



电网短路电流限制措施的研究与应用

摘要

针对短路电流超标的问题,研究分析了包括改变系统运行方式、改善电网结构、采用高阻抗变压器、故障电流限制器等在内的多种短路电流限制措施在电网中的应用情况,并依据短路电流限制措施的仿真,对比提出适应电网实际情况的短路电流限制措施。

关键词

短路电流;限制措施;运行方式

中图分类号 TM732

文献标志码 A

0 引言

随着经济快速发展,作为经济发展重要保障之一的电网结构不断加强.特高压交直流电网的快速发展,500 kV 主干网络日趋成形,220 kV 区域电网联系的逐步紧密,电源点逐渐增多,都使得电网中短路电流水平进一步上升.如不加以合理的规划和管控,将影响到电网的安全运行与发展,同时也将影响到电网发供电能力.因此,如何将短路电流限制在合理的范围内,使其与电网的发展相适应,已经成为电网规划与运行所面临的主要问题。

目前涉及电网限制短路电流措施的研究文献很多,主要从改变系统运行方式^[1-2]、改变电网结构以及短路限制设备应用 3 个方面来限制短路电流。

1) 改变系统运行方式

在实际操作中,改变系统运行方式主要典型措施有线路拉停、线路出串以及母线分列运行等。

相较电网分区运行,将出现短路电流问题的厂站的母线分列运行,是实施条件更为简单、操作更加方便的措施.但是母线分列运行带来的问题也是显而易见的,在母线分列之后,系统的电气联系降低,潮流的流通方式实际上是减少了.这不仅削减了系统的安全裕度,也降低了运行的灵活性和可靠性.同时,母线分列运行还会出现诸如同一厂站的变压器所带负荷不均匀这样的问题。

在电网的实际运行和规划中,从短期来说,最常见的措施还有通过改变电网的接线,如拉停线路,从物理上改变厂站间的电气距离,进而有效降低短路电流过高的厂站.这是较为经济的措施,但是对短路电流的限制效果有限。

2) 改善电网结构

电源的接入、变电站的位置、线路的连接方式等,都在根本上决定了短路电流的大小以及分布.改善电网结构^[3-4]较为典型的措施是电磁环网解环。

500 kV 作为主干网架,对下一级电网,即 220 kV 电网来说起到支撑作用,一旦在 500 kV 原有基础上进行分区运行,将会对 220 kV 电网的规划和运行产生较大的影响.因此在条件允许的情况下,降低 220 kV 区域电网间的联系,将 220~500 kV 电磁环网解环,是最直接的电网分区运行的措施,可以有效地降低电网中的短路电流.但由于

收稿日期 2017-01-10

资助项目 国家自然科学基金(71503136)

作者简介

谢大为,男,硕士,主要研究方向为电网分析和安全管理.dwxie@163.com

刘玉娟(通信作者),女,博士,讲师,主要研究方向为分布式电源和配电网继电保护.yjliu-china@163.com

1 国网安徽省电力公司,合肥,230001

2 南京信息工程大学 江苏省气象能源利用与控制工程技术研究中心,南京,210044

系统可靠性、备用容量、输电线路限额、系统稳定性等多方面的限制,电网解环的条件较为苛刻,需要合理规划并加强 500 kV 电网结构,虽需要巨大投资,但又是更为有效的措施。

3) 短路限制设备应用

从短路限制设备方面^[5]来控制短路电路,主要是通过提高系统的等效阻抗来降低短路电流.传统的措施主要有两类:采用高阻抗变压器和加装限流电抗器。

采用高阻抗变压器的实质是通过增加变压器的阻抗,进而降低短路电流.但这样的措施需要更换全新的变压器,投资较大.同时,由于变压器自身阻抗的增大,会导致损耗以及变压器上压降的增加.加装限流电抗器包括在变压器中性点上加装小电抗接地、线路上加装串联电抗器、母线上加装串联电抗器等措施.虽然这样的措施较更换高阻抗变压器更便宜,但所能起到的限流作用也很有限.和高阻抗变压器一样,这类措施也存在诸如网损增加等弊端。

传统限流措施都有很大的局限性,近年来新的短路电流限制技术得到了快速的发展,比如采用适当的电压调节手段、直流背靠背技术、故障限流器技术以及提高断路器最大遮断容量等方式.直流背靠背技术能够直接有效地降低短路电流,但是换流站成本较高.而故障限流器(Fault Current Limiter, FCL)限流技术,属于柔性交流输电系统(FACTS)中的一员.每类措施均有各自的优缺点,为了达到最优的效果,应根据电网的实际情况,对各类措施进行筛选。

1 电网短路电流水平概况

为了考察可能出现的最严重的短路电流,本文将在某电网不采取分层分区、故障限流器等限流措施下进行分析计算,重点是 500 kV 变电站的 220 kV 母线,并且在考察各变电站时,其均处于全接线状态。

电网内 500 kV 变电站 220 kV 断路器的遮断容量均为 50 kA.考虑到理论计算与实际值存在误差,为了计算的合理性,保留一定的裕度,针对 500 kV 变电站进行短路电流分析时,认为短路电流大于 48 kA 的均为短路电流超标的变电站。

经计算电网 500 kV 各变电站 220 kV 母线短路电流存在超标问题的主要是繁昌站.其短路电流情况如表 1 所示。

从表 1 可以看出对这个 500 kV 变电站,其短路电流主要来源于 500 kV 繁昌#1、#2 主变的注入,即

由 500 kV 层次的电网向 220 kV 母线提供的短路电流较大.除此之外,繁昌站中 220 kV 繁月双线为短路电流注入较大的线路。

表 1 繁昌变电站短路电流组成

Table 1 Structure of short-circuit current in Fanchang substation

组成	三相\单相短路电流/kA	
	2015 年	2016 年
500 kV 繁昌变电站	48.31\50.95	46.30\49.00
繁昌#1 主变	11.77	8.65
繁昌#2 主变	11.90	8.65
繁丹双线	5.16	
繁月双线	6.82	7.67
繁玉双线		4.56
繁南双线		7.81
繁清线	3.33	
繁南线	2.77	
南二-繁昌线		0
繁库线	2.23	1.81
繁盛线	1.88	0
繁董线	2.79	2.82
繁喻线		0.73

2 各限制短路电流措施的应用

2.1 电网结构的变化

本节主要从开断短路电流注入较大的线路来分析各种开断方式下,对短路电流限制的影响.各变电站的开断线路和相应的短路电流限制效果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,通过开断线路来改变电网结构,效果较好的情况下可以将短路电流降低 10%~20%左右。

表 2 繁昌变电站电网结构变化的影响

Table 2 Effects of grid structure change in Fanchang substation

年份	方案	短路电流限制措施	三相短路电流/kA	单相短路电流/kA	短路电流下降的效果/% (三相\单相)
2015	1	开断繁月双线	43.12	42.90	10.76\15.79
	2	开断繁丹双线	45.04	44.48	6.77\12.70
	3	开断铜陵-库山+港西-火龙岗	45.93	44.48	4.93\12.70
2016	1	开断繁月双线	40.20	42.97	13.17\12.31
	2	开断繁南双线	41.22	43.47	10.97\11.29
	3	开断繁月双线+南清单线	34.52	37.97	25.44\22.51

对于 500 kV 繁昌站来说,各方案均能将短路电流限制在要求以内,如果考虑采用方案后的稳定性问题,500 kV 繁昌站可以在 2015、2016 年均采用方案 1 来达到最佳的限流效果。

2.2 改变系统运行方式

本节主要采用母线分列运行来分析其对短路电流限制的影响.变电站采用 220 kV 母线分列运行之后的短路电流限制效果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,变电站采用母线分列运行可以很好地限制短路电流的大小,最多可以降低 50%左右。

表 3 繁昌站 220 kV 母线分裂运行短路电流情况

Table 3 Change of short-circuit current after 220 kV bus splitting operation in Fanchang substation

年份	短路电流限制措施	三相短路电流/kA	单相短路电流/kA	短路电流下降的效果/% (三相\单相)
2015	I、II 母线分裂运行	母线 I : 21.80	母线 I : 22.23	母线 I : 51.98\53.04
		母线 II : 27.03	母线 II : 28.88	母线 II : 40.48\38.99
2016	I、II 母线分裂运行	母线 I : 38.06	母线 I : 27.33	母线 I : 17.80\44.22
		母线 II : 33.89	母线 II : 22.36	母线 II : 26.80\54.67

2.3 设备应用

本节主要包括采用高阻抗主变和限流电抗器两类措施对短路电流的影响.变电站短路电流情况如表 4 所示。

1) 采用高阻抗变压器

从表 4 中可以看出,将 500 kV 变电站的 2 台主变换成 18%高阻抗变压器之后,限流效果非常有限,繁昌站仅有 10%左右。

表 4 繁昌站主变采用高阻抗变压器短路电流情况

Table 4 Change of short-circuit current after use of high impedance transformer in Fanchang substation

年份	短路电流限制措施	三相短路电流/kA	单相短路电流/kA	短路电流下降的效果/% (三相\单相)
2015	采用 18%高阻抗变压器	43.00	47.50	10.02\7.33
2016	采用 18%高阻抗变压器	41.94	45.65	9.42\6.84

2) 加装限流电抗器

从表 5 可以看出,在变电站的出线上加装 20 Ω 的串抗,无论是在一条或者多条线路上加装,效果都一般,短路电流最多降低 10%.为了减少对保护整定、运行稳定性的影响,在 220 kV 母联上仅加装 5 Ω 串抗,但效果明显,短路电流降低最低为 20%,最高可达 52%。

表 5 繁昌站各位置加装限流电抗器短路电流情况

Table 5 Change of short-circuit current after add of current limiting reactor in Fanchang substation

年份	方案	短路电流限制措施	三相短路电流/kA	单相短路电流/kA	短路电流下降的效果/% (三相\单相)
2015	1	繁清线、繁南线 分别装 20 Ω 串抗	46.964	46.718	2.79\8.3
	2	繁月双线加装 20 Ω 串抗	46.170	46.195	4.44\9.33
	3	繁丹双线加装 20 Ω 串抗	47.049	46.327	2.61\9.07
	4	220 kV, I、II 母联加装 5 Ω 串抗	母线 I : 33.01 母线 II : 36.75	母线 I : 31.34 母线 II : 37.17	母线 I : 27.30\33.80 母线 II : 19.07\21.49
2016	1	繁董线、繁库线 以及繁喻线 分别加装 20 Ω 串抗	45.21	47.27	2.35\3.53
	2	繁月双线加装 20 Ω 串抗	42.69	45.23	7.80\7.69
	3	繁月双线、南清 单线分别加装 20 Ω 串抗	40.37	43.14	12.81\11.96
	4	220 kV, I、II 母联间加装 5 Ω 串抗	母线 I : 40.92 母线 II : 37.89	母线 I : 29.94 母线 II : 26.20	母线 I : 11.62\38.90 母线 II : 18.16\46.53

3) 加装故障电流限制器

FCL 的基本原理是在串联电抗器限流的基础上发展而来的,它同 FACTS 中的其他控制器一样,依靠电力电子技术对其相应的传统技术进行改进而来.它克服了传统串联电抗器限流的缺点,具体模型可抽象为图 1;在系统正常运行时,开关装置处于闭合状态,FCL 无电抗投入,只在系统故障时开关快速断开投入电抗器进行限流^[6-7]。

如图 2 所示,具体的 FCL 主要有以下 4 部分组成:快速故障电流探测元件、快速切换开关、限流电抗器以及过电压保护元件。

由于故障电流限制器在故障时限制短路电流效

果与限流电抗器相似,因此在各变电站母联处加装故障电流限制器的效果可参照上述加装限流电抗器后短路电流降低的数值.

在母联开关 2800、2600 处加装故障电流限制器,如图 3 所示.

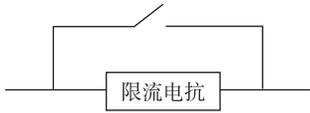


图 1 FCL 基本原理

Fig. 1 Basic principle of fault current limiter

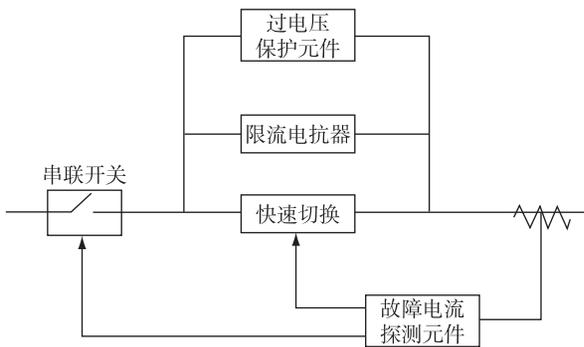


图 2 故障限流器原理

Fig. 2 Schematic diagram of fault current limiter

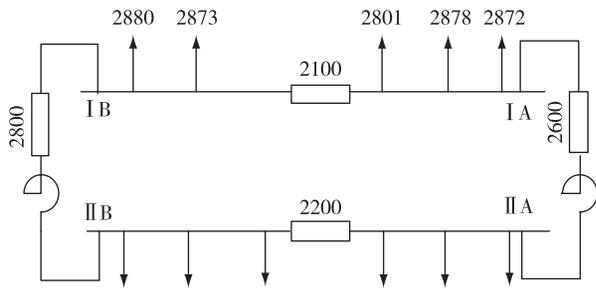


图 3 繁昌站 220 kV 母线接线示意

Fig. 3 Bus wiring of 220 kV Fanchang substation

根据上述加情况,限制效果如表 6 所示.

表 6 变电站短路电流限制方案效果

Table 6 Effect of short-circuit current restriction scheme

变电站名	年份	全接线未 加装电流/kA	分母短路电流/kA	
			母线 I	母线 II
繁昌站	2015	48.31	36.51	40.06
	2016	46.30	38.08	33.91

根据表 6 所示,从分母短路电流的限流效果来看,繁昌站无论是 2015 年还是 2016 年,在 2600 和

2800 开关处加装设备来达到限制的效果较好.

为了保证母线上以及各出线始端三相短路故障时,距离故障点最近的故障电流限制器能够可靠动作,其动作电流 I_{LIM} 应该小于各临近故障情况下流过故障电流限制器的瞬时短路电流(前 20 周波)最大幅值中的最小值(一对故障电流限制器的取值是相同的).根据 2015 年繁昌变 220 kV 各母线分段上以及出线始端的短路电流分析结果比较可知,当 IB 母线三相短路时,流过故障电流限制器的最大瞬时值达到 12 kA,为各类故障中的最小值,如图 4 所示(1 周波为 20 ms),即故障电流限制器的动作电流 I_{LIM} 应小于 12 kA.

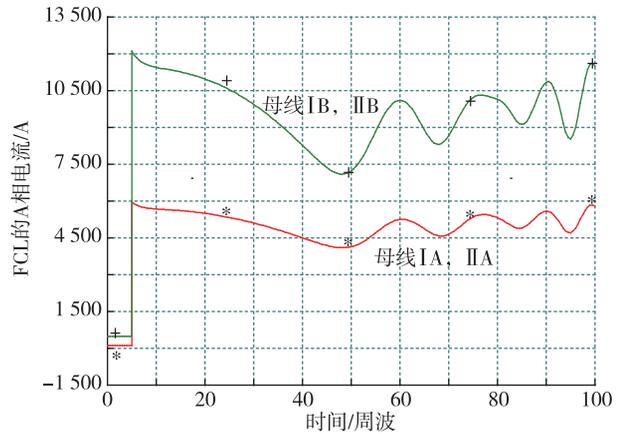


图 4 母线 II B 三相短路时流经 FCL 上电流

Fig. 4 FCL current in a three-phase short-circuit on bus II B

通过图 5 可知,以 IA 母线为例,在故障电流限制器投入之后,母线上的短路电流较电抗器没有投入的情况下得到了更好的限制,其电流幅值在投入之后更低,振荡更小.

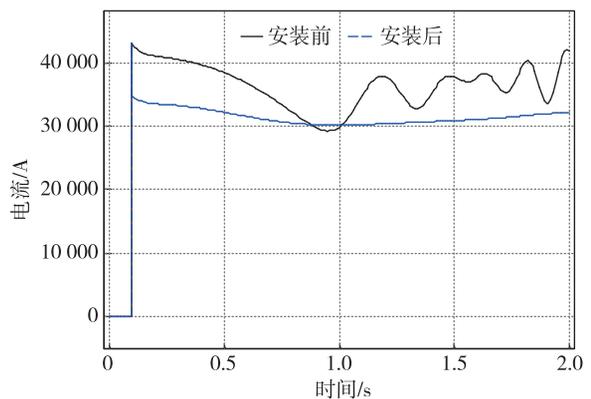


图 5 繁昌站 220 kV 侧短路电流比较

Fig. 5 Comparison of 220 kV short-circuit current in Fanchang substation

繁昌站母联加装故障电流限制器后,根据上述分析和定值分析结果,除母线或相邻线路近母线处故障外,故障电流限制器一般不动作.下面主要从最严重的母线短路故障来分析故障电流限制器对暂态稳定的影响,仍然以 IA 母线短路为例,如图 6 所示.

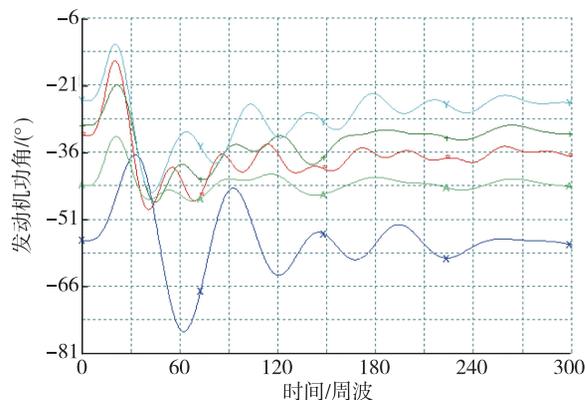


图 6 切除所有出线后附近各主要电厂功角曲线

Fig. 6 Main generator angle curves after all lines shedding

如图 6 所示,故障后功角曲线可以看出,在繁昌站附近各主要电厂中,大幅振荡在 120 周波前就已经消失,所有电厂均表现为减幅振荡,故加装故障电流限制器,且在母线故障后准确投入的情况下,未发生任何失稳现象.

3 各方案比较

上述 500 kV 繁昌站的各限流措施均能将繁昌站 220 kV 母线的短路电流降低至 48 kA 以下,符合限流的要求.对比来看,采用 220 kV 母线分列运行可以达到最佳的限流效果,但是对系统运行可靠性的影响最大.在各方案均能达到限流要求的情况下,不予考虑.如若不考虑电网新增设备和投资,仅利用现有资源,断开 220 kV 繁月双线已可将短路电流限制在 48 kA 以下.而如若为了更好的限流效果,可采用加装限流电抗器的方案.相较传统的串联电抗,故障电流限制器在系统正常运行情况下体现的是零阻抗,不会对系统的稳定性产生影响.总体来看,在母联上加装故障电流限制器,可以在不影响母线运行稳定性的前提下,很好地控制母线上的短路电流,达到良好的限流效果.但是,电力电子设备的投资和运行可靠性问题,都要在实际运行中加以综合考虑.

4 总结与展望

本文以实际电网数据为基础,针对理论计算所

发现的问题,以短路电流最优控制为导向提出了一些限流方案并做了相关比较分析,可以为调度运行和规划部门提供一些有益的参考.

实际短路电流控制措施,除了要考虑短路电流控制效果,还需综合考虑电网安全性、供电可靠性、运行方式灵活性、运行经济性等因素,对于电网短路电流超标问题的应对既需要理论上的进一步研究,也需结合实际电网运行情况具体分析.

参考文献

References

- [1] 许汉平,徐敬友,李继升.500 kV 变电站限制短路电流措施研究[J].电气应用,2014,33(16):68-72
XU Hanping, XU Jingyou, LI Jisheng. Study on measures to limit short-circuit current in 500 kV substation [J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(16):68-72
- [2] 武守远,荆平,戴朝波,等.故障电流限制技术及其新进展[J].电网技术,2008,32(24):23-32
WU Shouyuan, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress [J]. Power System Technology, 2008(24):23-32
- [3] 徐贤,丁涛,万秋兰.限制短路电流的 220 kV 电网分区优化[J].电力系统自动化,2009,33(22):98-101
XU Xian, DING Tao, WAN Qiulan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22):98-101
- [4] 阮前途.上海电网短路电流控制的现状与对策[J].电网技术,2005,29(2):78-83
RUAN Qiantu. Present situation of short circuit current control in Shanghai power grid and countermeasures [J]. Power System Technology, 2005, 29(2):78-83
- [5] 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
LU Jianzhong, ZHANG Xiaohu. Idea on grid planning for short-circuit current limitation [J]. East China Electric Power, 2005, 33(5):7-10
- [6] 庄侃沁,胡宏,励刚,等.控制和降低短路电流水平措施在华东电网的应用[J].华东电力,2005,33(12):29-31
ZHUANG Kanqin, HU Hong, LI Gang, et al. Measures to control and reduce short-circuit current in East China power grid [J]. East China Electric Power, 2005, 33(12):29-31
- [7] 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
YUAN Juan, LIU Wenying, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China power grid [J]. Power System Technology, 2007, 31(10):42-45

Short circuit current limiting measures in power grid system

XIE Dawei¹ LIU Yujuan² LEI Ting¹

1 State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230001

2 Jiangsu Engineering Research Center on Meteorological Energy Using and Control,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract To address the problem of excessive short-circuit current in power grid system, we analyzed the application of various short-circuit current limiting measures, including switches in system operating modes, improvement in the power grid structure, use of high impedance transformer, add of fault current limiter. Based on simulation and comparison of short-circuit current limiting measures, this paper puts forward the most reasonable short circuit current restrictive measures according to the actual situation of the power grid.

Key words short-circuit current; limiting measures; operating modes