

数字化变电站集中式保护应对边界信息缺失新方法研究

马云龙¹, 王来军¹, 文明浩², 李丰¹, 孙明¹, 鄢阳², 汪溢²

(1. 许昌供电公司, 河南 许昌 461000; 2. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 数字化变电站集中式保护装置统一处理全站实时信息, 有利于改善保护的性能。然而由于网络通信、电子互感器发生故障等原因可能造成集中式保护装置采集的实时信息缺失, 使得集中式保护无法迅速、有选择性的切除故障, 影响保护系统的可靠性。提出一种数字化变电站集中式保护应对边界信息缺失新方法, 当故障发生时, 如果出现一条线路电流采样值信息缺失, 在假设母线没有发生故障前提下利用基尔霍夫电流定律合成信息缺失线路的电流, 然后通过常规三段式线路保护判据切除故障。如果在信息缺失线路保护第一段检测到故障发生, 则在无延时跳开该线路断路器之后, 利用常规母线差动保护判据检测母线是否发生故障, 以决定是否跳开与母线相连的所有断路器。数字仿真分析验证该方法的有效性。

关键词: 数字化变电站; 集中式保护; 信息缺失

The study of a new method for digital substation centralized protection to cope with boundary information deficiency

MA Yun-long¹, WANG Lai-jun¹, WEN Ming-hao², LI Feng¹, SUN Ming¹, YAN Yang², WANG Yi²

(1. Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China;

2. Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The digital substation centralized protection device processes real-time information of the whole substation intensively, which improves the performance of protection. However, real-time information collected by centralized protection device may be lost due to some causes such as failure in communication network or mis-working of electronic transducer. The information deficiency makes centralized protection unable to remove faults rapidly and selectively, resulting in reduction of protection system reliability. This paper presents a new method for digital substation centralized protection to cope with boundary information deficiency. After a fault occurs, if the current sampling value of a transmission line is lost, first it is assumed that no faults occur on bus, the current value of the information missing line based on Kirchhoff's current law is figured out, then the fault is removed using general three-section line protection criterion. If this fault is detected in zone one protection of the information missing line, after making the breaker on this line trip without delay, it can be detected whether faults occur on bus using general bus differential protection criterion, in order to decide whether to trip all breakers connecting to the bus trip. Digital simulation proves the effectiveness of this method.

Key words: digital substation; centralized protection; information deficiency

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0084-06

0 引言

随着网络通信技术的发展和电子式互感器的应用, 基于 IEC61850 标准的数字化变电站在我国逐步发展起来。常规变电站的监控、控制、保护、故障录波、测量与计量等装置几乎都是功能单一、相互独立的系统, 这些系统存在硬件配置重复、信息不共享及投资成本大的缺点, 数字化变电站实现二次系统装置信息集成及功能优化处理, 避免上述问

题的发生^[1]。

数字化变电站中系统信息实现共享为信息集中处理带来便利, 国内学者对信息集中处理的保护结构及可行性进行了研究^[2-5]。文献[2]提出了一种遵循 IEC61850 标准的间隔层新型集中式 IED 方案, 在 1 台新型集中式 IED 上实现多台 IED 所完成的功能。文献[3]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, 主要阐明信息集中处理后保护的结构问题。文献[4]提出了

集中式保护原理,同时介绍了集中式保护的硬件系统构成、对象建模以及保护功能的实现。文献[5]从软硬件两方面说明集中式保护是对数字化变电站内诸多分散保护测控功能模块的有机集成,从而优化并简化了系统的数据流。集中式保护具有低成本、易维护、高性能、高可靠性等特点,能适应未来电力系统自动化的发展和市场需求。

集中式保护装置采集全站实时信息,能够迅速、有选择性地切除故障,然而数字化变电站或者邻近区域发生故障时,变电站网络通信流量大,同时由于电磁干扰和电子式电流互感器(ECT)故障等原因,可能导致集中式保护装置采集的实时信息缺失^[6-10]。文献[6]指出数字化变电站网络中采样数据传输占用大量带宽、100 Mbit/s以太网接入的数据源有限,目前数据采集网主要采用点对点通信方式。文献[7]通过理论计算指出数字化变电站中母线保护需要通过光纤以太网从间隔层交换机或者直接从间隔层MU接收所有间隔数据,大量数据的传输与处理给网络传输速率带来很大挑战。文献[8-10]指出电子式互感器与传统的电磁式互感器在实现原理上有很大的不同,电子式互感器采用很多新的电子元件,由于材料器件方面的缺陷导致电子式互感器的可靠性较低。

在数字化变电站集中式保护无法正常获得部分信息的情况下如果发生故障,保护装置往往只能依靠后备保护动作。信息集中处理后,数字化变电站利用信息集中处理的优势,来实现保护的优化^[11-12],文献[11]利用数字变电站信息共享的优势,介绍一种数字互感器失效后的软后备备用。文献[12]介绍了广域差动保护系统信息缺失时的处理方法,及故障发生时的跳闸策略。以上文献[11-12]讨论的是在出现部分信息缺失情况下的处理策略,主要适用于保护区内部信息缺失情况。为了提高数字化变电站集中式保护的可靠性,改善边界信息缺失情况下集中式保护的性能,提出了一种数字化变电站集中式保护应对边界信息缺失新方法。

1 集中式保护处理方法

1.1 集中式保护原理

集中式保护是指在数字化变电站中,通过非传统互感器、合并单元(Merging Unit, MU)、以太网和集中式保护装置,实现整个变电站保护和控制的系统^[3]。

集中式保护由三部分组成:

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) 集中式保护装置:位于数字化变电站三层结构中的间隔层是集中式保护的核心,从以太网上接收变电站所有元件的信息,利用常规保护原理和逻辑判断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。

数字化变电站集中式保护的主要特征有^[3]:

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。集中式保护装置突破了间隔的限制,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。

集中式保护集成了全站各个设备的信息,必能将大大提高保护动作的选择性、灵敏性和可靠性。由于故障发生时网络通信量大、互感器故障等原因可能造成集中式保护装置获取的实时信息缺失,此时集中式保护只能依靠后备保护切除某些故障,为此必须采用信息缺失处理方法来提高集中式保护的可靠性。

1.2 信息缺失处理方法

变电站中输电线路和馈线位于变电站的边界,它们的电流采样值为边界信息,其余元件的电流采样值则为内部信息。当数字化变电站信息缺失时,集中式保护装置有两种处理方法。

1) 利用基尔霍夫电流定律,使用相邻互感器电流合成信息缺失互感器电流^[11]。

根据图1(a)所示系统结构利用基尔霍夫电流定律可得:

$$i_1+i_2+i_3=0 \quad (1)$$

式中: i_1 为支路 L_1 的电流; i_2 为支路 L_2 的电流; i_3 为支路 L_3 的电流。

任一回路的电流量可通过其他回路的电流量计算而得。这意味着当某一回路的ECT失效时,可用其他回路的电流来间接获取失效回路的电流。假设电流 i_1 缺失,利用公式(1)通过正常获取的电流 i_2 和 i_3 合成,其合成电流为 $-(i_2+i_3)$ 。

2) 与信息缺失互感器相邻的一次设备差动主保护区融合形成大差差动保护区,利用大差差动检测故障是否发生在该区域^[13]。

根据图 1 (b) 所示系统结构, 假设电流 i_1 缺失, 差动保护区 1、2 无法检测故障, 此时差动保护 1、2 区域融合形成大差差动保护区 3。

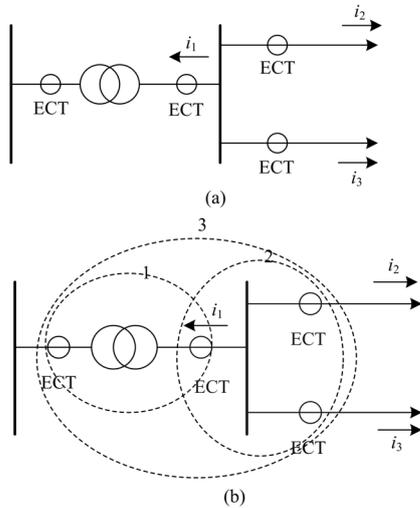


图 1 系统网络结构

Fig. 1 System structure drawing

以上两种方法在内部信息缺失时, 能够为一次设备提供无延时的主保护。当故障发生时, 在边界信息缺失情况下, 如图 1 (a) 所示假设缺失电流为 i_2 , 只有确认母线无故障后才能利用基尔霍夫电流定律合成电流 i_2 , 显然此时无法确定母线是否发生故障, 方法 1 失效。同时由于缺失信息线路位于变电站边界, 无法利用大差差动进行故障检测, 方法 2 失效。针对以上两种处理方法存在不足, 提出了一种数字化变电站集中式保护应对边界信息缺失新方法。

2 边界信息缺失处理新方法

数字化变电站中母线最典型的结构包括单母线和单母线分段、双母线和双母线分段、带旁路母线的单母线和双母线接线。数字化变电站中变压器各侧与母线相连, 每条母线上有多回线路, 无论数字化变电站中主接线如何, 边界线路是馈线还是输电线路, 数字化变电站边界区域都可以抽象为如图 2 的主接线方式, 变压器一侧与母线相连, 连线上装设断路器和电流互感器, 母线上有 n 回线路, 每条线路上装设断路器和电流互感器, 通过母联与另一母线相连, 母联上装设有断路器和电流互感器, 母线上装设有电压互感器。

下面以图 2 所示边界为例提出边界信息缺失处理新方法 (以下简称新方法), 其步骤如下:

1) 通过电压电流突变量检测变电站内部或者

相邻区域是否发生故障, 如果发生故障转 2), 否则继续执行本步骤。

2) 线路 j 电流信息缺失, 转入步骤 3), 否则转入转步骤 7)。

3) 假设母线没有发生故障, 利用基尔霍夫电流定律合成信息缺失线路 j 电流采样值, 称为线路 j 的合成电流。

4) 采用常规线路保护算法检测并记录线路 j 是否发生故障及故障位置。如果线路 j 上没有检测出故障发生转步骤 7)。如果检测到线路 j 常规保护第一段范围内故障, 集中式保护发出无延时跳闸命令转步骤 5), 如果故障不在线路 j 常规保护第一段范围内转入步骤 6)。

5) 确认线路 j 断路器已经断开后采用常规母线差动算法检测母线是否发生故障。如果母线发生故障, 则集中式保护向除线路 j 外与母线相连的断路器发出无延时跳闸命令并跳转到步骤 7)。

6) 如果故障发生在线路 j 常规线路保护第二段或者第三段范围内, 则集中式保护按常规保护第二段或者第三段延时发出跳闸命令。

7) 边界信息缺失处理方法完成, 执行常规集中式保护。

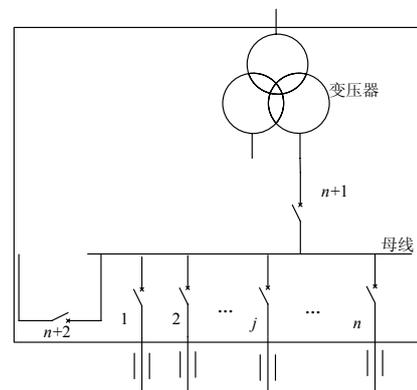


图 2 变电站抽象边界拓扑图

Fig.2 Topology of substation

3 典型故障情况分析

数字化变电站边界及其邻近区域发生故障, 其故障位置主要有以下几类典型情况, 如图 3 所示:

①故障发生在信息缺失线路; ②故障发生在母线上; ③故障发生在信息获取正常线路; ④故障发生在变压器上。

如图 3 所示数字化变电站, 信息缺失线路 j 的合成电流公式为:

$$i_j = - \sum_{k=1, k \neq j}^{n+2} i_k \quad (2)$$

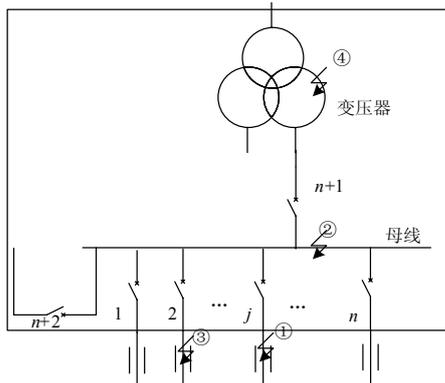


图3 变电站典型故障类型
Fig.3 Typical faults of substation

母线发生故障和信息缺失线路保护出口发生故障，虽然从信息缺失线路来看属于不同电气节点，但是从其他正常线路来看属于同一电气节点发生故障，所以同类型故障发生在母线和信息缺失线路保护出口时，信息缺失线路实际测量电流虽然不一样，但是按照式(2)计算的合成电流大小一样。因此采用新方法处理边界区域发生的故障时，如果信息缺失线路常规保护I段范围内未检测出发生故障，则可断定母线上未发生故障，否则不能断定母线是否发生故障，需要信息缺失线路断路器已经断开后再利用母线差动进行检测，判断母线是否发生故障。下面对四种典型故障逐一进行分析。

3.1 信息缺失线路 j 发生故障

线路 j 发生故障时，首先由式(2)合成线路 j 电流，该电流为线路 j 实际测量电流，新方法执行步骤4)时检测出边界线路 j 发生故障，如果故障发生在线路 j 常规保护I段范围内，此时集中式保护装置向线路 j 断路器发出无延时跳闸命令，然后执行新方法步骤5)确认线路 j 断路器已经跳开后，利用常规母线差动检测并确认母线无故障发生；如果故障发生在线路 j 常规保护II、III段范围内，则集中式保护装置按照常规保护II、III段延时发出跳闸命令。至此新方法处理流程结束。

传统保护在信息缺失线路 j 发生故障时，无法利用常规线路保护检测故障，只能依靠变压器后备保护动作切除变压器两侧断路器，不仅延时长至少为0.5s，而且扩大了停电范围切除与母线相连的所有线路；新方法能够迅速、有选择性地切除线路 j ，保证其他正常线路的供电。

3.2 母线发生故障

母线发生故障时，首先由式(2)合成线路 j 电流，该电流与线路 j 保护出口发生故障时测量电流一致，新方法执行步骤4)时检测出边界线路 j

常规保护I段范围内发生故障，集中式保护装置向线路 j 断路器发出无延时跳闸命令，然后执行新方法步骤5)确认线路 j 断路器已经断开后采用常规母线差动保护算法检测母线是否发生故障，确认母线发生故障后集中式保护向除线路 j 外与母线相连的断路器发出无延时跳闸命令。至此新方法处理流程结束。

传统保护在边界线路电流信息缺失时，无法利用母线差动判据检测故障，只能依靠变压器后备保护动作。根据变压器整定规程规定变压器后备保护延时至少为0.5s以上，新方法切除母线故障由于不存在整定上的配合，仅需要增加一个线路 j 切出故障时间，其延时远远小于0.5s。

3.3 信息获取正常线路发生故障

信息获取正常线路发生故障时，首先由式(2)合成线路 j 电流，该电流为线路 j 正常测量电流，新方法步骤4)检测边界线路 j 没有发生故障转步骤7)。至此新方法处理流程结束。

新方法处理的同时信息获取正常线路常规线路保护动作并切除故障，新方法能够正确做出判断。

3.4 变压器发生故障

变压器发生故障时，首先由式(2)合成线路 j 电流，该电流为线路 j 正常测量电流，新方法步骤4)检测边界线路 j 没有发生故障转步骤7)。至此新方法处理流程结束。

新方法处理的同时变压器差动保护动作并切除故障。新方法能够在变压器发生故障时正确做出判断，边界区域断路器不会误动。

通过以上四类典型故障的分析：变压器和信息获取正常线路发生的故障时，新方法能够正确处理不会产生误动；母线和信息缺失线路发生故障时，新方法动作速度明显优于传统保护。

新方法采取纵序跳闸策略：当母线发生故障时，首先跳开信息缺失线路断路器，然后再跳开与母线相连的所有断路器。此方法是提高供电可靠性的重要步骤，因为母线发生故障时保护动作必将切除与母线相连的所有断路器，先跳开信息缺失线路断路器并未扩大停电范围，此方法虽然增加了保护动作延时，但此延时仅仅为信息缺失线路保护I段出口动作切出故障的时间，大约为60ms，远小于0.5s的后备保护动作延时。假如故障发生在信息缺失线路常规保护I段范围内，边界信息缺失处理方法首先跳开信息缺失线路断路器切除故障，然后利用母线差动判据检测并确认母线未发生故障，这样既可以保证信息缺失线路发生故障时其他正常线路的供电不被中断，又可以保证母线发生故障时，故障能

够及时切除。

通过以上分析可知变电站及邻近区域发生各种故障，新方法都能够正确动作，特别是处理信息缺失线路和母线发生故障时，其性能远远优于传统保护。

4 仿真分析

利用 PSCAD 建立某 110 kV 数字化变电站的仿真系统模型，模型中用以模拟故障的边界如图 4 虚线框内所示，有 10 条馈线连接于 10 kV 母线上，线路 1 为信息缺失线路，母线和其他线路的信息都能正常获取。分别在该母线上、线路 1 全长的 50%处、线路 2 全长的 50%处、变压器低压侧设置 A 相单相接地短路、BC 相间短路、BC 相间接地短路、ABC 三相短路这四种类型的故障，并在线路 1 的出口处设置 ABC 三相短路故障。采用本文提出的集中式保护应对边界信息缺失处理新方法，线路保护采用 90°接线方向和常规距离保护算法中的圆形判据，母线采用差动保护，断路器延时设置为 40 ms。线路保护计算采用全周傅氏算法，母线差动计算采用半周傅氏算法，每周波 48 点采样。判断结果如表 1 所示，以故障发生的时刻为起始 0 时刻。

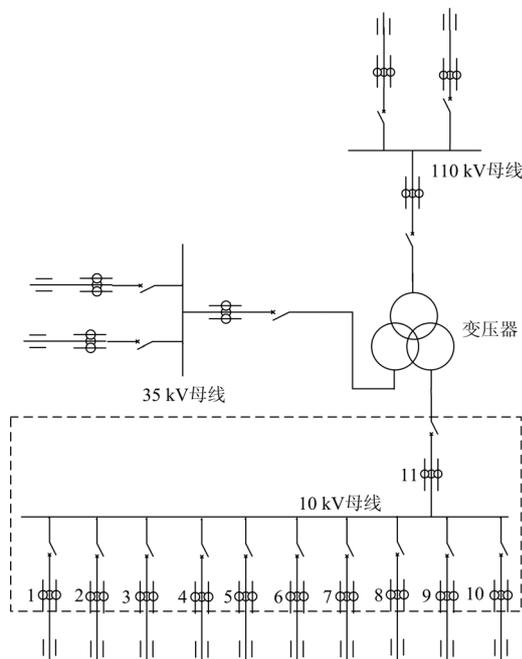


图 4 110 kV 变电站

Fig.4 110 kV substation

仿真表明，变电站边界区域母线发生故障时，集中式保护装置延时 20 ms 向信息缺失线路断路器 1 发出跳闸命令，延时 70 ms 向其余所有与母线相

表 1 故障发生后保护出口时间

Tab.1 Operation time of circuit breaker after occurrence of fault

故障类型	断路器编号及保护出口时间 /ms		
	1	2	3~11
10 kV 母线 A 相接地故障	20	70	70
10 kV 母线 BC 相间故障	20	70	70
10 kV 母线 BC 相间接地故障	20	70	70
10 kV 母线 ABC 三相故障	20	70	70
线路 1 全长 50%处 A 相接地故障	20	×	×
线路 1 全长 50%处 BC 相间故障	25.42	×	×
线路 1 全长 50%处 ABC 三相故障	25.42	×	×
线路 1 保护出口处 ABC 三相故障	21.67	×	×
线路 2 全长 50%处 A 相接地故障	×	20	×
线路 2 全长 50%处 BC 相间故障	×	25.42	×
线路 2 全长 50%处 ABC 三相故障	×	25.42	×

注：×表示保护不动作。

连的断路器发出跳闸命令；信息缺失线路 1 发生故障时，集中式保护装置最大延时 25.42 ms 向信息缺失线路断路器 1 发出跳闸命令；信息获取正常线路 2 发生故障时，集中式保护装置最大延时 25.42 ms 向线路断路器 2 发出跳闸命令；同时通过仿真验证了边界区域外发生故障时，新方法能够保证边界区内断路器可靠不动作。所以在变电站边界区域发生各种故障新方法都能够正确处理，特别是母线和信息缺失线路发生故障时保护动作延时远小于传统后备保护。

5 结论

数字化变电站发生故障时，由于网络通信量大、电子互感器发生故障等原因可能导致集中式保护装置采集的实时电流信息缺失，此时集中式保护的可靠性降低。为了提高集中式保护的可靠性，提出了基于数字化变电站集中式保护的边界信息缺失处理新方法。该方法在假设母线没有发生故障前提下利用基尔霍夫电流定律，采用正常获取电流合成信息缺失线路电流，采用常规线路保护判据切除故障。如果在信息缺失线路保护第一段检测到故障发生，则在无延时跳开该线路断路器之后，利用常规母线差动保护判据检测母线是否发生故障，以决定是否跳开与母线相连的所有断路器。仿真表明，新方法处理信息缺失线路发生故障时，集中式保护装置最大延时 25.42 ms 向信息缺失线路断路器发出跳闸命令；处理母线发生故障时，集中式保护装置最大延时 70 ms 向所有与母线相连的断路器发出跳闸命令；而对于这两类故障传统后备保护延时至少 0.5 s

以上。新方法不仅能够迅速、有选择性地切除故障,而且可以保证信息缺失线路发生故障时其他正常线路的供电可靠性。

参考文献

- [1] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30 (23): 67-71.
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30 (23): 67-71.
- [2] 易永辉, 曹一家, 张金江, 等. 基于 IEC 61850 标准的新型集中式 IED[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 36-40.
YI Yong-hui, CAO Yi-jia, ZHANG Jin-jiang, et al. A new centralized intelligent electrical device based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (12): 36-40.
- [3] 董新洲, 丁磊. 数字化集成保护与控制系统结构设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (1): 1-5.
DONG Xin-zhou, DING Lei. Research on design of digital integrated protection and control system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (1): 1-5.
- [4] 吴国旻, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (10): 15-18.
WU Guo-yang, WANG Qing-ping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (10): 15-18.
- [5] 黎强, 李延新. 基于数字化变电站的系统保护装置设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (18): 77-81.
LI Qiang, LI Yan-xin. Design of system protecting devices based on digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (18): 77-81.
- [6] 孙一民, 李延新, 黎强. 分阶段实现数字化变电站系统的工程方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (5): 90-93.
SUN Yi-min, LI Yan-xin, LI Qiang. A grading solution for building digital station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (5): 90-93.
- [7] 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): 90-93.
WANG Pan-feng, ZHANG Ke-yuan, WEN Ming-hao, et al. Research on distributed busbar protection applied to digital transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (13): 90-93.
- [8] 丁书文, 史志鸿. 数字化变电站的几个关键技术问题[J]. 继电器, 2008, 36 (10): 53-56.
DING Shu-wen, SHI Zhi-hong. Discussing some key technical problems for digital substation[J]. Relay, 2008, 36 (10): 53-56.
- [9] 刘清瑞, 刘日堂, 尚学军. 110 kV 数字化变电站的关键技术[J]. 继电器, 2007, 35 (增刊): 240-245.
LIU Qing-rui, LIU Ri-tang, SHANG Xue-jun. The key technologies applied in 110 kV digital substation[J]. Relay, 2007, 35 (S): 240-245.
- [10] 王红星, 张国庆, 郭志忠, 等. 电子式互感器及其在数字化变电站中应用[J]. 电力系统自动化设备, 2009, 29 (9): 115-120.
WANG Hong-xing, ZHANG Guo-qing, GUO Zhi-zhong, et al. Electronic transformer and its application in digital substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (9): 115-120.
- [11] 于军, 熊小伏, 张媛. 数字化变电站保护系统可靠性新措施及仿真[J]. 电网技术, 2009, 33 (4): 30-33.
YU Jun, XIONG Xiao-fu, ZHANG Yuan. Research and simulation on new reliability measures for digital substation protection system[J]. Power System Technology, 2009, 33 (4): 30-33.
- [12] Kangvansaichol K, Crossley P A. Multi-zone differential protection for transmission networks. Developments in Power System Protection[C]. //Eighth IEE International Conference, 2004, 2 (5): 428-431.
- [13] Tang J, G M P. A wide area differential backup protection scheme for shipboard application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (3): 1183-1190.

收稿日期: 2010-03-24

作者简介:

马云龙 (1972-), 男, 工程师, 主要从事继电保护运行与管理工作;

王来军 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护运行与管理工作;

文明浩 (1973-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: swenmh@263.net