

故障电流限制器在安徽省电网中的应用研究

以2016年安徽省电网规划运行数据为基础,针对安徽省电网短路电流超标的变电站,研究分析了故障电流限制器(Fault Current Limiter, FCL)在相关变电站配置的可行性及参数优化设置问题,并进一步通过仿真试验,研究了故障电流限制器对安徽电网稳态以及暂态安全稳定的影响。

林哲敏¹ 张旭昶¹ 汤伟² 毛荀¹/1.安徽省电力公司电力科学研究院
2.安徽省电力公司调度控制中心



林哲敏/工程师

随着芜湖、淮南特高压变电站的投运,500 kV主干网络的日趋成形,220 kV区域电网联系的逐步紧密以及用电负荷的持续增长,导致安徽省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,将影响到安徽电网的安全运行与发展,同时也将制约安徽电网向华东其他地区的输送电能力。

传统的限流措施在限制短路电流的同时,或改变了系统的运行方式,或改变了电网的网架,或提高了设备的性能,这些都是以降低系统安全性、增加系统正常运行损耗为代价,对电网运行有一定的负面影响^[1-3]。近年来,故障电流限制器(以下简称FCL)相关技术的使用和发展为限制短路电流提供了新的途径^[4-5]。

关键词/Keywords

短路电流 ·
故障电流限制器(FCL) ·
潮流分析 ·
暂态稳定 ·

FCL一般串联接入系统中,在正常运行情况下其综合阻抗基本为0,不影响系统的正常运行。而在发生短路故障时,FCL能迅速地增加其综合阻抗,起到限制短路电流的作用,减轻断路器的开断负担。FCL根据其原理,主要有串联谐振型故障电流限制器、超导限流器、PTC限流器和液态金属故障电流限制器等。目前技术上比较成熟的是串联

谐振型故障电流限制器,其基本原理可简化为如图1所示^[6]。FCL的开关是常开开关,在系统正常运行情况下处于打开状态,因电抗器和电容器在工频下的等效阻抗大小相同,FCL的综合阻抗为0;系统出现故障时,开关迅速闭合,电容器组被旁路,电抗器投入使用。

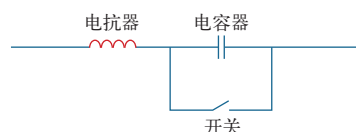


图1 串联谐振型FCL原理图

安徽省电网短路电流水平概况

研究主要针对安徽省电网500 kV变电站220 kV母线的短路电流水平。省内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,认为220 kV母线在全接线情况下,短路电流大于48 kA的均为短路电流超标的变电站^[7]。

以2016年安徽省电网夏季高峰方式下的规划数据为基础,使用BPA进行计算分析,肥西变电站为超标变电站,其短路电流情况如表1所示。

表1 肥西变电站短路电流

220 kV母线 三相短路电流/kA	220 kV母线 单相短路电流/kA
61.05	60.33

通过表1可以看出,肥西变电站的单相、三相短路电流远超过其断路器的遮断容量。而通过仿真计算,传统的短路电流限制措施并不能很好地解决肥西变电站的三相短路电流超标问题。因此,

可以考虑在肥西变电站加装FCL，以限制其三相短路电流。下面以肥西变电站使用串联谐振型FCL为例，讨论FCL的设置问题。

FCL加装地点选择

由于FCL对短路电流的限制效果与限流电抗器相似。而通过对肥西变电站220 kV母线上各出线加装限流电抗器方案的仿真可以发现，在线路上加装限流电抗器的限流效果有限，同时会导致诸多N-1、N-2问题，对系统运行的稳定性影响较大。因此，需要考虑在母联上加装FCL。

肥西变电站220 kV母线采用的是双母双分段结构，其母线接线如图2所示。考虑到保护等参数整定问题，这里采用加装成对FCL的方案，主要包括：方案A为在A、B分段开关2100、2200处加装；方案B为在I、II母联开关2600、2800处加装。

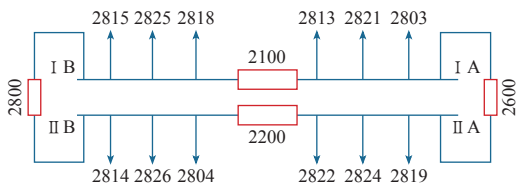


图2 肥西变电站220 kV母线接线示意图

考虑限流效果以及电抗器过大会对系统暂态稳定造成影响等因素，选择加装电抗为8 Ω的FCL。根据加装方案A和方案B，分别计算两方案三相短路电流在FCL电抗器投入情况下的限制效果，如表2所示。

表2 500 kV肥西变电站短路电流限制方案效果

方案	分母三相短路电流/kA			
	I A母线	II A母线	I B母线	II B母线
A	42.15	42.14	47.95	47.96
B	51.29	51.31	51.28	51.33

从表2可以看出，肥西变电站采取方案A，即在A、B分段开关2100、2200处加装FCL，可获得最佳的限流效果。

FCL相关参数的选择

FCL中诸多参数的选择，会对系统暂态产生影响。以BPA中FCL的模型为例，主要有

动作电流（ILIM）、旁路开关动作时间（T_BREAK）、恢复电流（I_RETURN）和恢复时间间隔（T_RETURN）及持续时间等参数，其中影响较大的是动作电流（ILIM）和恢复电流（I_RETURN）。

(1) 额定电流IN

通过对进出线额定电流的粗略计算，流过FCL的额定电流约为800 A，考虑一定的裕度，设定FCL的额定电流为1 kA。

(2) 动作电流ILIM

在母线或出线始端出现三相短路的情况下，FCL应能够可靠动作，并限制短路故障后瞬时短路电流的第一个峰值。因此，FCL的动作电流ILIM的定值应小于其动作范围内各种三相短路故障后流过FCL短路电流第一个峰值iCpeak(t)中的最小值（一对FCL的取值是相同的），即ILIM < min[iCpeak(t)]，这样可以确保FCL对其动作范围内的每一个三相短路故障都有反应。

利用BPA进行暂态仿真，分别在I A、II A、I B和II B母线以及各出线始端靠近母线处设置三相永久性短路故障，故障起始于仿真开始后的第5个周波。通过对比发现，II B母线上出现三相短路故障后，流过临近FCL（2200分段开关处）的短路电流第一个峰值最小。如图3所示，约为15.8 kA，即FCL的动作电流ILIM应小于15.8 kA。

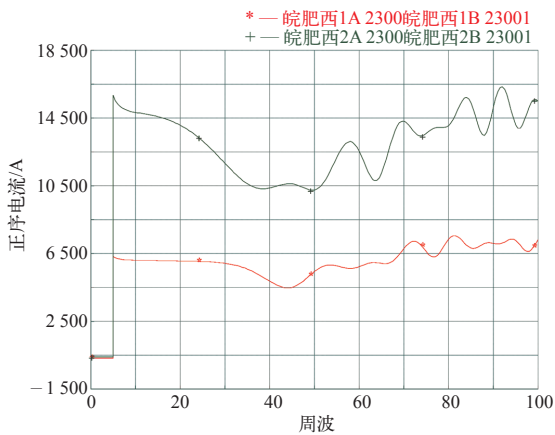


图3 IIB母线三相短路故障，流过FCL的短路电流

同时，在母线各出线对侧三相短路故障后，FCL应可靠不动作。220 kV线路故障的切除时间取保守数值为120 ms左右^[8]，这就要求FCL的动作电

流 I_{LIM} 整定避开各出线对侧短路后,在6个周波内流经临近FCL的故障短路电流峰值 $i_{Fpeak}(t)$,即 $I_{LIM} > \max[i_{Fpeak}(t)]$ 。

在各出线对侧设置三相永久短路故障,并对仿真结果可知,220 kV肥莲2线(接于ⅡA母线)的莲花变电站侧三相短路时,流过临近FCL(2200分段开关处)的瞬时短路电流的峰值最大。如图4所示,约为13.1 kA,即FCL的动作电流 I_{LIM} 应大于13.1 kA。

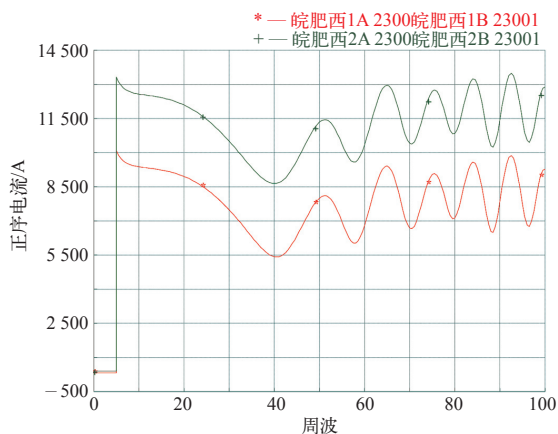


图4 肥莲2线莲花变电站侧三相短路,流经FCL的短路电流

综上所述,为了保证FCL的准确动作,其动作电流 I_{LIM} 应介于13.1~15.8 kA之间,仿真中取值14 kA。需要注意的是,实际应用中还需考虑动作电流阈值与故障电流变化率配合的问题^[9],BPA中并没有涉及。

(3) 恢复电流 I_{RETURN}

为保证FCL在故障切除后能准确恢复,不影响系统的正常运行,最小恢复电流的定值应小于电抗器投入的情况下各类故障切除后以及系统恢复正常运行时,流过两个FCL电流中的较小值。以2016年肥西变电站的情况为例,系统正常运行且电抗器投入的情况下,流过FCL的稳态电流最小,且两FCL差别不大,约为0.05 kA。考虑一定的裕度,将最小恢复电流取为保守值0.01 kA。

同时为保证FCL的电抗器在故障期间可靠投入,恢复电流的最大值应小于母线以及各出线始端三相短路且电抗器投入时,流过FCL的最小电流。对于2016年肥西变电站的情况,最小电流出现在220 kV肥竹1线(接于ⅠB母线)始端三相短

路时。流过临近FCL(2100分段开关处)的电流最小约为4.2 kA。考虑一定的裕度,将最大恢复电流取保守值为3.5 kA。

综上所述,对于2016年肥西变电站的情况,应在流经FCL的电流介于0.01~3.5 kA之间时,开始启动恢复动作。

FCL动作情况及影响

现以ⅡA母线三相短路故障为例,分析FCL对系统的影响以及在故障后的动作情况。

(1) FCL的限流效果

设置在仿真开始后的第5个周波ⅡA母线上出现三相短路故障,在保护没有动作切除故障的前提下,对比FCL动作(电抗器投入)和没有动作(电抗器未投入)的短路电流,如图5所示。通过FCL动作和没有动作情况的对比可以看出,ⅡA母线上的短路电流在FCL动作后得到了较好的限制。其短路电流峰值在FCL的电抗器投入后由原来的50 kA以上降低到40 kA以下,同时短路电流的振荡更小,更平稳。

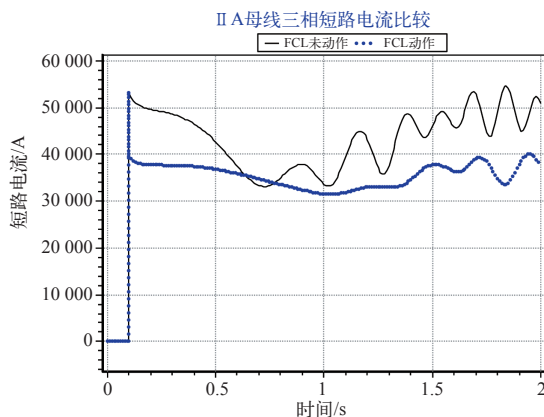


图5 IIA母线上FCL动作与未动作比较

(2) FCL对暂态的影响

设置在故障出现后的两个周波内,即第7个周波自动保护装置切除ⅡA母线上所有出线,期间FCL的电抗器处于投入状态。肥西变电站附近以及其他省内主要机组的功角曲线摆动情况如图6所示。其中合肥发电厂机组故障后振荡幅度较大,但大幅振荡在120个周波前就已经消失。所有发电厂均表现为减幅振荡,故加装FCL且在母线故障后

准确投入的情况下,未发生任何失稳现象,没有影响系统的暂态稳定。

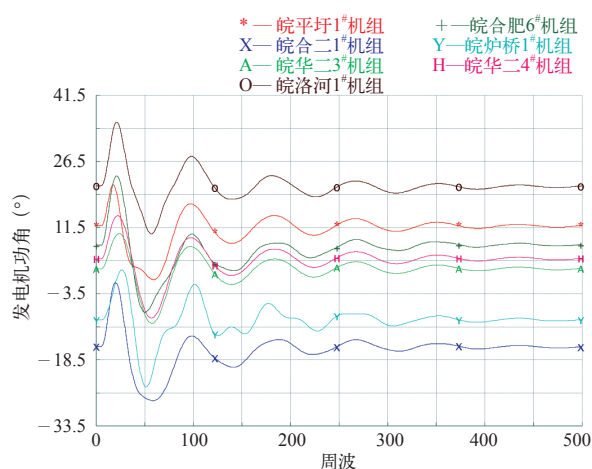


图6 220 kV IIA母线三相短路,切除所有出线

(3) FCL的电抗变化

设定在FCL动作,投入电抗器1.5 s(75个周波)之后开始判断是否恢复。同时,恢复判断的持续时间为两个周波,即当电流在恢复范围内,并持续两个周波后,FCL开关动作恢复零阻抗状态。在三相短路故障出现后,FCL旁路开关闭合,将电容器短路,投入电抗器,使得FCL的各相电抗从0上升到0.015(pu);之后保护装置动作,跳开IIA母线上所有出线,切除故障;在FCL动作的75个周波之后,即在仿真开始后第80个周波,FCL开始判断是否恢复。由于此时FCL上几乎没有电流,符合恢复条件,判断持续两个周波后,在第82个周波旁路开关打开,FCL重新恢复零阻抗状态。需要注意的是,由于FCL的实际开关动作时间迅速,这里没有计及开关的闭合和断开时间。

结束语

通过以上针对肥西变电站220 kV母线上加装FCL的仿真试验可以看出,在FCL的相关参数相互配合的基础上,在其动作范围内出现三相短路故障后,FCL能准确地动作,将电抗器投入并保持投入状态直至达到恢复条件。满足恢复条件后,FCL也能准确地恢复零阻抗状态。由于FCL

在系统故障过程中呈现抗性,可以有效地降低母线上三相短路电流,将短路电流限制在断路器开断能力范围内。仿真结果表明,FCL的安装并未对系统的暂态稳定产生负面影响。总体来看,为应对肥西变电站220 kV母线短路电流超标的问题,在其母线分段开关处加装FCL可以在不影响母线运行稳定性的前提下,很好地限制母线上的短路电流。

参考文献

- [1] 胡杨宇,李冬梅,孙素琴,等.短路电流限制器应用于河南电网可行性分析[J].河南电力,2008(2):22-24.
- [2] 庄侃沁,张旭航,杨增辉,等.超高压电网故障电流限制器在RTDS上的仿真试验研究[J].华东电力,2011,39(1):56-60.
- [3] 杨国庆,祝瑞金,余颖辉,等.华东电网500 kV故障电流限制器应用研究[J].华东电力,2008,36(11):22-25.
- [4] 蒋跃强,鲍伟,吴建坤.超高压电网故障电流限制器在电网中的应用评价[J].华东电力,2011,39(1):49-51.
- [5] 郑健超.故障电流限制器发展现状与应用前景[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5140-5148.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王子琦,付红军,蒋宜国,等.河南电网220 kV开关故障切除时间研究[J].电力系统装备,2004(4):70-71.
- [9] 甘斌,张全明.故障电流限制器在500 kV变电站的应用[J].电力自动化设备,2011,31(6):131-135.

(收稿日期:2015-05-07) EA