

各种限制电网短路电流措施的应用与发展

韩戈¹, 韩柳², 吴琳¹

(1. 徐州供电公司, 江苏 徐州 221005; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 100761)

摘要: 文章首先介绍了近年来短路电流增大过快给电网带来的一系列危害, 然后从电网结构与变电站两个层面全面分析了各种限制短路电流的措施。电网结构方面的措施包括合理规划电网结构及电源接入方式、发展直流输电等; 变电站方面的措施包括采用高阻抗设备、短路电流限制器等。文章比较其各自的优缺点, 描述各自在实际中的应用及今后的发展方向。最后阐述了两种限制不对称短路电流的措施。

关键词: 短路电流; 不对称短路电流; 限制措施; 电网结构; 变电站

Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current

HAN Ge¹, HAN Liu², WU Lin¹

(1. Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221005, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 100761, China)

Abstract: The paper firstly introduces a series of harm that the short-circuit current's fast increments brings. When viewed from power network composition and electric substation, the methods of limiting short-circuit current are analyzed fully. The methods on network composition include proper power system planning, appropriate power grid connection, and DC transmission etc. The methods on substation include using high-impedance facilities and short-circuit current limiter etc. It discusses their merits and drawbacks, and also describes applied influences & developmental momentum. In the end, two measures to restrict asymmetric short-circuit current are supplied.

Key words: short-circuit current; asymmetric short-circuit current; limiting method; electric power network composition; electric substation

中图分类号: TM89 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0141-04

0 引言

随着电力系统规模不断扩大, 电网逐渐加强, 电力系统中短路电流水平逐年攀升, 部分变电站的220 kV与500 kV母线的短路电流超过50 kA, 甚至直逼63 kA^[1]。由于短路电流是电网导体与设备选择、计算的基础数据, 短路电流的增大过快已成为电力系统规划、设计、运行面临的重大问题。

1 短路电流水平上升对电网带来的危害

短路电流水平逐年攀升带来的危害主要有: 1) 由于短路电流是导体与设备选择的基础数据, 一旦此数据提高, 意味着现有变电站内的大部分导体与设备都需要重新核算, 不满足要求的要予以更换, 不仅造成电网投资的重大浪费, 而且危及电网的安全运行; 2) 对新建变电站, 短路电流过大引起设备选择困难, 而选择高遮断容量的电器设备, 使建设

投资增大; 3) 对通讯的干扰增强, 引起其他行业的投诉增多; 4) 使线路附近及变电站内的接触电压与跨步电压升高, 危及人身安全。

2 限制短路电流水平的措施

短路电流是电力规划部门从事电网规划的主要指标, 是调度部门调整年度运行方式的重要参数。规划与调度部门, 每年都要结合电网发展, 计算电网的短路电流, 针对短路电流超标提出相应的处理方法。

2.1 从电网结构层面限制短路电流水平的措施

目前, 从电网结构层面限制短路电流的主要方法有:

1) 合理规划电网结构。这是控制短路电流的根本措施。电网不断发展的历史从某方面说也是通过不断升高电压等级、对低电压等级进行合理分区的过程。特高压电网形成坚强网架后, 为500 kV电网

优化结构、分区运行创造了条件，将对限制 500 kV 电网的短路电流起到十分重要的作用。从目前 220 kV 电网分区运行解决短路电流的经验看，这种方法十分有效。

2) 发展直流输电。直流输电系统由换流变压器、换流器、直流输电线路等直流设备组成。定电流调节是直流输电系统的基本调节方式，通过换流器触发相位的控制，直流输电系统可以实现快速调节，自动保持电流为定值，避免因直流电流剧烈变化对交直流电网安全运行的影响^[2]。采用直联电网或直流输电对交流系统进行分区，将电网分成相对独立的几个交流系统，避免系统间相互注入短路电流，可起到控制交流电网短路电流的作用。

3) 合理规划电源接入系统方式。电源接入点的选择应充分考虑对系统短路电流水平的影响，注意给电网短路电流水平留有一定的发展空间，发电厂宜以单元式方式接入系统，大电厂间尽可能不要有直接的联络线，大电厂不宜串在环网中运行。500 kV 电网发展初期，新建的较大容量机组宜直接接入 500 kV 系统，有利于降低 220 kV 系统短路电流水平，随着 500 kV 主网架的发展，短路电流水平升高，宜考虑将电源均衡接入 500 kV 和 220 kV 系统，目前我国电网进入特高压电网发展初期，新建特大电源经过论证可考虑直接接入特高压电网。

4) 拉停开关、线路。在不严重影响系统可靠性的前提下，拉停某些开关与线路，可以增大电网的等值阻抗，是抑制短路电流较为便捷的手段。对于 1 个半断路器接线，采用拉开边开关实现站内某串中的 2 条线路通过中间开关直接相连，不进入变电站母线，减少变电站的出线数的方法，本站短路电流下降明显，如图 1 中的串 1。这些方法均是以降低电网运行的可靠性为代价，一般作为临时措施。

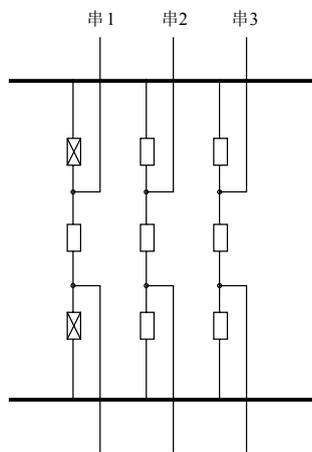


图 1 一个半断路器接线

Fig.1 Breaker and a-half configuration

5) 提高配电网电压等级。目前在我国绝大部分地区将 10 kV 电压作为配电网电压等级，这一电压等级在过去的电力建设与负荷发展过程中发挥了重要作用，但目前已经逐步不适应城市电网的发展，某些省市已开始逐步推广将 20 kV 或 35 kV 作为城市配电网的主要电压。配电网设备在电网中数量最多，分布最广，但是配网设备涉及大量用户，设备管理最不方便，设备选择也比较混乱。为此国家电网公司典型设计中将变电站 10 kV 侧的短路电流控制在 20 kA 或 25 kA^[3]及以下，而国家电网公司企业标准 Q/GDW156-2006《城市电力网规划设计导则》中将变电站 10 kV (20 kV) 侧的短路电流控制在 16 kA 或 20 kA^[4]。随着城市用电负荷的增大，城市电网存在着并正在建设着大量 220 kV 直变 10 kV 的变压器，以 180 或 240 MVA 容量的变压器为例，若不采取任何限制措施，这些变压器 10 kV 侧的短路电流一般超过 25 kA，实际工程中不得不采用高阻抗变压器，或在主变低压侧增加限流电抗器来限制短路电流。将城市配网电压等级由 10 kV 提高到 20 kV 后，在变压器短路阻抗相同的情况下，低压侧短路电流将减少近一半，可以有效地抑制配网短路电流，限制电网中高阻抗变压器及限流电抗器的使用或者减小变压器的阻抗值，从而达到节省变电站建设投资，降低网损的目的。

以某 220 kV 变电站为例，主变容量 180 MVA，220 kV 侧母线三相短路电流为 35 kA。经过计算，低压侧电压分别选用 10 kV 或 20 kV 时，为将短路电流限制到 20 kA 以内，变压器高低短路阻抗 $U_{d(1-3)}\%$ 选用值见表 1。

表 1 主变高低压短路阻抗计算值

Tab.1 The value of transformer's short-circuit impedance between high and low side

主变低压侧电压等级	10 kV	20 kV
主变高低压短路阻抗 $U_{d(1-3)}\%$	48.2%	23.5%

如表 1 所示，低压侧采用 10 kV 电压等级，变电站需要采用高阻抗变压器，而采用 20 kV 电压等级，采用普通阻抗变压器即可，大大节省了变压器投资。

2.2 从变电站层面限制短路电流水平的措施

从变电站层面限制短路电流的主要方法有：

1) 母线分列运行。打开母线分段开关，使变压器分列运行，可以增大系统阻抗，有效降低短路电流水平，该措施实施方便。对于变电站 110 kV、35 kV、10 kV 侧母线，这种方法已经普遍采用。在电网发达地区，220 kV 母线分列运行也不少见。但

对于超高压电网(500 kV 侧)实施该方案,将削弱系统的电气联系,降低电网安全裕度和运行灵活性。

2)高阻抗设备。在暂态稳定已不是主要矛盾的电网,可采用提高设备的阻抗值来控制短路电流,这需要从发、变电各环节同时采取措施才能取得较好效果。

发电设备是短路电流产生的源头,通过采用高阻抗发电机、升压变以及采用单元制接线接入电网,可以有效控制地区的短路电流。但同时也不利于电厂调压和保证送电可靠性。电厂无功是系统中重要的动态无功电源,在电压稳定事故中可以起电压支撑的重要作用。提高电厂接入系统的阻抗值,将会削弱这一功能。

采用高阻抗变压器是控制下一级电网短路电流的有效措施。特制的高阻抗变压器通过改变变压器内部结构可以获得更高阻抗,但一般价格是普通变压器的130%左右^[3]。注意采用高阻抗变压器可以避免增加电抗器设备,减少了检修与故障点。但采用高阻抗变压器后,应配置足够的电容器容量,以补偿高阻抗带来的电压损耗与无功损耗,这又增加了变电站的投资。目前,国内很多厂家制造高阻抗变压器的技术都很成熟,实际运行也很稳定。实践证明采用高阻抗变压器是限制短路电流的一种行之有效的办法。

3)普通限流电抗器。普通串联电抗器将一个固定阻值的电抗器串联入电网,是一种传统的限流技术,运行方式简单、安全可靠,但影响电力系统的潮流分布且增加了无功损耗,对系统的稳定性也有一定影响。串联电抗器一般安装于母线联络处或线路接入处。目前在国内不可控串联电抗器较多应用于中低压电网,超高压电网中尚无应用其限制短路电流的实例,但在国外如巴西、美国、南非的超高压电网中已有一些成功的应用实例^[5]。

4)高遮断容量的开关设备,将现有断路器及配套的电气设备更换为遮断容量更大的设备是应对短路电流过大比较直接的方法。在我国500 kV或220 kV采用50 kA的设备已经相当普遍,63 kA的设备也不少见,在日本和欧洲甚至已经有应用80 kA设备的先例。目前我国某些合资开关厂家都可以制造63 kA的断路器,而且已相当成熟,但该设备造价相对较高,以220 kV断路器为例,63 A的断路器比50 kA断路器约贵6万元左右^[3]。

5)大容量高速开关^[6]。目前,国内某些厂家开发研制出了采用爆炸式快速开断载流桥体与高压限流熔断器、高吸能氧化锌电阻相组合的新型大容量高速开关装置(FSR),该装置具有额定电流大(12

kA)、断流能力强(160 kA)、开断速度快(3 ms内切断故障)等性能。FSR装置可以与断路器串联作为短路开断设备,见图2(a);也可以与电抗器并联,正常运行时将电抗器短接,短路时FSR断开,将电抗器投入以限制短路电流,图2(b)。

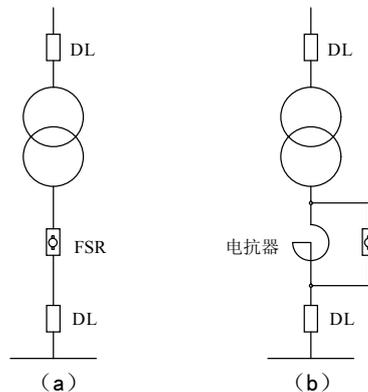


图2 大容量高速开关接线

Fig.2 The wiring diagram of fast switch with large capacity

该装置目前在10 kV及以下较低电压等级的小型电厂或用户工程有应用。但该装置也存在着先天不足,FSR装置中载流桥体断开是依靠炸药爆破完成的,炸药是一次性的,无法进行检测,存在长时间运行后因炸药受潮变质不能及时爆破的后果;而且该装置为新产品,国家尚无检测及运行维护的标准,无法根据标准进行产品验收及维护。

6)新型短路电流限制器^[7]。随着科技的发展,国外出现了新的应用超导与电力电子技术开发的短路电流限制技术:故障电流限制器。超导故障电流限制器和固态故障电流限制器具有独特的限流特性,可以提高输电线路和输电网运行的整体控制能力,是最具有发展前景的短路电流控制技术。目前许多发达国家都投入巨资开展新型故障电流限制器的研究工作,开发出的故障电流限制器已经通过试验有效地限制了短路电流,并开始在变电站进行长时间试验运行,在国内某些地区也开展了示范性的应用^[8]。但目前超导故障限流器主要应用于直流领域,至今没有在交流电网中得到大规模实际应用;固态故障电流限制器采用电力电子元件,虽具有动作速度快,允许动作次数多,可以有效限制短路电流暂态峰值的优点,但由于电子元件容量较低,用于高电压、大电流场合需要多个元件串并联,目前制造难度大,可靠性低,成本高,还有待于进一步研究。

3 限制不对称短路电流水平的措施

由于自耦变压器具有体积小、重量轻、价格便

宜的优点，直接接地的自耦变压器在电网中一度广泛使用，导致 500 kV 变电站的 500 kV 与 220 kV 母线单相接地短路电流超过三相短路电流的现象时有发生。本文 2.1 与 2.2 中的各措施在限制三相短路电流的同时也限制了不对称短路电流。单独针对限制不对称短路电流水平的方法还有：

1) 加装变压器中性点小电抗接地。在变压器中性点加装小电抗施工便利，投资较小，该阻抗值在零序网络中将放大 3 倍，因此在单相短路电流过大而三相短路电流相对较小的场合很有效。小电抗阻值的选取要考虑其自身的通流容量与主变中性点过电压水平，不宜太小也不宜太大，一般为 5~20 Ω^[9]。在 500 kV 变电站中性点加装小电抗对于限制 500 kV 侧 220 kV 侧的单相短路电流有效，但对限制 500 kV 侧的单相短路电流作用不大^[9]。

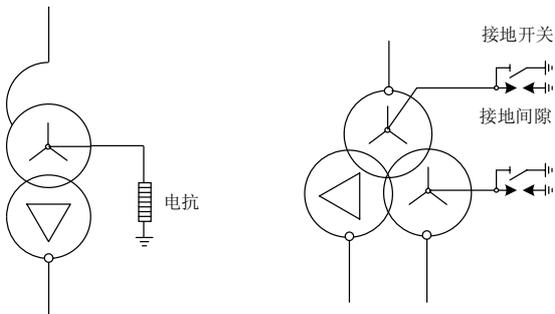


图 3 变压器接地方式

Fig.3 The transformer's grounding mode

2) 电网中适当增加三线圈变压器的数量，三线圈变压器的中性点接地运行方式比自耦变压器更灵活，运行中变压器中性点可以采用直接接地、不接地、经小电抗接地三种方式。在电网一些单相短路电流较大的变电站可选用三线圈变压器，变压器并列运行时，采用一台接地，另一台不接地的局部接地方式来限制单相接地短路电流。

以上措施对于减轻三相短路故障的短路电流无效，但对于限制短路电流的零序分量有明显的效果。

4 结语

合理规划电网结构是限制短路电流的根本措施，特高压交直流电网的建设对电网规划提出新的要求。在现有电网结构基础上，局部适当调整电网运行方式，是抑制短路电流较为便捷的手段。采用传统的高阻抗设备、限流电抗器等，可以较好地限制短路电流，同时投资增加不大，目前在电网中已经广泛应用，但使用时要考虑系统结构与运行方式等限制条件。提高中压配电网的电压等级，在增大输送容量的同时有效降低了配电网的短路电流。采

用高遮断容量的开关设备只是一种适应性的手段，并不是限制手段。新型短路电流限制器与可控式串联电抗器，具有正常运行时不改变系统阻抗，短路时增大系统阻抗的特点，是具有发展前景的短路电流限制技术。对于限制不对称短路电流的零序分量，主要从增大变压器中性点阻抗方面入手，目前多采用加装变压器中性点小电抗与适当增加电网三线圈变压器数量来实现。

总之，短路电流对于电网的规划、设计影响重大，与电网建设的投资关系密切，作为电力工作者应合理使用各种限制电网短路电流措施，以有效抑制目前短路电流水平增长过快的势头。

参考文献

[1] 周坚, 胡宏. 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.
 ZHOU Jian, HU Hong. Short Circuit Current of 500 kV East China Power Grid and Its Limitation[J]. Huadong Power, 2006, 34 (7): 55-59.

[2] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
 ZHAO Wan-jun. The Engineering Technology on High-voltage DC Transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[3] 刘振亚. 国家电网公司变电站典型设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
 LIU Zhen-ya. Typical Design for Substation of State Grid Corporation of China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[4] Q/GDW156-2006. 城市电力网规划设计导则[M]. 北京: 国家电网公司, 2006.
 Q/GDW156-2006. Guide Rule for Urban Electric Power Planning[M]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2006.

[5] SCCL-Short-Circuit Current Limitation with FACTS in High Voltage Systems: Application & Features_V2 PTD H 16. H IPD / Re[Z].

[6] 郎伟明, 等. 大容量高速开关装置的应用[J]. 东北电力技术, 2004, 23 (10): 37-38.
 LANG Wei-ming, et al. The Application of Fast Switch with Large Capacity[J]. Northeast Power Technology, 2004, 23 (10): 37-38.

[7] 江道灼, 等. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (3): 8-19.

(下转第151页 continued on page 151)

- Compensation and DC-link Voltage Controls of a Transformerless Self-charging Dynamic Voltage Restorer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (3): 1511-1518.
- [27] Jurado F. Neural Network Control for Dynamic Voltage Restorer[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51 (3): 727-729.
- [28] Jurado F, Valverde M. Operation of the Dynamic Voltage Restorer with Fuzzy Logic Control[A].in:Proceedings of the 4th International Power Electronics and Motion Control Conference[C].Xi'an(China): 2004: 891-895.
- [29] 雷燕. 基于智能控制的动态电压恢复器的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2007.
LEI Yan. A Study of Dynamic Voltage Restorer Based on Intelligence Control[D]. Xi'an: Xi'an University of Science & Technology, 2007.
- [30] 马振国, 李鹏, 赵保利, 等. DVR 电压波形跟踪无差拍控制方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (3): 13-17.
MA Zhen-guo, LI Peng, ZHAO Bao-li, et al. Voltage Waveform Deadbeat Control of DVR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (3): 13-17.
- [31] 曾江, 刁勤华, 倪以信, 等. 基于最优电压矢量的有源滤波器电流控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (6): 25-31.
ZENG Jiang, DIAO Qin-hua, NI Yi-xin, et al. A Novel Current Control Method for Active Power Filter Based on Optimal Voltage Vector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (6): 25-31.
- [32] 李丽. 基于电压空间矢量脉宽调制的动态电压调节器研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
LI Li. A Study of Dynamic Voltage Restorer Based on Space-voltage Vector Pulse Width Modulation[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [33] Awadh, Blaabjerg F. Transient Performance Improvement of Static Series Compensator by Double Vector Control[A].in: Proceedings of 19th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004.607-613.
- [34] Lee S J, Kim H, Sul S K, et al. A Novel Control Algorithm for Static Series Compensators by Use of PQR Instantaneous Power Theory[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (3): 814-827.
- [35] 吴卫兵, 高天星. 可连续运行的 DVR 装置研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28 (6): 120-122.
WU Wei-bing, GAO Tian-xing. Study on DVR Device with Uninterrupted Operation[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28 (6): 120-122.
- [36] 尹忠东, 支丽欣. 基于高频整流的动态电压恢复器能量提取方式[J]. 电力电子技术, 2005, 39 (6): 67-69.
YIN Zhong-dong, ZHI Li-xin. High Frequency Reversible Rectifier Based Energy Extraction of Dynamic Voltage Restorer[J]. Power Electronics, 2005, 39 (6): 67-69.
- [37] 赵剑峰, 蒋平, 唐国庆. 基于电压型逆变器的可连续运行的动态电压恢复器(UDVR)的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17 (3): 88-92.
ZHAO Jian-feng, JIANG Ping, TANG Guo-qing. Research on VSI-based Uninterrupted Dynamic Voltage Restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17 (3): 88-92.

收稿日期: 2009-01-22; 修回日期: 2009-06-02

作者简介:

王晶(1974-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统建模与仿真, 电能质量的监测、识别与控制方法的研究; E-mail: kmhelen@zjut.edu.cn

徐爱亲(1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统建模与仿真、电能质量的控制方法的研究。

(上接第 144 页 continued from page 144)

- JIANG Dao-zhuo, et al. Research and Development of Short-circuit Current Limiting Technology[J]. Transaction of Power System and Automation, 2007, 19 (3): 8-19.
- [8] 周挺, 张铭. 华东电网 500 kV 短路电流限制器示范工程选点方案[J]. 华东电力, 2008, 36 (9): 43-46.
ZHOU Ting, ZHANG Ming. Siting Schemes for Demonstration Engineering Projects of 500kV Short Circuit Current Limiters in East Chin Power Grid[J]. East China Electric Power, 2008, 36 (9): 43-46.
- [9] 毛雪雁, 宣晓华. 500 kV 自耦变压器中性点小电抗接地的研究[J]. 华东电力, 2005, 33 (5): 26-29.
MAO Xue-yan, XUAN Xiao-hu. 500 kV Autotransformer with Neutral Point Grounded Through Small Reactance Research[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (5): 26-29.

收稿日期: 2009-02-06; 修回日期: 2009-04-21

作者简介:

韩戈(1970-), 男, 江苏徐州人, 工程师, 主要从事电力系统设备管理工作;

韩柳(1975-), 女, 江苏徐州人, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计研究工作; E-mail: hlhanliu@163.com

吴琳(1969-), 女, 江苏徐州人, 讲师, 主要从事电力系统培训教育工作。