

DOI: 10.7667/PSPC201711

配电网故障处理若干问题探讨

刘健, 张志华, 张小庆

(陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了提高配电网的故障处理性能, 对配电网故障处理过程进行了归纳。对配电网继电保护配置、就地型馈线自动化改进以及单相接地故障处理等问题进行深入研究, 指出配电网继电保护不必追求完美配合, 只要效果明显就值得配置。论述了一种基于合闸速断方式的就地智能馈线自动化的改进方法, 实例表明其不仅可以显著加快相间短路故障处理速度而且可以做到免整定。论述了智能接地配电系统的组成和工作原理, 讨论了暂态过程抑制、选相容错纠错和单相接地选线定位与隔离等关键技术的实现方法。

关键词: 配电网; 配电自动化; 相间短路故障; 单相接地; 继电保护

Investigation on fault processing for electric power distribution networks

LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing

(Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: To improve the performance of fault processing in distribution networks, the tasks of fault processing are summarized. Some problems, such as relay protection for distribution systems, improvement of local intelligence feeder automation and single phase grounding fault processing, are deeply investigated. It is pointed out that there is no need for perfection of relay protection for distribution systems and that a relay protection may be installed as long as it being effective. An improved local intelligence feeder automation based on over-current protection during closing period is put forward, the instance of which, showing that not only is the fault processing time reduced remarkably, but also the setting may be fixed. The structure and principle of a smart grounding distribution system is described. The realization of some key technologies, such as electromagnetic transient suppression, modification for phase-selection mistake, location and isolation of single phase grounding faults, are discussed in detail.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5226SX1600U9).

Key words: distribution networks; distribution automation; inter-phase short circuit; single phase grounding; relay protection

0 引言

配电网故障处理包括相间短路故障处理和单相接地故障处理两个方面。

在相间短路故障处理方面, 长期以来研究的热点围绕集中智能配电自动化系统^[1-3], 而配电网继电保护对于提高供电可靠性具有重要意义。

在配电网继电保护研究领域普遍存在的错误倾向是为了追求继电保护的完美配合而将问题复杂化, 比如: 不得不采用光纤纵差保护或基于高速可靠通信的智能分布式保护策略^[4]等。

实际上, 继电保护配合不必追求完美, 只要效

果明显就值得配置。

重合器与电压时间型分段器配合是一种成熟的就地智能馈线自动化技术, 已经成功地在包括日本和中国在内的许多亚洲国家广泛应用^[5-6]。但是, 随着近二十年来科学技术的进步, 这种就地智能馈线自动化技术存在很大的改进空间。

我国配电网的中性点大多采取非有效接地方式, 在单相接地故障处理方面的研究和关注点大都聚焦在单相接地选线和定位方面, 但是, 选线和定位并非单相接地故障处理的全部内容, 及时可靠地熄灭电弧以避免故障的影响扩大化更为重要, 但是仅仅依靠消弧线圈有时并不能可靠熄弧。

本文在梳理配电网故障处理过程的基础上, 重点对配电网继电保护配置、就地型馈线自动化改进

以及单相接地故障处理等问题进行深入探讨。

1 配电网故障处理过程

1.1 相间短路故障处理过程

相间故障处理过程包括：故障切除、故障定位、故障隔离、健全区域恢复供电、故障修复和返回正常运行方式，除了故障修复这个环节需人工进行外，其余 5 个环节均可通过各种自动化手段提高效率。

可用于相间短路故障处理的自动化手段包括：继电保护、自动重合闸、备自投、自动化开关(就地智能馈线自动化)、故障指示器和集中智能配电自动化等。

继电保护是切除故障的唯一手段，限于可配合的级数有限，可以粗略隔离和定位故障区域，使故障上游区域继续供电，但无法恢复故障下游健全区域供电。

自动重合闸可以在瞬时故障情况下恢复全部或部分馈线段供电。

备自投在主供电途径故障时，可以快速切换供电途径从而迅速恢复多供电途径用户供电。

就地智能馈线自动化通过各个自动化开关的协调配合可以隔离故障区域和恢复健全区域供电。

故障指示器有助于快速定位故障区域，有效缩短故障查找时间。

集中智能配电自动化具有故障定位、故障隔离、健全区域恢复供电和返回正常运行方式的功能，且具有一定的容错能力，还能进行大面积断电快速恢复以及模式化故障处理，提高模式化接线配电网的供电能力等。

恰当配置各种自动化手段，使它们协调配合，有助于提升配电网相间短路故障处理能力。

1.2 单相接地故障处理

长期以来，在中性点非有效接地配电网单相接地故障处理方面的研究和关注点大都聚焦在单相接地选线和定位方面，但是选线和定位并非单相接地故障处理的全部内容。

重要的处理工作还包括：及时可靠地熄灭电弧以避免故障的影响扩大化，有效抑制过电压以使得永久性单相接地时安全可靠地继续维持用户供电。

2 配电网继电保护不必追求完美

对于供电半径较长和分段数较少的低负荷密度地区馈线，沿线短路电流水平差异比较明显，可以基于 3 段式过流保护实现多级保护配合，只需注意相邻两级保护之间应留有足够长的间距，所需最小间距的计算可参见文献[7]。

对于供电半径较短的高负荷密度地区馈线，沿线短路电流水平往往差异比较小，难以基于 3 段式过流保护实现多级保护配合。此时仅能依靠延长时间级差实现多级保护配合。

对于变电站出线断路器采用延时速断保护的情形，可以配置次分支/用户、分支和变电站出线断路器三级级差配合，实现次分支/用户故障不影响分支和分支线故障不影响主干线^[8]。

对于变电站出线断路器仍必须采用瞬时速断保护的情形，因为瞬时速断保护往往并不保护馈线全长，因此在瞬时电流速断保护范围之外的下游馈线，仍具备多级级差保护配合的条件^[9-10]。

考虑到配电网故障的多样性(三相相间短路、两相相间短路和两相短路接地)、馈线和系统参数的实际偏差以及开关操动机构的轻微卡涩等，做到多级继电保护之间严格配合既非常困难，也没有这个必要。

对于一个继电保护装置，其对于提高供电可靠性的作用在于：在其下游故障修复期间可以避免其上游用户停电^[11]，哪怕 10 次故障中只有 8 次正确配合，只要因此而减少的停电户时数足够显著，就值得配置该保护装置，而没有必要追求完美配合。

例如，假设某分支发生永久性故障的概率为 0.5 次/年，平均故障修复时间为 4 h，馈线上除了该分支以外所带的用户数为 200，若该分支配置继电保护装置，其与变电站出线断路器处的保护装置成功配合的概率为 80%(即：该分支上每发生 10 次故障，有 8 次该保护动作跳闸而变电站出线断路器未动作，还有 2 次变电站出线断路器亦保护动作跳闸)，则该分支上配置保护装置后对该馈线每年减少的停电户时数为

$$\Delta\xi = 0.5 \times 4 \times 200 = 400$$

假设该馈线目前的供电可用率 $ASAI$ 为 99.95%，总用户数为 210，也即每年停电户时数为 919.8。

在该分支上配置保护装置后，每年停电户时数将减少为 519.8，供电可用率 $ASAI$ 将达到 99.97%，改进效果比较显著。

综上所述，配电网继电保护大有可为，但是没有必要追求完美配合，效果明显就值得。当然，继电保护可以采用动作型两遥终端实现，采用 GPRS 通道向配电自动化主站报送信息。

3 就地智能馈线自动化的改进

重合器与电压时间型分段器在以下 3 个方面存在很大的改进空间：

1) 变电站出线断路器的重合闸延时时间、分段

器的 X-时限和 Y-时限都可大幅缩短。

2) 瞬时性故障的处理速度尚可大幅度加快。

3) 已有技术存在整定复杂并且运行方式改变后需要重新整定的不足。

合闸速断方式^[12]是解决上述问题的有效手段,其基本原理如下。

1) 变电站出线断路器配置速断保护,通常为瞬时速断保护,重合闸成功后在一段时间内(如: 30 s ~2 min, 可根据实际需要整定)改为延时速断保护(延时时间为 0.5 s),之后返回瞬时速断保护。变电站出线断路器配置两次自动重合闸控制,延时时间分别为 0.5 s 和 2 s。

2) 分段器采用断路器,在分段器长期(如: 5 min)连续两侧带电时进行身份认定。若处于分闸状态,则认定为联络开关;若处于合闸状态则认定为分段开关;否则处于身份不确定状态。对于身份不确定的分段开关,闭锁一切自动化功能。

3) 分段开关具有下列功能。两侧失压后延时(如: 1 s)自动分闸,一侧带电后延时(如: 2 s)合闸,合闸速断保护功能,即合闸瞬间开启瞬时速断保护功能,若该开关合闸时瞬时速断保护动作导致开关再次跳闸,则该开关闭锁在分闸位置;若合闸后开关稳定在合闸位置超过规定时间(如: 1 s),则将其瞬时速断保护改为延时速断保护(延时时间 0.5 s),一段时间后(如: 30 s~2 min)延时速断保护保护或瞬时速断保护自动退出;残压闭锁功能;处于分闸状态的开关在检测到两侧均带电时严禁合闸。

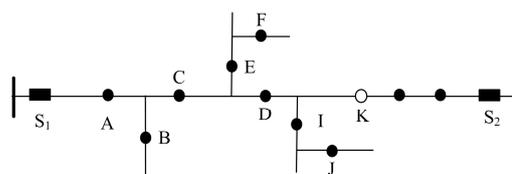
4) 联络开关具有下列功能: 一侧失压后启动延时合闸计数器,当到达事先整定的延时时间(一般可整定为其一侧最大开关数乘以 2 再加 5 时,则自动合闸,若该联络开关两侧均恢复供电并且稳定时间大于 1 s 则返回;合闸速断保护功能同 3); 残压闭锁功能;处于分闸状态的开关在检测到两侧均带电时严禁合闸功能。

例如,对于图 1(a)所示的实例, S_1 和 S_2 为变电站的 10 kV 出线开关,配置瞬时速断保护功能,并设置在重合成功后的 30 s 内将瞬时速断保护改为延时速断保护,配置两次自动重合闸功能,延时时间分别为 0.5 s 和 2 s; A、B、C、D、E、F、J、I 为线路分段开关,两侧失压后延时 1 s 自动分闸,一侧带电后延时 2 s 合闸,配置合闸速断保护功能(合闸瞬间开启瞬时速断保护功能,合闸后开关稳定在合闸位置超过 1 s 则将其瞬时速断保护改为延时速断保护,30 s 后自动退出延时速断保护或瞬时速断保护),残压闭锁功能; K 为联络开关,一侧失压后延时合闸整定时间为 11 s,配置合闸速断保护功能,残压闭锁功能。图中,实心符号表示开关合状态,

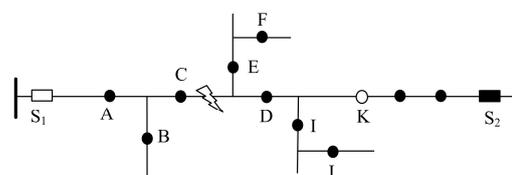
空心符号表示开关分状态。

假设在开关 C 下游区域发生瞬时性故障,则: S_1 瞬时速断保护动作分闸,如图 1(b)所示,0.5 s 后 S_1 第一次重合成功快速恢复全线供电, A、B、C、D、E、F、J、I 因失压延时时间未到不分闸,如图 1(c)所示。

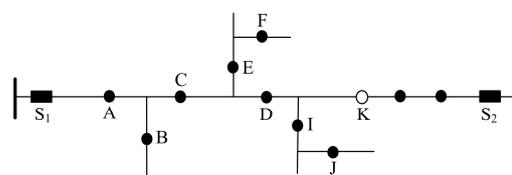
假设在开关 D 下游发生永久性故障,则: S_1 瞬时速断保护动作分闸,如图 1(d)所示;故障 0.5 s 后 S_1 第一次重合失败,1 s 后 A、B、C、D、E、F、J、I 因失压延时时间到而分闸,如图 1(e)所示;2 s 后(即故障后 2.5 s 时) S_1 再次重合将电送到 A,由于未重合到故障, S_1 重合成功并在重合成功后的 30 s 内将瞬时速断保护短时转为延时速断保护;再过 2 s A 合闸将电送到 B 和 C,由于未合闸到故障, A 在合闸瞬间开放的瞬时速断保护不动作, A 稳定在合闸位置超过 1 s 后其瞬时速断保护改为延时速断保护;再过 2 s B 和 C 合闸,由于未合闸到故障, B 和 C 在合闸瞬间开放的瞬时速断保护不动作, B 和 C 稳定在合闸位置超过 1 s 后其瞬时速断保护改为延时速断保护;再过 2 s D 和 E 合闸, D 由于合闸到故障点,其合闸瞬间开放的瞬时速断保护动作跳闸,将 D 闭锁在分闸状态,由于时限上的配合关系,上游 S_1 、A、C 延时速断保护不会动作,开关 K 因残压闭锁在分闸状态, E 由于未合闸到故障,其在合闸瞬间开放的瞬时速断保护不动作, E 稳定在合闸位置超过 1 s 后其瞬时速断保护改为延时速断保护;再过 2 s(即故障后 10.5 s 时) F 合闸,故障处理过程结束,如图 1(f)所示。



(a) 一条示例配电线路



(b) 开关 C 下游瞬时性故障, S_1 瞬时速断保护动作分闸



(c) 0.5 s 后 S_1 第一次重合成功, 快速恢复全线供电

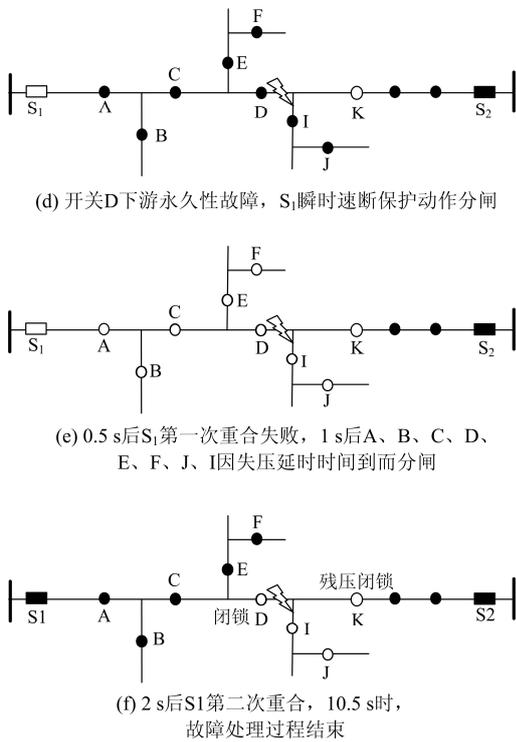


图 1 瞬时性和永久性相间短路故障的处理过程

Fig. 1 Processing of temporary and permanent phase-to-phase short circuit

故障后 32.5 s 时 S₁ 延时速断保护返回为瞬时速断保护，之后开关 A、B、C、D、E、F 延时速断保护或速断保护依次全部退出，为下一次故障处理做好准备。

可见，采用合闸速断方式后，对于瞬时性相间短路故障可以在 1 s 之内恢复供电；对于永久性相间短路故障，不仅其故障处理时间大大缩短，并且再次合到故障位置后不会引起越级跳闸，从而避免了重复停电；所有分段开关的 X-时限和 Y-时限都可设置成同样的定值，并且运行方式改变后不需要重新整定。对于图 1 所示的例子，永久性相间短路故障只需要 10.5 s 即可完成故障处理，而若采用重合器与电压时间型分段器配合模式，则需要 90 s 以上才能完成故障处理过程。

4 智能接地配电系统

我国配电网大都采用中性点非有效接地方式，单相接地故障中瞬时故障占比较高，大部分情况下，只要能够快速有效地熄灭电弧，故障现象即可消失，而不至于发展成为永久性单相接地故障。

为解决熄弧问题，中性点一般配置消弧线圈，但是消弧线圈仅仅补偿工频容性电流，有时并不能

可靠熄弧。

另一方面，由于故障信号小，中性点非有效接地系统的单相接地选线和定位都比较困难。

智能接地配电系统是解决上述问题的有效手段^[13-14]，其主要原理如下。

在变电站配置智能接地装置并通过断路器接入变电站 10 kV 母线，在馈线配置具有零序保护功能的配电终端和故障指示器。

当检测到发生了单相接地后，智能接地装置迅速判断出接地相别，并控制接地故障相的一组接地开关软导通，将其金属性接地，从而可靠熄灭电弧，并有效抑制因间歇性弧光接地导致的较高暂态过电压，避免因间歇性弧光接地处理不及时而引发的两相短路接地故障。

经短暂延时后通过软关断断开金属性接地。若单相接地现象消失则为瞬时性单相接地故障，故障处理结束；若单相接地现象再次发生则为永久性单相接地故障，控制中性点投入中电阻以增大接地点上游的零序电流，通过在馈线配置具有零序保护功能的配电终端的时间级差整定配合，跳开单相接地位置上游距离故障点最近的断路器以隔离故障区域，利用故障指示器还可实现更精细的单相接地选线和定位。

单相接地隔离、选线和定位完成后，退出该中电阻，故障处理完毕。

智能接地装置每一相的接地开关实际上是由 K1 和 K2 两个开关以及电阻 R 有机配合构成，如图 2 所示，可以实现软导通和软关断。

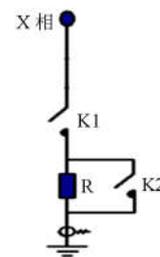


图 2 X 相接地开关

Fig. 2 Grounding switch group of X-phase

所谓“软导通”是指：当需要将 X 相金属性接地时，先合开关 K1，将该相经电阻 R 接地，然后再合开关 K2 旁路 R，实现 X 相金属性接地。当需断开 X 相金属性接地时的“软关断”的操作顺序与之相反，即先断开 K2，再断开 K1。

接地故障相的软导通和软关断控制可以有效抑制操作过程可能发生的强烈暂态过程，避免导致保护误动和对电气设备的损害。

接地故障相的软导通控制还可在 K1 合闸阶段及时发现选相错误,并自动纠正到正确相别。这样就可以有效避免因选相错误导致两相短路接地的风险,使其具有单相接地故障选相的容错和纠错能力。

配置智能接地装置时,原有消弧线圈仍可以采用,尽管它只能补偿工频容性电流并不能可靠熄弧,但是有助于有效减低电弧能量,且有助于抑制智能接地装置软关断时的暂态过程。

在判断出是永久性单相接地故障后,也可以采取其他原理进行单相接地隔离、选线和定位,比如:残流增量法^[15]、S注入法^[16]和双频注入法^[17]等,作者推荐采用中性点投入中电阻倍增零序电流的方法,其原因在于这种方法可以直接沿用已有的成熟的零序保护装置和传统相间短路故障指示器,而其他方法都需要配置专门的保护测控终端和故障指示器,并且有的方法需要借助于相互比较进行决断,因此更适用于单相接地选线,而用于定位时,因不容易实现相互比较而增大了决策困难度。

5 结论

1) 集中智能配电自动化、继电保护、自动重合闸、备自投、就地型馈线自动化、故障指示器和智能接地装置等协调配合,有助于提升配电网相间短路和单相接地故障处理性能。

2) 配电网继电保护对于提高供电可靠性能发挥出重要作用,宜将可靠性指标作为资源充分利用,继电保护配合不必追求完美。

3) 就地智能馈线自动化大有可为,与重合器和电压时间型分段器配合方式相比,合闸速断方式馈线自动化能够显著加快故障处理速度,有效避免故障处理中的重复停电,所有分段开关的整定值相同且运行方式改变后不需要重新整定。

4) 智能接地配电系统在发生单相接地故障时,接地故障相的软开关可及时可靠熄灭电弧,并抑制操作中的暂态过程。永久性单相接地时,在中性点投入中电阻倍增零序电流,配合馈线上的零序保护终端和故障指示器可进行单相接地隔离、选线和定位。

参考文献

[1] 刘健,程红丽,董海鹏,等.配电网故障判断与负荷均衡化[J].电力系统自动化,2002,26(22):34-38.
LIU Jian, CHENG Hongli, DONG Haipeng, et al. Fault section identification and load balancing of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 34-38.

- [2] 姚玉海,王增平,张首魁,等.基于偏好知识的多目标优化算法求解计及电源侧的配电网故障恢复[J].电力系统保护与控制,2016,44(4):1-8.
YAO Yuhai, WANG Zengping, ZHANG Shoukui, et al. Multi-objective optimization algorithm based on decision preferences to solve distribution network service restoration considering power supply[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 1-8.
- [3] 刘鹏程,李新利.基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J].电力系统保护与控制,2016,44(2):36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [4] 杜东威,叶志锋,许永军.基于GOOSE的综合型智能分布式馈线自动化方案[J].电力系统保护与控制,2016,44(24):183-190.
DU Dongwei, YE Zhifeng, XU Yongjun. A solution of integrated intelligent distributed feeder automation based on GOOSE[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 183-190.
- [5] 王章启,顾霓鸿.配电自动化开关设备[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [6] 陈勇,海涛.电压型馈线自动化系统[J].电网技术,1999,23(7):31-33.
CHEN Yong, HAI Tao. Voltage type feeder automation system[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 31-33.
- [7] 刘健,同向前,张小庆,等.配电网继电保护与故障处理[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [8] 刘健,张志华,张小庆,等.继电保护与配电自动化配合的配电网故障处理[J].电力系统保护与控制,2011,39(16):53-57.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57.
- [9] 刘健,刘超,张小庆,等.配电网多级继电保护配合的关键技术研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(9):35-41.
LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 35-41.
- [10] 刘健,张小庆,张志华.继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J].电力系统保护与控制,2015,

- 43(22): 10-16.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16.
- [11] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 基于供电可靠性的配电网继电保护规划研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2186-2191.
LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Planning of relay protection coordination for electric power distribution systems based on service reliability[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2186-2191.
- [12] 程红丽, 张伟, 刘健. 合闸速断模式馈线自动化的改进与整定[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 35-39.
CHENG Hongli, ZHANG Wei, LIU Jian. Improvements of recloser and instantaneous protection based feeder automation and its setting approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 35-39.
- [13] 刘健, 张小庆, 李品德, 等. 基于熄弧倍增原理的配电网单相接地故障处理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3586-3588.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, LI Pinde, et al. A novel approach to propose single-phase to earth faults in distribution systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3586-3588.
- [14] 刘健, 芮骏, 张志华, 等. 智能接地配电系统应用关键技术[J]. 供用电, 2017, 34(5): 27-31.
LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Application considerations of smart grounding distribution systems[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 27-31.
- [15] 王倩, 王保震. 基于残流增量法的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. 青海电力, 2010, 29(1): 50-52.
WANG Qian, WANG Baozhen. Single phase earth fault line selection of resonant grounding system based on residual current incremental method[J]. Qinghai Electric Power, 2010, 29(1): 50-52.
- [16] 王慧, 范正林. “S 注入法”与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(3): 18-20.
WANG Hui, FAN Zhenglin. The “S signal injection method” and its application in single phase-to-earth fault line identification and fault point location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 18-20.
- [17] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 30-33, 37.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, YU Yongyuan, et al. New methods for control and protection relay in a compensated medium voltage distribution network based on injecting various frequency current[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 30-33, 37.

收稿日期: 2017-07-10

作者简介:

刘健(1967—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 新世纪百千万人才工程国家级人选, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

张志华(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术。

张小庆(1971—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化。

(编辑 葛艳娜)