

DOI: 10.7667/PSPC151700

# 电力系统零序网络最优控制技术研究

李本瑜, 翟海燕, 赵明, 石恒初, 游昊, 方毅, 罗吉, 沈雨

(云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011)

**摘要:** 电力系统零序网络的稳定性直接影响到继电保护定值的灵敏性和选择性, 是继电保护安全可靠运行的基础。电力系统零序网络主要由输电线路和中性点直接接地的变压器两类设备构成。研究提出了综合运用输电线路的自动重合闸技术和变压器中性点接地刀闸的自动切换控制技术, 可以确保设备跳闸后以最快的速度恢复电力系统的零序网络, 是电力系统零序网络的最优控制技术。分析总结了输电线路的自动重合闸技术, 研究开发了变压器中性点接地刀闸的自动切换控制装置, 其性能已经在现场运行中得到检验和验证, 具备推广应用的条件。

**关键词:** 继电保护; 零序网络; 最优控制; 自动重合闸; 变压器中性点刀闸; 自动切换

## Research on optimal control technology of zero sequence network power system

LI Benyu, ZHAI Haiyan, ZHAO Ming, SHI Hengchu, YOU Hao, FANG Yi, LUO Ji, SHEN Yu

(Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China)

**Abstract:** The sensitivity and selectivity of electronic protection relay's constant value is directly influenced by the power system zero-sequence network's stability, which is the foundation of safe and reliable operation of the relay protection. Zero sequence network topology is formed by transmission line and directly-grounding neutral point of transformer. Analysis shows that the integrated use of automatic reclosing of the transmission line and automatically switching grounding neutral point of transformer will ensure the equipment after tripping can resume the zero sequence power system networks as soon as possible. This technology is the optimal control technology of the zero sequence power system networks. In the following, it summarizes the automatic reclosing technology of transmission lines, researches the technology of automatic switching the grounding neutral point of transformer, and develops the corresponding control device. Device performance has been tested in actual operation and verification, which meets the application requirements.

**Key words:** relay protection; zero-sequence network; optimal control; automatic reclosing; transformer neutral point knife switches; automatically switching

## 0 引言

随着电力系统的飞速发展, 我国电网在超(特)高压、大容量、远距离、交直流混联等复杂大电网的特征日益凸显, 网架结构日趋复杂, 各种相继、连锁故障等复杂电网事故频发, 给电网的安全稳定运行带来了严峻挑战, 对电网的运行控制也提出了更严更高的要求。

继电保护作为保障电网安全稳定运行的“第一道防线”, 是防范电网事故扩大、失稳和大面积停电事故的首要保障措施, 因此, 要求电网发生各种异常和事故期间, 继电保护装置均能够安全可靠动作。电力系统零序网络的稳定性直接影响到继电保护定

值的灵敏性和选择性, 按继电保护整定规程的规定, 继电保护定值仅考虑设备 N-1 检修的常见运行方式, 因此, 除正常的 N-1 检修方式外, 在其余故障跳闸的情况下, 要求跳闸设备尽可能快速地恢复运行, 进而保证零序网络的稳定性和继电保护运行的可靠性。

长期以来, 继电保护专业人员在开展零序保护的整定计算时, 主要精力集中在分析计算常见运行方式下零序网络的稳态变化对保护定值的影响方面, 对电网设备跳闸引起零序网络突变的动态过程, 以及如何将突变的零序网络快速恢复至跳闸前状态的研究还不够深入。纵观历年的电网事故事件, 不难发现由于设备跳闸特别是变压器跳闸后引起零序

网络突变, 在尚未来得及切换变压器中性点接地刀闸期间又有设备相继发生故障时, 由于继电保护定值的不适应进而造成事故范围扩大的事故时有发生, 因此, 研究电力系统零序网络稳定性的控制技术具有非常重要的意义。

## 1 零序网络稳定性对继电保护的影响分析

零序分量是电力系统发生故障的重要特征之一, 因此, 由零序分量构成的保护原理一直是 110 kV 及以上大电流接地系统中非常重要的保护原理, 如零序方向过流保护、纵联零序方向保护、纵联零序差动保护等。由于零序电流电压的大小与零序网络直接相关, 因此, 零序网络是否稳定, 将直接影响到零序保护功能的正常发挥<sup>[1-8]</sup>。

在电网结构如图 1 所示的系统中, S1、S2、S3 三个厂站分别有两台变压器运行, 正常运行方式下每个厂站均按一台变压器的中性点直接接地、另一台变压器的中性点经间隙接地的方式考虑, 当接地运行的变压器停运时, 将另外一台变压器的中性点接地刀闸合上, 从而达到零序网络基本稳定的要求。因此, 在开展继电保护整定计算时, 均不考虑各厂站变压器零序阻抗随运行方式的变化, 图 2 为图 1 所示系统对应的零序网络图。

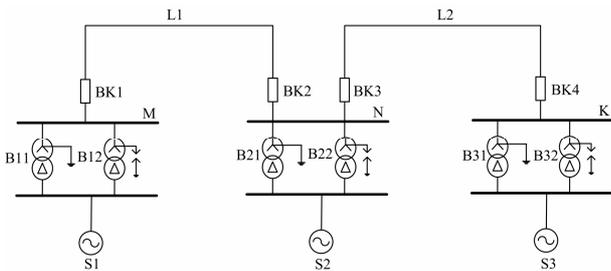


图 1 电网结构图

Fig. 1 Structure diagram of electrical power network

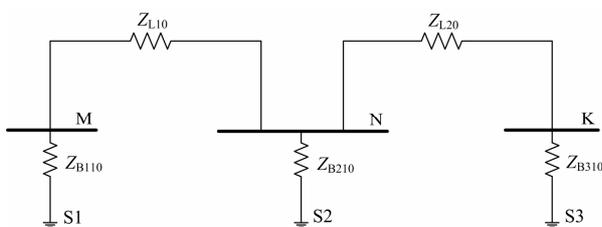


图 2 零序网络图

Fig. 2 Zero sequence network diagram

在图 1 所示的系统运行期间, 假设 S2 站中性点直接接地的 B21 变压器跳闸后, 没有及时将 S2 站 B22 变压器的中性点接地刀闸合上, 则在图 2 所示零序网络中 S2 站 N 母线的变压器零序阻抗  $Z_{B210}$

变为无穷大, 带来的影响是 S2 站 N 母线两回出线 L1 和 L2 对应的 BK2 和 BK3 保护装置的零序方向过流保护定值灵敏度降低, BK2 和 BK3 保护装置存在拒动的风险, 而 S1 站 L1 出线对应的 BK1 和 S3 站 L2 出线对应的 BK4 保护装置的零序方向过流保护定值灵敏度增大, BK1 和 BK4 保护装置存在区外故障越级跳闸的风险。另外, S1 站 L1 出线对应的 BK1 保护装置与 S2 站 L2 出线对应的 BK3 保护装置的定值间存在相互配合, S3 站 L2 出线对应的 BK4 保护装置与 S2 站 L1 出线对应的 BK2 保护装置的定值间也存在相互配合, 由于继电保护整定计算时不考虑 S2 站 N 母线变压器零序阻抗的变化, 在计算相邻线路 L1 和 L2 两侧的 BK1~BK4 保护装置间相互配合的零序方向过流保护定值的最大分支系数时自然也不会考虑这种运行方式, 导致上述运行方式下保护定值间存在失配的问题。S2 站中性点直接接地的 B21 变压器跳闸后, 必须尽快将 S2 站 B22 变压器的中性点接地刀闸合上, 方可避免出现上述保护定值的灵敏性和选择性等问题。另外, 如果线路 L1 或 L2 跳闸, 对相邻设备零序保护的影响和上述分析的中性点直接接地变压器跳闸后的影响类似, 均将对保护定值的灵敏性和选择性造成影响, 特别是线路 N-1 检修方式下, 运行线路再发生跳闸时, 将超出继电保护定值的适应范围。

在如图 3 所示的 220 kV 变电站中, #1B 中性点直接接地运行, #2B 中性点经间隙接地运行, 若 #1B 跳闸后没有快速将 #2B 的中性点接地刀闸合上, 则该变电站的 110 kV 系统将变为不接地系统, 此间若 110 kV 出线或母线再发生单相接地故障, 110 kV 线路保护或母线保护均不能动作, 只能由 #2B 的间隙

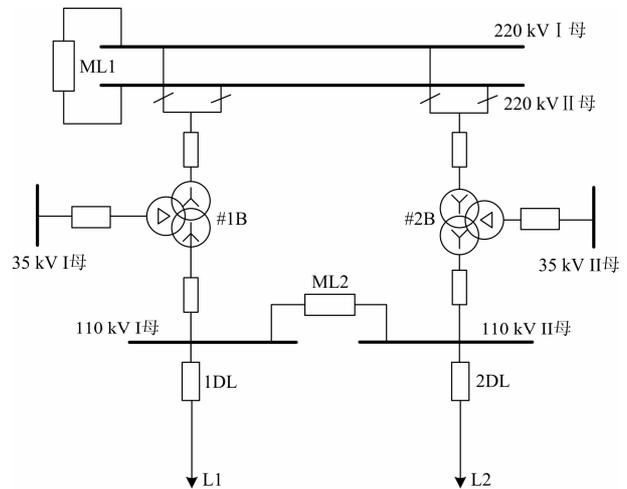


图 3 电气主接线图

Fig. 3 Electrical main wiring diagram

零序过压或间隙零序过流保护动作隔离故障，最终将导致该变电站的 110 kV 和 35 kV 母线全部失压事故，后果极其严重。若#1B 跳闸后能够快速将#2B 的中性点接地刀闸合上，则 110 kV 出线或母线再发生单相接地故障时，110 kV 线路保护或母线保护仍然可以正确动作保证选择性，不会造成事故范围的扩大。造成此后果的原因，本质上也是由于零序网络变化引起相关继电保护功能失效导致的。

从上述分析可知，电力系统零序网络的稳定性是保障继电保护安全可靠运行的基础，继电保护专业人员必须给予高度重视，特别是线路或变压器异常跳闸后对零序网络带来的动态影响应分析评估到位，这对电网设备相继发生故障的复杂电网事故期间，确保继电保护安全可靠动作至关重要，对防范重大电网事故的发生意义重大。

## 2 输电线路自动重合闸技术

由于架空输电线路需要穿越各种地形地貌和气象条件的野外区域，与站内元件设备相比，其运行环境最差，电力系统的所有设备故障中，线路故障的占比在 90%以上，其中 80%以上的线路故障又为瞬时性故障。

输电线路的自动重合闸技术一直伴随着继电保护技术同步发展，并且在电力系统中得到大规模的成熟应用，为提升电力系统的供电可靠性和安全稳定性发挥了重要的作用<sup>[9-10]</sup>。

电力系统中输电线路的自动重合闸一般采用单相、三相和综合重合闸等方式，为了避免非同期合闸，重合闸检定方式又分为检无压和检同期两种模式，输电线路大电源侧断路器的重合闸一般投检无压方式、小电源侧断路器的重合闸一般投检同期方式。输电线路跳闸后，投入检无压方式的大电源侧断路器先合闸成功后，小电源侧的断路器通过检同期方式重合，从而避免非同期合闸的问题。断路器偷跳后为了利用重合闸的补救措施，重合闸检定方式中还增加了“检无压自动转检同期”的逻辑功能。

传统的重合闸检无压以“母线有压线路无压”的方式进行判别，这种重合闸检定方式用于有小电源并网的送出线路时，存在小电源侧检同期条件一直不满足而造成重合闸失败，进而引起地区电网孤网最终失压的系统风险。为此，在传统的“母线有压线路无压”的重合闸检无压方式基础之上，又增加了“线路有压母线无压”的另外一种检无压方式，在线路大电源侧的断路器重合成功后，小电源侧的断路器若检同期条件不满足，则自动转“线路有压母线无压”的检无压重合方式，确保在小电解列后，

并网线路仍能重合成功，避免地区电网失压事件。

为了适应电力系统飞速发展对重合闸技术的新要求，近年来还研究提出了在断路器重合前就能够识别线路发生了永久性还是瞬时性故障的自适应重合闸技术<sup>[11-13]</sup>，另外从系统稳定的角度出发，还研究提出了最佳重合闸时间整定的相关技术<sup>[14]</sup>。

输电线路自动重合闸技术的应用，在提升电力系统供电可靠性和安全稳定性的同时，还发挥着快速恢复跳闸线路进而保持零序网络稳定性的作用。因此，输电线路的自动重合闸技术是控制电力系统零序网络稳定性的重要技术措施之一。

## 3 变压器中性点接地刀闸自动切换技术

变压器作为电力系统中最重要变电设备，其结构复杂、价格昂贵，电力系统的相关规程规定，变压器跳闸后必须对其保护动作行为、外观、油色谱等进行全面的检查分析，确认变压器没有故障后，才能对变压器进行送电，因此，变压器跳闸后不能和输电线路跳闸一样，采用自动重合闸技术让变压器快速复电，存在中性点直接接地的变压器跳闸后，零序网络发生较大变化，进而引起保护不正确动作的风险。虽然变压器不能采用自动重合闸技术，但变压器的中性点接地刀闸可以采用自动切换控制技术，在中性点直接接地的变压器跳闸后，如果能够将在间隙接地变压器的中性点接地刀闸快速合上，即可保证零序网络快速恢复至变压器跳闸之前的状态。

长期以来，变压器中性点接地刀闸的切换控制一直由人工在就地操作完成，这种传统的管理模式存在操作流程复杂、操作持续时间长、危及人身安全等问题。特别是变压器事故跳闸的紧急情况下，由于调度员和厂站值班人员对事故关注的重心往往都集中在对变压器跳闸原因的分析上面，顾不上甚至遗忘对运行变压器中性点接地刀闸的切换操作，这将导致零序网络长时间不能恢复至跳闸前的状态，导致局部电网由大电流接地系统变为小电流接地系统，给系统的安全稳定运行构成极大威胁。显然，这种传统的变压器中性点接地刀闸切换控制的管理模式，已经不能满足现代复杂大电网运行控制的要求，研究变压器中性点接地刀闸的自动切换控制技术已经迫在眉睫。

变压器中性点接地刀闸的自动切换控制技术，是解决变压器跳闸后快速恢复零序网络的重要技术措施，其技术方案是通过采集厂站变压器高、中压侧断路器、中性点接地刀闸和母联断路器的开关量位置信号实时识别变压器的运行方式和运行状态，

采集变压器高、中压侧母线的 $3U_0$ 电压模拟量作为闭锁判据, 在中性点直接接地的变压器或母联断路器跳闸后, 装置能够快速将中性点经间隙接地变压器的中性点接地刀闸自动合上, 确保该厂站零序网络的稳定性<sup>[15]</sup>。

根据上述技术方案, 在继电保护级的硬件平台上成功研究开发了变压器中性点接地刀闸自动切换控制装置, 具体逻辑框图如图4所示。

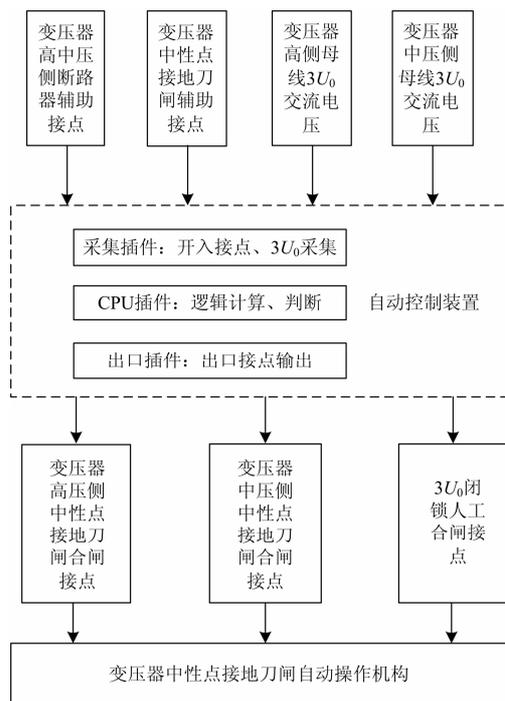


图4 变压器中性点接地刀闸自动切换实现逻辑框图

Fig. 4 Logic diagram of transformer neutral ground switch automatic switching

装置的逻辑判据清晰明了、所需的开入开出量较少, 保护级的硬件平台确保了装置的抗干扰能力, 从软、硬件两个层面保障了所研发的变压器中性点接地刀闸自动切换控制装置具有较高的安全性和可靠性, 目前该控制装置已经在现场成功投入运行, 达到了预期的效果。结合系统的研究开发工作, 成功申请了国家发明专利“变压器中性点接地刀闸自动切换方法(CN201410647852.X)”和实用新型专利“变电站变压器中性点接地刀闸智能切换装置(ZL201420843718.2)”。

变压器中性点接地刀闸的自动切换控制技术是控制电力系统零序网络稳定性的又一重要技术措施, 该技术的成功应用还大幅减少了现场运行人员的操作量和误操作的风险, 具有极大的推广应用价值。

## 4 结语

综合运用输电线路的自动重合闸技术和变压器中性点接地刀闸的自动切换控制技术, 可以确保以最快的速度恢复电力系统的零序网络, 是电力系统零序网络的最优控制技术。输电线路的自动重合闸技术已经成熟应用, 但变压器中性点接地刀闸自动切换控制技术的应用才刚刚起步, 需要引起广大继电保护专业人员的高度重视, 并加大推广应用的力度, 为保障电力系统的安全稳定运行尽早发挥其功效。

## 参考文献

- [1] 申志成, 张慧媛, 龚仁敏, 等. 反应全类型故障的改进零序方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 102-106.  
SHEN Zhicheng, ZHANG Huiyuan, GONG Renmin, et al. An improved zero-sequence directional component to response all kinds of fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 102-106.
- [2] 谭靖, 肖浩, 李艳, 等. 基于暂态仿真的主变涌流对线路零序过流保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 149-153.  
TAN Jing, XIAO Hao, LI Yan, et al. Study on influence of transformer magnetizing inrush current on the line zero sequence overcurrent protection by transient simulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 149-153.
- [3] 徐海洋, 宋国兵, 樊占峰, 等. 适用于弱馈系统的零序方向元件防误动方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2952-2958.  
XU Haiyang, SONG Guobing, FAN Zhanfeng, et al. A novel method adapted to weak-infeed system for preventing mal-operation of the zero-sequence direction component[D]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2952-2958.
- [4] 阿里木江·卡德尔, 索南加乐, 阿米那古丽·艾尼, 等. 基于超高压自耦变压器中性点零序电流的方向比较纵联保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 24-31.  
ALIMJAN Kader, SUONAN Jiale, AMINGUL Aini, et al. Novel scheme for UHV auto-transformer protection based on zero-sequence current longitudinal comparison principle[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 24-31.
- [5] 阿里木江·卡德尔, 索南加乐, 伊力亚尔·艾尔肯, 等. 基于零序电流的超高压自耦变压器相位比较纵联保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 59-65.

- ALIMJAN Kader, SUONAN Jiale, YILYAR Arken, et al. A novel phase comparison pilot protection scheme based on zero-sequence current of UHV auto-transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 59-65.
- [6] 李晓华, 傅龙辉, 罗龙波, 等. 220 kV 主变压器中性点加装隔直电容对零序电量的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 121-126.
- LI Xiaohua, FU Longhui, LUO Longbo, et al. Influence of 220 kV transformer neutral point accessing DC blocking capacitor on zero-sequence electric quantities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 121-126.
- [7] 陈曦, 傅锦发, 樊征臻, 等. 线路非全相运行及其再故障零序方向保护的動作特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 82-88.
- CHEN Xi, FU Jinfang, FAN Zhengzhen, et al. Action features analysis on zero-sequence directional protection of line open phase running and sound phase grounding[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 82-88.
- [8] 王玘, 何正友, 张姝. 基于零序电荷-零序电压关系的谐振接地系统单相接地故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 18-24.
- WANG Qi, HE Zhengyou, ZHANG Shu. Characteristics analysis of single-phase ground fault in resonant grounding system based on zero-sequence charge-voltage relationship[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 18-24.
- [9] 刘欣, 郑涛, 黄少锋, 等. 自动重合闸引起风电场连锁脱网的解决策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 51-56.
- LIU Xin, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng, et al. Analysis on solution of cascade failure caused by automatic reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 51-56.
- [10] 孙正伟, 孙羽, 鲍斌. 500 kV 线路单相重合闸事故分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 158-164.
- SUN Zhengwei, SUN Yu, BAO Bin. Accident analysis and coping scheme of single-phase reclosing of 500 kV power line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 158-164.
- [11] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 140-147.
- LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-147.
- [12] 王庆庆, 王慧芳, 林达, 等. 基于并联电抗器差模电流波形特征的三相自适应重合闸永久性故障识别[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1127-1132.
- WANG Qingqing, WANG Huifang, LIN Da, et al. Identification of permanent faults for three-phase adaptive reclosure based on waveform characteristics of differential mode currents in shunt reactors[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1127-1132.
- [13] 林达, 王庆庆, 王慧芳, 等. 带并联电抗器同杆双回线自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 101-106.
- LIN Da, WANG Qingqing, WANG Huifang, et al. Adaptive reclosure scheme for parallel lines with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 101-106.
- [14] 李兆伟, 贺静波, 方勇杰, 等. 计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 116-120.
- LI Zhaowei, HE Jingbo, FANG Yongjie, et al. Research on the method to set reclosing time of power plant transmission system considering transient stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 116-120.
- [15] 李本瑜, 辜新宇, 张凯. 变压器中性点接地刀闸自动控制技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 69-73.
- LI Benyu, GU Xinyu, ZHANG Kai. Study on transformer neutral point ground switch automatic switching technology[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 69-73.

收稿日期: 2015-09-22; 修回日期: 2015-12-23

作者简介:

李本瑜(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护技术管理工作; E-mail: jkjdk@163.com

翟海燕(1965-), 女, 高级工程师, 从事电力系统继电保护技术管理工作;

赵明(1973-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护技术管理工作。

(编辑 姜新丽)