

DOI: 10.7667/PSPC151539

智能变电站保护动作时间延时特性研究

庞福滨^{1,2}, 杨毅¹, 袁宇波¹, 刘琦¹, 卜强生¹, 弓新月¹

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 在智能变电站中, 数字化保护所引入的合并单元、智能终端等智能设备延长了保护的動作时间, 对电力系统故障的快速切除带来了安全隐患。因此, 有必要对智能站中保护动作延时的环节进行深入分析。首先给出了智能站继电保护动作的各个延时组成部分, 对比了其与常规站保护动作各环节的差异性。对差异环节中的采样延时和智能终端延时这两大主要延时构成部分进行了详细分析, 给出了智能站延时现象的深层机理。探讨了降低各延时环节的有效措施。通过实验对比了常规站和智能站各环节动作时间的差异性, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 智能站; 动作时间; 合并单元; 智能终端; 延时环节

Research on characteristics of intelligent substation protection time delay

PANG Fubin^{1,2}, YANG Yi¹, YUAN Yubo¹, LIU Yu¹, BU Qiangsheng¹, GONG Xinyue¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In intelligent substation, the introduction of digital protection devices such as merging unit, intelligent terminal, etc. prolongs the operation time of protection, which brings the safe threat to the cutoff of power system fault. Therefore, it is necessary to analyze the time delay link of protection operating time in intelligent substation. In this paper, the composition of time delay in intelligent substation is given, and the difference of each part between intelligent and traditional substation is analyzed. Further, the two major compositions of time delay in sampling and intelligent terminal link are analyzed in detail, the deep mechanism of time delay phenomenon is given and the effective measures to reduce the time delay in each link are discussed. Finally, the differences of operation time delay between traditional and intelligent substation are compared by experiment, and the results testify the validity of theoretical analysis.

Key words: intelligent substation; operation time; merging unit; intelligent terminal; time delay link

0 引言

继电保护的速动性对于减小设备在故障状态下的运行时间、降低设备的损坏程度、提高电力系统并列运行的稳定性具有重要意义^[1]。随着自动控制技术、网络通信等技术的不断发展, 满足信息高度共享、设备之间具有互操作性、可扩展性强的智能变电站逐渐取代了传统变电站, 成为变电站发展的方向^[2-5]。智能变电站的全数字化保护很大程度上沿用了传统继电保护的原理和微机保护的实现技术, 但是由于智能站将原有的采样、出口跳闸功能部分拆分出来, 在合并单元、智能终端中分别实现, 且各装置之间通过标准通信协议进行信息的交互, 增加了报文接收、数据处理、报文输出等环节, 造成智能站较常规站的保护动作时间延长, 影响了保护

的速动性^[6-7]。为此, 本文分析了智能变电站中保护动作延时环节的构成, 通过与常规站保护装置动作的延时差别的对比, 给出了智能变电站保护动作时间延长的主要原因及改进措施, 并试验验证了智能站和常规站的保护动作时间, 提出了降低智能站保护动作时间的有效建议。

1 智能站与常规站保护动作延时对比

在常规变电站中, 电流、电压模拟量通过电缆方式接入保护、测控、计量等二次装置, 由于电信号在电缆中的传播速度接近光速, 且系统的采样和跳闸集成在保护装置内部, 因此由采样环节造成的延时基本可以忽略, 保护装置采集到互感器的输出信息后, 经过逻辑判断, 由出口继电器输出跳闸命令, 经操作箱到断路器执行跳闸动作, 如图 1 (a)所

示。而在智能变电站中, 合并单元采集互感器一次输入的模拟量, 并生成 SV 报文给保护装置; 保护装置进行逻辑判断, 发送 GOOSE 报文到智能终端, 智能终端接收到 GOOSE 报文后控制断路器动作跳闸, 如图 1 (b)所示。

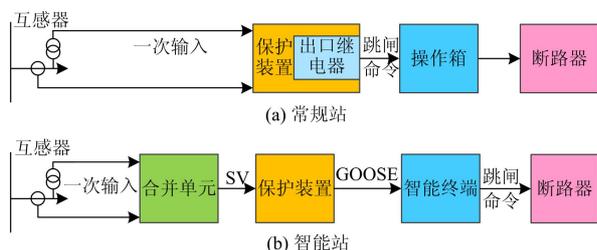


图 1 常规站与智能站的保护流程对比图

Fig. 1 Comparison diagram of protection process of traditional and intelligent substation

保护的動作时间, 是指从系统故障发生到保护动作信号发出跳闸命令的时间^[8]。从图 1 中可以看出, 常规保护的主要動作时间包括保护装置中模拟量滤波 A/D 转换时间(耗时很短, 基本可以忽略不计)、保护逻辑判断时间及出口继电器動作时间; 而由于合并单元和智能终端的引入, 智能站的保护動作时间包括合并单元采样时间、合并单元到保护装置的传输时间、保护装置動作时间、保护到智能终端的传输时间和智能终端的動作时间。其中, 合并单元到保护装置的传输时间、保护到智能终端的传输时间可以忽略不计。因此, 相比于常规站, 智能站的保护延时增加了合并单元的采样延时及智能终端的動作时间, 进而造成保护整组動作时间增长, 影响了保护的速动性。

智能站保护動作时间较常规站延长的问题, 在智能变电站建设的初期, 伴随着合并单元和智能终端的应用就已出现^[9]。由于早期智能站对合并单元、智能终端的规范化程度不高, 不同厂家的设备所造成的延时也不同, 部分设备的延时较长, 不能满足保护速动性的要求。随着智能变电站标准规范不断完善, 对合并单元、智能终端的延时特性已经有了统一的规范和要求^[10-12]。为了进一步缩短智能站整组保护動作时间, 提高保护的速动性, 有必要对合并单元、智能终端的延时机理进行分析, 并采取合理的措施降低两环节引起的保护延时。

2 采样延时分析

区别于常规站中保护装置直接采样, 智能站的采样环节前移到合并单元进行, 并生成 SV 报文, 因此带来了由于采样引起的延时问题。在智能变电站中, 由采样环节造成的延时包括两个环节:

1) 合并单元采样延时环节: 从互感器模拟量输入开始, 到合并单元转换生成 SV 报文并输出。

2) 保护装置采样延时环节: 从保护装置接收到 SV 报文进行解析, 到装置插值重采样后发送插值数据到逻辑判断单元。

下面分别对上述两环节展开讨论。

2.1 合并单元采样延时分析

图 2 为合并单元内部工作流程框图。如图所示, 由互感器输入的二次模拟信号经过 A/D 采集模块转换为数字信号^[13], 由于 FPGA 特别适合实时快速的逻辑控制, 因此由其负责各单元之间的数据交互传递。当数字信号到达 FPGA 时, FPGA 通过打时标的方式标记信号的到达时刻, 并将采样数据发送至合并单元的 CPU 进行数据的组包并生成 SV 报文。报文生成后, 再由 FPGA 提取报文并发送给保护装置。

为了更直观的说明系统的工作流程及合并单元造成的整体延时情况, 图 3 给出了系统的各个部分的工作时序图。

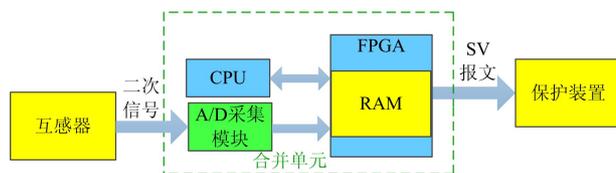


图 2 合并单元内部工作流程框图

Fig. 2 Diagram of working process inside of merging unit

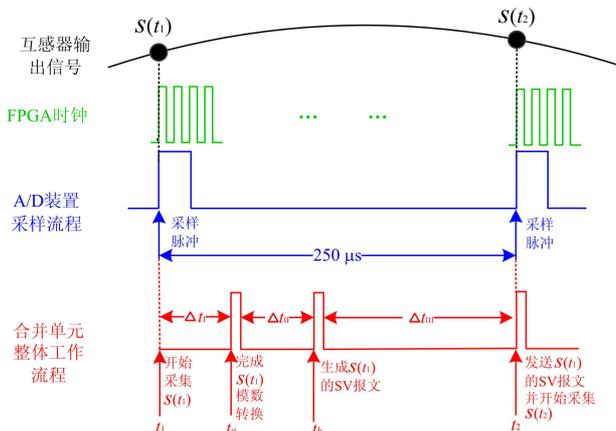


图 3 合并单元采样环节时序图

Fig. 3 Sequence diagram of sampling link of merging unit

在多路 A/D 采集装置同步采集(共用采样时钟)的情况下, 合并单元内部不需要进行插值运算。假设 A/D 采样装置采集到互感器的两个连续采样点为 $S(t_1)$ 和 $S(t_2)$ 。由于 SV 报文的输出频率为 4 kHz^[14], 因此由 FPGA 分频生成 A/D 装置的相邻两个采样脉

冲间隔为 250 μs。合并单元的工作时序流程如下：

1) 在 t_1 时刻, A/D 装置的采样脉冲到达, 合并单元开始采集 $S(t_1)$ 的信号值。

2) 由于 A/D 装置转换需要一定的时间, 目前主流 A/D 转换芯片的转换速度可达上百千赫兹至兆赫兹, 按照 16 位串行 A/D 转换芯片来计算, 其转换时间可控制在十几微秒的量级, 因此经过 Δt_1 (约为十几微秒) 后, 在 t_a 时刻完成 $S(t_1)$ 的模数转换。

3) 完成 $S(t_1)$ 的模数转换后, FPGA 将数据通过 RAM 发送给 CPU, 并由 CPU 组包生成 SV 报文, 此过程需要消耗 Δt_{II} (约为十几微秒) 的时间, 在 t_b 时刻生成 $S(t_1)$ 的 SV 报文。

4) 由于 CPU 内部受中断、数据排队等不确定因素的影响, 导致报文生成会存在一定的延迟, 即生成的报文到达 FPGA 的时间是不确定的; 为了保证报文均匀地等间隔输出, 系统将会等待 Δt_{III} , 在下一个 A/D 的采样脉冲到来时, 即 250 μs 后的 t_2 时刻发送 $S(t_1)$ 的 SV 报文给保护装置, 并开始采集 $S(t_2)$ 信号。

通过以上分析可以看出, 理论上合并单元输出报文的延时可以控制在 250 μs 内。但是上述分析是建立在多路 A/D 采集装置共用采样时钟的基础上的, 这种情况一般需要通过外接 GPS 同步信号来实

现, 这就增加了对外同步信号的依赖性。在没有外部同步信号时, 各路 A/D 采集装置的采集时间是相互独立的, 因此在 SV 报文输出时需要进行插值运算, 计算出各路信号在某一输出时刻的信号值。由于插值运算需要等待插值时刻的下一个采样点以进行内插运算, 这就增加了合并单元报文输出的时间; 且不同间隔的合并单元在信息上传时存在合并单元级联问题, 也会导致合并单元采样环节的延时变长。考虑上述情况时, 国家电网公司企业标准《智能变电站合并单元技术规范》中规定合并单元采样响应延时不应大于 2 ms^[15]。由此也可以看出, 通过共用采样时钟(在多路信号采集的情况下)、减少合并单元的级联传输可以有效降低合并单元的采样传输延时。

2.2 保护装置采样延时分析

保护装置内包括插值模块和逻辑判断模块, 其工作流程为: 采样模块接收合并单元发送的 SV 报文, 按照逻辑判断模块所需要的采样率进行报文的解析和插值运算, 再将采样插值运算结果送至保护逻辑判断模块, 并根据算法处理以判断是否发送跳合闸命令。因此, 在送至逻辑判断模块前, 保护单元的采样延迟包括插值部分和逻辑判断单元对插值结果采样部分, 其具体时序流程图如图 4 所示。

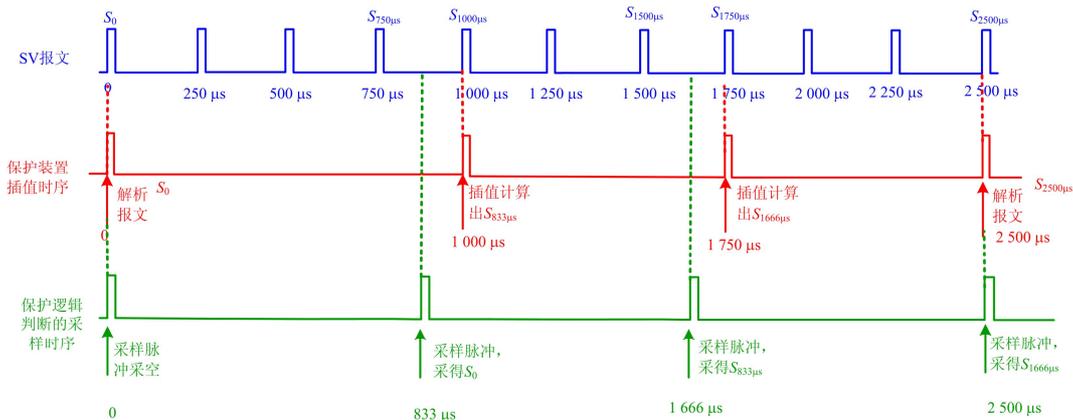


图 4 保护装置时序逻辑

Fig. 4 Sequence diagram of protection device

SV 报文的输出间隔为 250 μs, 每到一个报文, 保护单元会进行一次报文解析。由于保护逻辑判断单元的采样间隔为 1.2 kHz, 与 SV 报文的 4 kHz 的采样频率不同频, 因此需要进行插值运算, 而保护逻辑判断也需要对插值运算结果进行采样以进行算法处理^[16]。因此, 保护采样引起的延时误差来源于两个方面:

1) 插值等待时间: 为了计算得到保护逻辑判断在 833 μs 时的值 $S_{833\mu s}$, 就需要 $S_{750\mu s}$ 及 $S_{1000\mu s}$ 两个时刻的采样值报文, 因此必须等待至 1000 μs 时 $S_{1000\mu s}$ 报文到达后进行计算, 这样保护采样就需要等待 167 μs; 显然, 保护单元因为插值运算等待 SV 的报文时间不会超过 SV 报文的一个发送间隔, 即此时间在 250 μs 以内。

2) 保护逻辑单元的重采样等待时间: 保护逻辑判断单元的采样率为 1.2 kHz, 即采样的间隔为 833 μs 。此时保护逻辑判断单元对插值运算结果进行采样时, 必将滞后一个采样点。以插值运算的结果 $S_{833\mu\text{s}}$ 为例, 它是在 1 000 μs 以后才插值生成的, 因此在 833 μs 时刻对其进行采样是采集不到的, 只能在 1 666 μs 时才能够采集到。此时距离其实际对应的采样点坐标 833 μs 则正好相差一个采样间隔—833 μs , 其他采样点亦然。

通过以上的分析可以知道, 除了保护单元进行插值运算时要等待 SV 报文的采样点时间所需要消耗的 250 μs 以内的时间外, 保护逻辑判断单元的重采样等待时间是造成保护采样延时的主要原因, 而两者之和恰为 1 个逻辑判断单元的采样间隔 833 μs 。如果保护装置插值采样与保护的逻辑判断共用采样时钟, 则可在保护装置完成插值计算后直接将插值采样结果送到逻辑判断装置, 进一步减小保护装置的采样延时时间。

需要说明的是, 上述分析未考虑合并单元的容错机制及保护单元等待各合并单元的 SV 报文时间等因素。因此, 在实际应用中智能站的延时一般大于以上分析数值。

3 智能终端延时特性分析

智能终端的动作时间为智能终端收到 GOOSE 跳闸命令时刻至智能终端出口动作的时间。其内部集成了操作箱功能, 当接收到间隔层保护测控装置的 GOOSE 下行控制命令后, 通过报文解析实现对一次设备的实时控制。在相同的一、二次设备条件下, 与传统变电站中保护节点直接跳闸、其延时构成主要为出口继电器的动作时间相比, 智能变电站中采用 GOOSE 报文经网络发信给智能操作箱的方式增加了中间环节, 导致总保护动作时间有所延长^[7]。GOOSE 报文的接收和发送都要通过 DM9000AE 以太网控制器进行完成, 其接收流程图如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 开始接收 GOOSE 报文时, DM9000 首先清除接收中断标志位, 并读取帧接收的标志位, 若为“00”则舍弃该帧并中断返回; 当帧标志位正确时, 则读取帧的长度等状态信息, 弱错误则中断返回, 若无错误则保存数据, 记录 GOOSE 报文的接收时间并存入 SOE, 然后调用报文解析函数对报文进行解析, 最后进入中断返回。

GOOSE 报文的发送和接收延时与通信装置的处理能力有关, 在智能终端接收保护装置的报文时, 应防止 GOOSE 报文量过大引起的网口溢出而丢失

报文或延长时间过长。保护 GOOSE 跳闸网络延时的主要组成包括以下环节。

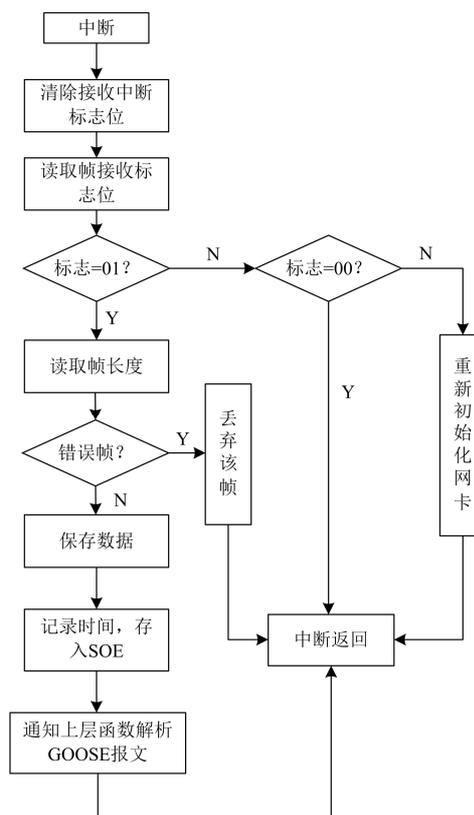


图 5 GOOSE 报文接收流程图

Fig. 5 Receiving diagram of GOOSE message

1) 交换机存储转发延时 T_{SF}

现代交换机均采用存储转发机制, 即将所有数据先保存在存储器中, 待整个数据帧接收完毕后再把数据发送到相应的端口, 这个转发过程中的时间即为交换机存储转发延时。此延时与所发送数据帧大小成正比, 与转发速率成反比。

$$T_{SF} = FS / BR \quad (1)$$

式中: FS 为以比特为数据帧的大小; BR 为单位为比特率的交换机通信速率。若数据帧大小为 1500 字节, 交换机通信速率为 100Mbps, 则交换机的传输延时为

$$T_{SF} = 1500 \times 8 / 100 = 120 \mu\text{s} \quad (2)$$

2) 交换机交换延时 T_{sw}

交换机在执行数据存储和转发过程中, 本身会产生交换延时, 此延时与 MAC 地址表、VLAN 及优先级等因素有关。工业级加强型交换机的交换延时一般在几微秒范围内, 一般不超过 10 μs ^[18]。

3) 光纤传输延时 T_{wl}

光纤传输延时等于光缆的长度除以数据帧在光缆中的传播速度，考虑光缆本身的折射率，光纤传输延时为

$$T_{WL} = Ln / v \quad (3)$$

式中： L 为光纤的长度； n 为光线中传输的折射率； v 为光纤传播速度。

4) 交换机帧排队延时 T_Q

在以太网交换机的数据存储和转发机制中，往往采用数据帧排队的方式以避免发生数据帧冲突的现象，这个过程中产生的时间就是交换机帧排队的延时。在最不利的情况下，当具有 K 个端口的交换机的 $K-1$ 个端口同时往另一端口发送报文，在忽略帧与帧之间的时间间隔的条件下，数据帧排队的最长延时为 $(K-1)T_Q$ ，最短延时为 0，平均延时为 $(K-1)T_Q / 2$ 。

4 试验研究

为验证智能化和常规保护动作时间的差异性，将智能化保护与常规保护串接在一起进行整组试验，如图 6 所示。其中，OMICRON 为信号源，输出交流模拟量到合并单元，由模拟量输入合并单元串接到常规保护装置构成常规化保护(图中经过合并单元是为了保证常规保护和智能化保护有相同的

模拟量输入，模拟量只是经由合并单元直接连接到常规保护装置，并不存在合并单元的延时环节)；由合并单元、智能化保护装置、智能终端构成智能化保护。为了统计各环节的延时时间大小，将智能化保护 GOOSE 跳闸出口、GOOSE 报文出口、SV 报文出口、常规保护的跳闸出口及 OMICRON 的交流模拟量等五路信号同时接入便携式录波仪。

本次试验采用某厂家的二次设备，经多次纵联差动保护整组动作试验(纵差保护定值 1 A，故障电流 1.2 A，差动保护通道自环，相当于 2.4 倍动作定值)。根据录波仪中的时序波形，统计了 6 次试验中智能化保护中合并单元采样延时、保护采样延时、保护逻辑判断时间、智能终端延时的时间，以及常规保护中逻辑判断时间、常规继电器动作时间，统计结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出，在常规保护中，保护装置的逻辑判断时间为 19 ms，常规继电器的动作时间为 3.3~5.2 ms(平均为 4.3 ms)，常规保护的整体动作时间为 22.3~24.2 ms(平均为 23.3 ms)；在智能化保护中，合并单元的采样延时为 1.3 ms，保护装置的采样延时为 2.3~3.1 ms(平均为 2.8 ms)，保护装置的逻辑判断时间与常规保护的逻辑判断时间相同，也为 19 ms(这也说明智能化保护的逻辑算法沿用了常

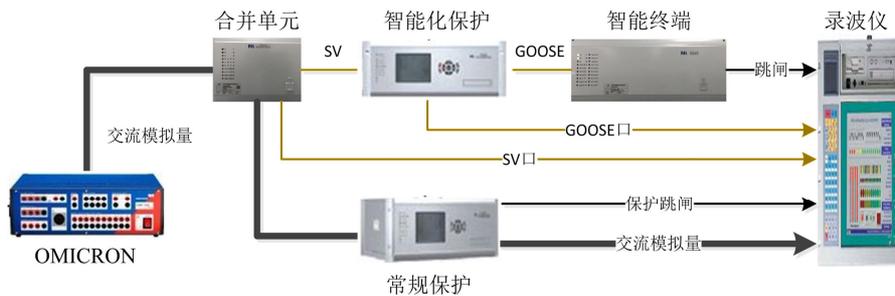


图 6 保护整组对比试验接线示意图

Fig. 6 Wiring diagram of the protection time experiment

表 1 智能站与常规站保护动作时间对比

Table 1 Comparison of protection time of intelligent and traditional substations

序号	常规保护逻辑判断时间	常规继电器动作时间	常规保护整组动作时间	合并单元采样延时	保护采样延时	智能化保护逻辑判断时间	智能终端延时	智能化保护整组动作时间	智能保护较常规保护延长时间
1	19	4.1	23.1	1.3	2.9	19	6	29.2	6.1
2	19	4.5	23.5	1.3	3.5	19	6.1	29.9	6.4
3	19	3.3	22.3	1.3	2.4	19	5	27.7	5.4
4	19	4.2	23.2	1.3	3.1	19	5.3	28.7	5.5
5	19	4.3	23.3	1.3	2.3	19	5.3	27.9	4.6
6	19	5.2	24.2	1.3	2.3	19	5.5	28.1	3.9

ms

规保护), 智能终端延时为 5~6.1 ms(平均为 5.5 ms), 智能化保护的总动作时间为 27.7~29.9 ms(平均为 28.6 ms), 较常规站保护动作时间延长了 3.9~6.4ms(平均为 5.3 ms)。

通过本次试验可以看出, 由于合并单元和智能终端的应用, 智能化保护装置相比于常规保护装置, 主要增加了合并单元采样延时环节(包括数据采样、SV 报文的生成)、保护采样延时(保护装置对 SV 报文的解析、插值等运算)、智能终端的延时等环节。其中, 合并单元的采样延时在总延时所占比重较小, 其次为保护装置的采样延时, 智能终端的动作延时最长, 这是由于一方面其内部集成了智能操作箱, 动作时间较长; 另一方面 GOOSE 报文的传输和解析, 也延长了保护的動作时间。

5 结论

在智能变电站中, 合并单元和智能终端的应用改善了变电站的信息共享, 提高了设备的通用性, 但同时由于采样环节的前移及 SV、GOOSE 报文的产生、传输及解析, 也使得智能站的保护动作时间滞后于常规站, 影响了保护的速动性。本文分析了智能站各环节中保护动作时间延长的机制, 并与常规变电站的保护动作机理进行了对比。通过分析智能站中保护动作时间延长的主要构成, 提出了降低保护动作时间的建议, 并进行了常规站与智能站保护动作时间的对比试验, 验证了理论分析的正确性。保护装置的动作时间关系到电网的安全运行, 因此有必要从动作机理及硬件实现中进一步开展降低其保护动作时间的研究, 充分保障智能站建设的顺利推进。

参考文献

- [1] 李锋, 谢俊, 兰金波, 等. 智能变电站继电保护配置的展望和探讨[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 122-126.
LI Feng, XIE Jun, LAN Jinbo, et al. Prospect and discussion of relay system configuration for intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 122-126.
- [2] 窦秉国, 张宏波. 一种新型合智一体装置的研制[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(5): 62-65.
DOU Chengguo, ZHANG Hongbo. The development of a new type of merging unit and intelligent terminal integrated device[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(5): 62-65.
- [3] KEZUNOVIC M, CUKA B M, POPOVIC T. Substation data integration and utilization[C] // Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09 IEEE/PES, Seattle, WA, 2009: 1-6.
- [4] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [5] 倪益民, 杨宇, 樊陈, 等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 194-199.
NI Yimin, YANG Yu, FAN Chen, et al. Discussion on integration of secondary devices in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 194-199.
- [6] 李英明, 郑拓夫, 周水斌, 等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 93-98.
LI Yingming, ZHENG Tuofu, ZHOU Shuibin, et al. A realization solution of key links for merging unit in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 93-98.
- [7] 闫志辉, 周水斌, 郑拓夫. 新一代智能站合并单元智能终端集成装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 68-71.
YAN Zhihui, ZHOU Shuibin, ZHENG Tuofu. Study of device with merging unit and intelligent terminal for new intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 68-71.
- [8] 高湛军, 陈青, 王涛, 等. 基于继电保护时空参数的电网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 61-67.
GAO Zhanjun, CHEN Qing, WANG Tao, et al. A power system fault diagnosing model based on protective relay time-space relation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 61-67.
- [9] 倪兆瑞, 王延安. 智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 119-124.
NI Zhaorui, WANG Yanan. Design of field testing instrument for merging unit delay characteristics in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 119-124.
- [10] 李文俊, 程志伟, 薛忠新, 等. 基于光纤通信的防越级跳闸方案设计和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 131-135.
LI Wenjun, CHENG Zhiwei, XUE Zhongxin, et al. Design and application on preventing override trip system based on fiber-optic communication[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 131-135.

- [11] 倪益民, 杨松, 樊陈. 智能变电站合并单元智能终端集成技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 95-100.
NI Yimin, YANG Song, FAN Chen, et al. Discussion on integration technology of merging unit and intelligent terminal in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 95-100.
- [12] 嵇建飞, 袁宇波, 庞福滨. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度实验分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 2-10.
JI Jianfei, YUAN Yubo, PANG Fubin. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 2-10.
- [13] 陈学伟, 高厚磊, 向珉江, 等. 基于电子式互感器微分输出的改进 R-L 模型距离保护算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 283-289.
CHEN Xuewei, GAO Houlei, XIANG Minjiang, et al. Improved R-L model distance protection algorithm based on differential output of electronic transducers[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 283-289.
- [14] 孔凡坊, 杨彬伦, 王瑞, 等. 智能变电站数字化采样测试技术及应用探讨[J]. 电测与仪表, 2013, 50(569): 42-46.
KONG Fanfang, YANG Binlun, WANG Rui, et al. Application of digital sampling test techniques in smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(569): 42-46.
- [15] 智能变电站合并单元技术规范[S] 北京: 国家电网公司, 2014.
- [16] 刘益青. 智能变电站站域后备保护原理及实现技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [17] 王松, 陆承宇. 数字化变电站继电保护的 GOOSE 网路方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 51-55.
WANG Song, LU Chengyu. A GOOSE network scheme for relay protection in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 51-55.
- [18] 刘昊昱, 左群业, 张保善. 智能变电站过程层网络性能测试与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 112-116.
LIU Haoyu, ZUO Qunye, ZHANG Baoshan. Process level network performance testing and analysis in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112-116.

收稿日期: 2015-08-31; 修回日期: 2015-12-16

作者简介:

庞福滨(1987-), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 从事智能变电站二次设备技术, 电力系统继电保护等方面的研究工作; E-mail: pangfubin2006@163.com

杨毅(1983-), 男, 博士, 工程师, 从事智能变电站二次设备技术, 继电保护故障分析等方面的研究工作;

袁宇波(1975-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 从事智能变电站试验及新技术, 电力系统继电保护及自动化等方面的研究工作。

(编辑 张爱琴)