

华东 500 kV 电网短路电流情况的调查

刘兆林¹, 殷敏莉²

(1. 华东电网有限公司, 上海 20000; 2. 华东电力试验研究院有限公司, 上海 200177)

摘要: 为了了解系统在短路故障时短路电流的表现, 笔者调查了近几年来华东 500 kV 电网故障中的短路电流情况, 对收集到的短路电流数据和波形进行了统计分析, 所得到的分析结果如系统时间常数、短路电流幅值、故障性质等可供今后规划系统发展、开关设备选型、安全运行和继电保护等专业参考。

关键词: 短路电流; 时间常数; 故障性质

中图分类号: TM51

文献标志码: B

文章编号: 1001-1609(2008)03-0221-04

Analysis of Short-current Failures of the 500 kV Power System in East China Grid

LIU Zhao-lin¹, YIN Min-li²

(1. East China Grid Co. Ltd., Shanghai 200002, China;

2. East China Power Test & Research Institute, Shanghai 200177, China)

Abstract: In order to understand the performance of short-circuit at fault in system, this paper investigated the short-current failures of the 500 kV power system in East China in recent years, statistically analyzed the short-currents and waveforms, and obtained such parameters as time constant of system, amplitude of short-current, and failure property. The results can provide references for system plan, switchgear selection, safe operation, and relay protection.

Key words: short-current; time constant; failure property

0 引言

华东 500 kV 电网自 1987 年中投入运行, 至 2006 年底系统规模从当时的 3 750 MV·A 变电容量、7 个变电站和 7 条线路发展到至今的 89 650 MV·A 变电容量、60 个变电站(开关站)和 202 条线路, 管辖地域达苏、浙、皖、闽省和上海市, 已成为国内超大容量电网之一, 在规模上也接近欧美及日本的大电网。由于地处我国东部沿海地区, 经济发达, 用电量增长显著, 为适应这种快速发展, 500 kV 系统在负荷中心区域已形成了双环网结构, 同时还有 5 条线路接受自山西和华中电网的区外来电。一个大系统在故障中的表现历来是人们所关注的问题, CIGRE 为此也曾做过几次调查, 笔者根据对近年来系统中短路故障情况的调查, 统计分析了短路电流及相关的一些参量数据, 以期能在该领域反映出一些系统发展后的影响。

1 故障中的短路电流情况

为了了解系统在短路故障时短路电流的表现,

笔者收集了 2000~2005 年华东电网调度中心所记录到的大部分系统短路故障情况, 根据事故记录和故障录波, 分别对故障时的系统时间常数、短路电流水平和持续时间进行了统计分析。

1.1 系统时间常数

系统时间常数关系到短路电流中直流分量的衰减水平, 且与断路器开断性能密切相关。系统发生短路后, 直流分量按照指数函数衰减, 测量短路电流的波形可以计算出时间常数^[1], 其方法可参见图 1。

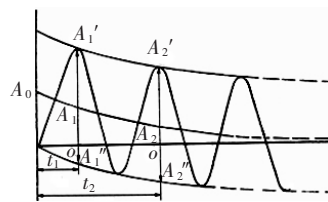


图 1 时间常数的测量及计算方法

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(A_2/A_1)}$$

由于时间常数与短路发生地所处的系统具体结构参数有关, 如线路参数、系统短路阻抗、短路时的系统运行方式等, 实际上得出的是一个时间范围, 为便于分析, 表 1 给出了经过统计处理的计算结果, 即

收稿日期: 2007-06-06; 修回日期: 2007-11-23

作者简介: 刘兆林(1953-), 男, 高级工程师, 从事输变电及高压电器专业技术管理和研究工作。

以落入每个时间区间的次数来表示。

表 1 系统时间常数的分布

直流分量衰减时间/ms	统计次数	所占比例 /%
10~20	29	16.29
20~30	49	27.53
30~40	51	28.65
40~50	27	15.17
50~60	14	7.87
>60	8	4.49
合计	178	100

因故障录波器记录有误或保护通道等原因,按上述方法共量取了 184 个短路电流波形,其中直流分量衰减时间小于 10 ms 的有 3 次,分别为 9.58、9.96、9.0 ms;从波形上看短路电流中几乎就没有什么衰减,而故障地点也有发生在距电源点不远的地方,对此现象还需进一步研究分析,故暂舍弃未计;直流分量衰减时间大于 60 ms 的有 11 次,剔除可能因测量原因引起波形畸变的 3 次,其时间分布在 60~69.4 ms 之间;可以认为有效的数据是 178 个。

需要说明的是因绝大部分故障是单相故障,多相故障时的系统时间常数因数据偏少未进行比较分析,两者的区别是否会有很大的差异尚待再研究。

1.2 短路电流水平

根据已收集到的数据,共分析了 258 个短路电

流波形(其中包括部分一次线路故障中两份记录的数据),表 2 给出了对这些数据分析后的统计结果,短路电流在 50~60 kA 范围中仅有 1 次(电流值为 58.34 kA),需要说明的是收集到的故障电流波形有几次由于受测量二次回路饱和、截波的影响无法反映出幅值,为估计其可能出现的幅值,对这些波形作包络线延长处理,得出的是近似的幅值。另因早些年故障录波分别使用几种仪器,在进行数据分析时有差异,为统一起见,尽可能采用同一型号的录波器记录数据,结果就出现了 2000~2003 年的数据明显偏少,实际上的故障次数与后两年的水平差不多。图 2 给出了几张典型的短路电流波形。

表 2 短路电流值的统计分布(短路电流为有效值)

短路电流/kA	统计次数	所占比例 /%
<10	151	58.53
10~20	70	27.13
20~30	24	9.30
30~40	8	3.10
40~50	4	1.55
50~60	1	0.39
合计	258	100

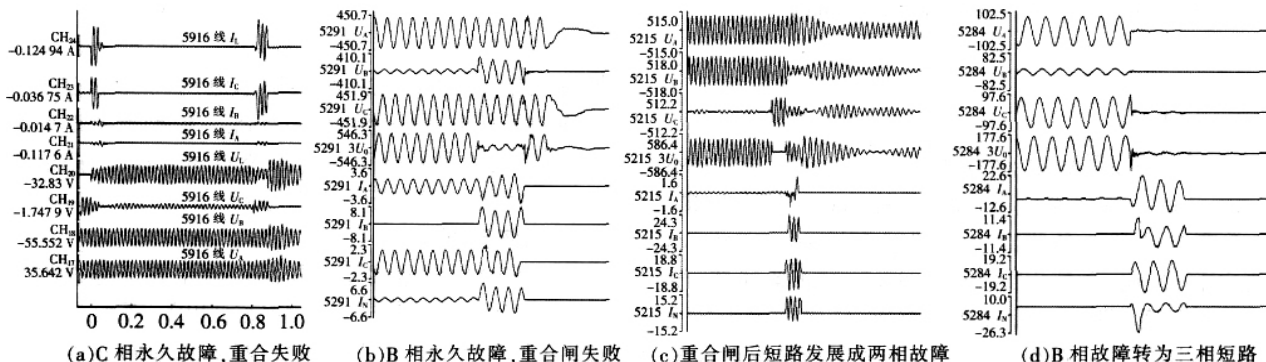


图 2 典型的短路电流波形

从表 2 中数据可看出,约 95%的短路故障其短路电流值小于 30 kA,而其中有 58.53%小于 10 kA,该结论与文[2]相似,这也意味着系统中实际出现的短路电流要远小于断路器的额定开断电流,毕竟在系统大方式运行下出现短路的情况还是一个小概率事件。

此外从波形上看,有些短路电流值在被开断前的半个周波内出现了明显的增加,结合故障性质进行分析发现此现象多为线路故障情况,有可能是开始时故障为弧光接地,不稳定的弧道电阻使得短路电流难以在第一个峰值就达到最大值,随着故障的发展,弧光接地转换成金属接地,弧电阻一下子减小,使得短路电流增加。

1.3 短路电流持续时间

从系统专业的角度上看,短路电流持续时间与故障时系统稳定有很大的关系,对开关设备而言,该时间则是考核设备性能的一个重要指标(合分时间和额定短时耐受电流),表 3 是对短路电流持续时间的统计结果,分析表明短路电流持续时间与电流的大小无关,电流并不很大持续时间也可达到 50~60 ms,而占比例最大的持续时间落在了 60~70 ms。

1.4 短路故障性质

从收集到的 2000~2005 年华东 500 kV 系统故障数据中整理得出,发生短路故障共 166 次,表 4 是对这些故障性质的统计。笔者对故障次数的定义为故障跳闸后断路器重合闸成功与否均计为一次故障,其后若再次重合亦失败则计为另一次故障;分闸

表3 短路持续时间统计

短路持续时间/ms	统计次数	所占比例/%
≤50	43	16.67
50~60	67	25.97
60~70	104	40.30
70~80	27	10.47
80~90	7	2.71
≥90	10	3.88
合计	258	100.00

表4 短路故障性质与切除情况

年份	故障次数	单相故障	多相故障	重合成功	重合失败	说明
2000	7	7	-	4	3	保护误动三相跳2次
2001	6	6	-	3	3	重合闸故障停用1次
2002	14	14	-	9	5	
2003	18	18	-	11	7	
2004	61	58	3	42	19	重合闸停用1次
2005	60	59	1	36	24	重合闸停用4次
合计	166	162	4	105	61	

次数则以断路器动作(开断短路电流)次数计,如重合闸失败算为2次分闸。分析表明系统单相故障占到了97.76%,而重合闸成功率也达到63.33%。从故障发生的月份上看,冬季的雾闪和夏季的雷击是引起系统短路的主要因素。图3、4反映出了这些关系。

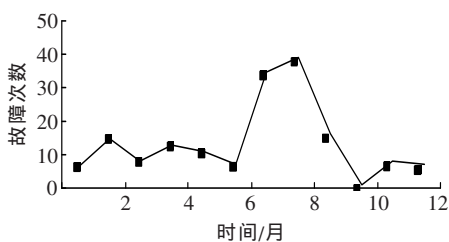


图3 按故障时间的分布

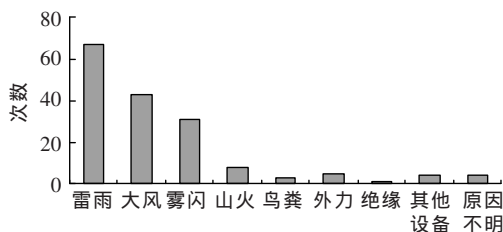


图4 按故障原因的分布

2 分析与讨论

2.1 关于系统的时间常数

文[1]认为45 ms的时间常数足以覆盖大多数工况,除此之外的可考虑选用与断路器额定电压相关的特殊工况下的时间常数,在额定电压500 kV及以上时为75 ms,同时在其附录I中提出,根据CIGRE所做的调查,具有525 kV及以上运行电压的用户反映550 kV系统的时间常数为55 ms。从笔者所统计的数据看,出现频次最高的时间常数在40~50 ms

的区间内,最长的也不超过70 ms,该结果基本上与文[1]的结论相符。华东500 kV电网结构与国外那些大电网相类似,由一个双环形的主网架向负荷中心送电,大量的架空线路和终端配置大容量的电力变压器决定了电网的结构,由于长距离的交流输电线路只有晋、闽省各2条输入,对系统时间常数的影响不大(来自于华中电网的线路采用的是直流方式,未考虑其影响),故可以认为取75 ms的时间常数作为对断路器的考核指标已有足够的裕度。

系统的时间常数与系统结构、线路设计标准有关,同时也与故障性质和短路电流水平有关。华东电网现行的技术政策决定500 kV系统的短路电流水平不应超过63 kA,通过改变运行方式,或利用串联电抗器或短路电流限制器,如TPSC技术等(但后者尚在准备之中),以此来限制一次短路电流的增长。在此前提下,对系统中已运行或新建站所用的断路器参数选择提出了均应满足开断63 kA短路电流的要求,早期那些50 kA的运行设备正计划通过改造增容到63 kA,联系到上述短路电流值的统计分析结果,因大部分故障的短路电流水平在30 kA左右,因此即使“标准的时间常数在某些系统中是不足的”^[1],也可因短路开断电流小于额定值而获得补偿,故可以认为63 kA的水平是合理的。

2.2 短路电流水平

如上所述,随着500 kV系统的发展,控制系统短路电流水平不超过63 kA是一个重要的技术原则,则检验实际发生的故障电流水平的现实意义就不言而喻了。表2的数据表明,2000~2005年系统中共发生了166次短路故障,其中短路电流超过40 kA的仅5次,分别在上海(杨高43.20 kA)与靠近上海的嘉兴(王店41.56、46.30、46.05 kA)和苏州(车坊58.34 kA),几处均位于负荷中心区域,这与系统计算结果是相符的。实际上为控制短路电流的发展,在系统运行方式上已采取了一些措施,如在上海将双环网解开分区运行。实际说明按现有的措施可以将短路电流水平控制在63 kA以下。

表2的统计中约85.7%的故障电流是断路器额定短路开断电流的31.75%(63 kA)和40%(50 kA),即额定短路容量的一半还不到,而超过60%额定短路开断电流故障次数小于总数的10%,这与文[3]的90%的故障电流为额定短路开断电流的30~40%相接近。这个数据一方面反映出系统的实际短路故障水平,计算中考虑极端运行方式下的故障电流尚未出现过;另一方面也说明断路器在这种条件下运行,对灭弧室中触头系统的烧损影响和断路器的维护检修均有利,文[4]的论述说明国外对此也有相同的认识。

单相故障的发展对短路电流有较大的影响,这里既有重合闸不成功的情况,也有进一步发展成两

相或三相故障的情况,此时短路电流的过程相当复杂,这对分析难免会有一些的影响。

2.3 故障持续时间

统计表明约 66%的故障持续时间在 50~70 ms,这个时间应包括保护动作时间、断路器合分时间和短路电流的燃弧时间。一般 500 kV 断路器的合分时间约为 40~50 ms,考虑燃弧时间后再加上一个周波属正常现象。虽然统计中也有大于 70 ms 的情况,约占到 17%,这可能与保护的動作时间有关,或本侧保护未动作靠对侧保护发讯使断路器分闸。

值得引起重视的是余下约 17%的那部分故障——持续时间小于 50 ms,这可能会存在一些问题。众所周知,现代继电保护装置动作时间相当迅速,最快的保护装置接受信号后不到 10 ms 即可出口(随保护装置性能而异,一般不大于 20 ms),而断路器的分闸时间一般也小于 30 ms,如果机构的辅助开关切换得快,重合闸时故障仍存在,就有可能在合分时间内开始进行分闸,此时对断路器的自卫能力是一个考验;而从断路器的型式试验中看,短路开断试验的条件是短路电流中的直流分量小于或等于 20%,试验中为满足该条件,一般是人为地将被试断路器的合分时间调到约 60 ms 左右,并没有真正在断路器的最小合分时间条件下去做开断试验,因此对该工况下断路器的开断能力是否有影响没有把握,笔者曾与多家制造厂探讨过此问题,结果仅西安西开高压电气股份有限公司做过短合分时间条件下的开断,而其余的国内产品及进口或合资产品对此均未有考虑。

按照电力系统稳定导则的要求,华东电网 500 kV 系统故障切除时间规定为 80 ms,如设保护动作为 15~20 ms,合分时间加燃弧时间为 60~65 ms 是可取的,作为用户当然希望后者能缩短,但前提是必须要有试验数据的支持。

(上接第 216 页)和可控性。

参考文献:

- [1] 钱家骊,袁大陆,徐国政.对 1000 kV 电网操作过电压及相位控制高压断路器的讨论[J].电网技术,2005,29(10):1-4.
- [2] CARLO C, CARLO G, CHRISTIAN R. Synchronous Medium Voltage Circuit Breaker; ABB Solution Based on Magnetic Drive and Electronic Control[J]. ABB Review, 1999(6): 13-21.
- [3] DEFINO B, FORNARI F, GEMME C, et al. Power Quality Improvement in Transmission and Distribution Conference and Exposition [C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES, 2001: 367-372.
- [4] 林 莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [5] 马少华,王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究

3 结论

(1)统计分析表明,系统时间常数出现频次最多的在 40~50 ms,最长不超过 70 ms,验证了文[1]的结论,虽然这仅是单相故障时的情况,但亦可供系统设计或设备选型时作参考。

(2)根据所获得的短路电流数据,反映出约 85.7%的故障电流不到 20 kA,实际上发生的最大的短路电流值为 50.86 kA,说明在目前的运行方式下可以将短路电流控制在 63 kA 水平以下,而制定的断路器选型技术原则——额定短路开断电流为 63 kA 是可行的。

(3)大部分的短路故障持续时间在 50~70 ms 范围内,能够满足系统稳定要求的故障切除时间,对少数持续时间较长的情况,随着保护装置的更新,选用性能好的设备完全可以解决问题。但对断路器在最小合分时间条件下的开断性能,用户希望能进一步获得试验数据的支持。

(4)故障性质表明,华东电网中短路故障以线路故障为主,其中雷击和大风又占了很大的比例,今后在努力减少故障跳闸率的工作中可将这两个问题作为主要矛盾加以考虑。此外因设备问题引起的故障仍有存在,对此除应加强维护和检修,在新设备选型中也应把好关,尽可能选用那些成熟的、有运行业绩的设备。

参考文献:

- [1] GB 1984-2003. 高压交流断路器[S].
- [2] SMEETS R P P, ALDROVANDI G, CHÈVRIER P, et al. Statistical Analysis of Electrical Stresses on High-voltage Circuit-breakers in Service[J]. ELECTRA, 2005(220): 24-29.
- [3] JANSSEN A L J, SÖLVER C E. 用于 CIGRE SC A3/WG13.08 和 IEC SC 17A/WG29 的高压断路器电寿命型式试验的统计数据[C]// CIGRE, 2004: A3-30.
- [4] BALZER G, DRESCHER D. 高压断路器的故障数据用于评估状态维护[C]// CIGRE, 2004: A3-305.
- [5] 研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [6] 荣命哲, 姜建勇, 王小华. 永磁式接触器动触头动作特性仿真分析与试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 109-113.
- [7] IVAN YATCHEV, KRASTIO HINOV, VULTCHAN GUEORGIEV. Dynamic Characteristics of a Bistable Linear Actuator with Moving Permanent [J]. Serbian Journal of Electrical Engineering, June, 2004, 1(2): 207-214.
- [8] TOSHIE T, TAKAFUMI N, MITSURU T K K, et al. An Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker Developed by Electromagnetic Analysis Coupled with Motion [J]. IEEE Trans. PE, 2004, 124(2): 321-326
- [9] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.