

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201968

一二次配合的配电网故障处理

刘健¹, 张志华^{1,2}, 吴水兰³, 芮骏⁴

(1. 国网陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 西安理工大学自动化学院, 陕西 西安 710048;
3. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 安徽一天电气技术股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 针对短馈线继电保护配合和中性点非有效接地配电网单相接地故障处理问题, 分别提出了一种一次设备与二次设备协同配合的解决方案。采取在故障率较高的分支断路器处配置限流电抗器的方法, 实现分支线故障快速切除而不影响馈线其他部分正常供电。采用故障相接地实现及时可靠熄弧, 并利用故障相接地前后和故障相接地断开前后系统零序电压和各处零序电流的变化规律, 实现单相接地选线、定位和选段跳闸。论述了所提出解决方案的工作原理, 详细分析了关键技术问题。基于所提出原理研制出的产品都经过测试验证了其可行性。

关键词: 配电网; 中性点非有效接地; 相间短路; 单相接地; 熄弧; 继电保护

Fault processing with coordination of primary equipments and secondary devices

LIU Jian¹, ZHANG Zhihua^{1,2}, WU Shuilan³, RUI Jun⁴

(1. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;
4. Anhui Onesky Electric Technology Company Limited, Hefei 230088, China)

Abstract: To solve the problems of relay protection for short feeders and single phase to ground fault processing for neutral non-effectively grounded systems, two novel approaches based on coordination of primary equipments and secondary devices are put forward. A reactor is managed in series with the branch circuit breaker, with the help of which, the relay protection on branch switches are cooperated with the relay protection in the substation. The methodology of fault phase grounding is introduced to extinct the arc rapidly. Based on the variation of zero-sequence-voltage and zero-sequence-current before and after fault phase grounding, the grounding feeder is identified and the position of grounding is located. The sectionalizing switch adjacent with the fault may be also tripped to isolate the fault position. The principle of the innovations is described. The critical technologies are discussed in detail. Devices based on the proposed approaches are developed, the test results of which show their feasibility.

Key words: distribution network; neutral non-effectively grounded; phase-to-phase short circuit fault; single phase to ground fault; arc extinction; relay protection

0 引言

配电网故障处理对于提升配电网供电可靠性具有重要意义, 长期以来一直是配电网领域的研究重点, 但是受制于配电网供电半径短、分支多以及中性点非有效接地的网架特点, 导致配电网故障处理仍然存在一些难点问题需要突破。

一方面, 在相间短路故障处理方面, 配电线路一般较短, 沿线短路电流差别不大, 并且在短路电流水平较高、主变压器抗短路能力不足的情况下, 往往变电站出线断路器必须配置瞬时电流速断保

护, 造成变电站和馈线分段之间的继电保护配合难度较大^[1], 经常发生越级跳闸或多级跳闸现象。单纯在二次侧采取措施解决上述问题非常困难, 典型的解决方案包括: 集中智能配电自动化^[2-5]、光纤差动^[6]、邻域交互快速自愈保护^[7]等, 不仅建设和维护费用较高, 而且依赖数据通信, 安全性和可靠性不够高。

另一方面, 单相接地是配电网最常见的故障, 但由于中性点非有效接地, 单相接地故障电流特征不如相间短路明显, 单相接地选线、定位和保护遇到很大困难^[8-9]。在这个方面已经取得了许多研究成

果,主要包括稳态量法^[10-11]、暂态量法^[12-15]、注入法^[16]及现代信号处理法^[17-18]等。很多原理在仿真和实验室测试阶段效果很好,但是实际应用中效果却不尽如人意,其中最主要的原因还是在于中性点非有效接地方式下,故障电流特征微弱、检测困难,且容易受到不稳定故障电弧以及随机因素的干扰,仅仅从二次侧采集单相接地后的电气量着眼难以满意解决配电网的单相接地故障选线和定位问题。

目前在配电技术领域,一二次融合是一个热点研究方向,发挥一次设备和二次设备的协同作用,解决过去单纯依靠一次设备或二次设备难以解决的难题,达到“1+1>2”的效果而不仅仅是“一二次组合”,是一二次融合研究和应用的发展趋势。

针对上述问题,本文论述一二次配合的配电网故障处理思想。

1 采用一二次配合解决城市配电网继电保护难题

采取与馈线断路器串联适当参数限流电抗器的一二次相互配合的方式^[19],可以较好地实现短馈线配电网全线速断保护配合,其基本原理如图1所示。

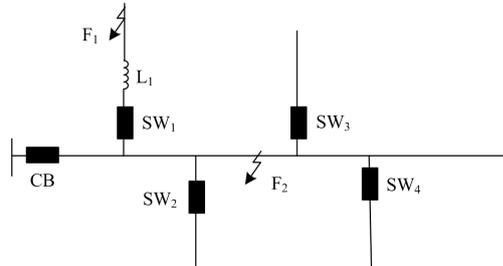


图1 断路器与串联电抗器组合实现短馈线全线速断保护
Fig. 1 Instantaneous overcurrent protection based on circuit breakers and reactors for short feeders

图1中, CB 为变电站出线断路器, SW 为馈线断路器, L₁ 为与 SW₁ 串联的限流电抗器。

在不配置限流电抗器的传统情况下,当 F₁ 处发生相间短路故障时,流过 SW₁ 和 CB 的短路电流基本相同,会引起 SW₁ 和 CB 均跳闸。在为 SW₁ 配置了串联的限流电抗器 L₁ 后,当 F₁ 处发生相间短路故障时,短路电流得到抑制而不致造成 CB 跳闸,但是因 SW₁ 的电流速断保护装置整定的灵敏度较高,导致 SW₁ 跳闸。而当主干线 F₂ 处发生相间短路故障时,由于流过 CB 的短路电流未经过限流而较大,导致 CB 跳闸。

可见,采取在故障率较高的分支断路器处配置限流电抗器的方法,可以实现分支故障快速切除而不影响馈线其他部分正常供电。据统计,对于城市

配电网,由于主干线长度较短且绝缘化程度较高,大部分相间短路故障发生在分支线和用户线路,因此所提出的方法能够有效提高供电可靠性。

将串联限流电抗器和馈线断路器(比如柱上开关)以及控制保护终端(FTU)和基于无线公网的通信设备做成一个产品,就是一种典型的一二次融合设备,如图2所示。

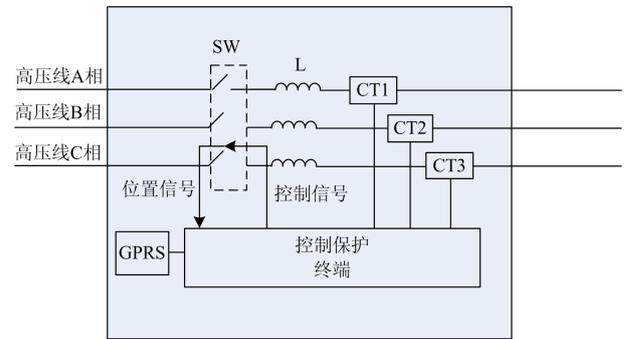


图2 串联限流电抗器和馈线断路器组合设备结构示意图
Fig. 2 An integrated device composed of a circuit breaker, a reactor and the corresponding controller

串联电抗器宜采用干式空心电抗器实现,其参数设计要满足选择性的要求,串联电抗器接入后的等效电路如图3所示。

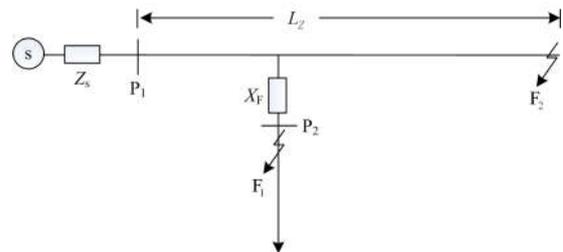


图3 串联电抗器接入馈线等效分析电路
Fig. 3 Equivalent circuit for analysis when series reactor is connected into feeder

图3中, Z_s 为系统阻抗, X_F 为配置于分支线的串联电抗器的感抗,主干线的长度为 L_Z, K_F 为分支线引出位置占主干线的比例(取值范围为 0.1~1)。串联电抗器的电抗值和主干线的瞬时速断保护整定值 I_{set} 可通过式(1)确定。

$$I_{set} = \frac{I_{min}}{K_{lm}} = \frac{0.5U_N}{K_{lm} |Z_{s,max} + z_L L_z|} \quad (1)$$

式中: I_{min} 为最小运行方式下主干线末端(F₂)发生两相短路时的短路电流; K_{lm} 为灵敏系数,取值一般为 1.2~1.5; U_N 为标称线电压; Z_{s,max} 为最小运行方式下系统阻抗; z_L 为主干线单位长度阻抗。

为了避免最大运行方式下 CB 的保护范围越过

分支串联电抗器,则需满足式(2)。

$$I'_{\max} \leq \frac{I_{\text{set}}}{K_{\text{rel}}} \quad (2)$$

式中:最大方式下分支线串联电抗器下游侧(F₁)的三相短路电流为 I'_{\max} ; K_{rel} 为可靠系数,取值一般为1.2~1.5。

所需串入电抗器的电抗值 X_F 需满足式(3)。

$$I'_{\max} = \frac{U_N / \sqrt{3}}{|K_s Z_{s,\max} + K_F z_L L_z + jX_F|} \leq \frac{I_{\text{set}}}{K_{\text{rel}}} \quad (3)$$

式中, K_s 为运行方式变化后系统阻抗系数(取值范围为0.1~1)。

以 $Z_{s,\max}$ 为 $j0.4 \Omega$, K_s 为0.53, K_{lm} 为1.2, K_{rel} 为1.2, L_z 分别取1 km和3 km为例,限流电抗器的最小取值如表1所示。

表1 X_F 的最小取值

Table1 The minimum values of X_F

线型	L_z/km	K_F	X_F/Ω
LGJ-185	1	0.1	1.078 3
		0.5	0.924 1
		0.8	0.805 9
		1	0.725 8
	3	0.1	2.379 9
		0.5	1.913 1
		0.8	1.551 5
		1	1.304 8
LGJ-240	1	0.1	1.050 1
		0.5	0.900 8
		0.8	0.787 2
		1	0.710 7
	3	0.1	2.275 6
		0.5	1.824 8
		0.8	1.479 8
		1	1.246 4
YJV-185	1	0.1	0.637 6
		0.5	0.594 9
		0.8	0.560 9
		1	0.537 2
	3	0.1	1.089 1
		0.5	0.954 5
		0.8	0.841 6
		1	0.760 3
YJV-300	1	0.1	0.612 0
		0.5	0.573 1
		0.8	0.543 1
		1	0.522 8
	3	0.1	0.964 4
		0.5	0.844 9
		0.8	0.750 2
		1	0.684 7

根据表1的计算结果,可将 0.7Ω 、 1.5Ω 和 2.0Ω 作为标准配置参数。

考虑到继电保护装置很容易识别两相相间短路和三相相间短路,因此可以设置两套整定值分别针对两相相间短路和三相相间短路,这样可以有效提升性能和缩小限流电抗器的体积。

当然,串联限流电抗器的引入,会使正常运行时分支的损耗和电压降有所增大,但是考虑到所提出的方法主要用于解决供电半径短的城市配电网的继电保护配合问题,损耗和电压降有所增大都不会对这类馈线产生多大影响,而继电保护困难这个主要问题却能得到有效解决。

基于上述原理已经由许继集团开发出产品化的设备,测试结果表明其性能良好。

2 采用一二次配合解决单相接地故障处理难题

我国配电网大多采用中性点非有效接地方式,对于保障供电可靠性具有重要意义。但是,许多单相接地伴随着电弧,若电弧持续燃烧,不仅会造成“火烧连营”的恶劣后果,而且间歇性弧光接地还会产生高倍数过电压,引起两相短路接地。消弧线圈虽然能补偿工频电容电流,但却不能补偿高频和阻性电流,因此配置消弧线圈但仍不能可靠熄弧的现象并不罕见。近年来在电力系统试点应用的故障相接地型(又称作“主动转移型”)熄弧装置^[20-22]为及时可靠熄弧开辟了新的途径。

实际上,故障相接地型熄弧装置在发生单相接地时,通过在变电站内将故障相金属性接地来转移馈线接地电弧能量达到熄弧的目的,随后又会断开故障相接地判断是否为永久性故障。这种熄弧方式不会造成用户停电,并且及时可靠,可以显著降低电弧破坏性和提高瞬时性接地电弧自熄的比例。同时其在整个工作过程中会对系统产生了较大的扰动,恰当利用这个扰动,通过一二次配合可以为解决配电网单相接地故障选线、定位和选段跳闸问题提供又一途径。

一般情况下,馈线接地点都存在较大的过渡电阻(即使裸线直接落到接地扁铁也存在几十欧姆接地过渡电阻),而变电站内的接地电阻则很小(一般小于 1Ω)。因此,变电站内故障相接地后,零序电压会升至很高,导致健全线路和故障线路接地点下

游的零序电流增大,而故障线路接地点上游的零序电流减小。利用故障相接地后和接地前零序电流的上述变化,可以进行单相接地选线和定位,对于故障线路接地点上游的保护装置,可以采用延时级差配合实现选段跳闸,本文称这种方式为故障相接地增量原理。

笔者研发的故障相接地型熄弧装置^[22]在故障相接地断开前,先将一个中阻抗(20~30 Ω)并联到中性点,然后再断开故障相接地,在上述两个因素的共同作用下,如果是永久性接地故障,则随着故障相接地的断开,故障线路接地点上游零序电流增大,健全线路和故障线路接地点下游零序电流减少,利用这个特征也可以进行单相接地选线、定位和保护,本文称这种方式为故障相接地断开增量原理。

无论故障相接地增量原理还是故障相接地断开增量原理,对故障相接地和断开的感知都是前提条件。

对于安装于变电站内的故障相接地型选线装置,由于正是它发出的故障相接地或断开指令,因此可以确切感知故障相接地和断开的时刻,增量检测的启动不存在问题。

而对于配置于馈线开关处的终端,则需依靠故障相接地和断开时零序电压的变化感知。对于故障相接地增量原理,在低阻接地时,故障相接地与否引起零序电压变化小,典型参数下,接地过渡电阻在 30 Ω 以下时,引起零序电压变化将不足 10%,有可能造成启动困难。但是,实际当中极少发生这么低过渡电阻接地的情形。对于故障相接地断开增量原理,则不存在启动困难,因为故障相接地断开前的零序电压为零序网络综合阻抗(包括所有出线对地等效电容、中性点对地阻抗在内)和母线故障相接地电阻的分压,故障相接地断开后的零序电压为零序网络综合阻抗和馈线接地过渡电阻的分压,即使在故障相接地断开前并入中性点的中阻抗可能会使得零序电压稍有降低,但故障相接地断开前后零序电压的降低依然明显。

此外,对于故障相接地增量原理,在故障相接地后,健全线路的零序电流都会增大,但是故障线路接地点上游的零序电流在下列情况下可能不会减小甚至反而增大:

① 由于故障相接地熄弧过程中并不破坏线电压而使用户正常供电,负荷电流导致变电站内故障

相接地点和馈线故障接地点存在压差,两个接地点间会出现环流,当馈线故障接地点发生在较长的馈线远端、接地过渡电阻很小且负荷较重的情形时,在故障相接地后,有可能增大线路接地点上游的零序电流。典型参数下,接地过渡电阻在 30 Ω 以下时才有可能发生,但是实际当中极少发生这么低过渡电阻接地的情形。

② 在采用随调式消弧线圈的情况下,由于故障相接地后,故障馈线失去补偿,当其自身电容电流较大的情形下,在故障相接地后,故障线路接地点上游的零序电流有可能反而增大。

上述两种情形有可能会造成故障相接地增量原理判断不出故障接地线路。

此外,由于消弧线圈的作用,故障相接地后零序电压的变化需要经历一个暂态过程,也会对故障相接地增量原理产生影响。对于故障相接地断开增量原理,由于在故障相接地断开前并入中性点的中电阻,在故障相接地断开时,有效缩短了暂态过程的时间常数,使得检测更加容易些。

故障相接地断开原理只在永久性故障时才启动,对于延时级差保护配合非常有利,但是在瞬时性故障时无法实现选线和定位功能。

综上所述,故障相接地增量原理和故障相接地断开增量原理需要联合使用,前者用于瞬时性接地时选线和定位,后者用于永久性故障时选段跳闸。尽管前者相比后者存在少许判断困难的场景,但是因仅是针对瞬时性故障,不利影响也不大。

基于上述原理已经由安徽一天公司开发出产品化的装置,测试结果表明其可以在 10 kΩ 过渡电阻情况下正确选线和定位。

3 结论

1) 采取与馈线断路器串联适当参数电抗器的一二次相互配合的方式,可以较好地实现配电网短馈线全线速断保护配合,而将串联限流电抗器和馈线断路器以及控制保护终端组合即可构成一种一二次融合设备。

2) 故障相接地型熄弧装置在工作过程中会对系统产生较大扰动,恰当利用这个扰动,将故障相接地增量原理和故障相接地断开增量原理联合使用,前者可用于瞬时性接地故障选线和定位,后者可用于永久性接地故障选段跳闸,通过一二次配合

可以为解决配电网单相接地故障选线、定位和选段跳闸问题提供又一途径。

参考文献

- [1] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网建设中的继电保护问题[J]. 供用电, 2012, 29(5): 16-26.
XUN Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Protection issues in building smart distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2012, 29(5): 16-26.
- [2] ALWASH S F, RAMACHANDARAMURTHY V K, MITHULANANTHAN N. Fault-location scheme for power distribution system with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1187-1195.
- [3] ADEWOLE A C, TZONEVA R, BEHARDIEN S. Distribution network fault section identification and fault location using wavelet entropy and neural networks[J]. Applied Soft Computing, 2016, 46: 296-306.
- [4] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及应用成效分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32.
SHEN Bingbing, WU Lin, WANG Peng. Technological characteristics and application effects analysis of distribution automation pilot projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 27-32.
- [5] 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.
- [6] 李瑞生. 适用主动配电网的差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 104-109.
LI Ruisheng. Differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 104-109.
- [7] 刘健, 负保记, 崔琪, 等. 一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 82-86.
LIU Jian, YUN Baoji, CUI Qi, et al. A distributed intelligent based feeder automation system with fast self-healing performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 82-86.
- [8] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.
- [9] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 7-13.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Survey of fault location technology for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 7-13.
- [10] LIN X, SUN J, KURSAN I, et al. Zero-sequence compensated admittance based faulty feeder selection algorithm used for distribution network with neutral grounding through Peterson-coil[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 747-752.
- [11] LIU B, MA H, XU H, et al. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 139-147.
- [12] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97, 125.
SUONAN Jiale, LI Zongpeng, WANG Li, et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97, 125.
- [13] 宋国兵, 李广, 于叶云, 等. 基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 84-90.
SONG Guobing, LI Guang, YU Yeyun, et al. Single-phase earth fault section location based on phase current fault component in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 84-90.
- [14] BARIK M A, GARGOOM A, MAHMUD M A, et al. A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution

- systems with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2462-2473.
- [15] 董新洲, 王珺, 施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.
- DONG Xinzhou, WANG Jun, SHI Shenxing. Principle and algorithm of traveling waves based single-phase-to-ground protection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 154-160.
- [16] 樊淑娴, 徐丙垠, 张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 91-95.
- FAN Shuxian, XU Bingyin, ZHANG Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 91-95.
- [17] LI Y, MENG X, SONG X. Application of signal processing and analysis in detecting single line-to-ground (SLG) fault location in high-impedance grounded distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(2): 382-389.
- [18] ESCALANTE F P, ADRIANO P D M, CARDOSO J G, et al. Fault location in distribution systems: a method considering the parameter estimation using a RNA online[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(12): 4741-4749.
- [19] 国家电网公司, 国网陕西省电力公司电力科学研究院. 利用串联电抗实现配电线路全线电流速断保护配合的方法: 中国, CN201510587378.0[P]. 2015-09-15.
- [20] 吴旭涛, 艾绍贵, 樊益平. XHG 消弧消谐选线过电压保护装置的现场试验研究[J]. 宁夏电力, 2007(2): 14-18, 41.
- WU Xutao, AI Shaogui, FAN Yiping. Field test study on XHG arc extinction, harmonic eliminating and line selection over voltage protective device[J]. Ningxia Electric Power, 2007(2): 14-18, 41.
- [21] 合肥思源电气有限公司. 一种智能型消弧消谐装置: 中国, CN201620587381.2[P]. 2016-11-23.
- [22] 刘健, 芮骏, 张志华, 等. 智能接地配电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 130-134.
- LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Smart grounding power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 130-134.

收稿日期: 2018-05-16

作者简介:

刘健(1967—), 男, 总工程师, 博士, 教授, 博士生导师, 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, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: zzhtsky123@163.com

吴水兰(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护. E-mail: 273403203@qq.com

(编辑 周金梅)