

基于在线自组织同步 MAS 的电网广域保护系统

余文辉, 王少荣, 柳斐, 郑倩倩, 程时杰

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了电网广域保护的定义、作用、构建模式、体系结构和关键技术, 提出了一种电网广域保护新方案。所提广域保护系统基于在线自组织同步 MAS, 其中的所有智能体(Agent)由广域精确同步脉冲驱动实现时间同步, 提高了广域保护系统的实时性; 依据功能需求和预定规则在线自组织成多个基于 MAS 的子系统, 以灵活实现不同层次和不同功能的广域保护子系统; 具备实现广域后备保护及协调主保护、安稳措施的能力。详细描述了所提技术方案, 并讨论了与常规保护和稳定控制装置的配合问题。

关键词: 广域保护; MAS; 安全防御; 在线自组织; 广域同步; WAMS

A wide-area protection system based on synchronized MAS self-organizing online for power grid

YU Wenhui, WANG Shaorong, LIU Fei, ZHENG Qianqian, CHENG Shijie

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science & Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: The definition, the role, the constructing modes, and the key technologies of wide-area protection system for power grid are introduced. A new scheme of wide-area protection system is proposed. The proposed wide-area protection system is based on synchronized Multi-Agent System (MAS) self-organizing online. In order to improve the real-time performance, all of the agents in the proposed system are synchronized by a set of precise synchronization pulses. According to requirements and setting rules, specific function subsystems based on MAS can be constructed by self-organizing mode online. Therefore, it is flexible to construct subsystems for various purposes. The proposed system is of the capacity to achieve the functions of wide-area backup protection and to coordinate the main protections and the control equipments for enhancing stability of power system. The proposed scheme is introduced in detail, and the cooperation problem with traditional protection devices and control equipments for improving power system stability and security is discussed.

Key words: wide-area protection; MAS; security defense; self-organizing online; wide-area synchronization; WAMS

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0069-08

0 引言

目前, 电网广域保护已经成为电力系统继电保护和安全防御方面的重要研究热点。可以预期, 在不久的将来, 电网广域保护将会在电力系统故障切除和安全防御方面发挥重要作用。因为广域保护技术的出现及其发展具有历史必然性。

(1) 经济社会的进步和发展在很大程度上依赖于充足的电能供应, 同时又对电力供应的可靠性提出了更高的要求。而大电网表现出的脆弱性可能会被恐怖分子利用或成为现代战争的攻击目标。因而必须将电网的安全性提到新的认识高度。

(2) 采用大机组、大区电网互联、超高压远距离交直流混合输电、大量可再生能源接入以及引入市场化运营竞争机制等使电力系统的发展规模和发展水平进入了一个崭新的发展阶段, 同时也对继电保护及安全防御提出了许多新的课题。

(3) 传统的继电保护系统和电网安全防御体系尚存在着诸多不足, 亟待提升。长期以来, 根据三道防线构建的防御体系在保证我国电力系统安全稳定运行中发挥了极其重要的作用。但是, 作为第一道防线的主要技术措施, 传统的继电保护基本上依据局部信息工作, 缺乏在大区域进行协调动作的能力。国外电力系统继电保护的情况大致也是如此。

文献[1]指出：国外多次大停电事故分析表明，传统后备保护在系统扰动引起的异常运行状态下容易误动，引起电网连锁跳闸。北美电力可靠性委员会对多年事故统计发现，63%的电力系统事故与继电保护的不正确动作有关^[2]。此外，第二道防线的稳定控制装置与继电保护的协调尚需深入研究^[3-4]。同样，第三道防线的低频减载、低压减负荷以及系统振荡解列等技术措施也应该充分考虑与一二道防线的协调问题。

(4) 高可靠性的广域高精度同步时间授时系统、高速光纤通信网络和价格低廉的高性能微处理器的广泛应用为实现电网广域保护奠定了坚实的技术基础。

电网广域保护正是在上述背景下应运而生。近十年来，我国许多学者和电力工程技术人员对广域保护进行了大量研究，并取得了诸多成果。譬如，文献[1]提出了差动环概念，并对广域差动差动保护进行了研究；文献[5]对国内外广域保护的发展状况作了综述，并指出未来广域保护系统的发展方向将采用多 Agent 体系结构；文献[6]则构建了一种基于 MAS 的广域保护系统；文献[7-8]提出了基于“三道防线”的广域保护系统；文献[8]提出了基于保护元件的广域继电保护算法；文献[9]阐明了智能电网条件下的继电保护问题；文献[10]研究了基于综合阻抗比较原理的广域保护算法；文献[11]研究了利用方向信息和距离 I 段信息实现广域后备保护的系统；文献[12-14]则分别研究了广域后备保护智能跳闸策略、运用先进的 SDH 光纤自愈环网实现集中分布式的新型广域保护系统和基于 MPLS 并符合电力系统广域保护要求的传输路径选择模型。

广域保护是一个庞大且复杂度很高的系统，又是一个新的研究领域。尽管经过广大学者和电力工程技术人员共同努力已经取得可喜的进展，但是还有诸多课题需要深入研究。本文在广大同行研究成果的基础上，首先介绍广域保护的定义、作用、构建模式、体系结构和关键技术，进而提出一种基于在线自组织广域同步多智能体 (Multi-agent System, MAS) 的电网广域保护系统，重点探讨以提高广域保护系统可靠性和实时性的多智能体协作方法和运行机制。

1 广域保护的定义、作用和构建模式

目前，对广域保护系统还没有严格统一的定义。根据文献资料可概括出三种表述^[1,5,7-8]：1) 广域保护系统是利用广域测量系统(WAMS)和 SCADA/EMS 信息及在线动态安全分析涵盖三道防线的电力系统

故障快速切除和安全稳定控制及防御系统；2) 广域保护系统是涵盖具有防御连锁故障后备保护功能和协调安全稳定控制措施的利用多点信息实现的电力系统安全自动控制系统；3) 广域保护是利用广域信息实现的可以防御连锁故障的新型继电保护系统(包括广域主保护和广域后备保护)。显然，上述第一个定义几乎覆盖了电力系统的整个安全稳定控制及防御体系，涉及的范围最广。而第三个定义涉及的范围最窄。但是，三个定义实际上均以提高电力系统安全稳定性为目标，且均包含了利用广域多点信息和防御连锁故障这两个方面，而防御连锁故障的前提是具有协调能力。因此，这里我们概括为：广域保护是利用广域多点信息、具有协调能力、能够防御连锁故障的电力系统故障快速切除和安全稳定自动控制系统。

根据上述定义，广域保护包含以下几个方面中的作用：

(1) 利用广域多点信息、可靠高速通信系统和有效算法，协调继电保护和各种安全自动装置的作用。

(2) 利用广域多点同步信息、可靠高速通信系统和有效算法实现新原理的广域主保护和快速动作的广域后备保护。

(3) 在电力系统故障情况下，快速决策和自动控制尽可能维持电力系统安全稳定的作用。

(4) 根据广域多点信息在线快速准确评估电力系统安全稳定状况的作用。

需要提及的是，并不是要求所有广域保护都必须具备以上全部作用。

广域保护系统的构建可以采用两种模式：1) 充分利用现有的继电保护装置、安全稳定控制装置、光纤通信网络以及 WAMS、SACDA/EMS 信息进行构建；2) 根据制定功能和性能要求构建全新且独立的广域保护系统。显然，采用第一种构建模式更为经济和现实。因此，目前有许多研究都基于第一种构建模式。但是，第二种构建模式，比较灵活，可以增加或采用某些第一种模式难以实现的算法或策略。

2 广域保护的体系结构

广域保护的体系结构有三种^[6,11,13]：集中式、分布式和分布集中式。目前，大部分学者倾向于采用分布集中式。因为分布集中式比集中式具有更高的可靠性，同时需要交换的信息量又比完全分布式少。此外，由于需要广域多点信息和具备协调能力，广域保护实际上必然是一个分层分布式系统。对于实现一种具体功能的广域保护子系统而言，其逻辑框

图为两层系统, 如图 1 所示。其中, 第一层承担数据采集及保护控制任务的 IEDs(Intelligent Electronic Devices)分布安装在各个发电厂和变电站。第二层承担决策任务, 位于控制中心或逻辑决策中心。两层之间通过高速通信网络连接。应该说明的是, 上述两层都可能没有明确独立的硬件(即与其他子系统共用)。譬如, 对于近些年正飞速发展的智能变电站而言, 广域保护可从合并单元取得数据, 而决策则由承载在某硬件系统上的实现相应算法的软件完成。但逻辑上仍可分为两层。

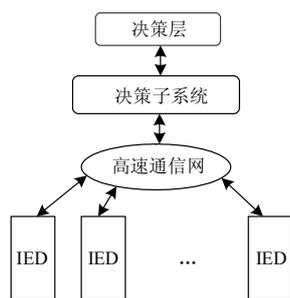


图 1 实现一种功能的广域保护子系统逻辑框图

Fig. 1 Logic diagram of wide-area protection subsystem achieving one function

3 广域保护的关键技术

广域保护的发展以广域同步测量技术和高速通信技术为前提。广域保护的关键技术主要包括: 可靠精准的广域同步时间应用技术、同步相量测量技术、同步发电机功角测量技术、可靠快速的数据交换技术、快速有效的电力系统状态评估技术, 可靠的电力系统在线安全稳定控制技术(包括协调技术和算法等)以及广域保护系统的构建和运行机制设计等。

较早的时间同步技术主要利用美国全球卫星定位系统(GPS)的授时信号, 今后的发展趋势是同时利用多个卫星定位系统(如 GPS、GLONASS 和我国北斗卫星定位系统 COMPASS 等)的授时信号以提高广域同步时间的可靠性。此外, 近些年来, 通过高速光纤网络实现精准的广域同步时间技术有了长足发展, 同步精度已经可达微秒量级。国际电工委员会已经制订了相应的协议 IEC1588。为了保证广域同步时间的可靠性和可用性, 在利用高精度授时信号的同时, 装置内置高精度守时钟是一种进一步提高同步时间可靠性的技术手段^[15]。经过近十多年发展, 广域同步时间的应用技术已经具有较高的成熟度。

目前, 我国电力系统普遍采用光纤通信, 通信

系统的可靠性和稳定性大多能够满足快速继电保护的要求, 这为实现广域保护创造了条件。虽然近些年来人们对广域保护的数据传输作了许多研究^[16], 但今后对数据交换方法或策略还需进行深入研究。

对于同步相量测量和发电机功角测量我国已经积累了不少经验, 可供实现广域保护时借鉴。

电力系统状态的快速评估需要高速计算技术的支持, 计算速度是一个瓶颈。因此在这方面还有赖于广大科研工作者和工程技术人员共同努力。

算法是广域保护的核心技术问题, 且对于不同的广域保护类型, 算法将会有很大差别。目前研究较多的有: 基于基尔霍夫电流定律的广域电流纵差保护算法, 基于常规保护方向元件输出结果的广域方向保护算法, 基于常规保护 I 段输出结果的广域后备保护算法, 基于稳定控制装置的大电网稳定控制决策方法, 以及着眼于抑制电力系统振荡的控制方法等。但对于全局的协调方法研究相对较少。在较小区域内实现功角稳定控制的稳定控制装置, 在我国电力系统已经成功应用多年, 并发挥了很好的作用。因此, 广域保护宜在现有稳定控制装置的基础上实现大区域稳定控制。由于在线稳定控制涉及的电网范围很大, 控制策略是非常关键的, 需要深入研究和充分的实验论证后才能实际应用。这方面的研究还需要进一步展开。

在广域保护系统构建方面, 目前虽然有些学者进行了研究, 但还有待深入。另外, 人们对广域保护系统的运行机制方面研究的较少。正是因为如此, 本文拟重点在这两个方面进行探讨。

4 广域保护新方案

这里提出一种基于在线自组织同步 MAS 的广域保护新方案。新的广域保护系统在智能变电站平台构建, 并与现有常规微机保护和稳定控制装置相协调。所提技术方案涉及到广域同步测量、广域同步并行处理机制、高速光纤网络、在线自组织 MAS 等新技术。所提广域保护系统的逻辑框图如图 2 所示。下面对该方案进行介绍。

(1) 图 2 中, 精准同步时间单元采用两个及以上卫星定位系统的授时信号。卫星定位系统优先选用我国“北斗”卫星导航系统(COMPASS)和 GPS 以及 GLONASS。对于已经配置了高可靠性同步时间服务装置的厂站, 同步时间单元可与其它系统共用, 但广域保护系统需要配置相应的同步时间信号接口。此外, 为了保证广域同步时间的可靠性、准确性、稳定性和可用性, 新的广域保护方案同时还采用 IEC1588 对时协议通过高速光纤通信网络进行区

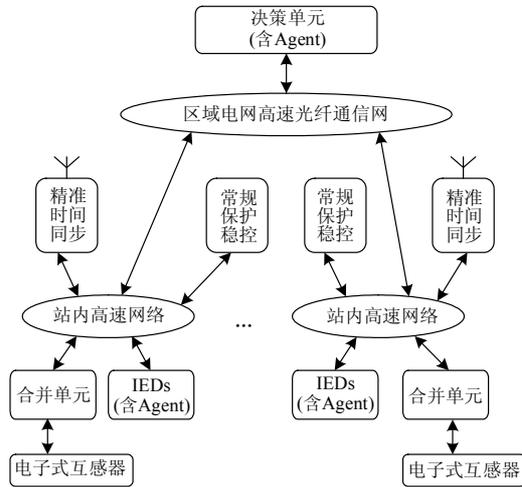


图 2 广域保护新方案逻辑框图

Fig. 2 Logic diagram of proposed wide-area protection system

域电网中不同厂站间的时间校对。

(2) 电子式互感器和合并单元构成了模拟量数据采集和发布子系统。新的广域保护的 IEDs 采集断路器状态、常规微机保护装置状态、常规稳定控制装置以及其它安稳装置状态，并输出断路器跳合闸命令。为实现协调功能，广域保护的 IEDs 还有通信接口与保护和稳控装置等相连。上述部分构成了新的广域保护系统的输入输出单元。

在各个厂站，微机保护和稳定控制等按照常规配置。新的广域保护系统通过通信接口对这些设备进行整定值和时限协调。为了进一步提高可靠性，广域保护的 IEDs 的控制输出接点与常规保护装置和稳控装置等的输出接点采用硬件实现逻辑运算，最终形成综合控制输出。图 3 为实现这种逻辑运算的一个示例。在该示例中，广域主保护出口与常规主保护出口为“或关系”；广域后备保护出口与常规后备保护出口为“与关系”；协调稳定控制出口与常规稳控装置出口为“与关系+或关系”，协调低频自动减载出口与常规自动低频减载装置出口为“与关系+或关系”。需要指出的是，究竟采用什么硬件逻辑运算必须根据设备的可靠性和控制目标确定。

(3) 图 2 中的决策单元位于某一枢纽变电站或调度中心。硬件应该采用具有高速运算能力的高新能计算机，如高可靠性服务器，并采用双机互为备用模式。决策单元通过高速光纤通信网络接入广域保护系统，并通过可靠的网络隔离手段与 SCADA/EMS 和现有的 WAMS 相连(目的是获取更多信息)。

(4) 所提广域保护的通信单元基于厂站内的高速光纤通信网络和远程的高速光纤通信网构建。

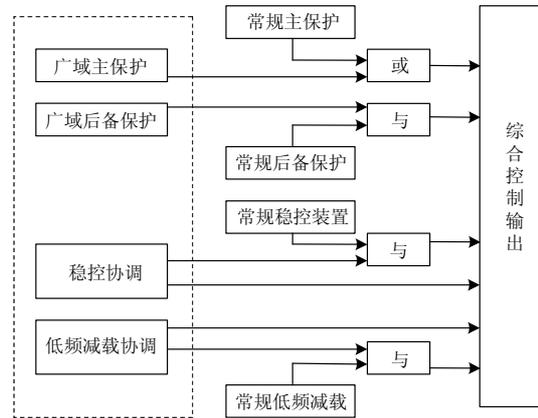


图 3 广域保护出口与常规装置出口的逻辑关系

Fig. 3 Logical relationship between proposed wide-area protection output and conventional device output

对于站内通信，目前，我国电力系统 220 kV 及以上电压等级的新建变电站和大部分近期改造的 220 kV 及以上电压等级变电站已经建设了光纤通信网络。如果站内通信网络建设时考虑了为主保护传送采样数据，则已有实施案例表明通过网络传送采样数据实现主保护的方案是可行的。换句话说，这样的站内通信网络也能满足广域保护对站内通信的要求。

对于远程通信，需要提供足够的带宽才能满足广域保护要求。目前我国电力系统 220 kV 及以上电压等级变电站间输电线路已经很多采用光纤差动保护作为主保护，其采用的数据传输通道通常为 1 对点对点光纤和 2 Mbps 专线。所以，所提广域保护方案站间数据传输通道也可采用这种配置方式。

上述两种远程数据通道，点对点光纤对带宽更宽，所以这里仅估算 2 Mbps 专线能够传输的采样数据量。假设每个周波 40 个采样点，即采样周期为 0.5 ms，A/D 转换器为 16 位，则对 1 条输电线路的三相电流进行采样，1 ms 的采样数据位数为：2(采样点)×16(采样点位数)×3(相)=96 b。而 2 Mbps 专线 1 ms 可以传送 1 000 b，所以，考虑数据帧的帧头、帧尾、地址码、校验码和时间信息码之后，2 Mbps 专线仍然可以传送多条输电线路的三相电流采样数据。

远程数据传送的延时，对于点对点光纤通道，信号传输为光速，即 300 km 延时 1 ms。对于 2 Mbps 专线除了信号传输延时外尚有复用设备的延时，数据传输延时稍长。但 2 Mbps 专线目前已经用于输电线路主保护，可见其传输延时也是可以接受的。

(5) 所提广域保护的 MAS 单元由分布于厂站 IEDs 和决策单元中的众多 Agent 构成。一个具体的

Agent 实际上是实现特定功能的子程序, 并依据功能明确且界限清晰的原则构建。多个为完成特定任务的 Agent 共同协作实现广域保护一个具体功能, 而其中的 Agent 子集即构成一个 MAS 子系统。本文提出, 采用在线自组织模式构建 MAS 子系统。

在线自组织 MAS 适用于复杂系统的协调控制, 并具有广阔的应用前景^[17-20]。广域保护正是需要高度协调且复杂度很高的系统, 认为采用在线自组织 MAS 是实现广域保护功能的一条可行途径。诚然, 将在线自组织 MAS 应用于广域保护并取得效果还需广大学者和专家的共同努力, 这里仅是提出初步设想, 希望能够起到抛砖引玉的作用。下面以构建广域差动保护为例, 说明在线自组织 MAS 的自组织过程。

如图 4 所示的一个无内部电源的电网, 区域内部可以含不同电压等级输电线路和不同连接组别的变压器等设备, 设其对外有 5 条联络线。每条联络线远端断路器处配置了广域保护的 IEDs 及相应的多个智能体(Agent), 其中, 每条联络线均有一个 Agent 承担广域差动保护任务。无源网络区域内的所有断路器处也作同样配置。则这些承担广域差动保护任务的 Agent 子集构成了一个 MAS 子系统。该 MAS 子系统依据决策单元给出的当前电网运行方式的拓扑结构和运行状态(如变压器分接头位置)以及预先知道的变压器连接组别和电流互感器变比, 自组织实现三个层次的差动保护功能和稳定控制功能等。



图 4 无源网络外部联络线 Agent 配置示意图

Fig. 4 Agent configuration diagram of the external transmission lines of a passive power network

第一层次为单个元件和单条线路的差动保护, 如线路纵差、变压器纵差、母差等。这个层次的差动保护瞬时动作, 可由已有的常规差动保护承担, 或者广域保护这一层次的输出作为第二套差动保护使用, 其输出与常规差动保护并联(即“或运算”)。

所提广域保护方案的第一层次保护仍为电流差动保护。这里以实现变电站 A、B 之间的输电线路的差动保护为例作进一步说明。

在变电站 A 中的广域保护的 IED-A 有承担该差

动保护任务的 Agent-A, 在变电站 B 中的广域保护的 IED-B 亦有承担该差动保护 Agent-B。这对智能体可采用目前已经广泛使用的光纤差动保护工作原理。如果 A、B 变电站均为智能变电站, 则采样数据可直接取用合并单元送出的数据, 采样数据通过各自 IEDs 的网络接口获得。合并单元送出的采样数据中带有采样时间信息, 并满足差动保护运算的时间同步要求。直接采用合并单元送出的数据实现站内主保护, 华北电网已有 220 kV 变电站的实施方案, 并已经过几年运行考验^[21]。

如果其中 1 个变电站不是智能变电站, 或是 A、B 两个变电站均非智能变电站, 则相应的非智能变电站的 IEDs 需要采用直接采样线路电流方式获得采样数据。并且, 需要有广域同步时间单元提供高精度采样定时信号, 以便给采样数据加上采样时间信息。因为无论变电站是否装设了 PMU, 目前的 PMU 尚不能为差动保护提供采用数据。

上述差动保护如果是站间输电线路的纵差保护, 则其通信通道可采用点对点的 1 对光纤通道, 或采用 2 Mbps 专线通道(2 Mbps 接口由通信复用设备提供), 或是同时采用上述两种通道构成双通道模式。

与目前我国推广使用的光纤差动保护相比, 上述广域保护中第一层次的保护主要有两点差别: 其一是, 对于智能变电站采用了合并单元送出的采样数据(目前大多光纤差动采用直接采样方式), 节约了采样部件; 其二是两端变电站广域保护的 IEDs 非第一层次的差动保护独占(仅用了其中的第一层次差动保护智能体), 因为它们还用于实现广域保护的其它层次保护功能。

第二层次的差动保护, 其切除范围比第一层次稍大, 作为第一层次的快速后备保护。譬如, 由于第一层次拒动或是断路器失灵, 则由第二层次切除。理论上, 第二层次差动保护的时限可按第一层次差动保护动作时间、断路器跳闸时间、断路器熄弧时间及时间裕度之和整定。目前, 我国稳定控制装置在主保护切除故障以后动作于切机、切负荷, 其动作时间也是按上述原则整定。显然, 第二层次保护比常规后备保护动作要快(因为常规后备保护一般采用动作时限配合, 以保证选择性。增加 1 级时限, 通常需增加延时 0.5 s。), 对提高电力系统稳定性十分有利。第二层次的差动保护任务由涉及变电站广域保护 IEDs 中的对应 Agent 子集共同承担, 电流采样数据来源同第一层差动保护, 需要的第一层差动保护动作信息, 由涉及的 IEDs 自己采集。故障前的网络拓扑信息由涉及的 IEDs 采集得到,

或者由 SCADA/EMS 或 WAMS 提供。

第三层次如实现差动保护，则作为一、二层次的后备，动作时限比第二层次长，且切除范围更广。第三层次如实现稳定控制功能，则其动作原理与目前的稳定控制装置类似，即通过功率平衡原理动作于切机、切负荷。故障前的网络拓扑信息由涉及的 IEDs 采集得到，或者由 SCADA/EMS 或 WAMS 提供。故障前的状态估计结果或由 SCADA/EMS 或 WAMS 提供，或者由广域保护系统的决策单元的状态估计 Agent 给出。第三层次如实现自动低频减载功能，则其任务由决策单元中对应的 Agent 承担。由于得到了区域内的各支路信息，可及时地判断功率缺额，使低频减载更加迅速、准确。这有利于电力系统在故障后尽快恢复到允许频率运行。第三层次的不同功能，由涉及厂站中 IEDs 中相应 Agent 子集共同协作实现。

所提方案的厂站 IEDs 中配置各种功能的 Agent，在配置广域保护功能时，在决策单元中输入 MAS 子系统构成原则，广域保护系统的 Agent 进行自组织，以构成实现不同功能的 MAS 子系统。由此可知，只要预先制定规则，采用在线自组织 MAS 可根据运行方式变化灵活构成不同保护范围的差动保护和稳定控制等。这种模式，可根据具体情况在线调整差动保护定值，也可精细考虑变压器分接头变化等情况，以提高差动保护的灵敏度。同时，也可灵活投、退某种保护功能或稳定控制功能。

(6) 所提广域保护采用广域同步并行处理运行机制。这种运行机制是，广域同步时间单元输出一组同步脉冲，各个厂站的 IEDs 及其 Agent 在同步脉冲的驱动下按步骤进行工作。决策单元则根据网络对时进行同步，其中的 Agent 亦实现同步工作。这种运行模式在广域同步的工作节拍驱动下有条不紊地工作，并在规定的时间内完成预定的任务。关于广域同步并行处理机制，在文献[15]中作了较详细介绍，此处不再赘述。

(7) 对于各个厂站的 IEDs，硬件仍采用成熟的机箱插件结构，但由于所提广域保护方案采用广域并行处理机制，插件之间的总线将需增加同步脉冲总线，如图 5 所示。

图 5 中，AB 为地址总线、DB 为数据总线、CB 为控制总线、SB 为同步脉冲总线。本端的采样数据由合并单元经过站内网络提供，远端采样数据由相应的远端厂站的广域保护 IEDs 的远程数据通信插件提供。图 5 仅画出了两个远端变电站的情形。

(8) 需要指出的是，所提广域保护系统可以根据总体架构设计分步实施。同时，系统中的某些部分

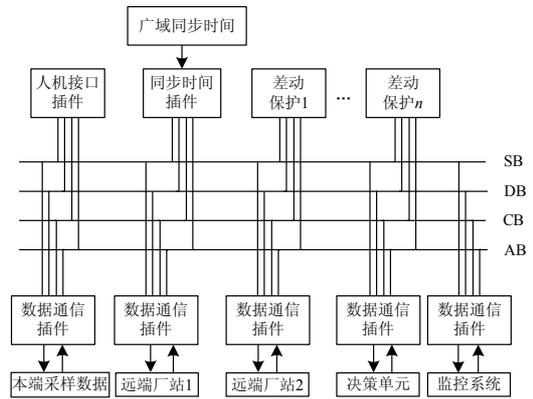


图 5 变电站 IED 硬件框图

Fig. 5 Diagram of IED hardware in substation

可以是已有的保护或稳定控制装置；或者是广域保护与常规保护和稳定控制装置互为备用。如采用互为备用方式，则出口配合逻辑如图 3 所示。

还需进一步说明的是，所提广域保护系统实现某些功能时，需要其他系统提供信息。在这种情况下，如果数据交换协议不一致，则需要配置协议转换器。同时，还需要关注网络安全性问题。

(9) 所提广域保护系统的差动保护范围为对应差动区域内部故障。对于第一层次差动保护，采用常规差动保护算法原理，其灵敏度与常规差动保护相同。对应于第二、三层次的差动保护，其保护范围比常规差动保护大，算法需要深入研究，其动作灵敏度也只有待验证后才能得知。此外，该广域保护系统的可靠性需要在实际系统开发时予以充分重视。但可采用一次常用措施，如双套装置、双信道等，以提高系统可靠性。

5 结束语

提出了一种基于在线自组织同步 MAS 的广域保护新方案。所提方案的特点：(1) 系统构建较好地考虑了继承性，广域保护可以充分发挥现有的微机保护、稳定控制装置和其他安稳装置的作用，并能够实现相互协调。(2) 在智能变电站条件下，如果远程通信网络能够提供足够的带宽给广域保护系统，构建一个区域电网的广域保护系统，只需增加精准广域同步时间单元(也可与其他系统共用)、各个厂站的广域保护 IEDs 和决策单元，可以节约采样部件。(3) 采用广域并行同步处理运行机制，能够保证实时性。(4) 采用在线自组织 MAS 技术构建功能子系统，功能实现灵活，可望实现复杂的协调功能。

广域保护系统是一个复杂的大系统，本文着重讨论了所提广域保护系统的构建和运行机制等方

面, 对于具体实现的硬件系统和具体算法等均未展开讨论。这些方面还有待今后研究。

参考文献

- [1] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.
- [2] 戴志辉, 王增平. 继电保护可靠性研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 161-167.
DAI Zhihui, WANG Zengping. Overview of research on protection reliability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 161-167.
- [3] 周泽昕, 王兴国, 杜丁香, 等. 过负荷状态下保护与稳定控制协调策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 146-153.
ZHOU Zexin, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. A coordination strategy between relay protection and stability control under overload conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 146-153.
- [4] 董希建, 李德胜, 李惠军, 等. 电网安全稳定控制装置线路故障跳闸判据的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 73-78.
DONG Xijian, LI Desheng, LI Huijun, et al. Improvement of line fault trip criterion of power system security and stability control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 73-78.
- [5] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 7-12.
YI Jun, ZHOU Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12.
- [6] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于多 AGENT 的广域保护系统系统体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 71-75.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Hierarchy of wide area protection system based on multi-Agent[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 71-75.
- [7] 刘兵. 基于“三道防线”的广域保护系统及其算法研究[J]. 广东电力, 2005, 18(6): 5-10.
LIU Bing. Study of a wide-area protection system based on 'three defensive lines' and its criterion[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(6): 5-10.
- [8] 王宏伟, 段建军, 殷宏涛, 等. 对构建山东 500 kV 电网广域保护系统的探讨[J]. 山东电力技术, 2006(5): 32-37.
WANG Hongwei, DUAN Jianjun, YIN Hongtao, et al. The study on constructing a wide-area protection system for the 500 kV network of Shandong Power Grid[J]. Shandong Dianli Jishu, 2006(5): 32-37.
- [9] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 14-18.
WANG Zengping, JIANG Xiangguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 14-18.
- [10] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [11] 田聪聪, 文明浩. 大电网实现信息冗余的广域后备保护系统[J]. 电力与能源, 2011, 32(2): 105-109.
TIAN Congcong, WEN Minghao. Wide-area backup protection system with achieving redundancy of information[J]. Electricity and Energy Source, 2011, 32(2): 105-109.
- [12] 李丰, 王来军, 文明浩, 等. 广域后备保护智能跳闸策略研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 84-87.
LI Feng, WANG Laijun, WEN Minghao, et al. Studies of smart trip strategies of wide-area backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 84-87.
- [13] 殷玮珺, 袁丁, 李俊刚, 等. 基于 SDH 网络的广域保护系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 120-124.
YIN Weijun, YUAN Ding, LI Jungang, et al. Research on wide-area protection system based on SDH network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 120-124.
- [14] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263.
XIONG Xiaoping, TAN Jiancheng, LIN Xiangning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.
- [15] 王少荣. 电力系统分布式广域同步并行处理平台研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.

- WANG Shaorong. A distributed wide-area synchronized parallel processing platform for power system monitoring and control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [16] 廖洪根. 电力系统广域保护通信系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- LIAO Honggen. Studies of communication system in power system wide-area protection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [17] 王越. 复杂信息系统构建的新方法——多活性代理方法[J]. 中国工程科学, 2006, 8(5): 29-33.
- WANG Yue. A novel method of constructing complex information system——multi-living agent method[J]. Engineering Science, 2006, 8(5): 29-33.
- [18] 韩彦岭, 张桃红, 杨炳儒, 等. 基于自组织的智能诊断技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(5): 1008-1014.
- HAN Yanling, ZHANG Taohong, YANG Bingru, et al. Intelligent diagnosis technology based on self-organizing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(5): 1008-1014.
- [19] 王越, 陶然, 李炳照, 等. 信息系统功能增强的多活性代理方法研究[J]. 中国科学, 2013, 43(7): 821-841.
- WANG Yue, TAO Ran, LI Bingzhao, et al. Multi-living agent methods for the function enhancement of the information system[J]. Science China, 2013, 43(7): 821-841.
- [20] SUDEIKAT J, RENZ W. Toward requirements engineering for self-organizing multi-agent systems[C] // Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, 2007. SASO '07. First International Conference on, Cambridge, MA, July 9-11, 2007: 299-302.
- [21] 赵琳, 刘振, 任雁铭, 等. 220 kV 数字化变电站测控保护一体化的实现方式[J]. 中国电力, 2010, 43(4): 38-40.
- ZHAO Lin, LIU Zhen, REN Yanming, et al. Realization of integrated devices of automation and protection in 220 kV digital substation[J]. Electric Power, 2010, 43(4): 38-40.

收稿日期: 2014-08-06; 修回日期: 2014-09-02

作者简介:

余文辉(1968-), 男, 在职博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。 E-mail: Yu-wenhui68@163.com