

## 500 kV 固定串补区外故障间隙自触发问题分析

王奇<sup>1</sup>, 张楠<sup>1</sup>, 程江平<sup>1</sup>, 李妍红<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663; 2. 广东电网广州供电局变电二部, 广东 广州 510180)

**摘要:** 以南方电网 2009 年 4 月 10 日串补间隙自触发故障为例, 对串补区外故障间隙自触发问题进行了深入的研究。在详细介绍等离子火花间隙和强制触发型火花间隙构成的基础上, 对两类不同结构的间隙触发原理进行了对比、说明。调取并分析该次故障时所涉及不同串补站串补的故障录波, 对各间隙触发过程及触发参数进行分析, 找出了本次自触发故障中各不同类型间隙所遵守的相同的自触发规律。最后, 对串补站的安全稳定运行提出了若干建议。

**关键词:** 固定串补; 等离子火花间隙; 强制触发型火花间隙; 间隙自触发

### The analysis of gap self trigger problem on 500 kV fixed series compensation at out-area fault

WANG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>1</sup>, CHENG Jiang-ping<sup>1</sup>, LI Yan-hong<sup>2</sup>

(1. Maintenance and Test Center of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 2. Second Deptment of Power Transforming, Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510180, China)

**Abstract:** The paper researches the gap self-trigger problem of series compensation when out-area fault occurred, based on the gap self-trigger event on 10 April 2009 of China Southern Power Grid. Then the trigger principle of the gaps with different structures are compared based on the structure of plasma trigger gap and compulsion trigger gap. Then, the paper obtains and analyzes the transient fault recorder of different fixed series compensation devices which related with the gap self trigger event. At last, the causes of gap self trigger has been found through the analysis on the gap trigger process and parameter. The same self trigger rule observed by different kinds of gaps in the trigger event are found out. At last, the paper proposes some recommendations on safety operation of series compensation stations.

**Key words:** fixed series compensation; gap self trigger; plasma gap; compulsion triggered gap

中图分类号: TM772 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)17-0174-05

## 0 引言

随着西电东送网络完善工程的进行, 中国南方电网超高压输电公司到 2009 年年底共有 7 个串补站, 目前已投产 5 个, 随着这些串补站的逐步投入运行, 大大增强了西电东送交流线路的输送能力, 满足了西电东送电量进一步增长的需求。

2009 年以来, 南方电网超高压公司所辖的天平 I、II 线串补和马百线、罗百 I 线串补相继发生了区外故障间隙自触发事件, 导致串补多相旁路重投。国内其他已投运的串补也曾出现类似故障, 给生产运行部门带来了较大的经济损失。串补保护功能的正确动作对南方电网主网架的稳定运行将发挥越来越大的作用, 当线路或者串补本身发生故障时, 串补保护要准确、及时动作, 避免因串补的误动导致电网潮流的振荡, 减少因串补退出导致的输电损失。

固定串补 (Fixed Series Compensation, FSC)

间隙自触发是指当间隙两端的电压达到一定的电压水平时, 火花间隙的电极会过压击穿, 形成放电回路, 从而导通的现象, 是火花间隙本身的物理特性<sup>[1-2]</sup>。间隙自触发作为串补电容器和 (Metal Oxide Varistor, MOV) 的过压保护, 能够防止串补电容器和 MOV 过压损坏, 是保护电容器和 MOV 的重要功能。间隙自触发动作完全取决于间隙两端的电压, 不依赖于控制保护逻辑和故障点范围。间隙自触发将导致串补旁路并重投。本文介绍了固定串补间隙的构成及触发原理, 分析了串补间隙自触发暂态故障录波, 最终找出了导致南方电网超高压公司所辖串补中频繁出现间隙自触发的原因, 并给出了反措建议。

## 1 火花间隙的构成及触发原理

### 1.1 等离子火花间隙系统的构成及触发方式

等离子火花间隙由间隙电极组、2 个冗余的

(Varistor Analog and Pulse, VAP)板、2个冗余的GTT (Ground Triggered Air Gap Trigger)板、两个冗余的触发电路、2个冗余的分压电容器、2个冗余的等离子发射器组成,如图1所示。其中,间隙电极组由低压、中压、高压三个电极组成;VAP板是和MOV保护配合触发间隙的触发板;GTT板是和线路保护配合用以触发间隙的触发板;等离子发射

器一般安装在低压电极上,其作用是为主电极的导通创造条件;触发电路和GTT板及VAP板相互配合,完成等离子发射器的触发任务。分压电容器组由两个电容器(C1,C2)串联而成,连接于触发回路,单只串补电容器单元的电压经C1、C2分压后,作为等离子发射器的电源。

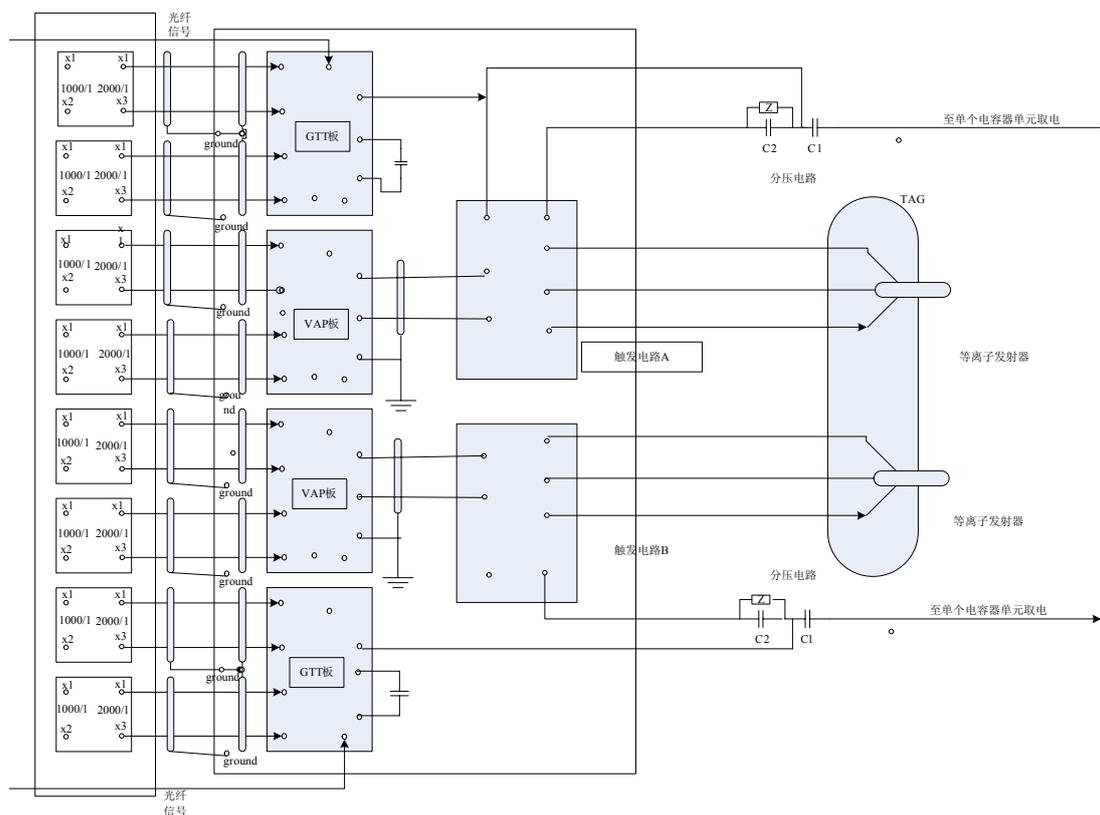


图1 等离子火花间隙触发回路

Fig.1 Trigger circuit of plasma gap

等离子火花间隙的导通有两种:一种是通过触发脉冲触发导通(GTT板触发和VAP板触发);一种是强制导通(自触发)。具体触发方式有以下三种:

(1) VAP板触发:平台上VAP板检测MOV的电流和能量,只要电流或能量达到设定值,VAP板通过触发电路向等离子发射器发触发脉冲,等离子发射器向中压电极发射等离子,然后导通间隙。

VAP板的输入信号为MOV的CT二次电流,其电源也由CT二次电流提供。间隙触发的电流、能量整定值均在VAP板上通过跳线整定,且不需要地面提供的信号,VAP板与触发回路相连,触发后在VAP板上累加计数器,该计数器可通过VAP板上的复归按钮清零。

(2) GTT板触发:在收到线路保护上送的触

发信号且同时检测到线路电流和电容器两端电压均大于1.8 p.u时,GTT板通过触发电路向等离子发射器发触发脉冲,等离子发射器向中压电极发射等离子,然后导通间隙。

(3) 强制导通(自触发):当电容器两端的电压达到间隙自触发电压定值时,间隙电极之间自行放电导通。

## 1.2 强制触发型火花间隙的构成及触发原理

强制触发型火花间隙的构成如图2所示,主要包括以下主要部件:

- (1) 自放电型主间隙2台,G1和G2;
- (2) 触发放电型密封间隙2台,TRIG1和TRIG2;
- (3) 限流电阻器2只,R1和R2;

- (4) 脉冲变压器 2 个, T1 和 T3;
- (5) 高绝缘脉冲变压器 2 台, T2 和 T4;
- (6) 均压电容器 4 只, C1、C2、C3 和 C4。

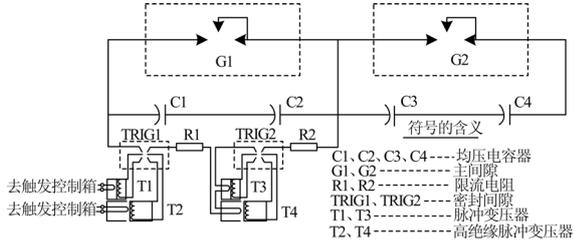


图 2 强制触发型火花间隙触发回路

Fig.2 Trigger circuit of compulsion triggered GAP

根据图 2 所示, 在串补装置以额定值正常运行时, 两个串联连接的主间隙 G1 和 G2 各承担串补电容器组额定电压的一半。在线路出现接地故障时, 由于限压器的作用, 如果电容器组电压最高上升到 2.3 p.u., 两个主间隙在动作前承担的电压约为 1.15 p.u. 主间隙内部由闪络间隙和续流间隙构成, 其中闪络间隙是主间隙中放电起始间隙, 间隙距离将根据其自放电电压进行调整。在没有触发的情况下, 间隙距离必须确保在最大可能承受的过电压下, 间隙不会自放电。

当输电线路出现接地故障时, 由 MOV 将电容器组的过电压限制在 2.3 p.u. 在未接收到触发命令时, 两个串联的主间隙各承担 1.15 p.u. 当间隙的触发控制系统接收到触发命令后, 将同时向脉冲变压器 T1 和 T2 的一次绕组发出点火脉冲, 经升压后使密封间隙 TRIG1 的两个球面电极上的火花塞对球面放电, 放电产生的小火花将迅速促使密封间隙 TRIG1 击穿。TRIG1 击穿后, 均压电容器 C1 将通过脉冲变压器 T3 和 T4 的一次绕组以及限流电阻 R1 放电。脉冲变压器 T3 和 T4 的二次绕组产生的高压脉冲将使密封间隙 TRIG2 的两个球面电极上的火花塞对球面放电, 放电产生的小火花将进一步迅速促使密封间隙 TRIG2 击穿, 并使均压电容器 C2 通过限流电阻 R2 放电。当均压电容器 C1 和 C2 的电压迅速降低时, 主间隙 G2 上的电压也将迅速升高到自放电水平并被击穿放电。与此同时, 主间隙 G1 上的电压也将迅速升高到自放电水平并被击穿放电。至此, 两个串联连接的主间隙全部放电, 使串补电容器组经阻尼电抗装置旁路。

## 2 故障录波分析

2009 年 04 月 10 日 18 时 29 分, 南方电网超高压输电公司所辖 500 kV 天金线 C 相故障, 经 1 066 ms 后重合于 B、C 相间接地故障。在此过程中, 500 kV

马百串补 B、C 相间隙自触发, 天平 I 线串补 B、C 相间隙自触发, 天平 II 线串补 B 相间隙自触发。以上自触发的串补均三相旁路后重投成功, 在此期间 500 kV 马百线, 天平 I、II 线均正常运行。根据马百串补的相关设计资料以及现场运行规程<sup>[3-6]</sup>, 马百串补和天平 I、II 线串补相关定值如表 1 所示, MOV 的伏安特性如表 2 所示。等值系统接线图如图 3 所示。

表 1 串补相关定值

Tab.1 The fixed value of FSC

串补名称	电容器组保护水平 / kV	电容器组自触发电压 / kV	MOV 电流启动定值 / kA	MOV 能量启动定值 / MJ
马百串补	242.2	266.42	12.5	51.6
天平 I、II 线固定串补	190	209	10	24

注: 电容器组自触发电压按 1.1×电容器组保护水平考虑, 以下同。

表 2 串补 MOV 的伏安特性

Tab.2 Volt-Amp characteristic of MOV's for FSC

I / A	U / kV		
	天平 I、II 线串补 FSC	TCSC	马百串补 FSC
1	151.5	27	198.3
50	159.8	28.2	210.52
100	161.5	28.5	212.79
500	166.0	29.3	218.09
1 000	168.0	29.7	220.43
3 000	173.0	30.3	/
5 000	176.0	30.6	229.87
10 000	180.0	31.4	235.24
20 000	/	32.1	242.04
30 000	190.0	/	/

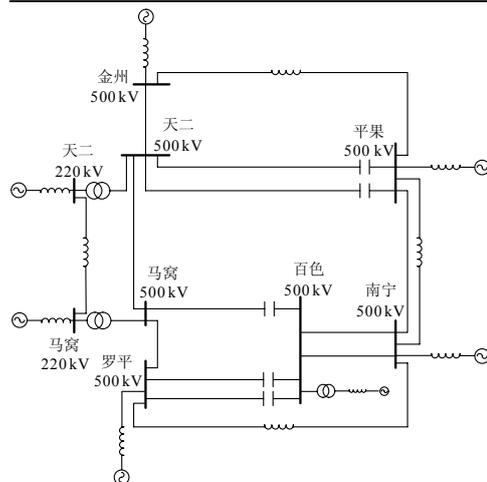


图 3 等值系统接线图

Fig.3 Wiring diagram of equivalence system

2.1 马百串补自触发故障录波分析

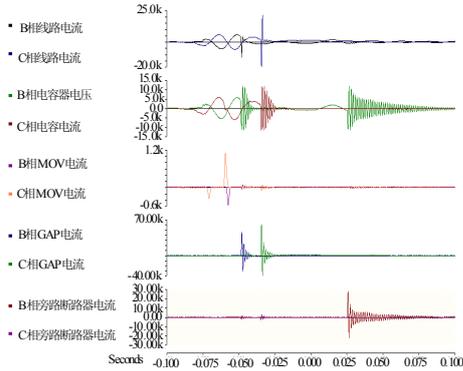


图 4 马百串补 B、C 相故障录波

Fig.4 Phase B/C transient fault record of Ma-Bai FSC

图 4 为 4 月 10 日马百串补区外故障时间隙自触发的故障录波。当 B 相电容器电流达到最小值时, B 相 MOV 达到最大值 577 A, 根据表 2 中马百串补 MOV 伏安特性曲线可知, B 相 MOV 两端电压在 218.09~220.43 kV 之间, 电容器组两端电压等于 MOV 两端电压。对照表 1 马百串补相关定值可知, B 相串补电容器组两端电压未达到间隙自触发电压定值 266.42 kV, 因此 B 相间隙不应该自触发。C 相 MOV 电流峰值最大为 1.093 kA, 根据马百串补 MOV 伏安特性曲线, 可知 C 相 MOV 两端电压约为 220.43 kV, 电容器组两端电压等于 MOV 电压。由于串补 C 相电容器组两端电压也未达到间隙自触发电压定值 266.42 kV, 因此 C 相间隙也不应该自触发。

2.2 天平 I 线串补自触发故障录波分析

利用 OSCOP 波形查看软件, 对天平 I 线串补发生间隙自触发时的故障录波进行分析, 图 5 为天平 I 线串补 B、C 相故障录波, 表 3 为图 5 中 C1 和 C2 时刻各模拟量的瞬时值。从图 5 可知, C 相先于 B 相约 1/4 周波检测到线路故障电流, C 相、B 相间隙先后在各自电容器电压达到最大值时触发。

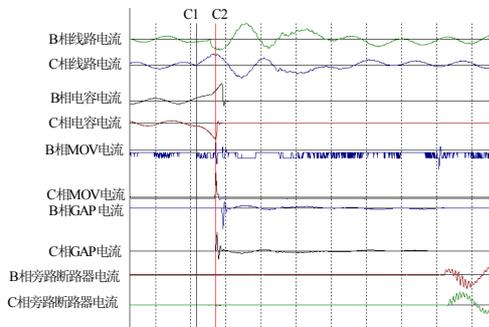


图 5 天平 I 线串补 B、C 相故障录波

Fig.5 Phase B / C transient fault record of Tian-Ping I FSC

表 3 C1 和 C2 时刻各模拟量的值

Tab.3 Analog signals value at C1 and C2

模拟量	C1	C2
B 相线路电流 / kA	-0.607 9	-1.953 1
C 相线路电流 / kA	-0.046 85	2.955 5
B 相电容器电压 / kV	19.501	67.588
C 相电容器电压 / kV	-27.06	150.21
B 相 MOV 电流 / kA	-0.008 63	-0.008 63
C 相 MOV 电流 / kA	-0.016 03	0.020 961
B 相 GAP 电流 / kA	-0.035 8	-0.035 8
C 相 GAP 电流 / kA	-0.037	-0.083 8
B 相旁路断路器电流 / kA	-0.033 29	-0.033 29
C 相旁路断路器电流 / kA	-0.032 06	-0.032 06

C 相在 C1 时刻检测到线路的故障电流, 此时线路电流处于过零点位置。在 C2 时刻, MOV 电流达到最大值 0.453 kA, 对应的线路电流为 2.84 kA, 电容器组电压为 155.84 kV, 远小于间隙自触发电压定值 209 kV, 因此间隙不应该自触发。

B 相在 C2 时刻, MOV 电流达到最大值 0.053 kA, 对应的线路电流为 2.377 2 kA, 电容器电压为 123.665 kV, 远小于间隙自触发电压定值 209 kV, 因此间隙也不应该自触发。

2.3 天平 II 线串补自触发故障录波分析

图 6 为天平 II 线串补 B 相的故障录波, 表 4 为图 6 中 C1 和 C2 时刻各模拟量的瞬时值。在 C2 时刻, MOV 电流达到最大值 2.906 kA, 对应的线路电流为 2.902 5 kA, 电容器电压为 173.61 kV, 小于间隙自触发电压定值 209 kV, 因此间隙不应该自触发。

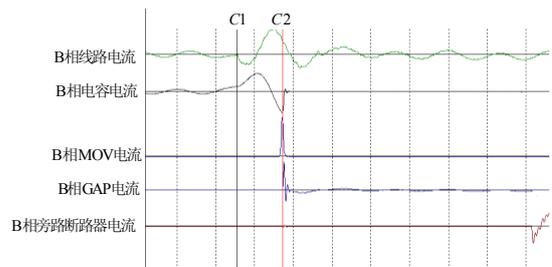


图 6 天平 II 线串补 B 相故障录波

Fig.6 Phase B transient fault record of Tian-Ping II FSC

表 4 C1 和 C2 时刻各模拟量的值

Tab.4 Analog signals value at C1 and C2

模拟量	C1	C2
B 相线路电流 / kA	-0.151 7	2.902 5
B 相电容器电压 / kV	42.38	-173.61
B 相 MOV 电流 / kA	-0.024 66	2.906 2
B 相 GAP 电流 / kA	-0.014 8	-0.072 7
B 相旁路断路器电流 / kA	-0.033 29	-0.033 29

### 2.4 故障录波小结

从上述故障录波分析，可以看出串补间隙触发时电容器组电压值均小于间隙自触发电压定值，MOV保护和线路保护均未动作。因此，4月10日天平 I、II 线串补和马百串补因区外故障引起间隙自触发属于误触发。

表 5 对触发时电容器电压与自触发定值进行了归纳统计，从表 5 可以看出，马百串补和天平 I、II 线串补有 5 相间隙自触发时电容器组电压均小于间隙自触发电压定值，其中有 4 相触发时的电容器组电压均分布在间隙自触发电压定值的 0.746~0.831 倍之间，除去天平 I 线 B 相，可以求得其他 4 相间隙自触发时比例系数等于 0.805。因此，可以认为实际间隙自触发电压定值约等于 0.8 倍的间隙自触发电压设计值，与设计不符。

表 5 触发时电容器电压与自触发定值归纳统计值

Tab.5 Capacitors voltage at trigger time and fixed value of gap self trigger reporting summary statistics

串补名称	相别	触发时电容器组电压 / kV	间隙自触发电压定值 / kV	$k_1$	$K_2$
马百串补	B 相	218	266.42	0.818	
	C 相	220	266.42	0.826	
天平 I 线	B 相	82.108	209	0.592	0.805
	C 相	155.84	209	0.746	
天平 II 线	B 相	173.61	209	0.831	

注： $k_1$  = 触发时电容器组电压/间隙自触发电压定值；归纳统计比例系数： $k_2 = \overline{k_1}$ ；以下同。

### 3 结论及建议

根据故障录波分析结果可知，间隙实际触发电压定值均约为设计值的 0.8 倍左右，从而导致电容器组电压未达到自触发定值而发生区外故障间隙自触发。因此，4月10日百色串补和平果串补发生的间隙自触发属于误触发。

导致间隙自触发的原因在于间隙一次设备本身，在串补定检时需要进行以下几个方面检查：

(1) 由于等离子火花间隙和强制触发型火花间

隙均符合 0.8 倍于自触发电压定值的规律，所以在年度定检中需要检查现场间隙电极间距离并重新整定。

(2) 火花间隙放电电压可能会受到环境因素的影响，需在实验室环境做各种温度和湿度下间隙的放电电压测试，研究间隙在不同温度、气压和湿度情况下间隙放电电压的变化规律。

(3) 目前强制型火花间隙均安装了均压电容器，均压电容器也可能是引起间隙自触发定值降低从而导致间隙在未达到自触发定值时自触发的一个因素。因此，需检查火花间隙均压电容参数是否和设计值一致，若均压电容器参数发生较大变化，应考虑更换。

另外，等离子型火花间隙的 GTT 板的工作不稳定也可能会导致间隙误触发，因此需进行 GTT 的可靠性测试，查明 GTT 板在哪些情况下会误触发，并进行改进。

### 参考文献

[1] GB / T6115.2-2002 / IEC 60143-2: 1994 电力系统用串联电容器(第2部分), 串联电容器组用保护设备[S].

[2] Anderson P M, Farmer R G. 电力系统串联补偿翻译组译. 电力系统串联补偿[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[3] Baise Compensation Project Instruction Book[S]. USA: GE Energy, 2005.

[4] Tian-Guang at pingguo series capacitor system operation maintenance manuals[S]. China Southern Power Grid Co., Ltd.

[5] 500 kV平果可控串补站现场运行规程[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司.

[6] 500 kV白色串补站现场运行规程[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司.

收稿日期: 2009-09-15; 修回日期: 2010-06-08

作者简介:

王 奇(1983-), 男, 工学博士, 工程师, 从事电力系统电压稳定与控制、直流及串补控制保护方面工作。E-mail: epwangqi@gmail.com