

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180817

基于关联变电站信息的断路器失灵保护技术研究

李宝伟^{1,2}, 倪传坤², 文明浩¹, 李勇³, 李文正²

(1. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 3. 国网华中分部, 湖北 武汉 430077)

摘要: 阐述了目前断路器失灵保护的基本原理, 分析了影响失灵保护动作延时的主要因素。提出了一种基于关联变电站信息的断路器失灵保护及死区保护技术方案。该方案利用与失灵断路器相邻的非故障区域断路器 CT 构成电流差动保护判据, 满足动作条件后跳开与失灵断路器相邻的断路器, 实现故障的清除。该方案不受 CT 拖尾和饱和的影响, 大幅缩短了失灵保护动作时间, 并且可实现免整定。工程实施采用主子机方式的可扩展架构设计, 工程配置灵活。同时保护采样同步不依赖外部对时信号, 可靠性高, 易于实现, 有广泛推广的现实意义。

关键词: 失灵保护; 死区保护; 电流差动保护; 站域保护; 采样同步

Research on breaker failure protection based on associated substation information

LI Baowei^{1,2}, NI Chuankun², WEN Minghao¹, LI Yong³, LI Wenzheng²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 3. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China)

Abstract: This paper first describes the basic principle of breaker failure protection, and analyzes the main factors affecting the delay of breaker failure protection. A technical scheme of breaker failure protection and dead-zone protection based on associated substation information is proposed. This scheme forms a current differential protection criterion by utilizing the non-faulty area circuit breaker CT which is adjacent to failure breaker. After the criteria of incomplete current differential protection are satisfied, the related circuit breaker is tripped to isolate the fault. This scheme is not affected by CT tailing and saturation, which greatly shortens the delay of failure protection and realizes the free protective setting. The implementation of the project adopts an expandable architecture designed with master slave mode, which is flexible in engineering configuration. Meanwhile, the protection sampling synchronization does not rely on external timing signals. This scheme has high reliability and is easy to carry out, so it has the practical significance of widespread promotion.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477061), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on Failure Protection and Adaptive Reclosing Technology based on Whole Domain Information”, and Henan Province Distinguished Youth Scholars Foundation of China (No. 184100510023).

Key words: breaker failure protection; dead-zone protection; current differential protection; substation-area protection; synchronous sampling

0 引言

断路器失灵保护作为一种近后备保护, 其主要

作用是在故障后跳开与失灵断路器相邻的断路器实现故障的隔离^[1]。对于在断路器单侧布置 CT 的情况, 当发生死区故障时, 同样需要依靠失灵保护清除故障。近年来, 全国发生过多起 500 kV 断路器死区故障, 2014 年 5 月 1 日, 某 500 kV 变电站发生 CT 闪络导致的死区故障, 断路器失灵保护动作切除故障时间为 391 ms。2014 年 5 月 13 日, 某 500 kV 变电站在 4 min 内发生 5 次 CT 闪络故障, 导致 1

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477061); 国家电网公司科技项目资助“基于全域信息的失灵保护和自适应重合闸技术研究”; 河南省科技研发专项经费项目资助(184100510023)

条 500 kV 母线、1 台主变及 3 条线路跳闸。

中国电网已形成特高压交直流混联格局，由于直流换相失败的影响，交流系统故障若不能及时清除，将可能引发交直流系统连锁性严重故障。系统对故障极限切除时间的要求越来越高，对断路器失灵及死区保护的動作速度也提出了更高的要求^[2-7]。

本文在分析断路器失灵保护動作時延的基础上，结合站域保护的綜合信息採集^[8-15]，提出了一种基于電流差動原理的站域失灵保护方法，并给出了详细的技術和工程实施方案。

1 現有失灵保护動作時延分析

500 kV 断路器失灵保护動作逻辑包括启动元件、電流元件、延時元件及出口元件^[16-19]。启动元件为保护跳閘命令，包括分相跳閘命令和三相跳閘命令，其中分相跳閘命令来自于线路保护、三相跳閘命令来自于母线保护、主变保护等。

電流元件包括可整定的相電流元件，零、負序電流元件，对于三相跳閘開入设置低功率因数元件。在任一相分相跳閘命令開入后，经電流突变量或零負序電流元件判别后启动失灵計時。在三相跳閘命令開入后，经相電流元件判别后启动失灵計時。

延時元件和出口元件一一对应，经短延時 T1 重跳本断路器，经长延時 T2 跳开相邻断路器。

由于失灵保护的誤動作会造成事故范围扩大，目前失灵保护判据和延時一般考虑防止誤動作。電流元件的主要作用为防止誤開入造成保护誤動，而延時元件主要躲过断路器跳开时间和電流元件的返回时间。

根据整定規程要求^[20]，一个半断路器接线方式下，可经较短時限(约 0.13~0.15 s)動作跳开本断路器三相，经较长時限(约 0.2~0.25 s)動作跳开与失灵断路器相关联的所有断路器。失灵保护動作時序如图 1 所示，由分析可知，从故障發生到故障完全清除耗時近 400 ms。

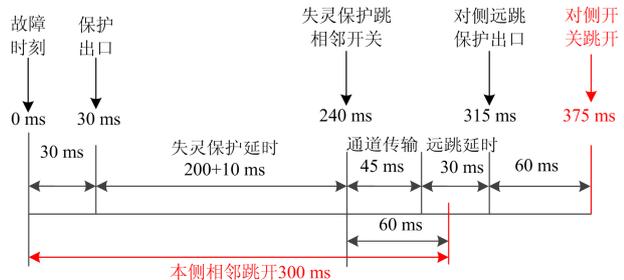


图 1 失灵保护動作時序

Fig. 1 Sequence of breaker failure protection action

因此，根据失灵保护的整定計算和现场实际故障表明，当直流近区發生交流系統 CT 死区故障或故障情況下断路器失灵，故障切除时间将由 100 ms 延長至 400 ms，进而造成直流系統持续換相失敗或功率跌落，对送、受端電网都造成严重功率冲击，甚至造成穩定破坏。

2 基本原理

当系統發生死区故障或故障后断路器失灵时，利用与失灵断路器相邻的非故障区域断路器 CT 构成不完全電流差動保护，滿足動作条件后跳开故障断路器相邻的断路器，从而实现故障的快速清除。

如图 2 所示，当發生甲站 5011 断路器死区 F1 故障或 I 母發生 F2 故障 5011 断路器失灵时，利用甲站 5012、乙站 5031 和乙站 5032 断路器 CT 构成输电线路不完全電流差動保护 1，滿足差動判据时跳甲站 5012、乙站 5031 和乙站 5032 断路器；当 L1 线發生 F3 故障 5011 开关失灵时，利用甲站 5021、5031 断路器 CT 构成母线不完全電流差動保护 2，滿足差動判据时跳甲站 5021 和 5031 断路器。

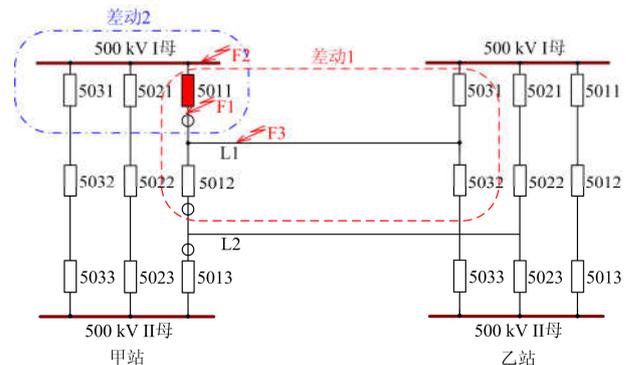


图 2 站域失灵保护方法示意图

Fig. 2 Scheme of substation-area breaker failure protection

3 站域失灵保护技术方案

按一次设备设置電流差動保护，利用保护跳閘信号開入和故障前差流构成启动元件，利用启动元件和保护跳閘信号開入构成封 CT 元件，在设置时间内持续滿足差動判据后動作跳开相应的断路器。

3.1 差動元件

按照传统的保护范围设置母线差動元件、线路差動元件和主变差動元件。以图 3 中甲站为例进行说明，母线差動元件按照母线进行设置，线路和主变差動元件的数量根据变电站实际线路和主变間隔的数量而定，线路電抗器不单独设置差動元件，归属于线路差動范围。考虑到高阻接地故障，差動元

件包括相差判据和零差判据, 母线、线路和主变差动元件采用统一的差动方程。

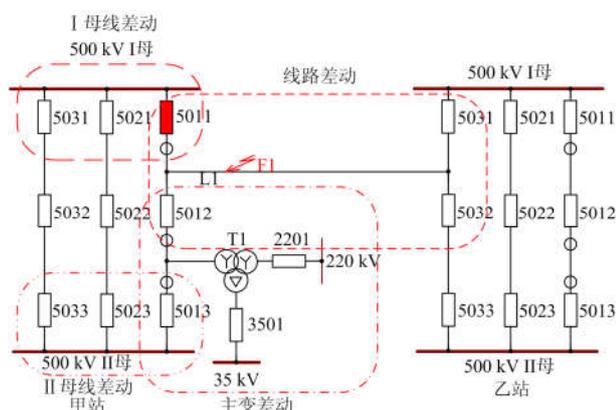


图 3 差动元件配置示意图

Fig. 3 Configurations of current differential elements

相差判据为

$$\begin{cases} I_d > I_{set} + I_{bph} \\ I_d > kI_{res} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 差动电流 I_d 取各开关电流的相量和; I_{bph} 为不平衡电流, 取启动前 2 周的差流计算值, 主要用于消除线路电容电流带来的影响; 制动电流 I_{res} 取各开关电流的绝对值之和; 差动门槛 I_{set} 可取固定值, 如一次电流 800 A; k 为相差制动系数, 可取 0.5。

零差判据为

$$\begin{cases} I_{d0} > I_{set0} \\ I_{d0} > k_0 I_{res0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: 差动电流 I_{d0} 取各开关零序电流的相量和; 制动电流 I_{res0} 取各开关零序电流的绝对值之和; 差动门槛 I_{set0} 可取固定值, 如一次电流 800 A; k_0 为零序制动系数, 可取 0.5。

3.2 启动元件

按照差动元件分别设置独立的启动元件, 当差动元件范围内的任一断路器有跳闸信号且无差流时启动。如图 3 所示, 当 L1 线路上发生 F1 点故障时, 线路保护动作跳甲站 5011 和 5012 断路器, 与其相关的差动元件有线路差动元件、主变差动元件和 I 母差动元件, 而故障发生在 L1 线上, 所以线路差动元件不启动, I 母差动元件和主变差动元件启动。

3.3 封 CT 元件

当某一差动元件启动后, 将对应跳闸信号的断路器 CT 电流置为 0, 不计入差动方程。如图 3 所示, 当发生 F1 点故障时, I 母差动元件和主变差动元件启动, 因甲站 5011 和 5012 断路器有跳闸信

号, I 母差动元件计算时将 5011 断路器电流置为 0, 使用 5012 和 5031 断路器电流构成差动方程, 主变差动元件计算时将 5012 断路器电流置为 0, 使用 5013、2201、3501 断路器电流构成差动方程。

3.4 失灵保护逻辑

当差动元件启动后, 差动判据在设置时间内持续动作, 失灵保护动作出口跳开相关断路器。当发生图 3 中 F1 点故障后 I 母差动元件和主变差动元件启动且差动判据满足动作条件, 当 5012 开关跳开后主变差动元件返回, 5011 开关失灵时 I 母差动元件一直满足动作条件, 失灵跳 I 母动作出口。失灵保护逻辑如图 4 所示。

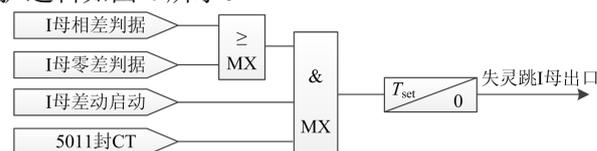


图 4 站域失灵保护动作逻辑示意图

Fig. 4 Logic of substation-area breaker failure protection

图 4 中, T_{set} 主要考虑躲过断路器的开断时间(开关固有分闸时间+息弧时间)和差动元件的返回时间。按照要求, 高压断路器开断时间不超过 60 ms, 由于本方案中差动元件不计入跳闸断路器的电流, 所以不受 CT 拖尾的影响, 考虑差动元件的返回时间并保留一定的裕度, T_{set} 可取 90 ms。当一侧失灵保护动作后通过纵联通道发远跳对侧信号, 对侧经就地判别元件把关后跳开相关断路器。

站域失灵保护动作时序如图 5 所示, 光纤通道采用专用通道, 其通道传输时延不大于 5 ms, 断路器开断时间按 60 ms 考虑, 装置继电器出口时间为 5 ms。采用本方案的站域失灵保护时, 本站断路器跳开时间为 190 ms, 对侧断路器跳开时间 195 ms, 故障总持续时间不超过 200 ms。

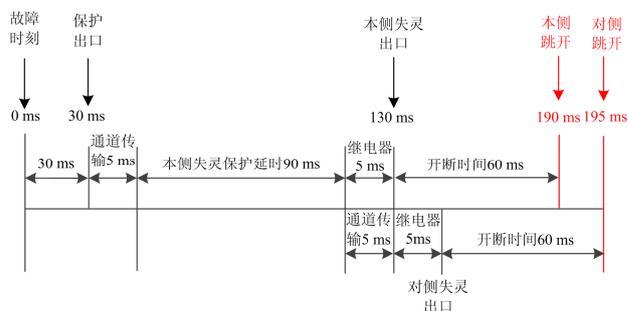


图 5 站域失灵保护动作时序

Fig. 5 Sequence of substation-area breaker failure protection action

本方案基于电流差动原理，利用故障相邻区域的开关 CT 构成差动方程，当使用线路差动元件时会受到电容电流影响。但相对于线路差动保护而言，站域失灵保护延时动作受暂态电容电流影响较小，主要受稳态电容电流影响，由于相差判据中已考虑输电线路分布电容引起的不平衡电流，所以电容电流不会造成失灵保护误动作，仅灵敏度有所降低。另外，本方案基于本站及关联变电站信息，数据采集是制约本方案工程应用的关键因素，具体工程实施方案在本文第 4 部分进行阐述。

由于本方案的差动元件不计入跳闸的断路器

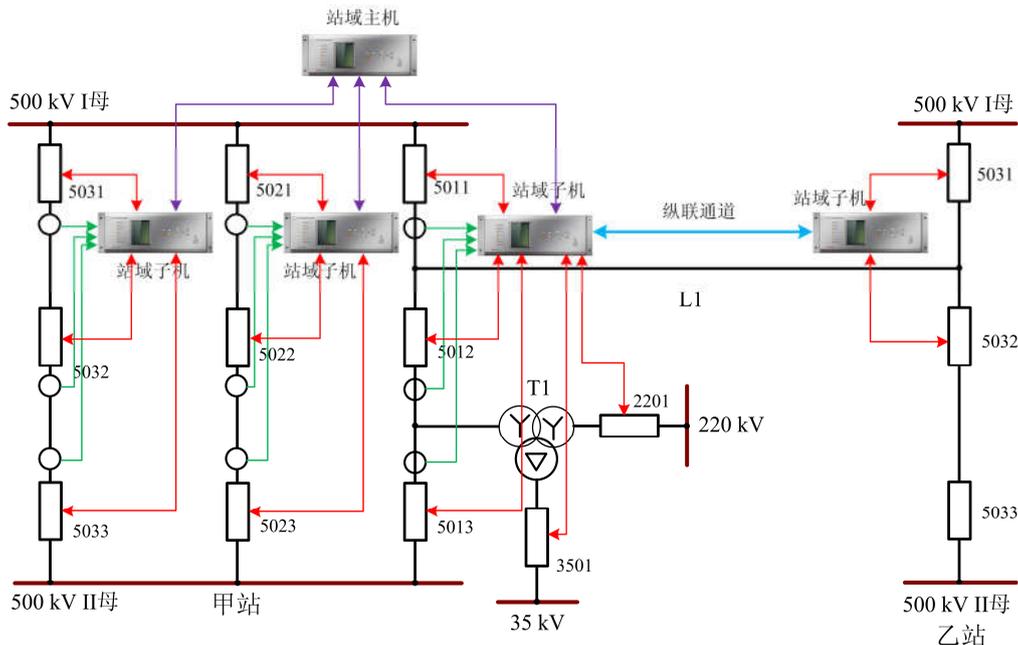


图 6 变电站工程配置示意图

Fig. 6 Engineering configuration in substation

按照典型设计，变电站规模一般不超过 7 串，所以站域失灵保护按 7 串设计，由于采用主子机的可扩展模式，可根据实际工程规模灵活配置子机数量。主机完成保护功能，子机作为数据采集和跳闸执行单元，同时子机和线路对端子机通过纵联通道进行通信，采集线路对端的模拟量，为了提高动作速度，纵联通道采用专用光纤直连通道。主子机间采用点对点 SV 直采方式传输模拟量，开关量传输采用 GOOSE 方式。

4.2 采样同步方案

站域保护系统采样同步包括子机中本站与线路对侧采样同步和本站主子机间采样同步两部分^[21]。子机需采集本站模拟量数据和线路对侧模拟量数据，两侧均独立采样，再基于同一时钟信号进行重采样完成两侧采样数据的同步。重采样之前首先要

准确计算出两侧的采样延时，本站的采样延时主要为采样 AD 回路低通滤波延时，该延时根据硬件回路参数可准确计算。采集线路对侧模拟量的环节包括对侧模拟量采样、数据打包发送、纵联通道传输及对侧报文接收等，时序如图 7 所示。

4 工程实施方案

4.1 工程配置方案

站域失灵保护采用主子机的分布式配置方案，全站配置一台主机，子机按串配置，如图 6 所示。

准确计算出两侧的采样延时，本站的采样延时主要为采样 AD 回路低通滤波延时，该延时根据硬件回路参数可准确计算。采集线路对侧模拟量的环节包括对侧模拟量采样、数据打包发送、纵联通道传输及对侧报文接收等，时序如图 7 所示。

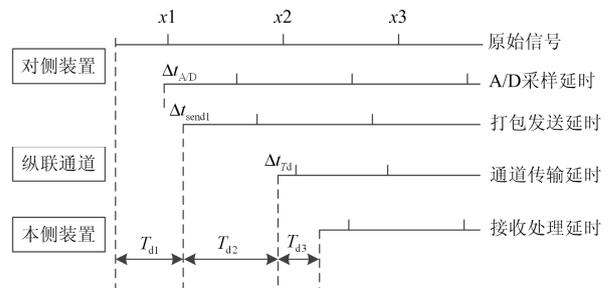


图 7 对侧采样时序

Fig. 7 Contralateral sampling sequence

两侧装置采用相同的模拟量采样回路, 对侧装置的 AD 采样延时和本侧装置相同。对侧在模拟量采样完成后立即启动纵联通道发送, 在同一中断任务中执行, 其打包发送延时为固定的程序执行时间, 根据 CPU 主频和功能代码长度可以进行准确计算。本侧装置采用 FPGA 准确记录纵联通道报文接收时刻, 其处理时延可以忽略, 采用乒乓算法可准确计算出纵联通道的传输延时。

根据本侧采样时刻、对侧采样值报文接收时刻以及两侧的采样延时时对两侧采样进行重采样同步, 重采样采用子机内部时钟信号, 重采样同步之后的两侧采样值报文和采样延时打包在同一帧 SV 报文, 采用点对点 SV 输出方式。

由于纵联通道可能存在一定的传输延时, 而且不同的工程传输延时也不尽相同, SV 报文的额定延时根据实际的纵联通道传输延时动态调整, 并在通道传输延时的基础上增加一定的裕度, 考虑到失灵保护采用专用光纤通道方式, 所以通道延时较短且固定。主子机间模拟量传输采用点对点直采方式, 子机自由采样, 主机对各子机的 SV 报文进行重采样, 完成各串采样的同步。

采用主子机模式的工程实施方案, 可根据变电站实际规模进行灵活配置, 提高方案的通用性。采用“乒乓算法”和重采样实现站间数据同步, 不依赖外部对时信号, 可确保失灵保护的可靠性。利用本方案研制的站域失灵保护装置正在河南进行挂网试运行, 截至目前运行情况良好。

5 结论

本文提出了一种基于关联变电站信息的站域失灵保护方案, 该方案基于电流差动原理, 且差动元件不计入跳闸断路器的电流, 相对于目前的失灵保护, 该方案从根本上避免了 CT 拖尾对断路器失灵保护的影响, 可大幅缩短故障清除时间。同时动作定值和延时定值都可以固定, 做到免整定。进一步提出了工程实施方案, 采用主子机方式的可扩展架构设计, 可根据实际工程规模灵活配置子机数量, 提高了方案的通用性; 另外给出了站域失灵保护系统的采样同步方案, 采用“乒乓算法”和重采样实现站间和站内数据同步, 不依赖外部对时信号, 可靠性高, 易于实现, 有着广泛推广的现实意义。

参考文献

[1] 余江, 周红阳, 陈朝晖, 等. 计及系统稳定需求的 500 kV 断路器失灵及死区保护优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 142-146.

- YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. Improvement of 500 kV breaker failure and dead-zone prevention based on requirement on stability of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 142-146.
- [2] 刘建勋, 陆榛, 付俊波, 等. 抵御直流连续换相失败的同步调相机配置研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 22-27.
- LIU Jianxun, LU Zhen, FU Junbo, et al. Research on synchronous condenser configuration for resisting continuous commutation failure in HVDC[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 22-27.
- [3] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.
- XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [4] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.
- CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82.
- [5] 刘颖, 戴栋, 汪娟娟, 等. 基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 1-8.
- LIU Ying, DAI Dong, WANG Juanjuan, et al. Transient and steady responses in HVDC system based on constant voltage control at inverter side[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 1-8.
- [6] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.
- LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [7] 王玲, 文俊, 司瑞华, 等. UHVDC 分极分层接入方式及其运行特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 730-738.
- WANG Ling, WEN Jun, SI Ruihua, et al. The connection mode and operation characteristics of UHVDC with hierarchical connection by pole[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 730-738.

- [8] 陈波, 王永庆. 电网安全控制与保护技术现状分析及发展趋势研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 67-71.
CHEN Bo, WANG Yongqing. Current situation analysis of power grid security control and protection technology and its development trend[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 67-71.
- [9] 张尧, 李玉平, 陈实. 分布式就地化变压器保护定值自整定的实现方案研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 72-76.
ZHANG Yao, LI Yuping, CHEN Shi. Research on distributed on-site transformer protection self-setting solution[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 72-76.
- [10] 张新昌, 张项安. 层次化保护控制系统及其网络通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 129-133.
ZHANG Xinchang, ZHANG Xiang'an. Research of hierarchical protection & control system and its communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 129-133.
- [11] 马燕峰, 张佳怡, 蒋云涛, 等. 计及广域信号多时滞影响的电力系统附加鲁棒阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 58-66.
MA Yanfeng, ZHANG Jiayi, JIANG Yuntao, et al. Additional robust damping control of wide-area power system with multiple time delays considered[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 58-66.
- [12] 姜涛, 贾豪杰, 李国庆, 等. 基于广域量测信息相关性的电力系统同调辨识[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 1-11.
JIANG Tao, JIA Hongjie, LI Guoqing, et al. Cross-correlation coefficient-based coherency identification in bulk power system using wide-area measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 1-11.
- [13] 李俊刚, 孟乐, 张爱民, 等. 基于相量集合的站域差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 93-97.
LI Jungang, MENG Le, ZHANG Aimin, et al. Research on substation differential protection based on phase set[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 93-97.
- [14] 于游, 邱金辉, 吴颖超, 等. 基于电流量的断路器失灵保护闭锁新原理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 114-118.
YU You, QIU Jinhui, WU Yingchao, et al. A novel blocking method of circuit breaker failure protection based on current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 114-118.
- [15] 李倍, 和敬涵, YIP T. 一种基于相位相关电流差动的站域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 1-5.
LI Bei, HE Jinghan, YIP T. A study of substation-area backup protection based on phase related current differential[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 1-5.
- [16] 丁文书. 断路器失灵保护若干问题分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 89-91.
DING Shuwen. Analysis on some problems of breaker failure protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 89-91.
- [17] 姜自强, 刘建勇. 南阳特高压断路器失灵保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 117-122.
JIANG Ziqiang, LIU Jianyong. Study on Nanyang substation of UHV circuit breaker failure protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 117-122.
- [18] 余越, 郭雅蓉, 李岩军, 等. 基于 CT 拖尾电流截断算法的失灵保护延时优化研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 285-290.
YU Yue, GUO Yarong, LI Yanjun, et al. Research on delay optimization of breaker failure protection based on the CT current tail truncation algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 285-290.
- [19] 万洛飞, 李志坚, 宋斌, 等. 一种基于拖尾电流识别的失灵保护实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 89-94.
WAN Luofei, LI Zhijian, SONG Bin, et al. Implement method of breaker failure protection based on subsidence current blocking[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 89-94.
- [20] 国家电网继电保护整定计算技术规范: Q/GDW422—2010[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2018-09-12

作者简介:

李宝伟(1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: 65284590@qq.com

倪传坤(1979—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制;

文明浩(1973—), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。

(编辑 周金梅)