的保护、控制、量测和监察功能, 两套 MPCU 即可实现冗余备用, 这也是 DIPC 发展的最终目标。

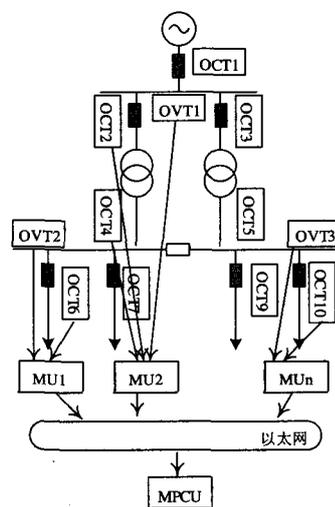


图 4 单 MPCU 的全变电站 DIPC 示意图

Fig.4 IPC with single MPCU for whole substation

2) 按电压等级分隔的多 MPCU 变电站集成保护与控制系统: 如图 5 所示, 分别使用高压侧 MPCU 来实现高压侧母线及进线的保护、控制、量测功能,

使用变压器 MPCU 实现变压器的保护和控制, 使用低压侧 MPCU 实现低压侧母线及所有的馈线的保护、控制和量测。

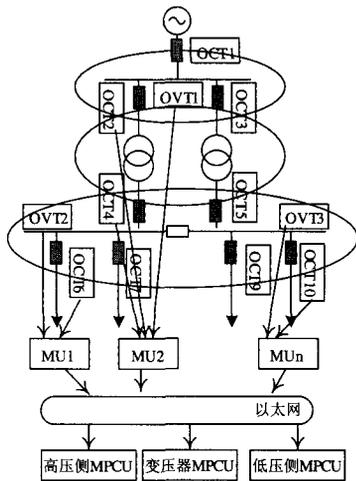


图 5 按电压等级分隔的多 MPCU 集成保护与控制系统  
Fig.5 IPC with IPC multi-MPCU, voltage grade oriented

3) 按母线(或段)分隔的多 MPCU 变电站集成保护与控制系统: 如图 6 所示, 将变电站按区域划分, 由一台 MPCU 涵盖一段母线, 完成母线保护和该母线所有出线的线路保护及相关的控制、量测功能, 由变压器 MPCU 变成变压器的保护和控制。

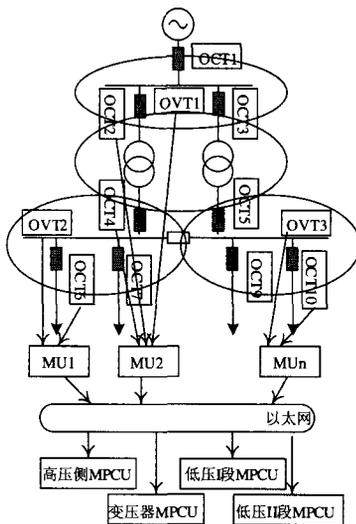


图 6 按母线分隔的多 MPCU 集成保护与控制系统  
Fig.6 IPC with multi-MPCU, oriented by busbar or segment

### 3.2 过程层总线配置

过程层总线承担了连接一次智能化设备(MU、智能开关)和二次网络化设备(MPCU)的任务。按照 IEC61850 的描述, 过程层总线有四种配置方式: 1) 面向间隔, 即点对点的形式, 每个 MU 通过光纤与本间隔的二次设备直连; 2) 面向位置原则,

即就近将多个 MU 组成总线; 3) 单一总线原则, 即全站使用单一的通信总线; 4) 面向功能原则, 如将变压器各侧的 MU 组成总线以便于实现变压器保护。由于通信速度的限制, 目前的数字化变电站大多采用点对点的过程层连接方式, 并未真正形成总线。

DIPC 的实现形式与过程层总线的配置相对应, 使用单 MPCU 模式时, 需要配置全站的单一总线; 使用多 MPCU 模式时, 则需要按位置和功能配置合理的过程层总线。DIPC 接收的数据量比传统的二次装置要多很多倍, 对数据传输的实时性和可靠性要求较高, 需要对过程层总线进行合理的配置。

采样值报文是典型的周期性数据流, 数据流的到达周期就是过程层互感器的模拟量采样周期, 数据流量取决于局域网内的 MU 个数和采样率。当局域网内有多个 MU 时, 由于 MU 具有同时发送大量数据的特点, 将会在多个 MU 之间造成频繁的冲突, 要经过多次碰撞和避让才能达成通信的协调, 从而造成延时过长, 使报文不能在存活时间内到达 MPCU 或挤占了 MPCU 的计算时间。以 3200 Hz 采样率为例, 其报文的存活时间只有 312.5 us, 而 Opnet 仿真证实, 2 个 MU 和 2 个智能开关经集线器广播的延时大约 300 us, 经交换机广播延时为 26 us。所以应采取各种措施来减少冲突和碰撞, 主要的方法有:

1) 利用星型结构, 采用存储式交换机。采用存储转发式交换机后, MU 和交换机之间可以建立一对一的全双工通讯, 交换机和 MPCU 之间也可以建立一对一的全双工通讯。所有 MU 传递上来的数据均存放在交换机的缓存中, 排队等待转发。局域网内的 MU 同时发送 SMV 报文将不会引起冲突和碰撞, 报文传送的延时仅仅是在交换机缓存中排队的时间。

2) 采用全双工模式, 可以有效避免半双工模式中的信道占用问题, 使得下行的命令不会因大量上传的 SMV 报文占用信道造成长时间延误。

3) 合理建立 VLAN(Virtual Local Area Network, 虚拟局域网)、使用订阅/发布的组播(Multicast)方式替代广播方式, 从而将大量数据的交换限制在合理范围内, 避免全局广播引起的阻塞和延时。例如将某个功能模块及其相关的 MU 及智能开关组成一个 VLAN, 在 VLAN 内只传输与该功能模块相关的数据信息, 从而缩小冲突域, 节省网络带宽, 减少传输时延。

4) 提高以太网带宽, 使用千兆以太网构建过程层总线, 提高传输的实时性和可靠性。

通过使用全双工以太网、存储转发式交换机进行合理的过程总线配置、改进数字装置的结构和通信接口, 结合 VLAN 和组播技术, 可以提高 MPCU 从过程层总线上接收大量数据流的效率和速度, 解决集成保护与控制系统的通信瓶颈问题。

#### 4 结论

提出了基于 IEC61850 标准的数字化变电站集成保护与控制系统的结构设计方案, 通过集中采集、统一传送站内信息, 进行了信息的全面集成和功能的合理优化、整合, 使得原来分散的二次系统装置变成了一个功能全面、运行灵活的有机整体。以中央控制器 MPCU 为核心的数字化集成保护与控制系统 DIPC 利用非传统互感器、合并单元、以太网和多功能保护控制器 MPCU, 实现整个变电站的保护和控制功能。MPCU 从过程总线上接收信息, 完成变电站内全部或部分设备的保护、控制、量测等功能。通过合理的硬件集成、功能集成和信息集成简化硬件设置、降低投资成本、减少运行维护的难度和工作量、并利用冗余的广域信息优化协调功能, 保证全系统的安全稳定运行。数字化集成保护与控制系统的研究重点和难点将是多功能保护控制器的开发。

#### 参考文献

- [1] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
GAO Xiang. Application Technologies of Digital Substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] Rockerfeller G D. Fault Protection with Digital Computer. IEEE Trans. On PAS, 1969, 88(4): 438-461.
- [3] Sachdev M S. Advancements in Microprocessor Based Protection and Communication[J]. N.J.USA: IEEE Tutorial Course, 1997.

- [4] 戴伟. 面保护在配网自动化中的应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.  
DAI Wei. The applying of panel protection theory in distribution system automation[D]. Baoding: North China Electric Power University
- [5] Serizawa Y, Myoujin M, et al. Wide-Area Current Differential Backup Protection Employing Broadband Communications and Time Transfer Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1046-1052.
- [6] 丛伟, 潘贞存, 丁磊等. 满足“三道防线”要求的广域保护系统及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 29-33.  
CONG Wei, PAN Zhencun, DING Lei, et al. Wide Area Protection System to Defend Three Different Types of Power System Stability Problems and Its Application[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 29-33.
- [7] Tan J C. Application of a Wide Area Backup Protection Expert System to Prevent Cascading Outages[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 375-380.
- [8] 王慧芳, 何奔腾. 输电线路集合保护及其实现[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 49-53.  
WANG Hui-fang, HE Ben-teng. Transmission Line Aggregate Protection and Its Implementation[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 49-53.
- [9] 薄志谦, 和敬涵, 董新洲. 电力系统的集成保护[J]. 继电器, 2005, 33(14): 6-10.  
BO Zhi-qian, HE Jing-han, DONG Xin-zhou. The Integrated Protection for Power Network[J]. Relay, 2005, 33(14): 6-10.

收稿日期: 2008-08-20

作者简介:

董新洲(1963-), 男, 教授, 博导, IET Fellow, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn

丁磊(1980-), 男, 博士后, 主要研究方向为数字化变电站继电保护和分布式发电。

### 许继电源公司一体化电源系统深受南方电网专家好评

12月11日至12日, 由许继电源公司发起并组织的南方电网公司变电站数字一体化电源系统技术研讨会在桂林隆重召开。许继电源公司起草的数字一体化电源系统技术规范受到与会专家的充分肯定。

会上, 南方电网公司调度中心副总工程师洪军、南方电网直流电源系统专家杨奕先后发言, 介绍了南方电网公司面临的形势及发展方向, 并对电源公司提出了南方电网公司的实际需求和一些建议。许继电源公司总经理张东江、副总经理于文斌在会上汇报了公司的发展情况, 并着重介绍了公司数字一体化电源系统的开发应用情况。他们指出, 许继电源公司的发展目标就是为客户提供高科技的产品和优质的服务。

会上, 许继电源公司技术专家董新生与南方电网公司及广东、广西、云南、贵州和海南五省电网公司专家就数字一体化电源系统进行了深入交流和讨论, 现场气氛热烈、融洽, 取得了非常好的效果。