

500 kV 电网方式调整短路电流限制措施选取分析

随着电力系统的快速发展,500 kV 电网短路电流超标问题日益严重。为了帮助电力调度部门更好地运用电网运行方式调整短路电流限制方法,从各种电网运行方式调整短路电流限制方法的原理出发,分析其适应性,归纳出一套选取理论。概括为优先拉停开关;如果不牺牲系统稳定可考虑拉停线路;谨慎使用线路出串;运用母线分段必须确保无动态稳定问题。兼顾电网的输送能力和整体稳定性,电力调度部门应灵活选取。

刘 兵/国家电网公司华中分部



刘 兵/高级工程师

快速发展的电力系统为国民经济持续增长提供了必备的电能,但也随之出现了短路电流水平不断攀升的次要矛盾^[1-3]。为确保500 kV 主网安全稳定运行,各地电力部门被迫采用各种措施限制短路电流^[4-8],归纳为以下3类。

1) 比较直接的一类措施是加装短路电流限流设备^[9-13]。例如在线路上或分段母线间加装串联电抗器或短路电流限制器,在变压器中性点加装电抗器等。虽然效果明显,但投资大,装置复杂,增加了运维工作量,且可能产生附加损耗。

2) 更直接的一类措施是重新规划调整电网结构^[14,15]。例如线路永久出串、改接或改接近区电源等。虽然效果最好,但规划、基建周期长,费用高,一般不采用。

3) 普遍采用的一类措施是临时调整电网运行方式^[16-18]。这类措施的本质是通过牺牲局部电网结构的完整性来降低流过开关的短路电流。从目前的运用情况看,经验成分占很大比重,缺乏完整的选取理论。

为了更好地发挥临时调整电网运行

方式调整短路电流限制方法在经济、灵活运用上的优点,有必要从每种电网方式调整短路电流限制方法的限制原理出发,分析其适用性,进而提炼出快速、准确的选取原则,探索出一套完整的选取理论。

拉停线路选取分析

1. 拉停线路短路电流限制原理

有两种拉停线路短路电流限制方法。第一种方法是直接拉停该站的某回出线,如图1所示,改变该站系统连接拓扑结构,增大部分电源到该站的短路阻抗,从而减小这些电源提供的短路电流,达到抑制该站短路电流的效果。第二种方法是拉停该站周围的线路,同样改变系统连接拓扑结构,增大部分电源到该站的短路阻抗,减小这些电源提供的短路电流,同样达到抑制该站短路电流的效果。

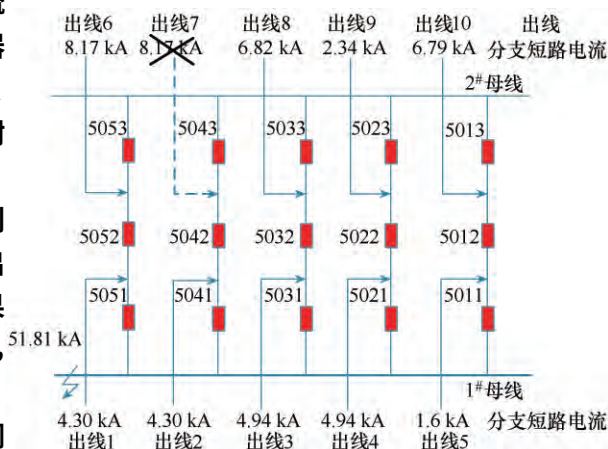


图1 某500 kV变电站拉停出线短路电流限制方法

拉停线路是一种比较有效、运用较广的短路电流限制方法。在有效限制短路电流的同时,由于被迫拉停500 kV 输电线路,破坏了电网结构的完整性,可能带来以下不利影响。

关键词/Keywords

电网·
短路电流·
运行方式·
选取原则·

1) 降低电网规划设计输电能力。被拉停的线路上的潮流会转移到其他线路上,可能导致部分线路重载。

2) 影响电网方式安排。将电网 $N-1$ 运行方式(甚至 $N-x$ 运行方式)作为正常运行方式,可能需限制周围机组、断面的运行方式来适应。

3) 严重时影响电网安全稳定运行。 $N-1$ 正常运行方式下,电网长期存在 $N-2$ 、 $N-3$ 运行风险,方式安排需小心,否则容易破坏系统安全稳定。

2. 拉停线路短路电流限制方法的适应性

归纳分析,拉停线路短路电流限制方法的适应性概括为两条。第一条:长期拉停对系统安全稳定影响较大的线路不应拉停;第二条:方式改变对周围机组、断面运行方式影响较大的线路不宜拉停。

线路出串选取分析

1. 线路出串短路电流限制原理

图2为某500 kV变电站采取固定断开5043开关和5041开关,出线2和出线7经5042开关直接相连,从变电站脱出。 $1^{\#}$ 母线发生三相短路故障后,流过短路点的短路电流仅由出线1、出线3~6和出线8~10提供,缺少出线2和出线7提供的短路电流后,边开关5011、5021、5031和5051开断的短路电流小于开关遮断电流。

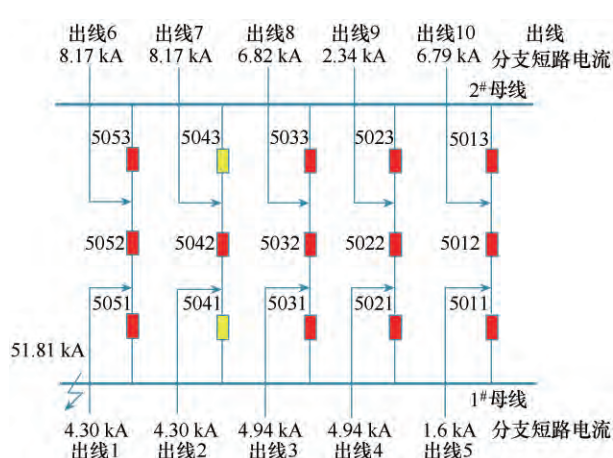


图2 某500 kV变电站线路出串短路电流限制方法

两条出线从变电站出串,导致电网结构变化较大,可能产生以下负面影响。

1) 破坏同杆并架或同通道多回线路并列运行条件,线路间形成环流,导致相关断面潮流发生较大变化,断面限额减小,严重影响规划设计能力。

2) 破坏变电站与临近电厂间网架结构,影响电厂送出,被迫整定电厂输出系统安控策略。

3) 出串的两回线路的保护必须重新配置。

4) 形成超长线路,给线路无功电压调节带来较大压力。

2. 线路出串短路电流限制方法的适应性

归纳分析,线路出串短路电流限制方法的适应性概括为三条。第一条:变电站出线重要断面上的线路不宜出串;第二条:变电站连接重要电厂的线路不宜出串;第三条:变压器出线不宜出串。

拉停中开关选取分析

1. 拉开中开关短路电流限制原理

图3为某500 kV变电站采取固定断开第4串5042中开关短路电流限制方法。 $1^{\#}$ 母线发生三相短路故障,母线短路电流大小与全接线方式相比没有变化,继电保护动作于5011~5051开关跳闸。考虑到故障隔离过程中开关断开时间的一致性,有且仅有三种情况。第一种:5041先于5011、5021、5031和5051断开;第二种:5041后于5011、5021、5031和5051断开;第三种:5041既不是最先断开,也不是最后断开。

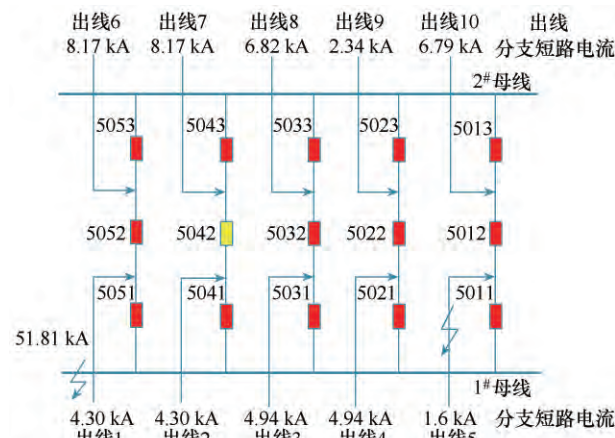


图3 某500 kV变电站断开中开关短路电流限制方法

第一种和第三种情况,无论5041以何种次序断开,由于中开关5042已经断开,5041只需断开出线2提供的短路电流。最后断开的那个开关

需要承受的短路电流最大,为出线2被隔离后1#母线短路时的母线短路电流。由于出线2被隔离后,电网结构发生改变,分支短路电流相应改变,最后一个断开的开关承受的短路电流略大于47.51 kA ($51.81 \text{ kA} - 4.30 \text{ kA}$),计算结果为48.85 kA。

第二种情况,倒数第二个断开的开关需要承受的短路电流最大,为母线短路电流减去出线2提供的短路电流,等于47.51 kA ($51.81 \text{ kA} - 4.30 \text{ kA}$)。

类似地,若2#母线发生三相短路故障,开关需要开断的最大短路电流也分为两种情况。一种为48.79 kA,它由5043开关非最后断开,5043开关断开后出线7被隔离计算得到;另一种为43.64 kA,它由5043开关最后断开,母线短路电流减去出线7短路电流求得。

分支短路电流最小的出线5出口处故障时,5011开关和5012开关将动作于跳闸。最后断开的开关需要开断的短路电流为50.2 kA ($51.81 \text{ kA} - 1.61 \text{ kA}$)。配合限制周边机组开机方式,才能将出线5出口处三相短路故障时开关需开断的短路电流降到开关遮断电流50 kA以下。

2. 拉开中开关短路电流限制方法的适应性

归纳分析,拉开中开关短路电流限制方法的适应性概括为两条。第一条:拉开的中开关应选取在两回出线分支短路电流都较大的串上,以满足正常方式下母线三相短路电流减去一回出线的分支短路电流后小于开关最大遮断电流;第二条:拉开中开关后应经得起最小分支短路电流出线出口处三相短路的校验,以满足母线三相短路电流减去最小分支短路电流后小于开关最大遮断电流。

拉开边开关选取分析

1. 拉开边开关短路电流限制原理

图4为某500 kV变电站固定断开边开关短路电流限制方法。

断开5013边开关,出线5出口发生三相短路故障,短路电流仍为51.81 kA,继电保护动作于5011和5012开关跳闸。考虑到故障隔离过程中开关断开时间的不一致性,有且仅有如下两种情况。

1) 5012开关先于5011开关断开。此时,5012开关只需断开出线10提供的短路电流。

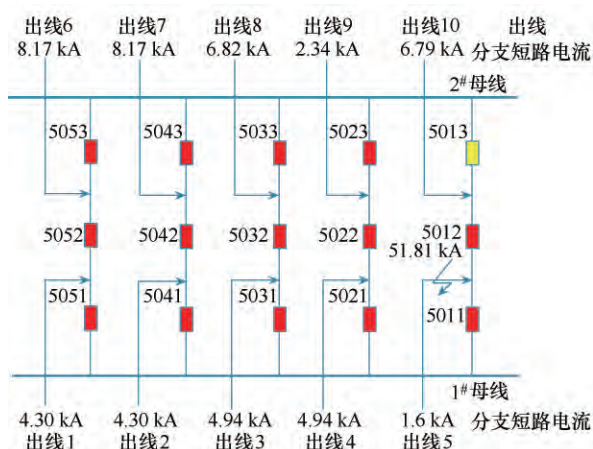


图4 某500 kV变电站固定断开边开关短路电流限制方法

5012开关断开后,出线10从变电站脱出,此后5011开关需要开断的短路电流是出线10脱出后母线短路电流48.12 kA减去出线5提供的短路电流1.61 kA,计算得46.51 kA。

2) 5011开关先于5012开关断开。由于5013开关事先已断开,出线10提供的短路电流仅经过5012开关流入短路点;出线5提供的短路电流直接流入短路点;5011开关需要开断的短路电流是出线5出口短路电流51.81 kA减去出线10提供的短路电流6.79 kA和出线5提供的短路电流1.61 kA,计算结果为43.41 kA。

当1#母线三相短路时,若5011开关并非最后断开,则最后断开的边开关需要开断的短路电流最大,其值为第一串从变电站出串后的母线短路电流,计算后为47.61 kA。若5011开关最后断开,则倒数第二个断开的开关开断的短路电流最大,其值为1#母线短路电流51.81 kA减去出线10提供的短路电流6.79 kA和出线5提供的短路电流1.61 kA,计算结果为43.41 kA。5011开关只需开断两种情况下出线10和出线5提供的短路电流。

2. 拉开边开关短路电流限制方法选取原则

拉开边开关短路电流限制方法的选取原则包括以下四条。第一条:拉开的边开关应选取在分支短路电流最小(或较小)的出线所在串上,串必须完整,拉开的边开关不是该出线边开关;第二条:母线三相短路电流减去该串中另一回出线的分支短路电流后小于开关最大遮断电流;第三

条：由于拉开一个边开关后，临近母线三相短路后，剩余边开关仍将承受母线短路电流，需要根据第一、第二条选取原则，至少拉开另一条母线相连的一个边开关；第四条：如果一个变电站分支短路电流较小的出线（母线三相短路电流减去该出线分支短路电流仍大于或等于开关遮断电流）有 n 条，为限制这些出线出口处的三相短路和流过开关的短路电流，就需要拉停 n 个相对应的边开关。

变电站母线分段选取分析

1. 变电站母线分段运行短路电流限制原理

另一种重要的电网方式调整短路电流限制方法是将变电站母线分段运行。如图 5 所示，其本质是增加一段 500 kV 母线所连电源到另一段 500 kV 母线的电气距离，增大短路阻抗，减小每段母线上的短路电流。

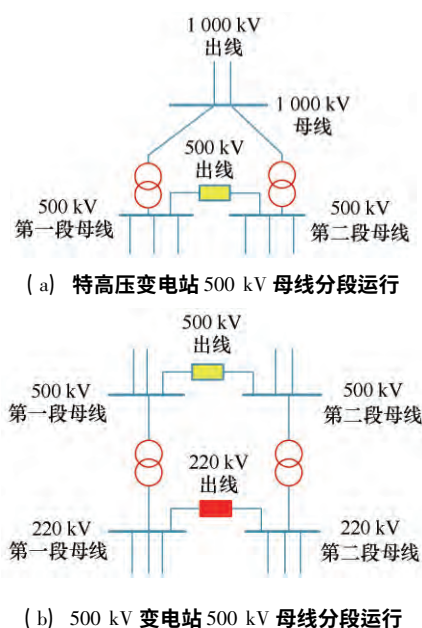


图 5 母线分段短路电流限制方法

由于变电站 500 kV 母线分段运行，500 kV 层面变成两个站，彼此之间完全断开或仅通过 500 kV 环网迂回形成弱连接，电气距离明显增大，在有效限制短路电流的同时，带来以下不利影响。

1) 电网结构严重破坏。明显不同于原有 500 kV 电网结构，潮流变化较大，电网规划设计输电能力可能因此发生较大变化。

2) 影响电网稳定特性。原来紧密联系的电

网结构变得松散，电气距离明显增大，每段母线所连电源之间的暂稳、动稳特性可能发生较大变化。

3) 500 kV 变电站 500 kV 母线分段运行后，220 kV 系统运行方式、稳控策略等也要相应做较大调整，可能会影响电力供应。

2. 母线分段运行短路电流限制方法的适应性

归纳分析，500 kV 母线分段运行短路电流限制方法的适应性概括为三条。第一条：500 kV 母线分段后严重破坏系统安全稳定，产生暂稳或动稳问题的变电站不应分母运行；第二条：500 kV 母线分段后影响地区安全供电的变电站不应分母运行；第三条：500 kV 母线分段后，导致潮流大范围转移，相关线路重载时，不宜分母运行。

结束语

综上所述，各种电网方式调整限制短路电流方法的选取原则总结如下。

1) 如果想尽量减小对电网结构的破坏，充分利用电网规划设计输送能力，可优先考虑拉停变电站中开关或边开关。前提是母线和任一出线出口处短路时流过任一开关的短路电流不超标。

2) 拉停中开关或边开关无法限制短路电流时，可考虑拉停相关线路。前提是不降低系统暂态和动态稳定，对断面热稳限额影响较小。

3) 线路出串往往对电网结构破坏较大，需认真校核正常方式和检修方式下相关线路故障对电网稳定性的破坏和输电能力的影响，谨慎采用。

4) 500 kV 母线分段对电网结构破坏大，每段母线间电气距离增大明显，必须校验动态稳定性。

电力调度部门应根据电网不同结构和不同运行方式，结合上述选取原则及每种电网方式调整短路电流限制方法的适用性，兼顾电网的输送能力和整体稳定性，灵活选取。

参考文献

- [1] 杨杰, 陈希英, 邵建雄. 三峡水电站短路电流水平及限制措施分析 [J]. 电网技术, 1997, 21(7): 17-20.
- [2] 熊炜, 卢宏振. 广东电力系统短路电流水平及抑制措施研究 [J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2002, 31(5): 32-35.

(下转第 26 页)

- 400-404.
- [6] Ning Zhang, Chongqing Kang, Daniel S. Kirschen. planning pumped storage capacity storage for wind power intergration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (2): 393-401.
- [7] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电 - 抽水蓄能联合系统能量转换效益研究 [J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 13-18.
- [8] Javier G G, Rocio M R M, Luz M S, et al. Research on energy shifting benefits of hybrid wind and pumped hydro storage system considering peak - valley electricity price [J]. Power System Technology, 2008, 23 (2): 460-468.
- [9] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (13): 10-17.
- [10] 陈峦, 陈池. 基于旋转备用和出力预测的风电抽水蓄能并网调度策略 [J]. 水力发电, 2011, 37 (12): 65-68.
- [11] 潘文霞, 范永威, 杨威. 风 - 水电联合优化运行分析 [J]. 太阳能学报, 2008, 29 (1): 80-84.
- [12] 静铁岩, 吕泉, 郭琳, 等. 水电 - 风电系统日间联合调峰运行策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (22): 97-104.
- [13] Bueno C, C J A. Technical - economic analysis of wind - powered pumped hydrostorage systems, part II: model application to the island of El Hierro [J]. Solar Energy, 2005, 78 (3): 396-405.
- [14] 胡泽春, 丁华杰, 孔涛. 风电 - 抽水蓄能联合日运行优化调度模型 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (2): 36-41.
- [15] Huajie Ding, Zechun Hu, Yonghua Song. Stochastic optimization of the daily operation of wind farm and pumped - hydro - storage plant [J]. Renewable Energy, 2012 (48): 571-578.
- [16] IBM Corporation. IBM ILOG CPLEX V12.3 Getting started with CPLEX [EB/OL]. [2011 - 05 - 12]. ftp://ftp.software.ibm.com/software/websphere/ilog/docs/optimization/optimization/cplex/ps_gscplex.pdf.
- (收稿日期: 2014-06-10) EA
-
- (上接第 21 页)
- [1] 黄娟娟, 郑英芬. 特高压网架对华中电网短路电流水平的影响分析及限流措施 [J]. 中国电力, 2007, 40 (3): 49-52.
- [2] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500 kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨 [J]. 华东电力, 2006, 34 (7): 55-59.
- [3] 王非, 李群炬. 京津唐电网限制短路电流问题探讨 [J]. 华北电力技术, 2007 (4): 17-19.
- [4] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500 kV 电网短路电流运行方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (7): 104-107.
- [5] 叶幼君, 鲍爱霞, 程云志. 浙江 500 kV 电网短路电流的控制 [J]. 华东电力, 2006, 34 (3): 11-15.
- [6] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31 (10): 42-45.
- [7] 赵彩宏, 田立军, 江世芳. 一种新型故障限流器的拓扑结构及仿真 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (2): 40-44.
- [8] 章良栋, 刘为, 岑文辉, 等. 一种新型短路电流限制器的研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (7): 15-18.
- [9] 陈刚, 江道灼, 吴兆麟. 固态短路电流限流器的研究与发展 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (10): 89-94.
- [10] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 面向超高压电网的故障限流器的应用研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 99-113.
- [11] 郝志杰, 江道灼, 蔡永华. 新型固态故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (8): 50-56.
- [12] 陆建忠, 张啸虎. 加强电网规划, 优化电网结构, 限制短路电流 [J]. 华东电力, 2005, 33 (5): 7-10.
- [13] 何肇. 关于改善华东电网结构、降低短路容量方案的探讨 [J]. 电网技术, 2004, 28 (2): 28-31.
- [14] 张铭. 短路电流限制器技术综述 [J]. 华东电力, 2008, 36 (9): 43-46.
- [15] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500 kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (21): 92-96.
- [16] 李继红, 黄良宝, 徐谦, 等. 一种降低短路电流水平的措施: 母线分裂运行 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (14): 98-101.
- (收稿日期: 2014-02-13) EA