

# 不同故障下串联谐振式 FCL 对高压断路器恢复电压的影响

洪健山, 关永刚, 徐国政

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 为了使串联谐振式故障电流限制器 (series resonance type fault current limiter, SRFCL) 能在超高压电网中投入实际应用, 采用电磁暂态仿真计算软件 ATP-EMTP, 研究分析了 500 kV 电网中在母联处加入串联谐振式 FCL 对高压断路器在开断不同短路故障时恢复电压的影响。计算结果表明: 加入串联谐振式 FCL 后, 当断路器开断出线端短路故障时, 恢复电压上升率提高了 18%, 第一参考电压提高了 2.6%。当开断近区故障时, 90% 额定短路电流和 75% 额定短路电流条件下, 恢复电压起始部分的上升率分别下降了 19.26% 和 25.6%, 峰值分别下降了 11.05% 和 15.73%。当开断母线短路故障时, 串联谐振式 FCL 对母联上断路器恢复电压的上升率有显著的影响, 加入之后恢复电压上升率比加入之前提高了 13.1 倍, 第一参考电压提高了 78.5%。在母线出现短路情况下, 恢复电压上升率与第一参考电压的大幅提高将严重影响断路器的开断, 在串联谐振式 FCL 的应用过程中需要加以考虑和解决。

**关键词:** 串联谐振式 FCL; 高压断路器; 恢复电压; 恢复电压上升率

中图分类号: TM561

文献标志码: B

文章编号: 1001-1609(2009)05-0024-04

## Influence on Recovery Voltage of High-voltage Circuit Breakers under Different Fault by Employing Series Resonance Type Fault Current Limiter

HONG Jian-shan, GUAN Yong-gang, XU Guo-zheng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The influence of the series resonance type fault current limiter (SRFCL) on the recovery voltage of circuit breakers after breaking different kind of short-circuit fault was researched and analyzed by using the software of electromagnetic transient simulation ATP-EMTP for the application of SRFCL in 500 kV supergrid. The results show that the rate of rise of recovery voltage (RRRV) increased 18% and the first reference voltage increased 2.6% when circuit breaker breaking outlet short-circuit fault after the SRFCL installed. Under the condition of 90% and 75% rated short-circuit breaking current, the starting part of RRRV decreased 19.26% and 25.6%, and the peak voltage decreased 11.05% and 15.73% individually when circuit breaker breaking short-line fault. The RRRV increased 13.1 times and the first reference voltage increased 78.5% after the SRFCL installed when circuit breaker breaking bus short-circuit fault. The substantial increase of RRRV will seriously affect the breaking capability of high voltage circuit breakers, which should be considered and resolved before the SRFCL installed in supergrid.

**Key words:** SRFCL; high voltage circuit breaker; recovery voltage; rate of rise of recovery voltage

## 0 引言

随着国民经济的飞速发展, 社会对电力的需求不断增加, 带动了电力系统的不断发展, 单机和发电厂容量、变电站容量、城市和工业中心负荷不断增加, 这就使得电力系统之间不断互联。由于电网结构变得越来越复杂、容量越来越大, 系统的短路电流也持续增大。国内几个发达城市和地区的最大短路

电流都已经达到或接近断路器的最大开断电流。因此, 作为限制短路电流的一种措施, 故障电流限制器 (fault current limiter, FCL) 成为近年来国内外研究开发的一个热点<sup>[1-6]</sup>。在众多的 FCL 中, 串联谐振式故障电流限制器被普遍认为最有希望在超高压电网中得到应用。

对于串联谐振式 FCL 装置, 目前尚处在论证和样机研制过程中。由于超高压电网中接入串联谐振式 FCL 可能带来不少系统问题, 需要加以分析。比

收稿日期: 2009-03-25; 修回日期: 2009-06-21

作者简介: 洪健山 (1975), 男, 博士研究生, 现从事电网安全运行的研究工作。

较和分析了超高压电网中母联处加入串联谐振式 FCL 之后,对断路器开断不同位置短路故障时恢复电压的影响。通过计算和分析表明,串联谐振式 FCL 对母联断路器开断母线短路故障时的恢复电压具有显著的影响,有可能造成断路器无法开断,必须加以考虑和解决。

### 1 计算电路及各元件参数的确定

选择双母线电路作为研究和分析的对象,计算电路见图 1,其中,串联谐振式 FCL 加入在母联处,实际电网中,母联是最有可能被选作加入限流器的位置之一。图 1 所示的接线图和 FCL 加入位置,根据断路器的状态可以代表几种典型的运行工况,分析 FCL 加入在母联位置、其他断路器全部闭合的双电源运行工况。分析这一电路就能够从原理上得出实际电网中绝大部分情况下限流器对断路器恢复电压的影响。本计算电路中,最高电压为 550 kV,最大短路电流为 70 kA,超过了现有断路器最大短路电流的 63 kA。电路中其他参数的选取根据是断路器 CB<sub>5</sub> 开断出线端短路故障时其恢复电压上升率和第一参考电压符合国标要求。经配置和计算<sup>[7]</sup>,获得两组参数。第一组参数用于计算 SRFCL 对断路器开断出线端短路故障和母线短路故障时的恢复电压,第二组参数用于计算 SRFCL 对断路器开断近区短路故障时的恢复电压。

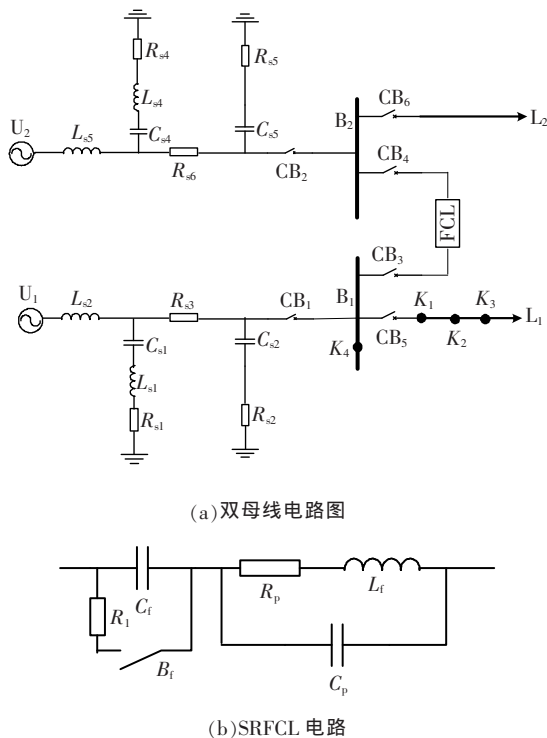


图 1 加入限流器的双母线系统电路图

第 1 组参数:  $U_1=U_2=412.8 \text{ kV}$ ;  $L_{s1}=34 \text{ mH}$ ;  $R_{s1}=$

$45 \Omega$ ;  $C_{s1}=1.4 \mu\text{F}$ ;  $L_{s2}=43.6 \text{ mH}$ ;  $R_{s2}=170 \Omega$ ;  $C_{s2}=0.32 \mu\text{F}$ ;  $R_{s3}=1.1 \Omega$ ;  $L_{s4}=34 \text{ mH}$ ;  $R_{s4}=45 \Omega$ ;  $C_{s4}=1.4 \mu\text{F}$ ;  $L_{s5}=32.7 \text{ mH}$ ;  $R_{s5}=170 \Omega$ ;  $C_{s5}=0.32 \mu\text{F}$ ;  $R_{s6}=0.9 \Omega$ ;

第 2 组参数:  $U_1=U_2=317.5 \text{ kV}$ ;  $L_{s1}=25.5 \text{ mH}$ ,  $R_{s1}=9 \Omega$ ,  $C_{s1}=0.8 \mu\text{F}$ ;  $L_{s2}=33.6 \text{ mH}$ ,  $R_{s2}=12 \Omega$ ,  $C_{s2}=0.32 \mu\text{F}$ ,  $R_{s3}=1.1 \Omega$ ;  $L_{s4}=25.5 \text{ mH}$ ,  $R_{s4}=9 \Omega$ ,  $C_{s4}=0.8 \mu\text{F}$ ,  $L_{s5}=25.2 \text{ mH}$ ,  $R_{s5}=12 \Omega$ ,  $C_{s5}=0.32 \mu\text{F}$ ,  $R_{s6}=0.9 \Omega$ ;

$B_1, B_2$  为母线,  $CB_1, CB_2, CB_3, CB_4, CB_5$  和  $CB_6$  为断路器;限流器 SRFCL 加在母联上;  $L_1, L_2$  为输电线路,每相电感  $0.92 \text{ mH/km}$ ,每相电容  $0.00454 \mu\text{F/km}$ ;

SRFCL 参数:  $L_f=30.0 \text{ mH}$ ,  $C_f=337.7 \mu\text{F}$ ;  $R_1=1 \Omega$ ,  $C_p=2.0 \text{ nF}$ ,  $R_p=0.3 \Omega$ ;

### 2 串联谐振式 FCL 对断路器开断出线端短路时恢复电压的影响

电路元件参数选择第一组参数,在加入串联谐振式 FCL 之前,断路器  $CB_5$  的出线端  $K_1$  点发生短路故障后,电源  $U_1$  提供的短路电流为 30 kA;电源  $U_2$  通过母联提供的短路电流为 40 kA。 $CB_5$  的恢复电压波形见图 2;在母线  $B_1$  和  $B_2$  之间的母联加入串联谐振式 FCL 之后,  $CB_5$  的恢复电压波形见图 3。

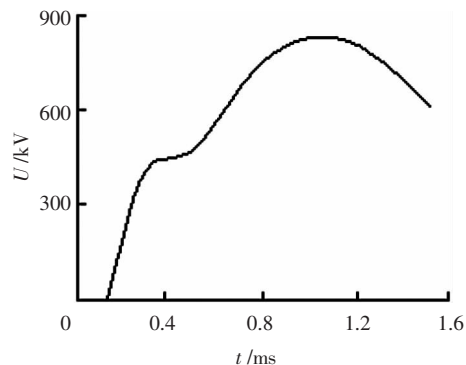


图 2 加入限流器之前断路器开断出线端短路故障的恢复电压波形

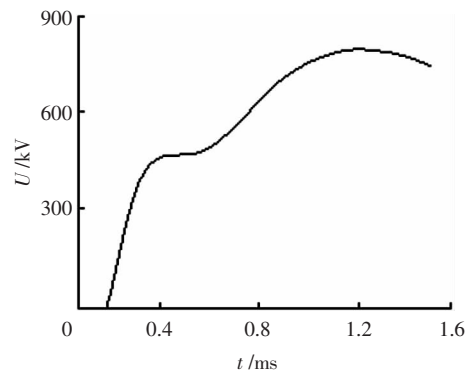


图 3 加入限流器之后断路器开断出线端短路故障的恢复电压波形

表 1 为串联谐振式 FCL 加入前后断路器  $CB_5$  的恢复电压数据。

在串联谐振式 FCL 加入之前,断路器的恢复电

表1 SRFCL加入前后断路器开断出线端短路时恢复电压数据

SRFCL	第一参考电压/kV	上升时间/us	TRV峰值/kV	开断电流/kA	$U_{\text{rurv}}/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
GB 1984	438.0	438.0	821.0	/	2.00
无	438.1	438.1	824.8	70.0	2.00
有	449.3	449.3	796.9	50.9	2.36

压上升率为 2.00 kV/us, 第一参考电压为 438.1 kV, 满足国标要求<sup>[8]</sup>, 加入串联谐振式 FCL 后, 断路器的恢复电压上升率提高到 2.36 kV/us, 提高了 18%, 第一参考电压提高到 449.3 kV, 提高了 2.6%。对于断路器开断出线端短路故障时的恢复电压有一定的影响, 即不利于断路器的开断。

### 3 串联谐振式 FCL 对开断近区故障恢复电压的影响

断路器开断近区故障的主要困难在于瞬态恢复电压起始部分的上升速度很高并有一定峰值, 电弧难以熄灭。

SRFCL 对断路器开断近区故障时恢复电压的影响, 笔者采用 SRFCL 加入在母联位置、并且母联开关闭合的运行工况。元件参数选择第二组参数, 对断路器开断 90% 额定短路开断电流和 75% 额定短路开断电流时, SRFCL 对恢复电压起始部分的上升率以及峰值的影响分别进行计算、比较和分析。

如图 1 所示, 线路  $L_1$  的  $K_0$  点发生近区故障, 加入限流器之前, 短路电流为 63 kA, 该情况为断路器开断 90% 额定短路开断电流的近区故障。在母线  $B_1$  和  $B_2$  之间的母联加入串联谐振式 FCL 前后, 恢复电压起始部分的上升率和第一峰值见表 2。

表2 SRFCL加入前后恢复电压起始部分数据(90%额定短路开断电流)

SRFCL	起始部分峰值/kV	上升时间/us	开断电流/kA	$U_{\text{rurv}}/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
GB 1984	71.84	6.3	63.0	11.34
无	71.29	6.3	62.2	11.32
有	53.01	5.8	44.6	9.14

由表 2 可以看出, 在加入 SRFCL 之前, 近区故障恢复电压的起始部分上升率为 11.41 kV/us, 峰值为 91.3 kV, 满足国标要求。加入 SRFCL 之后, 上升率降为 8.35 kV/us, 峰值为 66.8 kV, 分别下降了 19.26% 和 25.6%。加入 SRFCL 之后恢复电压的上升率和峰值都有较大幅度的降低, 对断路器的开断是有利的。

图 1 中, 线路  $L_1$  的  $K_1$  点发生近区故障, 加入限

流器之前, 短路电流为 52.6 kA, 该情况为断路器开断 75% 额定短路开断电流的近区故障。加入串联谐振式 FCL 前后, 恢复电压起始部分的上升率和第一峰值见表 3。

表3 SRFCL加入前后恢复电压起始部分数据(75%额定开断电流)

是否有 SRFCL	起始部分峰值/kV	上升时间/us	开断电流/kA	$U_{\text{rurv}}/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
GB 1984	179.70	19.0	52.5	9.45
无	177.14	19.0	52.6	9.32
有	149.28	18.0	38.8	8.29

由表 3 可以看出, 在加入 SRFCL 之前, 近区故障恢复电压的起始部分上升率为 9.32 kV/us, 峰值为 177.14 kV, 符合国标要求。加入 SRFCL 之后, 上升率降为 8.36 kV/us, 峰值为 183.9 kV, 加入之后恢复电压的上升率和峰值都有较大幅度的降低, 恢复电压上升率和峰值分别降低了 11.05% 和 15.73%, 有利于断路器的开断。

对开断 60%, 30% 及 10% 额定开断电流时也有类似情况。

### 4 串联谐振式 FCL 对断路器开断母线短路时恢复电压的影响

元件参数选择第一组参数。母线  $B_1$  的  $k_4$  点发生短路故障, 分析串联谐振式 FCL 对母联断路器  $CB_3$  恢复电压的影响。串联谐振式 FCL 加入前, 母联断路器  $CB_3$  的恢复电压波形见图 4, 加入后, 当限流电抗器端口等效电容选择 2 nF<sup>[9]</sup> 时, 母联断路器  $CB_3$  的恢复电压波形见图 5,

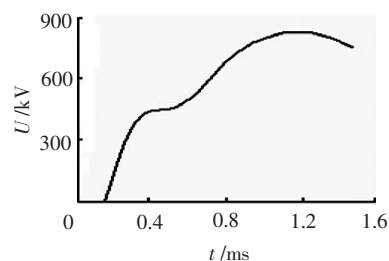


图4 加入限流器前开断母线短路故障的恢复电压波形

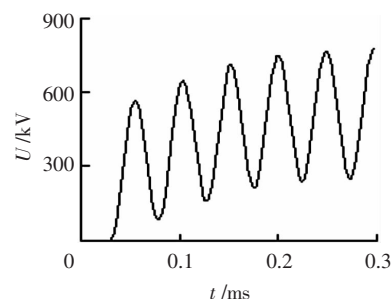


图5 加入限流器后开断母线短路故障的恢复电压波形

母线短路时,母联断路器 $CB_3$ 开断短路电流时的恢复电压比较数据见表4。由表4可知,在加入SRFCL之前,母线短路时母联断路器 $CB_3$ 的恢复电压上升率为 $2.00\text{ kV}/\mu\text{s}$ ,第一参考电压为 $438.1\text{ kV}$ 。加入SRFCL后,恢复电压上升率和第一参考电压分别提高到 $28.2\text{ kV}/\mu\text{s}$ 和 $782.0\text{ kV}$ 。加入SRFCL之后恢复电压的上升率和峰值都有很大幅度的提高,分别提高了 $13.1$ 倍和 $78.5\%$ ,远超标准要求,将严重影响断路器的开断<sup>[10]</sup>。在 $K_0, K_1$ 和 $K_2$ 等处短路, $B_3$ 拒动而由 $B_3$ 开断时,也有此种情况。

表4 SRFCL加入前后断路器开断  
母线短路的恢复电压数据

SRFCL	第一参考 电压/kV	第一 峰值/kV	上升 时间/ $\mu\text{s}$	开断 电流/kA	$U_{\text{RUV}}/$ ( $\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ )
GB 1984	438.0	821.0	219	/	2.00
无	438.1	/	219	49.5	2.00
有	782.0	676.2	24	23.7	28.2

## 5 串联谐振式 FCL 对断路器恢复电压影响原因分析

上节中计算并得出了串联谐振式 FCL 对不同短路情况下高压断路器开断故障时恢复电压的影响数据和结论。其中,加入串联谐振式 FCL 后,大幅提高了母联断路器开断母线短路故障时的恢复电压上升率,即从 $2.00\text{ kV}/\mu\text{s}$ 提高到 $28.00\text{ kV}/\mu\text{s}$ ,造成恢复电压上升率大幅提高的原因是串联谐振式 FCL 中限流电抗器的端口等效电容较小( $\text{nF}$ 级,限流电抗器的端口等效电容的具体数值范围,国际大电网会议的试验数据引用所得)比电源侧等效电容( $\mu\text{F}$ 级)低3个数量级,从而产生较高频率的恢复电压分量,导致断路器开断时恢复电压上升率急剧提高。

对于开断出线端短路故障时,恢复电压上升率从 $2.00\text{ kV}/\mu\text{s}$ 提高到 $2.36\text{ kV}/\mu\text{s}$ 影响较小,原因在于母线以及母线的不同出线有较大的对地电容,因此加入串联谐振式 FCL 后对断路器开断出线端短路故障时恢复电压的影响较小。

而对于近区故障,加入串联谐振式 FCL 后对断路器的开断则具有正面影响,恢复电压起始部分的上升率以及第一峰值都有所降低,即有利于断路器的开断,其原因主要是加入串联谐振式 FCL 后,在相同的运行方式下,同一近区位置出现短路故障时,降低了短路电流,从而降低了恢复电压起始部分第一峰值电压和上升率。

以串联电抗器作为限流元件的不同类型 FCL,

由于电抗器等效端口电容的值较为固定。上述结论适用于所有电感式限流器。

## 6 结论

超高压电网中加入串联谐振式限流器后,一方面能有效抑制短路电流从而利于断路器的开断,另一方面又对断路器开断故障时的恢复电压带来不同程度的影响。在选择 SRFCL 在 $500\text{ kV}$ 电网母联处加入的典型电路中,当断路器出线端短路时,恢复电压的上升率和第一参考电压都有所提高,不利于断路器的开断。在 SRFCL 加入在母联位置、且母联开关闭合的工况下,发生线路近区故障时,限流器加入后恢复电压起始部分的上升率和峰值比加入前要低,对断路器的开断是有利的。当母线发生故障时,则会大幅提高恢复电压的上升率和第一参考电压,严重影响母联断路器的开断。因此,在 SRFCL 的研制以及安装位置的选择中,应充分考虑其对高压断路器恢复电压的影响,避免出现因限流器的安装而造成断路器无法开断的情况。

## 参考文献:

- [1] 钱家骊,关永刚,徐国政,等.整流式故障电流限制器对高压断路器开合能力的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2005,10(1):1309-1312.
- [2] SUGIMOTO S,KIDA J.Principle and Characteristics of a Fault Current Limiter with Series Compensation [J].IEEE Delivery,1996,11(2):846-847.
- [3] CHOI SS,WANG TX,MAHINDA VILATHGAMUWA D.A Series Compensator with Fault Current Limiting Function[J].IEEE Trans. on Power Delivery,2005,7(3):2248-2256.
- [4] YE Lin,LIN Liang-zhen,JUENGST K P.Application Studies of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Systems [J].IEEE Trans. on Appl Superconductivity,2002,12(1):900-903.
- [5] ATTILA GYORE,SANDOR SEMPERGER,LASZLO FARKAS, et al.Improvement of Functionality and Reliability by Inductive HTS Fault Current Limiter Units [J].IEEE Trans on Appl Superconductivity,2005,6(2):2248-2256.
- [6] 陈金祥,董恩源,邹积岩,等.固态故障电流限制器(FCL)的应用与发展[J].继电器,2000,12(1):35-37.
- [7] 王仁甫.四参数瞬态恢复电压在大容量试验室中的重现[D].北京:清华大学,1988.
- [8] GB 1984-2004.交流高压断路器[S].北京:国家技术监督局,2004.
- [9] 钱家骊,张节容,吉嘉琴,等.高压开关开合电容电流和小电感电流[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [10] 徐国政,张节容,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.