

串联谐振式限流器对操作过电压的影响及分析

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: 串联谐振式故障电流限制器(SRFCL)是目前最有希望在超高压电网中应用的限流器。笔者采用 EMTP 和 PSCAD 电磁暂态仿真软件,以 500 kV 电网中不同位置安装 15 Ω 串联谐振式限流器为例,计算和分析了 SRFCL 对操作过电压的影响。其中工况包括: 开断空载线路操作过电压; 单相接地故障导致三相甩负荷引起的操作过电压; 三相甩负荷操作过电压; 单相自动重合闸操作过电压。分析结果认为:SRFCL 对 、 、 影响很小,而对 具有明显影响。笔者还对影响的机理和因素作了分析,这些可以为 SRFCL 在超高压电网中的应用提供参考。

关键词: 串联谐振式限流器; 电力系统; 操作过电压

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0044-04

Influence of Series Resonance Type Fault Current Limiter on Operating Over-voltage

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

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

Abstract: The series resonance type fault current limiter is quite possible to be applied in power grid at present. In this paper, the electromagnetic transient simulation softwares EMTP and PSCAD are used to study the influence of 15 Ω SRFCL installed at different location on operating over-voltage in 500 kV power grid. Four kinds of operating over-voltage are calculated and analyzed, which are: the operating over-voltage caused by breaking no-load transmission line; the operating over-voltage caused by the 3-phase load-shedding due to single-phase to ground fault; the operating over-voltage caused by 3-phase load-shedding; the operating over-voltage caused by single-phase closing of circuit-breaker. The results show that SRFCL has slightly influence on , and , but has significant influence on . In addition, the mechanism and factor of the influence are analyzed.

Key words: series resonance type fault current limiter(SRFCL); power system; operating over-voltage

0 引言

目前,国内几个发达城市和地区的电网,如华东电网和广东电网等,最大短路电流已经接近断路器的最大额定短路开断电流。随着电网容量的进一步增大,最大短路电流很可能超过断路器的开断极限。因此,作为限制短路电流的一种措施,故障电流限制器(FCL)成为近年来研究开发的一个热点^[1-6]。在众多的 FCL 中,串联谐振式 FCL(SRFCL)被普遍认为是目前最有希望在超高压电网中得到应用^[7-11],而 SRFCL 的安装可能给系统带来一定的影响,如过电压问题、断路器恢复电压问题、继电保护问题等。笔者对 SRFCL 在不同的安装位置及运行工况下对操作过电压的影响进行分析。

1 串联谐振式 FCL

图 1 为 SRFCL 的原理图。在正常状态下,电容器 C 和电抗器 L_f 处于串联谐振状态;当线路发生短路故障时,电容器上的电压急剧升高,当上升到一定值后,避雷器动作,然后根据监测到的避雷器的电流来触发放电间隙以保护氧化锌避雷器,并使旁路断路器 B 迅速闭合。此时,电容器 C 被短路,从而限流电抗器 L_f 起到限制故障电流的作用。

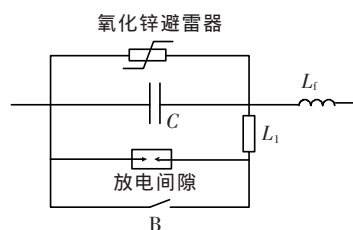


图 1 串联谐振式 FCL 原理电路图

收稿日期:2008-12-23; 修回日期:2009-03-05

作者简介:洪健山(1975-),男,浙江人,博士研究生,主要研究方向为电力系统安全运行。

2 计算电路及参数的选取

采用图2所示的接线图分析SRFCL对操作过电压的影响。图2中, P_1 、 P_2 为限流器的典型安装位置,分别为母联和电源线位置,根据断路器开合状态可以表示不同的运行工况。图3为等值电路,其中 U_1 、 U_2 为系统等效电源; $L_{s1}=34\text{ mH}$; $R_{s1}=45\ \Omega$; $C_{s1}=1.4\ \mu\text{F}$; $L_{s2}=43.6\text{ mH}$; $R_{s2}=170\ \Omega$; $C_{s2}=0.32\ \mu\text{F}$; $R_{s3}=1.1\ \Omega$; $L_{s4}=34\text{ mH}$; $R_{s4}=45\ \Omega$; $C_{s4}=1.4\ \mu\text{F}$; $L_{s5}=32.7\text{ mH}$; $R_{s5}=170\ \Omega$; $C_{s5}=0.32\ \mu\text{F}$; $R_{s6}=0.9\ \Omega$; B_1 、 B_2 为母线,电压等级为500 kV; CB_1 、 CB_2 、 CB_3 、 CB_4 为断路器; L_1 、 L_2 为输电线路,电感为0.92 mH/km,电容为0.0075 $\mu\text{F/km}$,波阻抗为350 Ω ;SRFCL的限流电抗值取15 Ω 。

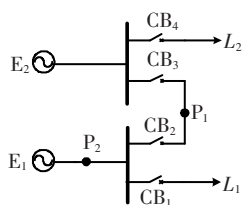


图2 分析用单线图

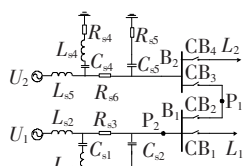


图3 等值电路

3 SRFCL对分闸操作过电压的影响

3.1 SRFCL对断路器开断空载线路过电压的影响

开断空载线路是电力系统中常见的操作之一。产生过电压的原因是断路器分闸过程中的重击穿^[12-14]。开断空载线路,断路器开断的是较小的容性电流,通常为几十安到几百安。然而在分闸初期,由于断路器触头间恢复电压可能超过介质恢复强度,造成触头间隙击穿现象,从而引起电磁振荡,出现过电压。

3.1.1 有无SRFCL时的恢复电压波形和数据

开断空线操作过电压与断路器是否产生重击穿关系密切,而断路器是否重击穿则与开断时的恢复电压以及断路器的性能有关。选择图2的接线图作为计算和分析SRFCL安装后对开断空线操作过电压的影响电路。其中线路 L_1 长300 km。图3中,当母联开关 CB_2 开断的情况下,SRFCL安装在 P_2 处,断路器 CB_1 的恢复电压起始部分波形见图4。

图3中,安装SRFCL之前起始部分恢复电压上升率为0.051 kV/ μs ,安装之后恢复电压上升率为0.370 kV/ μs ,提高了625%。若高频振荡部分衰减较快,则SRFCL安装后峰值电压基本没有变化。若高频振荡部分衰减较慢,则峰值电压略有提高,最高约提高1%。

在母联开关闭合的情况下,SRFCL无论是安装在 P_1 位置还是 P_2 位置,都对断路器开断空载线路时的恢复电压上升率和峰值基本没有影响,因此对

开断空线操作没有影响。

3.1.2 分析与小结

图4波形和数据显示SRFCL安装在电源线 P_2 处并且在母联开关断开的情况下,对断路器开断空载线路时的恢复电压起始部分有较大的影响,恢复电压上升率由安装前的0.051 kV/ μs 提高到0.37 kV/ μs ,提高了625%,恢复电压起始部分上升率的大幅提高跟SRFCL中限流电感的等效电容值较小有关,其与限流电感及等效电阻构成高频振荡回路,产生较高的恢复电压上升率。恢复电压上升率的大幅提高将使断路器在第一次电流过零点后电弧复燃的可能性提高,而下次电流过零点时触头间隙变大,产生击穿的可能性降低。

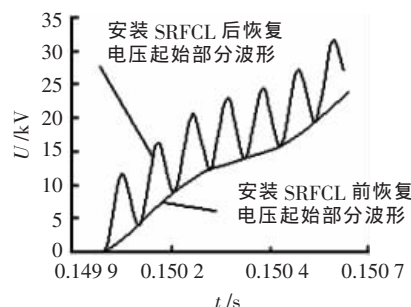


图4 有无SRFCL时的恢复电压波形

3.2 SRFCL对甩负荷操作过电压影响

3.2.1 SRFCL安装前后对甩负荷分闸操作过电压的影响

高压电网中,甩负荷操作主要包括单相接地故障后三相甩负荷和三相无故障甩负荷两种。

对于甩负荷操作过电压,采用图2中的单线图作为分析电路,其中甩负荷前线路 L_1 的负荷为430 MW,功率因数为0.95,对于单相接地短路后三相甩负荷情况,断路器的分闸时间为短路后50 ms,并设分闸时刻为A相电压峰值,且为三相断路器同期分闸。SRFCL安装前后,甩负荷操作过电压的数据列在表1、2中。

3.2.2 分析与小结

SRFCL安装后提高了单相接地短路引起的三相甩负荷分闸操作过电压,但百分比很低。对于三相正常甩负荷,安装SRFCL后其操作过电压同样有所提高。安装SRFCL后提高甩负荷操作过电压的原因是分闸过程中SRFCL两端出现了电压,其电压波形见图5,这是因为SRFCL的串联电容中产生了直流分量,而限流电感中产生了振荡分量,两个电压分量叠加形成SRFCL的端电压。SRFCL两端的电压抬高了线路的操作过电压。

表 1 有无 SRFCL 单相接地故障导致三相负荷引起的操作过电压

限流器参数/ Ω	FCL 位置及母联开关状态	线路长度/km	过电压倍数	百分比/%
无	无、闭合	300	1.488	100.0
15	P ₁ 、闭合	300	1.571	105.0
无	无、闭合	150	1.554	100.0
15	P ₁ 、闭合	150	1.608	103.5
无	无、开断	300	1.515	100.0
15	P ₂ 、开断	300	1.672	110.3
无	无、开断	150	1.539	100.0
15	P ₂ 、开断	150	1.652	107.3

表 2 有无 SRFCL 三相负荷引起的操作过电压

限流器参数/ Ω	FCL 位置及母联开关状态	线路长度/km	过电压倍数	百分比/%
无	无、闭合	300	1.296	100.0
15	P ₁ 、闭合	300	1.325	102.2
无	无、闭合	150	1.081	100.0
15	P ₁ 、闭合	150	1.091	100.9
无	无、开断	300	1.338	100.0
15	P ₂ 、开断	300	1.387	103.7
无	无、开断	150	1.130	100.0
15	P ₂ 、开断	150	1.147	101.5

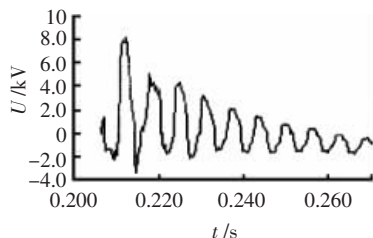


图 5 甩负荷前后 SRFCL 两端 A 相电压波形

4 SRFCL 对合闸无载线操作过电压的影响

合空载线路是电力系统中常见的一种操作,通常分成两种情况:正常合闸和自动重合闸。由于初始条件的区别,重合闸过电压是合闸过电压中较为严重的情况,因此选取单相自动重合闸来分析 SRFCL 对合空线操作过电压的影响。

4.1 SRFCL 对重合闸过电压的影响

采用单相自动重合闸,断路器加装 300 Ω 的合闸电阻^[15,16],主断口和辅助断口合闸时间差为 10 ms,从断路器分闸到自动合闸中间时间间隔取 0.5 s。由于重合闸操作过电压跟合闸相位以及线路残余电荷关系密切,文中的算例采用最严重的相位合闸分析 SRFCL 对过电压的影响。安装 SRFCL 之前线路末端电压波形见图 6。安装 SRFCL 后,三相电压波形见图 7。

由图 6 可知,安装 SRFCL 之前,A 相自动重合闸,辅助断口合闸时峰值电压为 702.2 kV,操作过电

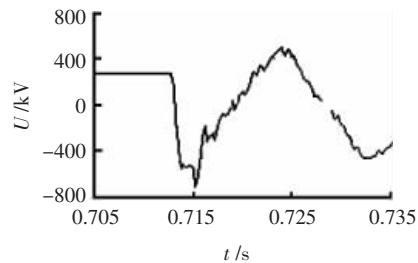


图 6 无 SRFCL 时单相重合闸操作过电压波形

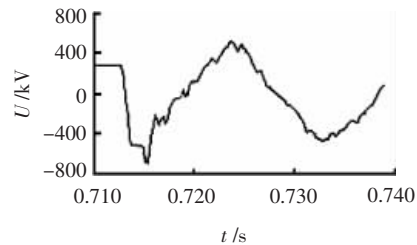


图 7 有 SRFCL 时单相重合闸操作过电压波形

压倍数为 $K_1=702.2/408.0=1.721$ 。主断口合闸后峰值电压为 504.7 kV,操作过电压倍数为 $K_2=504.8/408.0=1.238$ 。

由图 7 可知,安装 SRFCL 之后,辅助断口合闸时峰值电压为 694 kV,操作过电压倍数为 $K_3=694.0/408.0=1.701$,主断口合闸后峰值电压为 504.7 kV,操作过电压倍数为 $K_4=504.3/408.0=1.235$ 。其他数据见表 3。

表 3 安装 SRFCL 前后重合闸引起的操作过电压

限流器参数/ Ω	FCL 位置及母联开关状态	线路长度/km	辅助断口合闸过电压	百分比/%	辅助断口合闸过电压	百分比/%
无	无、闭合	300	1.721	100.0	1.238	100.0
15	P ₁ 、闭合	300	1.701	98.8	1.235	99.8
无	无、闭合	150	1.593	100.0	1.061	100.0
15	P ₁ 、闭合	150	1.581	99.2	1.060	99.9
无	无、开断	300	1.706	100.0	1.279	100.0
15	P ₂ 、开断	300	1.765	103.5	1.350	105.6
无	无、开断	150	1.602	100.0	1.105	100.0
15	P ₂ 、开断	150	1.621	101.2	1.127	102.0

4.2 小结

从表 3 可知,在母联 P₁ 处安装 SRFCL 后,辅助断口和主断口合闸时操作过电压比安装之前略低,但是在电源线位置 P₂ 处安装 SRFCL 后,主断口和辅助断口合闸过电压都有所提高,但提高幅度不大。

5 机理分析

从对操作过电压影响的基本机理看,SRFCL 的作用有以下几个方面。

5.1 限流电抗器

(1) 电感上的电压降

由于操作过电压属于高频范围,其上的电压降

会影响过电压幅值,大致上说决定于电感值和通过的电流大小。与断路器的恢复电压相比,由于这些情况下线路电流只为短路电流的几分之一,所以对操作过电压的影响不会明显。以文中算例为例,其上电压最大只有 7.5 kV,为相电压的 2.5%。

(2)限流电抗器的自振频率

由于限流电抗器的等效入口电容只有几 nF,自振频率很高,对操作过电压后的 RRRV 影响很大,如开断空载线。

5.2 电容器

(1)电容器上的电压降

由于操作过电压频率高,电容上的电压降较低,因此电压降明显低于电抗器上的电压降。

(2)电容器上的直流电压分量

在断路器开断时,电容器上可能存在一定的直流电压,对操作过电压会有一些影响。

由上可见,由于在正常情况下,通过限流器上的电流为工频电流,电感和电容上电压互相抵消,因此其向量和即 SRFCL 两端的压降基本为零,而操作时,电路突变一般产生高频电压分量,因而在 SRFCL 上产生一定的压差,从而影响到操作过电压的幅值。

5.3 影响因素

(1)对过电压幅值的影响因素: SRFCL 的限流电抗器的电抗值越大则影响越大; SRFCL 的通过电流越大,影响的幅值也越大。

(2)对恢复电压的影响: SRFCL 的限流电抗器的电抗值越大则影响越大; SRFCL 的通过电流越大,影响的幅值也越大; SRFCL 的限流电抗器上的断口等效电容越小,振荡频率越高,对 RRRV 影响越大。

(3)安装位置的影响

当 SRFCL 安装在电源线,母联开关断开情况比闭合情况影响更大。

6 结论

SRFCL 在母联或者电源线 P_2 处安装 SRFCL 后:

(1)当 SRFCL 安装在电源线并且母联开关断开的情况下,在开断空载长线路时,一方面由于起始部分恢复电压上升率的大幅提高导致比安装前更容易产生复燃,从而更容易避免断路器因发生重击穿而产生的过电压。其他情况下,SRFCL 的安装对开断空载长线路操作过电压没有影响。

(2)对单相接地短路引起的三相甩负荷分闸操作过电压,安装后操作过电压要比安装前略高。同

样,对于三相甩负荷操作过电压也略有提高,应加以注意。

(3)对于单相自动重合闸,SRFCL 的不同安装位置对操作过电压的影响也不同,安装在母联位置后比安装前过电压略低,而安装在电源线,母联开关开断的情况下,安装后过电压比安装前要略高。

(4)当限流电抗值变大、电流加大时,对操作过电压的影响随之变大。并联电源越多,则影响越小。

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 S S, WANG T X, MAHINDA V D. A Series Compensator with Fault Current Limiting Function [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 7(3): 2248-2256.
- [4] ZOU Ji-yan, CHEN Jin-xiang, DONG En-yuan. Study of Fast-closing Switch Based Fault Current Limiter with Series Compensation [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002 (24): 719-722.
- [5] 周彦. 基于 TPSC 技术的短路电流限制器 [J]. 华东电力, 2005, 5(5): 41-42.
- [6] GYORE A, SEMPERGER S, FARKAS L, 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.
- [7] 周雪松, 向龙瑞, 马幼捷, 等. 故障限流装置的发展和应用 [J]. 电工技术学报, 2004, 11(19): 1-5.
- [8] 董力. 故障电流限制器的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [9] 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.
- [10] 章良栋, 刘为, 岑文辉, 等. 一种新型短路电流限制器的研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 7(21): 15-18.
- [11] 陈金祥, 董恩源, 邹积岩. 具有串联补偿作用的新型故障限流器(FCL)的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 2(1): 48-51.
- [12] 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.
- [13] 张纬铨, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [14] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [15] 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.
- [16] 王梅义, 吴竞昌, 蒙定中. 大电网系统技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.