

# 消弧线圈投入后引起系统电压不平衡原因分析及解决办法

李嗣明<sup>1</sup>, 何婧<sup>1</sup>, 张熙军<sup>1</sup>, 陈飞<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 骆云峰<sup>3</sup>

(1. 海南电网三亚供电公司, 海南 三亚 572000; 2. 广东电网广州供电局, 广东 广州 510627;  
3. 广东电网惠州供电局, 广东 惠州 516001)

**摘要:** 通过对三亚电网 110 kV 鹿回头变电站 10 kV 自动调谐调匝式消弧线圈投入后母线电压不平衡加剧实例, 结合消弧线圈的工作原理及作用, 从理论上分析电压不平衡加剧产生原因, 并结合运行实际和相关规程规定针对此问题提出了相应的解决办法, 使 110 kV 鹿回头变电站 10 kV 母线电压不平衡情况减弱, 基本和未投入消弧线圈时一致且残流满足规程要求, 取得了明显的效果

**关键词:** 消弧线圈; 不平衡; 残流; 脱谐度; 改进措施

## Causing analysis and design solution of system voltage's unbalance when ARC-suppression coil goer line

LI Si-ming<sup>1</sup>, HE Jing<sup>1</sup>, ZHANG Xi-jun<sup>1</sup>, CHEN Fei<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, LUO Yun-feng<sup>3</sup>

(1. Hainan Power Grid Sanya Power Supply Company, Sanya 572000, China; 2. Gunagdong Power Grid Huizhou Power Supply Bureau, Huizhou 516001, China; 3. Gunagdong Power Grid Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 516027, China)

**Abstract:** Based on the example of bus voltage imbalance exacerbated when automatic tuning-turn-Petersen coil input on 110 kV power grid in Sanya Luhuitou 10kV substation and combined the working principle of Petersen coil, this papers analysis the theory increase of voltage imbalance causes. With the actual operation and related protocols, this paper presents corresponding solutions for this issue, so that bus voltage imbalance weakened and consistent with output of the Petersen coil and the residual flow to meet demand, which achieved marked results.

**Key words:** arc-suppression coil; unbalance; residual current; disarrangement extent; improving method

中图分类号: TM714.2 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)24-0124-05

## 0 引言

目前, 我国城市配电网的中低压供电系统大部分为中性点不接地即小电流接地系统。近些年来随着经济的发展, 6~35 kV 配电网不断发展, 电缆线路占配电线路的比例日益增大, 系统电容电流显著增加, 因此普遍配备安装了消弧线圈装置。但由于消弧线圈投入后会对系统中性点不平衡电压放大, 从而造成母线电压不平衡或不平衡度加剧成为一个较普遍的问题。本文结合三亚鹿回头变消弧线圈投入出现的此种问题, 进行分析, 根据现场提出解决方案, 供大家参考。

## 1 消弧线圈工作原理及作用

### 1.1 消弧线圈作用

小电流接地系统发生单相接地时, 电网仍可带故障运行, 避免开断线路, 提高了供电系统的可靠性, 但当单相接地电流较大时, 接地电弧不能最

终自熄, 产生弧光接地过电压和相间短路, 给供电设备造成极大的危害。防止这种危害的方法之一就是在变压器中性点和地之间串接一个消弧线圈, 利用它产生的感性电流补偿接地故障时的容性电流, 有效地减少接地点电容电流, 使故障相电压恢复的速度大大下降, 从而达到自动熄弧的目的, 保证供电安全。

自从 1917 年世界上第一台消弧线圈在德国投运以来, 随着科技的进步, 消弧线圈也得到了长足的发展, 目前消弧线圈大致分为以下几种:

- 1) 调匝式; (人工、自动)
- 2) 调容式;
- 3) 调气隙式;
- 4) 直流偏磁式;
- 5) 磁阀式。

### 1.2 消弧线圈工作原理

在中性点绝缘系统中, 如果三相对地电容平衡, 即线路换位很好, 则各相对地电压相等, 中性点的

对地电压为零。在此情况下, 各相对地电容产生的电容电流, 且超前电压  $90^\circ$ 。当发生单相接地故障时, 如 A 相接地, 则 A 相对地电压  $\dot{U}_A = 0$ ; 中性点的对地电压  $U_N$  由零升高为相电压  $(-\dot{E}_A)$ , B 相和 C 相的对地电压分别为:

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{-j150^\circ} \quad (1)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{j150^\circ} \quad (2)$$

即非接地相电压比正常电压升高  $\sqrt{3}$  倍。于是 B 相和 C 相的对地电容电流值增大了  $\sqrt{3}$  倍, 其有效值为:

$$I_B = I_C = \sqrt{3} \omega C_0 U_\phi \quad (3)$$

式中:  $C_0$  为一相对地电容;  $U_\phi$  为相电压。其方向分别领先于  $U_{BA}$  和  $U_{CA}$   $90^\circ$ 。

接地点电容电流为

$$I_{CA} = 3 \omega C_0 U_\phi \quad (4)$$

它的大小等于正常时一相对地充电电流的 3 倍, 方向滞后于 A 相正常时电压  $90^\circ$ , 如图 1 所示。

由于接地电流  $I_{CA}$  和接地相正常时的相电压相差  $90^\circ$ 。当接地电流过零时, 加在弧隙两端的电源电压为最大值, 因此故障点的电弧不易熄灭。当线路较长时, 容易形成间隙性的弧光接地或电弧稳定接地。间隙性的弧光接地能导致危险的过电压, 稳定性的弧光接地能发展成多相短路, 它们都能造成设备损坏和停电事故。

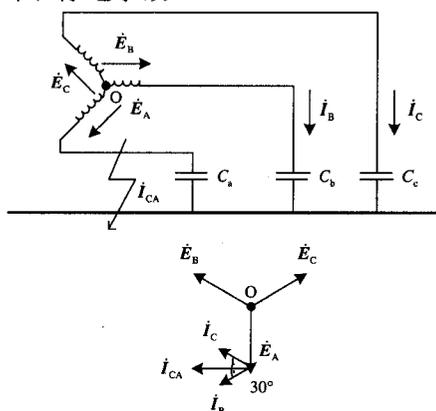


图 1 单相接地及向量图

Fig.1 Phasor diagram of single-phase earthing

将消弧线圈接在变压器或发电机绕组的中性点上, 形成消弧线圈接地系统。当系统单相, 例如 A 相接地时, 中性点的电压  $U_0$  将由零升高到相电压,

假设消弧线圈的电感为  $L$ , 消弧线圈中将产生电感电流  $I_L$ , 其大小  $I_L = \frac{U_0}{\omega L} = \frac{U_\phi}{\omega L}$ , 滞后中性点的电

压  $90^\circ$ , 即领先 A 相正常时的相电压  $90^\circ$ 。因此, 由故障点流回系统的消弧线圈的电感电流和接地电容电流的方向恰恰相反。如果适当地选择消弧线圈

$L$  的大小, 使  $\omega L = \frac{1}{3\omega C_0}$ , 那么通过故障点的电流

将等于零, 即接地电容电流  $I_{CA}$  全部被消弧线圈的电感电流  $I_L$  所补偿, 从而使得电弧自动熄灭, 达到了熄灭电弧的目的。

## 2 消弧线圈投入不平衡电压产生原因

消弧线圈接地系统在正常运行时的等值电路如图 2 所示。  $C_a$ 、  $C_b$ 、  $C_c$  为三相对地电容,  $L$  为消弧线圈的等值电感,  $R_L$  表示消弧线圈有功损耗的等值电阻。  $R_a$ 、  $R_b$ 、  $R_c$  为各相泄漏电阻。

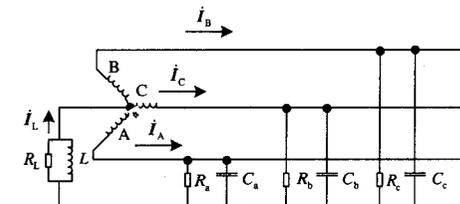


图 2 消弧线圈接地系统正常运行时的等值电路图

Fig.2. Equivalent diagram of arc-suppression coil in normal operation

假设三相电源电势对称, 且各相泄漏电阻相等为  $R$ , 则以  $U_A$  为参考相量, 中性点位移电压为

$$\dot{U}_0 = \frac{j\omega(C_a + \alpha^2 C_b + \alpha C_c)}{j\omega(C_a + C_b + C_c) - j\left(\frac{1}{\omega L}\right) + \frac{1}{R_0}} \dot{E}_A = -\frac{K_{c0}}{v - jd} \dot{E}_A \quad (5)$$

$$\text{其中: } \alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$K_{c0} = \frac{C_a + \alpha^2 C_b + \alpha C_c}{C_a + C_b + C_c}, \quad \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_L} + \frac{3}{R}$$

$$d = \frac{1}{R_0 \omega (C_a + C_b + C_c)}$$

$$v = \frac{\omega(C_a + C_b + C_c) - \frac{1}{\omega L}}{\omega(C_a + C_b + C_c)} = \frac{I_C - I_L}{I_C}$$

式中： $K_{C0}$  为电网不对称度（也称导线对地电容的不对称系数）； $d$  为电网阻尼率； $v$  为电网脱谐度。

其位移电压大小为

$$U_0 = \frac{U_N}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (6)$$

式中： $U_N$  为消弧线圈未投入时中性点不平衡电压值。

从公式 (5)、(6) 可以看到，在电网阻尼率一定的情况下，消弧线圈接地系统中性点电压的大小与脱谐度有关。脱谐度越小，中性点电压越高；脱谐度等于零即谐振补偿时，中性点电压最高。脱谐度愈小，放大作用愈强。所以加装消弧线圈后，对中性点位移电压起到了放大作用，造成系统电压的不平衡；如果消弧线圈未投入前系统已经不平衡，投入消弧线圈后，将加剧系统的不平衡。因此，为了保证正常运行时中性点电压不致过高，超出规程规定，应避免谐振补偿，尽量在较大的过补偿或欠补偿运行即是增大脱谐度，或者采取措施增大系统的阻尼，这是补偿电网调谐的另一个基本原则。另外，在以架空线路为主的电网中，还应该采用线路换位措施，以减小三相导线对地电容的不对称度，提高补偿效果。

### 3 鹿回头变电站消弧线圈投运情况

110 kV 鹿回头变消弧线圈共 2 台，均是由河北星光集团生产的 TXHK-Z 调匝式自动调谐消弧线圈成套装置，该种设备由接地变压器、消弧线圈、TXHK-Z 微机调节器、阻尼电阻箱、控制器和系统中性点电压合成器六个部分组成。每个档位补偿电流和阻尼电阻未固定值，具体参数如表 1、2 所示。

此套装置参数设置中运行方式共三种，即：欠补偿、最佳补偿、过补偿。补偿档位选择原则是在实际运行中某一档位的残流最接近参数设置中的残流下限值来自动选择档位。

鹿回头站 10 kV 母线在未投入消弧线圈时母线电压值如表 3 所示，可以看到在未投入消弧线圈时母线电压已经不平衡。

10 kV 母线在投入消弧线圈后母线电压值如表 4 所示，投入消弧线圈后，系统的不平衡加剧，此时消弧线圈实际运行情况如表 5 所示。现场采用过补偿方式。

表 1 #1 消弧线圈参数

Tab.1 The parameter of arc-suppression coil 1

#1 消弧线圈参数 XHDCZ-630/10							
档位	电流	电抗值	高压	ax	k	R	阻尼电阻
1	34.31	176.68	6062	171	35.47	2.1	2642.20
2	39.07	155.15	6062	184	32.92	2.1	2276.89
3	43.69	138.75	6062	201	30.12	2.1	1906.31
4	48.37	125.32	6062	212	28.58	2.1	1715.41
5	52.97	114.44	6062	227	26.69	2.1	1496.29
6	57.97	104.57	6062	234	25.92	2.1	1411.76
7	62.93	96.329	6062	247	24.55	2.1	1265.92
8	67.78	89.436	6062	253	23.94	2.1	1203.71
9	72.66	83.429	6062	265	22.89	2.1	1100.56
10	77.81	77.907	6062	265	22.86	2.1	1098.07
11	82.95	73.080	6062	274	22.12	2.1	1027.89
12	88.27	68.675	6062	275	22.07	2.1	1023.41
13	93.67	64.716	6062	282	21.48	2.1	969.029
14	98.49	61.549	6062	283	21.44	2.1	965.605
15	103.6	58.513	6062	290	20.91	2.1	918.870

表 2 #2 消弧线圈参数

Tab.2 The parameter of arc-suppression coil 2

#2 消弧线圈参数 XDZ-630/10							
档位	高压电流	电抗值	高压	ax	k	R	阻尼电阻
1	34.1	170.94	6062	171	35.45	2.1	2639.11
2	39	150.60	6062	184	32.94	2.1	2279.37
3	43.9	134.04	6062	195	31.08	2.1	2029.46
4	48	121.80	6062	204	29.71	2.1	1854.34
5	53	111.73	6062	214	28.32	2.1	1685.09
6	57	103.41	6062	220	27.55	2.1	1594.43
7	61.8	96.061	6062	228	26.58	2.1	1484.50
8	66.2	90.090	6062	234	25.90	2.1	1409.35
9	71.5	84.388	6062	244	24.84	2.1	1296.19
10	75.8	79.936	6062	252	24.05	2.1	1215.20
11	80.8	76.10	6062	256	23.67	2.1	1177.52
12	85.5	72.150	6062	260	23.31	2.1	1141.57
13	90.5	68.587	6062	264	22.96	2.1	1107.24
14	97	65.61	6062	268	22.61	2.1	1074.43
15	102.4	62.853	6062	274	22.12	2.1	1027.89

表 3 未投入消弧线圈时 10 kV 母线电压值

Tab. 3 The bus voltage of 10 kV before arc-suppression coil input

10 kV I 母电压值/kV			10kV II 母电压值/kV		
A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
6.0	5.9	5.9	5.9	6.0	6.0

表 4 投入消弧线圈后 10 kV 母线电压值

Tab. 4 The bus voltage of 10 kV after arc-suppression coil input

10 kV I 母电压值/kV			10 kV II 母电压值/kV		
A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
6.1	5.9	5.9	5.8	6.0	6.1

表 5 消弧线圈实际运行情况

Tab.5 Real situation in operation of arc-suppression coil

	#1 消弧线圈 (挂 10 kV I 母)	#2 消弧线圈 (挂 10 kV II 母)
电容电流/A	50.86	71.83
线圈档位	5 档	10 档
补偿电流/A	52.97	75.8
残流/A	2.11	3.97

表中, 电容电流为消弧线圈成套装置所测值, 线圈档位为装置根据所设残流下限值自动选取补偿后残流最接近下限值的档位, 各档位的补偿电流见表 1、2。

在出厂设置中 #1 消弧线圈残流值上限为 6 A, 下限为 2 A; #2 消弧线圈残流值上限为 7 A, 下限为 3 A。所以, 此时 #1 消弧线圈和 #2 消弧线圈分别在 5 档和 10 档时, 残流最接近设定的下限值, 补偿效果最优。

此时如果按这种补偿情况补偿, 尽管 10 kV 母线电压值满足《DL/T620-1997, 交流电气装置过电压保护和绝缘配合》中“消弧线圈接地系统, 在正常运行情况下, 中性点的长时间电压位移不应超过系统标称相电压的 15%”的规定, 但消弧线圈投入不平衡加剧情况仍是需要考虑的。

#### 4 改进措施和效果

通过对原残流设定值分析, 由于原残流设定值过低, 下限仅为 2 A 和 3 A, 造成消弧线圈实际工作点接近谐振点, 脱谐度接近零, 所以中性点位移电压大, 系统不平衡加剧。基于式 (5) 和 (6) 可知, 为减小中性点位移电压, 要么增大脱谐度, 要么采取措施增大系统的阻尼。

针对鹿回头变出现的问题, 考虑到运行实际,

决定采用增大系统脱谐度的方法。重设装置残流范围, 即在电容电流不变的前提下增大系统的残流。结合《DL/T620-1997, 交流电气装置过电压保护和绝缘配合》规程“消弧线圈接地系统故障点的残余电流不宜超过 10 A, 必要时可将系统分区运行。消弧线圈宜采用过补偿运行方式。”规定, 将 #1、#2 消弧线圈残流值设定范围为“6~10 A”, 仍采用过补偿运行方式。

10 kV 消弧线圈残流值重新设定后投运实际情况如表 6, 系统母线电压值如表 7 所示。

表 6 残流设定更改后消弧线圈实际运行情况

Tab.6 Real situation in operation of arc-suppression coil after residual flow reset

	#1 消弧线圈	#2 消弧线圈
电容电流/A	50.86	71.83
线圈档位	6 档	11 档
补偿电流/A	57.97	80.8
残流/A	7.11	8.97

表 7 残流设定更改后投入消弧线圈 10 kV 母线电压值

Tab. 7 Voltage of 10 kV busbar of afer residual flow reset

10 kV I 母电压值/kV			10 kV II 母电压值/kV		
A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
5.9	6.0	6.0	6.0	5.9	6.0

从表 6、7 中可以看出, 抬高消弧线圈残流值后, 消弧线圈档位自动调整, 让其工作点在设定范围内远离谐振点, 系统电压不平衡情况减弱, 基本和未投入消弧线圈时一致, 且残流值满足规程要求, 效果明显。

#### 5 结论

1) 消弧线圈投运后, 系统电压产生不平衡或不平衡加剧均是正常现象, 只要不超过规程规定的 15% 即可。

2) 消弧线圈发挥最佳作用是电网出现单相接地后, 实现全补偿, 此时脱谐度为零。但在电网正常运行情况下电网调度部门为了满足系统电压平衡要求而不得不将消弧线圈的脱谐度整定在较大的数值, 使接地残流加大不能很好地熄灭电弧, 补偿效果降低。

3) 为了减小中性点位移电压除了增大阻尼率  $d$  以外还可以增大脱谐度  $v$ 。在现场运行维护时, 增大脱谐度的方法比增大阻尼率更方便可行, 而且不增加设备成本。鹿回头变 10 kV 消弧线圈解决方案正是基于此, 取得了不错的效果。

参考文献

[1] 毛锦庆. 电力系统继电保护实用技术问答[M].北京: 中国电力出版社, 2002.  
MAO Jin-qing. Answer and Question of Relaying in Electric Power sSystem[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[2] 陈维贤. 电网过电压教程[M].北京: 中国电力出版社, 1996.  
CHEN Wei-xian. Instruction of Overvoltage in Electric Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press,1996.

[3] 曹云祥. 消弧线圈的调整及运行操作[J].农村电气化, 1998, (2): 26-28.  
CAO Yun-xiang.The Adjustment and Operation of Arc-suppression[J].Rural Electrification,1998, (2): 26-28.

[4] DL/T620-1997, 交流电气装置过电压保护和绝缘配合[S].  
DL/T 620 - 1997, Overvoltage Protection and Insulation Coordination for AC Electrical Installations [S].

[5] 童克诚, 汤波.消弧线圈在电网中的作用及工程应用分析.  
TONG Ke-cheng,TANG Bo.The Analysis of Effects and Application of Arc-suppression in Electric Power System.

[6] 杜永忠, 阎国强, 韩加凌.自动调谐调匝式消弧线圈阻尼电阻的选取原则分析[J].继电器, 2005, 33(12): 40-43.  
DU Yong-zhong, YAN Guo-qiang, HAN Jia-ling. Selecting Principle Analysis of Damping Resistance for Automatic-tuning Multi-tap Arc-suppression Coil[J]. Relay, 2005, 33(12): 40-43.

[7] 刘清凡.消弧线圈接入后一次系统不平衡加剧原因分析[J].继电器, 2005, 33(3): 79-82,88.  
LIU Qing-fan. Analysis of Reason for the Aggravation of Primary System After Arc-suppression Coil Connected [J].Relay, 2005, 33(3): 79-82,88.

[8] 赵红军, 刘兵.消弧线圈投入后母线电压不平衡度加大的原因及解决办法[J].新疆电力, 2006, 89(2): 1-3  
ZHAO Hong-jun, LIU Bin. The Cause and sSettle Method of Displacement Voltage Oversizing on Busbar after Arc- Suppression Inputting[J].Xinjiang Electric, 2006, 89(2):1-3.

[9] 张薛鸿. 35kV 电网实施消弧线圈自动跟踪调谐的研究(硕士学位论文)[D].北京: 华北电力大学, 2002.  
ZHANG Xue-hong.A Research on the Implement of Automatic Tuning for Petersen Coil in 35kV Distribution Network(Thesis)[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002.

[10] 李文锋.新型主从式消弧线圈的研究.(硕士学位论文)[D].北京: 华北电力大学, 2004.  
LI Wen-feng. Research of a New Type Main-Slave Peterson Coil(Thesis)[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.

[11] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[ M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. The Resonant Earthing in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

收稿日期: 2008-03-18; 修回日期: 2008-05-05

作者简介:

李嗣明(1981-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事电力系统继电保护和直流系统维护工作; E-mail: batiglo8112@yahoo.com.cn

何婧(1983-), 女, 本科, 助理工程师, 主要从事电力系统调度运行和运行方式工作;

张熙军(1962-), 男, 助理工程师, 主要从事变电检修管理工作。

许继开始批量生产云广特高压直流工程换流阀

近日, 许继柔性输电系统公司生产的±800 kV LTT 换流阀组件顺利通过了型式试验, 云广特高压换流阀已开始批量生产; 6 英寸ETT (电控) 换流阀型式试验组件也开始组装, 预计 12 月开始型式试验。

2007 年, 许继集团先后中标云南-广东、向家坝-上海两个特高压直流输电工程, 标志着公司在特高压重大装备国产化及自主技术创新方面实现了质的飞跃, 成为国内最具竞争力的特高压设备国产化基地之一。

依托贵广二回直流工程和高岭背靠背换流站工程项目的实施, 许继集团已完全掌握了超高压直流输电换流阀设计、制造和试验技术, 完成了超高压直流输电换流阀组件的研制, 具备直流输电ETT换流阀和LTT换流阀的设计、制造和试验能力。在特高压直流输电换流阀关键技术的研究和设备的研制中完成了特高压换流阀关键技术研究, 包括: 特高压换流阀绝缘配合的研究、电场分布的计算与高压屏蔽技术的研究、换流阀试验方法的研究、水冷系统设计方法的研究以及VBE设计技术的研究等。同时公司还完成了生产条件和试验环境的建设, 具备特高压换流阀的研制和例行试验的能力, 具备年生产2条完整特高压直流输电工程换流阀组件的能力。

许继集团公司云广特高压换流阀设备的批量生产, 有力地推动世界上第一个±800 kV 直流输电工程的顺利建设。