

DOI: 10.7667/PSPC170347

基于 MapReduce 架构的就地化分布式母线保护研究

周小波^{1,2}, 唐治国^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032; 2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 为了解决目前母线保护装置就地安放时支持间隔少和部分保护性能差的现状, 提出在 HSR 环网分布式母线保护的基础上, 引入基于 MapReduce 架构的分布式设计方法。将保护子机分为调度节点和任务节点, 对母线保护的差动保护模块根据子机的个数分配于不同的子机计算并进行合并, 而对于各子机相关的后备保护则分配于对应子机和负责备用计算子机完成, 实现母线保护的分布式计算和逻辑判断, 并经过“动作三取二”逻辑出口跳闸。经过 RTDS 动模试验验证, 此设计方案可靠性高, 提高了保护装置的可用资源和性能。

关键词: MapReduce; 分布式计算; 键值对; HSR; 就地化; 母线保护

Research on outdoor installation distributed busbar protection based on MapReduce architecture

ZHOU Xiaobo^{1,2}, TANG Zhiguo^{1,2}

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China;
2. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: In order to solve the less bay number support and poor performance of the outdoor installation busbar protection, a distributed design method based on MapReduce architecture is introduced, based on HSR ring network distributed busbar protection. The protection sub-machine is divided into the scheduling node and the task node, and the differential protection module of busbar protection is allocated some nodes to compute and merge according to the number of sub-machine, then the backup protection related to each sub-machine is assigned to the corresponding sub-machine and some redundant computing sub-machines, this design completes the busbar protection distributed computation and logical judgement, and the protection trip uses the "action three take two" logic. Through RTDS dynamic test, this design is proved high reliability and improves the available resources and performance of the busbar protection.

Key words: MapReduce; distributed computation; key-value pair; HSR; outdoor installation; busbar protection

0 引言

未来继电保护控制系统的发展趋势是采用层次化结构, 其中包括集成多功能智能设备的就地层^[1]。为了实现保护装置的就地安放, 对于多间隔的母线保护需要采用分布式方案, 目前提出或已经实现分布式母线保护的方案基本可以分为两种: 1) 无主分布式母线保护, 各子机通过环网通信网络连接, 各子机完成独立的保护功能, 一般实现方式是全主式, 即每个子机均是主机, 完成所有的保护计算任务^[2-3], 此种方式可靠性较高, 冗余度大, 但每个子机均需完成所有任务, 任务重, 拓展能力弱; 2) 有主分布式母线保护, 一般是树形通信网络拓扑, 即一个主机连接 N 个子机, 母线保护原理主要在主站实现,

子机只完成跳闸和采集操作^[4-9], 或子机完成失灵、过流等后备保护功能^[10-11], 此模式存在一个独立的主机, 随着间隔数的增加, 主机上所需连接子机数量增加, 不利于保护主机的就地安装^[12]。结合此两种模式的优势, 采用环网通信网络拓扑, 指定一个子机为主机, 计算任务由主机和子机共同完成。若存在一个或多个主机完成主要的计算任务, 一般随着间隔的增加资源消耗急剧增大, 随着电力系统的发展, 出现接入超多间隔的母线, 一套母线保护装置需要接入 30 个甚至更多间隔, 若一套母线保护无法接入这么多间隔, 则需要分多套装置实现整个母线保护功能, 这会导致保护配置复杂, 成本增加。保护装置硬件更新存在一定的周期, 在目前硬件基础上, 需要尽可能扩展分布式母线保护的能力, 以

满足接入更多间隔和提供更多功能的需求。

1 MapReduce 架构

1.1 MapReduce 架构简介

MapReduce 是 GOOGLE 公司 2004 年公开发表的一个数据处理架构, 是处理、产生大数据集的相关实现。该架构将要执行的问题拆分为 Map(映射)和 Reduce(化简)两个部分, 将计算分配到不同的计算节点实现并行计算。其中 Map 函数产生一个<key, value>对集, 再由一个 Reduce 函数对所有相同 key 的<key, value>对集进行合并^[13]。为了让分布式任务可靠地执行, 有两种类型的节点控制任务的执行过程: jobtracker 和多个 tasktracker。jobtracker 通过调度任务在 tasktracker 上运行, 来协调所有运行在各个子机上的任务。tasktracker 运行任务的同时, 把进度报告传送给 jobtracker^[14-15]。MapReduce 常见于利用 PC 集群进行大数据运算^[16]。

1.2 母线保护与 MapReduce 分布式计算架构

对于分布式母线保护, 若面向对象配置保护子机(即每个间隔均配置对应的子机), 则有多少个子机, 就有多少个计算单元, 形成一个保护集群, 而母线保护的大部分功能均面向间隔, 因此天然存在分布式运算的特性。以往常使用一个主机来完成所有功能, 导致主机负载过大, 在进行相关功能扩展时常常不能满足要求或性能下降, 而每个子机均完成一定的任务, 并相互共享结果, 那么每个子机的任务均不会因为需求的变更而导致负载过大。母线保护的保护功能均可作为一个映射(Map 函数), 将保护功能的计算结果使用一定的协议传输, 在 Map 函数输出的结果存在需要大量合并的数据, 比如从支路失灵动作合并出哪条母线失灵动作、各支路 CT 断线结果合并 CT 断线的具体相别、从大差和小差动作结果合并出动作的母线及故障相别等等, 合并的操作就是 Reduce 任务的过程。

2 基于 MapReduce 架构的分布式母线保护总体方案

2.1 分布式母线保护硬件设计

每个间隔配置一个子机, 子机通过环网组成, 子机采集模拟量和开关量信息通过环网共享。每个间隔的子机包含 CPU+FPGA, 其中 FPGA 采集模拟量和开关量, 传输给其余子机 FPGA, 每个子机的 FPGA 均接收其余间隔的模拟量和开关量数据, 并将数据进行插值后送给 CPU 进行保护逻辑计算。通过环网的同步方案(包括采样值同步、定值同步等)

参考文献[1]。信息的采集均由 FPGA 处理, 因此 CPU 的异常并不会导致环网中其他间隔数据的接收和发送, 一般情况下 FPGA 的可靠性大于 CPU, 此设计减少了保护拒动的发生, 提高了保护的可靠性。人机接口 MMI 模块用于后台管理和本地液晶操作, 若装置放置环境不利于液晶则可配置信号指示灯确定装置所处的状态。每个子机硬件一致, 可选配 MMI 模块, 子机硬件示意图见图 1。

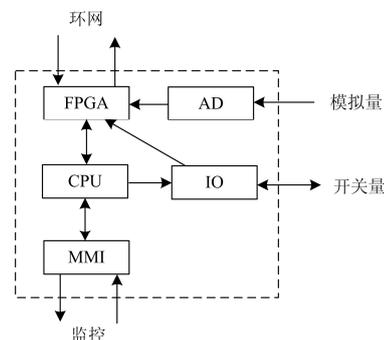


图 1 分布式母线保护子机硬件示意图

Fig. 1 Hardware schematic diagram of distributed busbar protection sub-machine

一个典型的分布式母线保护环网连接配置如图 2 所示。一般指定 PT 子机为调度节点(JobTracker), 其余间隔各配置一个子机为任务节点(TaskTracker), 每个子机所接资源仅包括本间隔所接的模拟量和开关量信息, 相对于集中式保护, 功耗、所需要的硬件资源、体积、功耗等将大大减少, 单间隔装置成本可大幅减少。

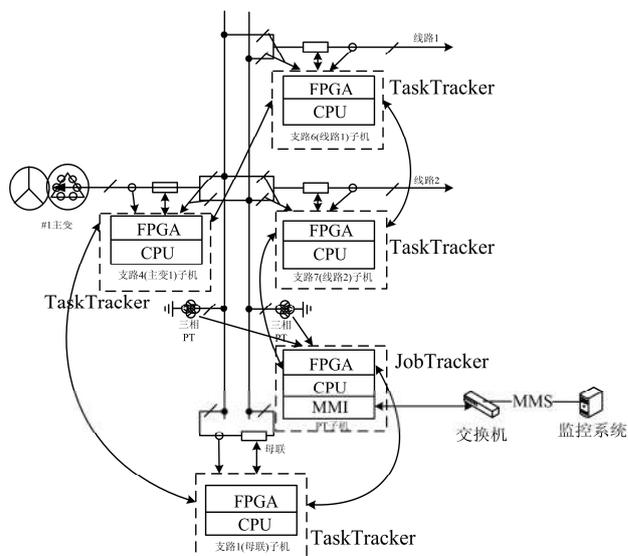


图 2 分布式母线保护环网连接配置图

Fig. 2 Configuration diagram of distributed busbar protection ring network connection

2.2 分布式母线保护软件框架

为确认母线保护的软件框架，对于分布式计算任务的分配，首先分析目前保护主机任务资源的消耗情况。目前一个典型 21 间隔配置的母线保护装置计算任务如表 1 和表 2 所示，其中应用任务所使用资源占总资源一半左右，基础运算或不可分解

表 1 母线保护任务占比示意

Table 1 Bus protection task occupancy ratio

任务	资源占用/%
软件平台	26
应用任务	50
操作系统管理等	4
剩余可用	20

表 2 母线保护应用任务分解示意

Table 2 Application task decomposition of busbar protection

应用任务	资源占用/%
差动保护	15
失灵保护	5
电压判据	3
母联相关保护	7
基础运算+其他功能	20
总计	50

的任务占 20%左右，另外的 30%即是分布运算的部分。由于失灵、电压或母联相关任务均是和间隔相关，而差动可以拆分为大差和小差，或者按照相别拆分。对于面向间隔的分布式母线保护装置，保证可靠性的前提下将计算任务按间隔和具体功能进行分布并行运算。

为了简化软件的设计且方便运维，每个子机运行任务包括三类任务。1) 公共模块：即所有子机均执行此任务模块，比如软件平台任务、应用里的基础运算以及所有保护功能的事件、录波、信号等输出；2) 必备模块：即本子机肯定执行的任务，即本间隔对应的保护，根据间隔不同的属性，各个间隔有所不同；3) 冗余模块：为提高通信的容错性和保护的可靠性，将安排子机执行其他子机的必备模块进行冗余计算。任务分配示意图如图 3 所示(以 4 个子机示意)。

在图 4 中，对于子机 x 的保护功能 Y 的 Map 任务为必备模块，Reduce 任务为公共模块，其他子机保护 Y 的 Map 任务为对应子机的冗余模块，Map 任务输出<key, value>键值对，Reduce 任务进行多级合并操作，驱动事件、录波、跳闸、信号等。此设计保证了每个子机的完整性，便于装置调试及运维。

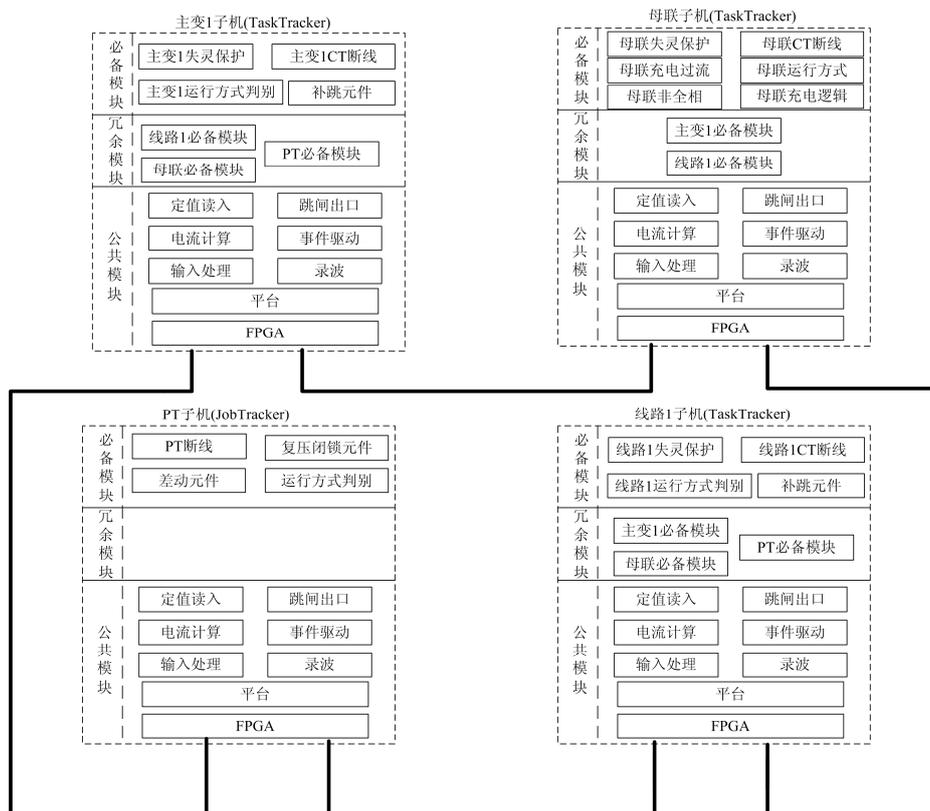
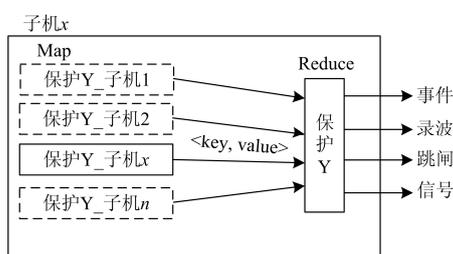


图 3 分布式母线保护任务分配示意图

Fig. 3 Task distribution of distributed busbar protection

图 4 子机 x 的保护 Y 任务执行示意图Fig. 4 Schematic diagram of the Y task execution for the protection of the sub-machine x

3 基于 MapReduce 架构的分布式母线保护关键技术

3.1 <key, value>键值对设计

为了实现分布式计算, Map 任务和 Reduce 任务的交互数据格式按照<key, value>键值对的形式, 其中 key 作为关键字, 用来区别功能类型, value 则是该功能带的所有中间输出结果。由于其他子机不进行此功能的运算, 因此所有的动作、异常信号等均需共享。

key 值共占用两个字节, 其中前一个字节代表一个保护功能, 后面一个字节表示对应间隔的功能。若部分功能不按间隔, 比如复压、PT、差动等, 则 key 按前两个字节区分, 后面一个字节用 0x00 代替, 以表示无间隔区分。key 值的定义如表 3 所示。

表 3 key 值定义

Table 3 Definition of key value

key 值	含义
0x8001	支路 1CT 断线
0x8002	支路 2CT 断线
⋮	⋮
0x8020	支路 32CT 断线
0x9001	支路 1 失灵保护
0x9002	支路 2 失灵保护
⋮	⋮
0x9020	支路 32 失灵保护
0x9100	I 母 PT 断线
0x9200	II 母 PT 断线
0x1000	大差
0x1100	I 母小差
⋮	⋮

value 值的定义, 在第一个比特位设置一个总动作或闭锁信号, 后续内容按照保护功能输出内容的信息而设计, 如表 4 所示。

表 4 value 值定义

Table 4 Definition of value

<key, value>	含义
<0x80xx, 0x001>	支路 xx_CT 断线
<0x80xx, 0x002>	支路 xx_A 相 CT 断线
<0x80xx, 0x004>	支路 xx_B 相 CT 断线
<0x80xx, 0x008>	支路 xx_C 相 CT 断线
⋮	⋮
<0x90xx, 0x001>	支路 xx_失灵保护动作
<0x90xx, 0x002>	A 相失灵启动
<0x90xx, 0x004>	A 相失灵启动异常
<0x90xx, 0x008>	B 相失灵启动
⋮	⋮
<0x90xx, 0x100>	解电压闭锁开入
<0x90xx, 0x200>	解电压闭锁开入异常
<0x90xx, 0x400>	I 母失灵保护 1 时限动作
⋮	⋮

3.2 <key, value>传输协议

为了各个节点之间能够快速交互<key,value>数据, 在设计时将中间结果<key, value>嵌入 SV 报文中, 利用千兆以太网, 4 kHz 的发送接收频率进行环网共享, 延时低, 数据更新及时。为了降低网络负载, 利用 TLV(Type Length Value)格式编码, 这是一种可变格式, 其中 Type 对应<key, value>中的 key, Length 代表 Value 的长度, 便于解析和报文的可缩放性, Value 则对应<key, value>中的 value 内容, 对于 BOOL 类型的 value 则只占其中一个比特, 对于 FLOAT 类型的 value 则需占用四个字节。

3.3 Map 任务构造

保护装置的功能逻辑作为 Map 任务, 可以分为三类。第一是只与单间隔相关的保护功能, 第二是与多个间隔相关的保护功能, 第三是跨间隔相关的保护功能。只与单间隔相关的保护功能, 如 PT 相关逻辑(PT 断线、差动电压判断、失灵电压判断)等等, 此函数增加输出对应的<key, value>键值对, 即实现 Map 任务的构造。对于与多个间隔相关的保护功能, 比如 CT 断线(可以分为支路 1、支路 2 到支路 N 的 CT 断线)、失灵保护(支路 1—支路 N 的失灵保护)、母联充电过流(母联 1—母线 3)、母联非全相(母联 1—母线 3)等函数, 增加此间隔功能的 key 输入, 并增加输出对应的<key, value>键值对, 即实现此类 Map 任务的构造。

跨间隔相关的保护功能主要是差动保护元件。第一种方式是按照相别拆分差动元件, 即分为 A、B、C 三个相差动元件, 此时差动函数增加相别差动对应的 key 输入, 差动保护输出结果以<key, value>格式, 即完成 Map 任务的构造。第二种按照

大差和小差的功能区分, 设置对应大差和小差的功能码 key 值, 在差动函数增加大差和小差的识别码输入, 并输出<key, value>。

每个间隔的间隔号, 由调试工具写入每个子机的 FPGA 中, 并保证环网内间隔号的唯一性, 对于间隔的属性(母联、主变、线路)一般固定, 可采用标准中规定的定义, 或者使用内部定值根据现场工程更改。

3.4 Reduce 任务构造

Reduce 任务是合并化简的一个过程, 前端 Map

任务已计算送出<key, value>中间值, 每个子机执行的 Reduce 任务一致, 包括所有保护功能。目前保护逻辑的最后一级(输出信号、跳闸、事件等), 增加合并处理, 即可完成 Reduce 任务的构造。合并分为两种, 第一种是当存在多个相同 key 的<key, value>, 需要进行去冗余合并操作; 第二种是存在多支路的同一功能的 key, 需进行合并操作。支路 CT 断线的 Reduce 任务如图 5 所示。去冗余合并操作时, 取<key, value>中的第一个比特, 采用“动作三取二”原则, 具体见 3.6 节。

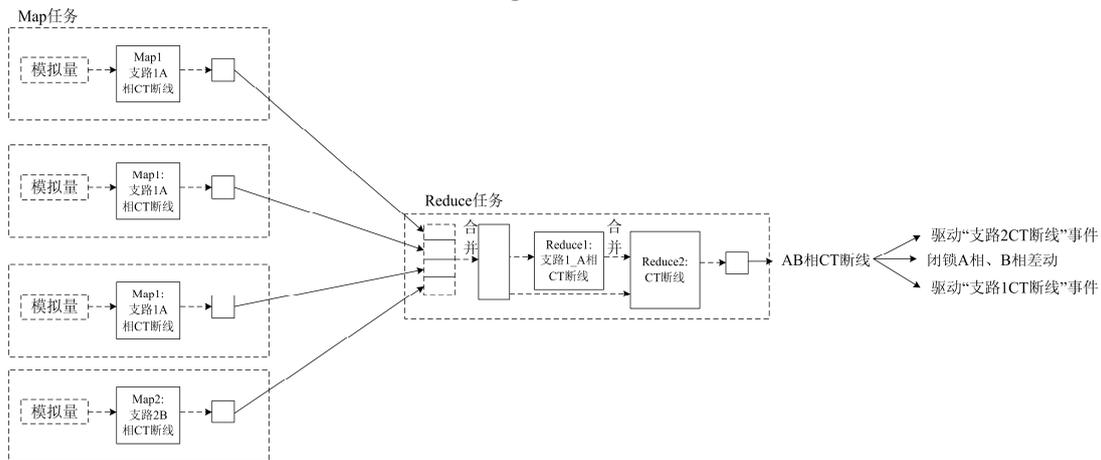


图 5 Reduce 任务合并示意图
Fig. 5 Schematic diagram of Reduce task merging

3.5 任务调度

MapReduce 架构由一个单独的调度节点 master JobTracker 和每个间隔一个任务节点 slave TaskTracker 共同组成。其中 JobTracker 负责任务的调度和分配, 在其中任一个 TaskTracker 投入或退出网络时, 进行任务计算的调整, 而 JobTracker 只负责由 TaskTracker 指派的冗余模块计算。

一般除二分之三断路器接线母线保护不接收母线电压信息, 其余母线保护均需接入电压信息, 且电压信息是必备信号, 一般不会出现单独检修电压的情况, 故一般指定 PT 子机为调度节点 JobTracker, 对于二分之三接线, 则确认任意一台子机或额外增加一台子机为调度节点 JobTracker。

任务调度流程如图 6 所示。在刚上电时, 组成环网后, JobTracker 获取网络拓扑, 每个 TaskTracker 执行必备任务, 其中差动元件由于此元件占用资源过多, 所以需要等待 JobTracker 分配任务。JobTracker 根据网络上节点的个数, 当间隔个数(不包括 JobTracker 节点)低于门槛 k 时, 则将差动元件的所有元件安排三个节点, 其中 JobTracker 节点算一个, 其余两个节点的选取原则按照间隔的优先级:

线路间隔>主变间隔>母联间隔(考虑间隔本身必备模块的任务消耗是按此顺序依次升高), 如果不满足两节点时, 按实际节点数分配。当间隔个数(不包括 JobTracker 节点)高于门槛 k 时, 则将差动元件按照 3.3 节差动的 Map 任务分配, 以双母线差动分为大差或小差为例, 同样按照上述间隔优先级, 其中 JobTracker 节点计算大差, 选择其他两个线路间隔冗余计算大差, 再选择三个间隔计算 I 母小差, 选择三个间隔计算 II 母小差。关于门槛 k 的选择, 需考虑任务安排最多的间隔资源剩余情况, 按照目前的处理, 在差动不拆分时, 由于后备保护任务分布运算, k 值一般选取超过 21。

JobTracker 定时刷新环网拓扑结构, 在环网中部分承担的差动任务需转移到其他子机执行, 为避免故障期间装置的异常, 在无差动保护启动时执行, 若在无异常时发生网络拓扑突然变化, 确认间隔的投入状态, 若间隔退出且环网中无子机数据, 瞬时确认子机退出环网运行, 将在下一个采样周期将任务分配给环网内运行子机, 以保证网络拓扑结构变化对保护的影响。

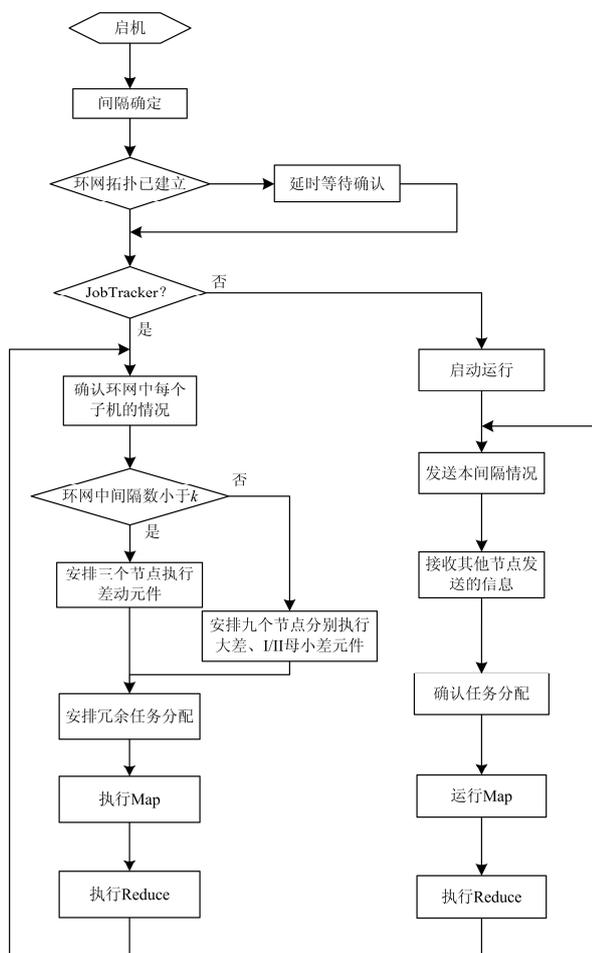


图 6 任务调度流程图

Fig. 6 Task scheduling flow chart

在不足三个节点时, 则按实际节点数目安排计算任务, 若间隔数超过门槛 k 时, 则将差动元件拆分为大差元件和小差元件, 每个元件由 JobTracker 分别安排三个节点计算, 差动元件的动作出口经本间隔的启动元件闭锁; 其中门槛 k 由 JobTracker 根据各个 TaskTracker 的剩余资源及增加节点后增加的计算任务估计决定。

3.6 “动作三取二”设计

为防止通信的异常、子机 CPU 的软件异常和任务的重新分配等, 防止保护的拒动或误动的发生, 差动保护及后备保护每个计算模块均由三个子机完成, 按照“动作三取二”的方式, 对于差动保护, 为保证主保护的动作为可靠, 设计高灵敏的本地差动启动就地判据, 避免误动的发生。

“动作三取二”的逻辑如下:

1) 若来自不同节点的重复 key 的 $\langle \text{key}, \text{value} \rangle$ 超过三个, 则采用“三取二”, 满足两个一致时, 即取其中第一个 $\langle \text{key}, \text{value} \rangle$ 内容赋值给后续 Reduce 任务;

2) 若来自不同节点的重复 key 的 $\langle \text{key}, \text{value} \rangle$ 只有两个, 则采用“二取一”, 选择间隔号较小的节点数据即可, 并将内容赋值给后续 Reduce 任务;

3) 若对于一个 key 的 $\langle \text{key}, \text{value} \rangle$ 只有一个来源, 则直接使用其结果。

4 测试仿真

在目前每个子机均配置完整保护的母线保护(全主式)和按照 MapReduce 架构进行设计后的母线保护, 基于 RTDS 进行仿真试验, 从剩余资源、可靠性、动作时间等方面对两者进行对比, 以验证设计的有效性, 仿真试验主接线图如图 7 所示。其中母联接入 1 单元, CT2 接入支路 7(线路)、CT4 接入支路 6(线路)、CT7 接入支路 4(主变), 其余子机均接入环网, 作为热备用子机, 包括电压子机, 总子机数量为 31 个。

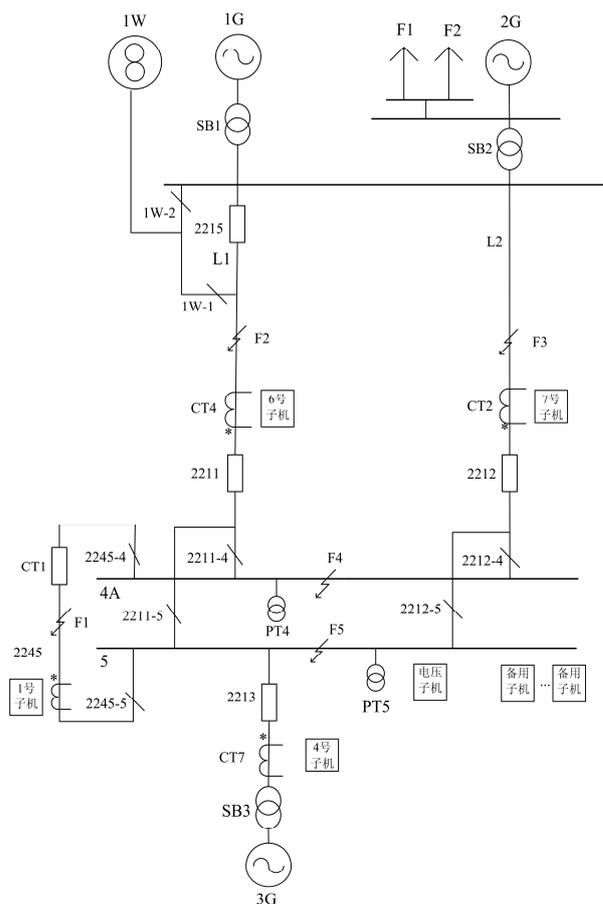


图 7 双母线试验系统图

Fig. 7 Double busbar test system diagram

对于全主式和基于 MapReduce 的分布式母线保护, 对动模的各项试验进行对比, 数据见表 5。定值: 差动保护启动电流定值为 0.4 A, 母联分段失灵

定值为 1 A, 母联分段失灵时间为 0.2 s; 失灵保护 1 时限为 0.15 s, 失灵保护 2 时限为 0.2 s。

表 5 保护测试对比

Table 5 Protection test comparison

类型	全主式	MapReduce 分布式
区内故障	16.2~30.4 ms	15.1~28.1 ms
区外故障	不动作	不动作
区内发展性	18.4~33.6 ms	18.0~32.4 ms
区外转区内	13.0~38.4 ms	12.8~38.1 ms
区内过渡电阻	17~38.8 ms	16~36.3 ms
区外过渡电阻	不动作	不动作
母联失灵	218.6~223.4 ms	208.1~215.4 ms
线路失灵 1 时限	0.171~0.181 s	0.161~0.171 s
线路失灵 2 时限	0.219~0.231 s	0.210~0.222 s
变压器失灵 1 时限	0.175~0.181 s	0.162~0.169 s
变压器失灵 2 时限	0.222~0.233 s	0.211~0.223 s
系统振荡	不动作	不动作
饱和区外	不动作	不动作
饱和区内	18.6~20.4 ms	17~18.9 ms
CT 断线闭锁试验	可靠闭锁	可靠闭锁
充电试验	正确动作	正确动作
死区故障	正确动作	正确动作

从表 5 中可以看出, 基于 MapReduce 的分布式母线保护动作行为正确, 动作时间较全主式均减少 1~2 ms, 而后备保护则普遍提升 10 ms 左右。

对比两者效率和最大支持间隔, 数据见表 6 和表 7。从中可以看出, 得益于效率的大幅提升, 保护的单位时间处理能力提升, 对保护进一步提高处理频率后, 减少了保护的整组动作时间。表 5 中测试是在目前支持最大间隔(30 个)下的测试, 为了保证各个情况下处理的可靠性, 目前是将 CPU 的扫描周期固定, 所以在减少子机个数时, 整组动作时间和最大间隔时测试一致。由于计算的分布式并发进行, 分布式母线保护支持的间隔, 在目前装置硬件上不作优化处理时可以提高到 30, 如果对保护的部分任务进一步分析, 加大分布式并发计算任务的比例或将部分任务前置让 FPGA 处理, 可最大支持间隔 36 或更多, 可以满足现场大部分的需求。

表 6 21 间隔效率对比

Table 6 Comparison of 21 interval efficiency

类型	子机最小剩余资源/%
全主架构	20
MapReduce 分布式架构	35

表 7 最大间隔数支持(最小剩余 20%资源)

Table 7 Maximum bay number support (minimum resources remaining 20%)

类型	子机最大支持间隔
全主架构	21
MapReduce 分布式架构	30

考虑到保护的实现机制, 对子机的投入和退出进行相应的保护行为测试, 以验证任务调度机制的可靠性。测试结果如表 8 所示, 在不同的工况或异常情况下, 保护的动作为正确, 无异常。其中在模拟子机异常时, 也包括调度节点(JobTracker 节点)。调度节点的异常使保护失去了调度能力, 由于三取二设计但保护功能仍然存在, 即使再出现一个子机异常或退出仍然可以正确动作, 在变电站中出现一个装置异常时, 再同时出现两个子机异常或对多于两个子机进行退出操作的概率是非常低的, 对于 220 kV 及以上的母线有另一套保护, 仍然可以保证故障的切除, 基本不会出现拒动的发生。

表 8 任务调度测试

Table 8 Task scheduling test

测试项目	保护行为
退出备用子机, 在网子机数目为 15 个	行为正确
退出备用子机, 在网子机数目为三个	行为正确
模拟其中任何一个子机 CPU 异常	行为正确
模拟其中任何两个子机 CPU 异常	行为正确
模拟一个子机报文置动作	行为正确
投入一个子机, 做差动保护试验	差动动作
退出一个子机, 做差动保护试验	差动动作
同时退出三个差动子机同时模拟故障	差动动作时间满足要求

对比其他分布式母线保护方案, 在同样的硬件上, 保护原理没有变化时, 保护整组动作时间没有什么差别, 本方案在将繁重计算任务分布式进行情况下, 又进行了三取二等可靠性设计, 经测试保护满足四性要求, 主保护整组跳闸时间减少 2 ms 左右。

5 结论

为适应母线保护装置就地安装, 以 MapReduce 架构为基础, 利用分布式母线保护的子机进行并行运算, 将各间隔保护相关的保护计算任务分配到各间隔同时进行计算任务, 这样在目前的硬件基础上即可支持母线保护接入更多间隔, 且能大幅提高保护的资源可用率, 并带来很强的扩展性, 以适应工程应用的各种需求, 跳闸结果采用出口三取二方式保证了保护的可靠性。

参考文献

- [1] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 周小波, 汪思满, 吴正学, 等. 环网分布式母线保护装置就地化实现探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 104-108.
ZHOU Xiaobo, WANG Siman, WU Zhengxue, et al. Local placing implementation research of distributed HSR busbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 104-108.
- [3] 王风光, 焦彦军, 张新国, 等. 一种分布式母线保护的新型通信方案[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 72-74, 80.
WANG Fengguang, JIAO Yanjun, ZHANG Xinguo, et al. A new communication scheme for distributed busbar protection[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 72-74, 80.
- [4] 刘伟, 倪传坤, 杨恢宏, 等. 智能变电站分布式母线保护实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 139-141, 146.
LIU Wei, NI Chuankun, YANG Huihong, et al. Implementation of distributed busbar protection applied to smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 139-141, 146.
- [5] 雷明, 王文森, 康小宁, 等. 不受非同步采样影响的母线差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 96-101.
LEI Ming, WANG Wensen, KANG Xiaoning, et al. Research on the busbar differential protection scheme immune to asynchronous sample data[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 96-101.
- [6] 唐治国, 汪思满, 康丰, 等. 多级级联分布式母线保护方案[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 136-141.
TANG Zhiguo, WANG Siman, KANG Feng, et al. Multilevel cascading solution for distributed busbar protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 136-141.
- [7] 王风光, 张祖丽, 张艳. 分布式母线保护在智能变电站中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 37-39, 43.
WANG Fengguang, ZHANG Zuli, ZHANG Yan. Application of distributed busbar protection in smart substation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(2): 37-39, 43.
- [8] 邹贵彬, 王晓刚, 高厚磊, 等. 新型数字化变电站分布式母线保护[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 94-97.
ZOU Guibin, WANG Xiaogang, GAO Houlei, et al. Distributed busbar protection of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 94-97.
- [9] 王攀峰, 张克元, 文明浩, 等. 应用于数字化变电站的分布式母线保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 68-71.
WANG Panfeng, ZHANG Keyuan, WEN Minghao, et al. Research on distributed busbar protection applied to digital transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 68-71.
- [10] 董杏丽, 徐瑞东, 薄志谦, 等. 分布式母线保护技术及实现[J]. 继电器, 2005, 33(14): 19-22.
DONG Xingli, XU Ruidong, BO Zhiqian, et al. Technology and implementation of distributed busbar protection[J]. Relay, 2005, 33(14): 19-22.
- [11] 李斌, 马超, 贺家李, 等. 基于 IEC 61850 的分布式母线保护方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 66-70.
LI Bin, MA Chao, HE Jiali, et al. Distributed busbar protection scheme based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 66-70.
- [12] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.
- [13] DEAN J, GHEMAWAT S. MapReduce: simplified data processing on large clusters[C] // Proceedings of the 6th Symposium on Operating System Design and Implementation, 2004, New York: ACM: 137-150.
- [14] WHITE T. Hadoop 权威指南: 中文版[M]. 曾大聃, 周傲英, 译. 清华大学出版社, 2010.
- [15] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 146-169.
MENG Xiaofeng, CI Xiang. Big data management: concepts, techniques and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(1): 146-169.
- [16] 夏靖波, 韦泽鲲, 付凯, 等. 云计算中 Hadoop 技术研究与应用综述[J]. 计算机科学, 2016, 43(11): 6-11, 48.
XIA Jingbo, WEI Zekun, FU Kai, et al. Review of research and application on Hadoop in cloud computing[J]. Computer Science, 2016, 43(11): 6-11, 48.

收稿日期: 2017-03-11; 修回日期: 2017-07-27

作者简介:

周小波(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为继电保护的研究与开发; E-mail: xiaobo-zhou@sac-china.com

唐治国(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护控制技术。

(编辑 周金梅)