

预调式消弧线圈自动控制装置的现场调试方法

卢成楠, 邹经鑫, 何振宇, 袁明哲

(国网四川电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:当中性点不接地的配电网系统发生单相接地故障时,将中性点经消弧线圈接地,是减小短路点故障电流,实现接地点快速熄弧的关键技术。目前中国 10 kV 系统中已大量采用了预调式消弧线圈自动控制装置,但运检人员对其运行状况和调试方法容易产生一些误区。通过分析系统各种运行方式下的电容电流的计算方法,对并列运行时的消弧线圈给出了较优的控制策略,并结合不同型号消弧线圈调谐装置的调试和运行经验,提出了自动调档、自动跟踪调谐、手动调档运行工况的判断方法,对消弧线圈技术的理论研究和工程实践有一定的指导意义。

关键词:消弧线圈; 电容电流; 预调式; 等效电路; 现场调试

中图分类号:TM855 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2019)06-0071-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.015

Field Commissioning Method of Automatic Control Device for Pre-adjustable Arc Suppression Coil

Lu Chengnan, Zou Jingxin, He Zhenyu, Yuan Mingzhe

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: When single-phase grounding fault occurs in distribution network with ungrounded neutral point, grounding technology of neutral point through arc suppression coil is the key technology for reducing fault current and realizing fast arc extinguishing at grounding point. At present, a large number of pre-adjustable arc suppression coil tuning devices have been used in 10 kV system in China. However, its operation status and commissioning methods cause some misunderstandings to the operation and maintenance staffs. The calculation methods of capacitive current under various operation modes of the system are analyzed, and a better control strategy for arc suppression coils in parallel operation is provided. Combining with the commissioning and operation experiences of different types of arc suppression coil tuning devices, the judgement methods for the operating conditions of automatic adjustment, automatic tracking and manual shifting are put forward. It has a certain guiding significance for the theoretical research and engineering practice of arc suppression coil technology.

Key words: arc suppression coil; capacitive current; pre-adjustable; equivalent circuit; field commissioning

0 引言

由于中性点不接地系统具有单相接地故障时非故障相可以不中断向用户供电的特点,因此中国 6~10 kV 系统大多都采用了这种运行方式。但是这种方式下容易产生间隙性弧光接地过电压,使原本的单相接地故障进一步发展为相间短路或多点重复性接地故障,从而威胁电网安全^[1-3]。为了减少单相接地时产生的电容性电流,中国在大范围内应用了消弧线圈技术,将它接入站用接地变压器的中性点,从而在接地点的接地弧道中补充电感性电流,实现抵消经

健全相流入短路点的电容性电流的目的,可显著减小接地电流,实现快速熄弧的目的^[4-8]。

目前大量变电站中的 10 kV 部分都采用了预调式消弧线圈调谐装置,在系统发生接地故障前计算故障时的电容电流,并将消弧线圈调整到匹配的状态,一旦发生故障可快速补充电感电流^[9-12]。下面以现场运行调试经验为基础,以两款主流国产消弧线圈调谐装置(分别称为装置 1 和装置 2)为例,针对变电运行人员在电容电流的计算和测量、消弧线圈装置并列运行以及现场调试中的常见问题进行了研究,介绍了不同运行方式下系统电容电流的算法以及消弧线圈的现场调试方法。

1 电容电流的计算方法

1.1 电容电流的基本计算

变压器的10 kV侧通常采用的接线方式为三角形接线,虽然没有可见的物理中性点,但是在电气上是存在中性点O的。为了实现消弧线圈在中性点的接入,必须引出一个中性点,其方法是在10 kV母线上接入一台采用Z型接线方式的接地变压器。该方法特点是零序电抗小,不会对零序电流产生扼流效应。在引出的中性点中接入消弧线圈后,消弧线圈提供的感性补偿电流可在其中自由地流通。在中性点接入消弧线圈后,正常运行时的系统如图1所示^[13-14]。

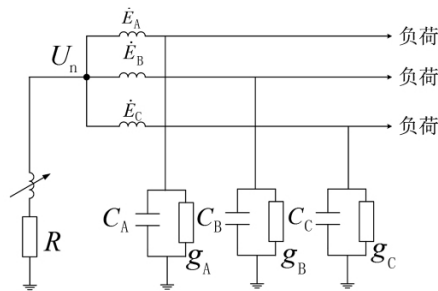


图1 中性点经消弧线圈接地系统

由于不接地电网中负载的中性点也是不接地的,三相对地电压不受系统的负载阻抗值和不对称度的影响。所以分析系统三相对地电压和中性点对地电压时可以不考虑负载的影响,只分析各相的对地电容和电导,又由于电容的容抗 $\frac{1}{\omega C}$ 比漏电阻 r 小得多($\frac{1}{\omega C} \approx 0.05$),为了分析方便,以下分析中忽略漏电阻而只看线路对地电容的影响,简化系统如图2所示。

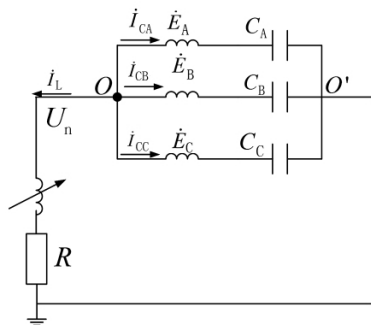


图2 正常运行时系统

图中: $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ 分别为各相的电源电动势;

C_A, C_B, C_C 分别为A、B、C三相线路对地的电容。此时可通过两种方法推导中性点电流 I_L 。

1) 依据基尔霍夫电流定理,流出中性点的电流和为0可得:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{CA} + \dot{I}_{CB} + \dot{I}_{CC} + \dot{I}_L &= 0 \\ \Rightarrow (\dot{U}_n + \dot{E}_A) \cdot j\omega C_A + (\dot{U}_n + \dot{E}_B) \cdot j\omega C_B + \\ (\dot{U}_n + \dot{E}_C) \cdot j\omega C_C + \dot{U}_n / (j\omega L + R) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

可得中性点电压

$$\dot{U}_n = - \frac{j\omega(\dot{E}_A C_A + \dot{E}_B C_B + \dot{E}_C C_C)}{j\omega L + R + j\omega(C_A + C_B + C_C)}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_L &= \frac{\dot{U}_n}{j\omega L + R} = - \frac{j\omega(\dot{E}_A C_A + \dot{E}_B C_B + \dot{E}_C C_C)}{1 + j\omega(C_A + C_B + C_C)(j\omega L + R)} \\ &= \frac{(\dot{E}_A C_A + \dot{E}_B C_B + \dot{E}_C C_C)}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega(C_A + C_B + C_C)}} \end{aligned} \quad (2)$$

2) 通过戴维南等效电路与诺顿等效电路的转化可知,中性点O对地电压为

$$\begin{aligned} U_{00'} &= - \frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \\ &= - E_A \frac{C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\alpha = e^{j120^\circ}$, $1 + \alpha^2 + \alpha = 0$; Y_A, Y_B, Y_C 分别为三相对地导纳。当三相对地电容相等即 $C_A = C_B = C_C$ 时,中性点电压为0。而当配电网不平衡时即 $C_A \neq C_B \neq C_C$,会产生不平衡电压 $U_{00'} \neq 0$ 。由于不平衡电压的存在,在中性点接入消弧线圈以后会在 C_A, C_B, C_C 和消弧线圈L上产生电流。

正常运行时消弧线圈的等效电路如图3所示。

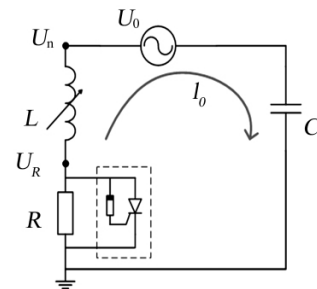


图3 正常时运行时消弧线圈的等效电路

图中: $U_0 = U_{00'}$, 为系统不平衡电压,它具有零序电压的性质; U_n 为中性点位移电压; U_R 为阻尼电阻分

压; L 为消弧线圈等效电感; R 为阻尼电阻; $C = C_A + C_B + C_C$ 为系统等效对地电容; I_0 为系统的不平衡电流。

若中性点不接地系统由于各种原因导致单相金属性接地, 此时电网中的电容电流分布情况如图4所示, 若单相金属性接地故障发生在系统的A相, 其对地电压会降为0, 其余两相的对地电压升高为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 因此对地电容电流也上升为原来的 $\sqrt{3}$ 倍。图5所示为故障发生时各相电压电流的向量关系, 此时各相对地电压为

$$\begin{cases} \dot{U}_A = 0 \\ \dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{-j150^\circ} \\ \dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{j150^\circ} \end{cases} \quad (4)$$

则母线中性点的零序电压为

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = -\dot{E}_A \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_g &= I_L + I_C = -\frac{\dot{E}_A}{j\omega L} + \dot{U}_B \cdot j\omega C_B + \dot{U}_C \cdot j\omega C_C \\ &= -\dot{E}_A \left(\frac{1}{j\omega L} + 3 \cdot j\omega C_0 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

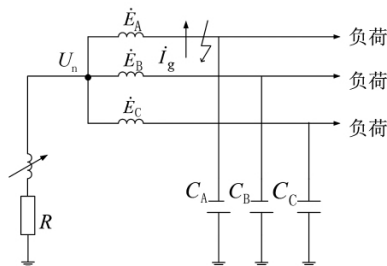


图4 A相接地时电容电流分布

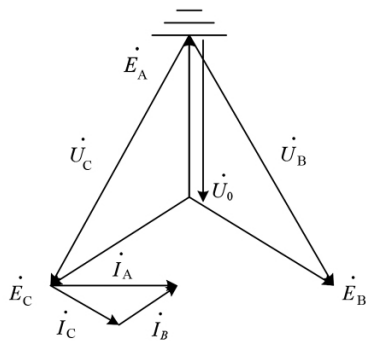


图5 A相接地时的向量关系

从式(1)至式(6)中可以看出, 分析补偿电网单相接地时可用一个如图6所示的并联谐振电路来等效, 此时的电源电动势为相电压。

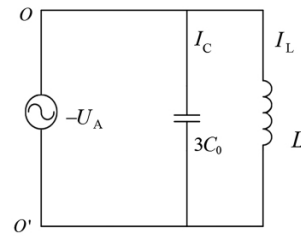


图6 补偿电网单相接地等效电路

1.2 电容电流测量方法

消弧线圈的自动调谐是按电网电容的变比来调整消弧线圈的接入电感值, 使其产生的电感电流能够有效抵消故障相的电容电流。一般是在单相故障发生前, 也就是在正常运行状态下预先调节消弧线圈电感使其达到串联谐振挡位, 当故障发生时最大限度地补偿电容电流。思路是在系统发生故障前采集中性点的位移电压、中性点电流和消弧线圈的电感值, 以此计算出系统的对地容抗, 并通过单相接地故障的等效回路计算此时的电容电流^[15-17]。

电容电流:

$$I_c = U_\varphi / X_C = U_\varphi \omega C = \frac{10.5 \times 10^3}{\sqrt{3}} \times 2\pi f C \quad (7)$$

电感电流:

$$I_L = U_\varphi / X_L = \frac{U_\varphi}{\omega L} = \frac{10.5 \times 10^3}{\sqrt{3}} / 2\pi f L \quad (8)$$

式中: U_φ 为相电压; C 为系统电容; L 为消弧线圈电感。

装置1各挡位与对应电抗如表1所示, 据此可以计算每挡电感电流。

表1 装置1各挡位与对应电抗

挡位	电抗/H	挡位	电抗/H	挡位	电抗/H
1	123.2	9	61.3	17	40.6
2	108.9	10	27.3	18	38.9
3	97.6	11	53.7	19	36.7
4	89.0	12	50.8	20	0
5	81.8	13	48.2	21	0
6	75.8	14	45.9	22	0
7	70.7	15	43.9	23	0
8	65.5	16	42.2	24	0

$$I_L = \frac{U_\varphi}{\omega L} = \frac{6062}{100 \times \pi \times L} \quad (9)$$

在计算系统电容时采用幅值相位法, 具体方法为调整消弧线圈挡位, 根据位移电压或电流的变化找出谐振点, 用谐振点两侧挡位的中性点电流以及

它们之间的相位差 根据阻抗三角形计算电容电流, 如图7所示。此方法考虑了中性点电阻的影响, 测量精度比装置中可供选择的外加非工频信号法和幅值计算法要高。

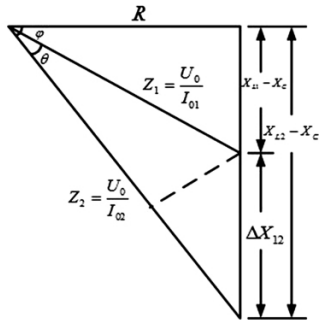


图7 阻抗三角形

$$\begin{cases} Z_1 \cdot \sin\theta = (\omega L_2 - \omega L_1) \cdot \cos\varphi \\ U_0/I_{01} = Z_1 \\ (U_0/I_{02}) \cdot \cos\varphi = R \\ \Rightarrow \cos^2\varphi = \frac{I_{02} \cdot \sin\theta \cdot R}{I_{01} \cdot (\omega L_2 - \omega L_1)} \end{cases} \quad (10)$$

$$C = \frac{R}{\omega \cdot \tan\varphi} + L_2 \quad (11)$$

式中: Z_1 和 Z_2 分别为在两个挡位下系统的总阻抗; L_1 和 L_2 分别为在两个挡位下装置的电抗值; I_{01} 和 I_{02} 分别为在两个挡位下系统的不平衡电流。

装置2挡位与对应电感电流如表2所示, 据此可以计算每档电抗。

表2 装置2挡位与对应电感电流

挡位	电流/A	挡位	电流/A	挡位	电流/A
1	48.6	12	103.6	23	155.2
2	54.2	13	108.1	24	160.6
3	60.0	14	112.8	25	164.5
4	65.1	15	117.2	26	0
5	70.3	16	121.8	27	0
6	75.3	17	126.1	28	0
7	80.3	18	131.2	29	0
8	84.9	19	135.9	30	0
9	89.5	20	140.8	31	0
10	94.2	21	145.7	32	0

$$\omega L = \frac{U_\varphi}{I_L} = \frac{6062}{I_L} \quad (12)$$

在计算系统电容时采用实时算法(两点法), 调节消弧线圈至某一挡, 测得中性点位移电压 \dot{U}_{n1}

和中性点电流 \dot{I}_{01} ; 再将装置调节至相邻的挡位, 测得此时的中性点的另一组位移电压 \dot{U}_{n2} 和电流 \dot{I}_{02} 。调挡过程中系统的不平衡电压为 \dot{U}_0 不变, 根据正常时消弧线圈的等效电路有:

$$\begin{cases} \dot{U}_{n1} = \dot{I}_{01}(j\omega L_1 + R) \\ \dot{U}_0 = \dot{I}_{01}\left(j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C} + R\right) \\ \dot{U}_{n2} = \dot{I}_{02}(j\omega L_2 + R) \\ \dot{U}_0 = \dot{I}_{02}\left(j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C} + R\right) \end{cases} \quad (13)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{j\omega C} = \frac{\dot{U}_{n1} - \dot{U}_{n2}}{\dot{I}_{02} - \dot{I}_{01}}$$

$$I_c = \frac{U_\varphi}{X_c} = U_\varphi \cdot \text{Im}\left(\frac{\dot{I}_{02} - \dot{I}_{01}}{\dot{U}_{n1} - \dot{U}_{n2}}\right) \quad (14)$$

但在现场调试时可能出现一种情况: 由于系统线路比较对称, 导致测得的中性点电压很小, 无法准确计算电容电流。为了能满足装置计算需求, 往往要人为将Z型接地变压器的挡位调偏(例如B相的挡位与A、C相不同), 以提高中性点处的不平衡电压, 使调谐装置可以计算电容电流。

2 并列消弧线圈的计算方法

当几个独立的消弧线圈系统联机运行, 母联开关合上时, 如果两套消弧线圈装置无法判断并列状态, 则两套装置将会不断调挡而达不到一个稳定状态。为了避免多套消弧线圈控制装置并列运行时影响彼此计算结果和调挡的正确性, 消弧线圈装置均采用一套装置定挡另一套装置调挡的运行策略^[18-20]。以图8所示的装置为例, 按照主机定挡运行、从机负责调挡原则, 采用两点法对电容电流进行如下计算。

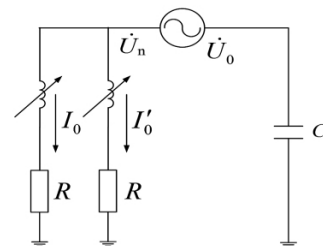


图8 两套消弧装置并列运行等效电路

其中主机定为 L_2 , 从机由 L_1 调至 L'_1 , 在第一1

个挡位时流经两个支路的电流分别为 \dot{I}_{01} 和 \dot{I}'_{01} 在第2个挡位时流经两个支路的电流分别为 \dot{I}_{02} 和 \dot{I}'_{02} (也就是此时两个装置上各自显示的“中性点电流”):

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \dot{U}_{n1} + (\dot{I}_{01} + \dot{I}'_{01}) \cdot \frac{1}{j\omega C} \\ \dot{U}_{n1} = \dot{I}_{01} (j\omega L_1 + R) \\ \dot{U}_{n1} = \dot{I}'_{01} (j\omega L_2 + R) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \dot{U}_{n2} + (\dot{I}_{02} + \dot{I}'_{02}) \cdot \frac{1}{j\omega C} \\ \dot{U}_{n2} = \dot{I}_{02} (j\omega L'_1 + R) \\ \dot{U}_{n2} = \dot{I}'_{02} (j\omega L_2 + R) \end{cases}$$

$$\dot{U}_{n1} + (\dot{I}_{01} + \dot{I}'_{01}) \cdot \frac{1}{j\omega C} = \dot{U}_{n2} + (\dot{I}_{02} + \dot{I}'_{02}) \cdot \frac{1}{j\omega C}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{j\omega C} = \frac{\dot{U}_{n2} - \dot{U}_{n1}}{\dot{I}_{01} + \dot{I}'_{01} - \dot{I}_{02} - \dot{I}'_{02}}$$

$$\dot{I}'_{01} = \frac{\dot{U}_{n1}}{j\omega L_2 + R} \dot{I}'_{02} = \frac{\dot{U}_{n2}}{j\omega L_2 + R} \quad (16)$$

$$I_c = U_\varphi \omega C = U_\varphi \cdot \text{Im} \left(\frac{\dot{I}_{02} - \dot{I}_{01}}{\dot{U}_{n1} - \dot{U}_{n2}} - \frac{1}{j\omega L_2 + R} \right)$$

$$\approx U_\varphi \cdot \text{Im} \left(\frac{\dot{I}_{02} - \dot{I}_{01}}{\dot{U}_{n1} - \dot{U}_{n2}} \right) + \frac{U_\varphi}{\omega L_2} \quad (17)$$

并列运行时 $I_c = U_\varphi \cdot \text{Im} \left(\frac{\dot{I}_{02} - \dot{I}_{01}}{\dot{U}_{n1} - \dot{U}_{n2}} \right)$, 可以看

出, 此时主机显示的电流约等于系统电容电流减去从机显示的电感电流。母联位置开入主机后, 主机定挡在目前挡位; 设置为从机的控制器测量并跟踪两段母线电容电流。如从机计算出电容电流超过(小于)本身最大(小)容量, 则通知主机调整当前挡位, 主机调整3挡后, 通知从机重新测量计算以适应从机后再次定挡。

3 消弧线圈调试方法

按照图9所示的等效模型图进行图10所示的现场接线, 完成自动调谐消弧线圈的现场调试^[21]。

以装置1为例, 其设计参数如表3所示。随着挡位增大, 消弧线圈电感减小、电感电流增大, 并逐一进行相关调试项目。

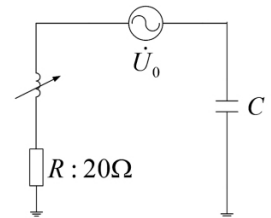


图9 试验等效电路

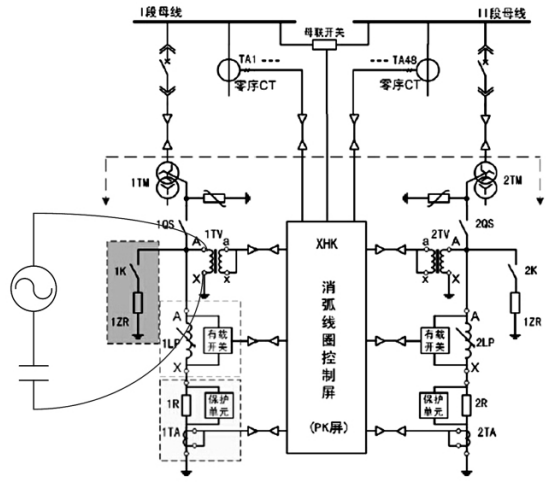


图10 试验接线

表3 装置1参数计算表

挡位	设计电流 / A	测量电流		电抗 / Ω
		电流 / A	偏差 / %	
1	50.00	49.19	-1.62	123.23
2	56.39	55.68	-1.25	108.87
3	62.78	62.14	-1.01	97.55
4	69.17	68.08	-1.57	89.04
5	75.56	74.09	-1.49	81.82
6	81.95	79.98	-2.40	75.80
7	88.33	85.74	-2.94	70.70
8	94.72	92.49	-2.36	65.54
9	101.11	98.88	-2.21	61.31
10	107.50	105.79	-1.59	57.30
11	113.89	112.81	-0.95	53.74
12	120.28	119.24	-0.86	50.84

1) 自动调挡试验: 校验电容电流计算的准确性及自动调挡的准确性。接入电容为 $32 \mu\text{F}$, 电源为 12 V , 此时电容电流为 $I_c = U_\varphi \omega C_1 = 60.94 \text{ A}$, 为满足残流为 $1 \sim 10 \text{ A}$ 的过补偿状态, 查询表3的补偿电流的计算值可见3挡和4挡满足要求, 而此时装置显示消弧线圈停留在3挡, 说明该装置自动调挡试验结果正确。

2) 自动跟踪调谐试验: 减小电容, 模拟切除故障线路后系统电容改变, 以校验系统电容发生变化时, 电容电流计算的准确性和自动调挡的准确性。试验中保持电源电压不变, 减小电容至 $24 \mu\text{F}$, 此时电容电流为 $I_c = U_\phi \omega C_2 = 45.70 \text{ A}$, 装置自动调至 1 挡, 说明该装置自动跟踪调谐试验结果正确。

3) 手动调挡试验: 从 1 挡至最高挡进行手动调挡, 同时记录数据, 从变化趋势和满足公式两方面分析中性点电流和中性点位移电压的准确性。

由于中性点电流:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + R^2}} \quad (18)$$

随着挡位增大, 消弧线圈电感减小, 中性点电流和中性点位移电压应满足先增后减的变化规律, 并在谐振点时幅值达到最大。

4 结 论

通过上面的分析, 可以得出在变电站现场进行消弧线圈计算和调试时的一些实用结论:

1) 在单相接地故障发生前, 10 kV 系统不接地电网接入消弧线圈后, 消弧线圈与线路对地电容以及阻尼电阻可等效为 RLC 串联回路; 单相接地故障时, 系统等效为 LC 并联回路。在正常运行时满足谐振条件的电感值能在故障时获得最佳补偿效果。

2) 分析了不同运行方式下, 系统电容电流的计算方法, 装置 2 在计算电容电流时采用幅值相位法, 两套消弧线圈装置并列运行时, 从机定挡运行主机可调挡; 而装置 1 采用实时算法(两点法), 主机定挡运行从机可调挡, 此时主机显示的电流约等于系统电容电流减去从机显示的电感电流。

3) 总结了消弧线圈自动控制装置的现场调试方法, 在调试过程中, 应分别针对消弧线圈装置的自动调挡功能和自动跟踪调谐进行试验, 并通过记录手动调挡数据确定装置的正常运行。而针对当中性点不平衡电压很低时电容电流的计算问题, 还需要开展更加深入的研究。

参考文献

[1] 张林利. 小电流接地故障定位方法及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.

[2] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 64-69.

[3] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 145-154.

[4] Zamora I, Mazon A J, Sagastabeitia K J, et al. Verifying Resonant Grounding in Distribution Systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(4): 45-50.

[5] 王朋, 陈柏超, 周洪, 等. 非连续铁心结构磁控消弧线圈的稳态建模与优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5606-5614.

[6] 陈维江, 蔡国雄, 蔡雅萍, 等. 10 kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 56-60.

[7] 公茂法, 葛卉婷, 林煜清, 等. 10 kV 消弧线圈补偿系统的应用研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 84-87.

[8] 王振邦, 赵明, 卢冲, 等. 消弧线圈接地补偿装置在线监测系统的研究[J]. 山东工业技术, 2017(6): 222-223.

[9] 刘宝稳, 李晓波. 基于失谐量的消弧线圈跟踪调谐方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 6-9.

[10] 吴斌, 陈纲, 金云奎, 等. 一种新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 157-163.

[11] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.

[12] 靳利华, 黄寿元. 自动调谐消弧线圈接地补偿装置的选型与计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 19-23.

[13] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.

[14] 徐波, 蔡旭. 改进的消弧线圈故障期间调谐方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 107-112.

[15] 司瑞琦, 黄翰, 罗建, 等. 基于消弧线圈补偿特征的故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 16-22.

[16] 唐轶, 王涛, 罗建锋. 用于消弧线圈控制的单相接地电流测量方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2242-2245.

[17] 贾清泉, 王振宇, 王宁, 等. 基于参数辨识的消弧线圈接地电网单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 77-85.

[18] 薛寒. 采用消弧线圈并联电阻的小电流接地故障选

线方案研究[D]. 济南: 山东理工大学, 2013.

弧线圈研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.

[19] 陈忠仁, 李占琪. 消弧线圈的自动并联运行及其控制[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 72-77.

作者简介:

卢成楠(1991), 变电二次检修中级工, 助理工程师, 长期从事继电保护工作。

[20] 陈竹峰. 自动调谐式消弧线圈控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2018(2): 41-43.

(收稿日期: 2019-07-19)

[21] 杨赞超. 基于信号注入法的自动跟踪补偿调容式消

(上接第49页)

表9 投资效益对比

方案	方案优点	方案缺点	投资金额/万元	降损电量/10 ⁴ kWh	效益提升/万元
1	梳理水电群网架架构, 有效降低水电送出线路损率, 同时提高 220 kV 变电站站间互供能力, 可满足后期水电发展	投资较大	20 000	3000	1000
2	投资金额较小	路降损效果不明显, 形成 110 kV 环网较多	3600	1600	480
3	仅对 3 条高损水电送出线路进行线径改造, 投资相对较小	线路降损效果不明显, 未起到网架梳理效果, 无法满足后期水电发展	11 700	1650	550

方案 1 线路降损效果明显, 优化了开都河流域水电送出网架结构, 同时使 220 kV 红帆变电站—220 kV 和静变电站具备较强互供能力, 形成合理的网架结构, 同时有利于后期开都河流域水电项目建设发展。若以年度降损电量 3.0×10^7 kWh 计算, 每年将为巴州公司减少效益损失 1000 万元。

虽然方案 1 投资较大, 但从电网发展、节能减排、提升公司效益方面, 方案 1 优于其他方案。因此推荐方案 1。

4 结论及建议

1) 通过新建 220 kV 和静变电站, 有效缩短了开都河流域水电送出线路长度, 同时提高了水电外送线路电压等级, 大大降低了开都河流域水电送出线路损率, 有效解决了开都河流域水电送出线路长期损失电量较大问题, 使巴州电网 110 kV 分压线损率降低 1% 左右, 在分压线损合理区间。

2) 新建 220 kV 和静变电站梳理了开都河流域水电送出线路网架结构, 也提高了 220 kV 红帆变电站互供能力。为后期开都河流域水电开发提供了接入点, 满足了今后电源发展需求。

3) 针对某流域水电群建设初期, 应结合水电群规划情况, 合理规划 220 kV 变电站布点, 缩短 110 kV 线路半径, 减少因长距离输送造成线路高损问题。

参考文献

- [1] 党三磊. 线损与降损措施[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 吴安官. 电力系统线损分析与计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [3] 纪雯. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [4] 谭永才. 电力系统规划设计技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 高海丽, 李黎峰, 刘兴龙, 等. 采用无功补偿方式的技术降损探讨[J]. 云南电力技术, 2018, 46(2): 9-11.
- [6] 贺星棋, 唐伟. 四川电网 35 kV 及以上电网降损潜力分析[J]. 四川电力技术, 2019, 42(3): 26-28.

作者简介:

贾中义(1988), 本科, 研究方向电力系统运行分析;
张东明(1987), 硕士, 研究方向电力系统运行分析。

(收稿日期: 2019-09-30)