

自动调谐调匝式消弧线圈阻尼电阻的选取原则分析

杜永忠, 阎国强, 韩加凌
(山西潞安矿业集团公司, 山西 长治 046204)

摘要: 目前在中低压电网中使用比较多的消弧线圈是自动调谐调匝式消弧线圈, 这种消弧线圈采取的是预调节方案, 即在电网正常运行时调节消弧线圈档位使消弧线圈的电抗等于电网的容抗, 为抑制全调谐状态下的串联谐振过电压, 一般采取并联或串联阻尼电阻的方法, 但如何选取阻尼电阻是比较困难的, 该文详细分析了自动调谐调匝式消弧线圈阻尼电阻的选取原则, 具有一定的实用价值。

关键词: 消弧线圈; 阻尼电阻; 脱谐度; 阻尼率; 串联谐振过电压

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)12-0040-03

0 引言

目前我国中低压电网中的消弧线圈基本上都是调匝式的, 这种消弧线圈靠改变绕组的线圈匝数来改变电感, 电感量与匝数 N 的平方成比例, 用无载开关调节分接头, 因此其电感不连续可调。将这种消弧线圈的无载开关换为有载开关即可实现带电调节, 加装自动控制装置后即可实现消弧线圈的自动调谐。

在中性点经消弧线圈接地系统中, 容易发生串联谐振过电压, 特别是调谐到全补偿状态时, 在没有阻尼电阻的系统中, 中性点位移电压很有可能超过规程规定的相电压的 15%, 为了满足规程的要求, 过去常采用增大脱谐度 ν 远离谐振点的办法, 但增大脱谐度 ν 会使得单相接地时接地残流太大以致接地电弧不能很好地熄灭。从公式 $U_0 = \frac{K_C \cdot U_\phi}{\sqrt{\nu^2 + d^2}}$ 还可以看出, 除了增大脱谐度 ν 以外, 还可用增大阻尼率 d 的办法, 在消弧线圈上并联或串联阻尼电阻, 就是为了增大电网的阻尼率, 从而达到降低此电压的目的。但阻尼电阻的大小是如何确定的呢? 本文通过对并联阻尼电阻的选取原则分析来说明这个问题。

1 阻尼电阻的串联与并联的等效性

对于消弧线圈的阻尼问题, 串联阻尼电阻和并联阻尼电阻是同样等效的。如图 1 所示是并联和串联阻尼电阻的电路图。

并联电路阻抗:

$$\frac{R \cdot jL}{R + jL} = \frac{R^2 L^2 + jR^2 L}{R^2 + L^2}$$

串联电路阻抗:

$$R_0 + jL_0$$

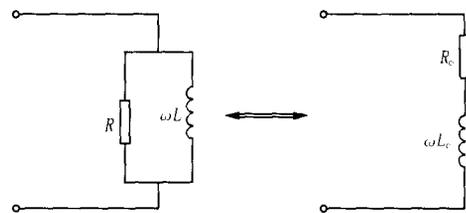


图 1 消弧线圈并联和串联阻尼电阻换算电路

Fig 1 Conversion circuit of damping resistance in parallel connection and series connection for multi-tap arc-suppression coil

若令它们的参数等效, 则串联电路与并联电路有如下关系

$$R_0 = \frac{R^2 L^2}{R^2 + L^2} \quad (1)$$

$$L_0 = \frac{R^2 L}{R^2 + L^2} \quad (2)$$

实际上, 不管是并联阻尼电阻, 还是串联阻尼电阻, 在同一条件下它们消耗的功率是一样的, 作为阻尼作用来说它们是同等有效的。

在对并联阻尼电阻的选取原则进行分析后, 如果消弧线圈是串联阻尼电阻, 只要进行相应的变换就可得出串联阻尼电阻的值。

2 阻尼电阻的选取原则分析

在自动调谐调匝式消弧线圈接地系统中, 阻尼电阻主要是用来抑制电网正常运行时全调谐状态下的串联谐振过电压, 所以阻尼电阻的选取主要是满足这一原则。

电力规程规定, 在正常运行时补偿电网中性点电压不应超过额定相电压的 15%。补偿电网中性

点电压可表示为 $U_0 = \frac{K_C \cdot U_\phi}{\sqrt{v^2 + d^2}}$, U_ϕ 为额定相电压, v 为脱谐度, d 为阻尼率 (一般可取 0.05), K_C 为系统不平衡度 (一般可取 0.01)。

当 $v=0.05$ 时, 有 $U_0 = 0.14 U_\phi$; 当 $v=0$ 时, 有 $U_0 = 0.2 U_\phi$; 由此可以看出当脱谐度小于 0.05 时, U_0 就会超过额定相电压的 15%。

作为消弧线圈接地系统调谐要求, 一方面必须保证中性点位移电压不超过额定相电压的 15%, 另一方面又必须使得脱谐度尽可能小, 很显然这是互相矛盾的, 增加阻尼电阻就可以解决这个问题, 这里以并联阻尼电阻来讨论这个问题。

消弧线圈并联阻尼电阻 R 后相当于增大了电网的阻尼率 d 。

$$d = 1 / (3 R C_0) \quad (3)$$

$$R = U_\phi / I_R \quad (4)$$

$$I_C = 3 U_\phi C_0 \quad (5)$$

把式 (2)、(3) 代入式 (1), 则阻尼率可表示为:

$$d = I_R / I_C \quad (6)$$

在全补偿或接近全补偿情况下 ($v=0$), 中性点电压可表示为:

$$U_0 = \frac{K_C \cdot U_\phi}{d} = K_C (I_C / I_R) U_\phi \quad (7)$$

由此可见中性点电压随电网电容电流的增大而增大, 随 I_R 的增大而减小。若使中性点电压 U_0 控制在 15% 相电压以内, 则有:

$$K_C (I_C / I_R) U_\phi \leq \frac{15}{100} \cdot U_\phi \quad (8)$$

$$\text{令: } K_C (I_C / I_R) U_\phi = \frac{n}{100} \cdot U_\phi \quad (9)$$

n 为中性点电压百分数, 则有 $n \leq 15$ 。整理式 (7) 可得 $R = f(I_C)$ 函数关系式:

$$R = \frac{n \cdot U_\phi}{100} \cdot \frac{1}{K_C} \cdot \frac{1}{I_C} \quad (10)$$

2.1 按 K_C 取极小值 (如 0.002), $n=5, 10, 15$ 时选取 R

当 $n=5$, $U_\phi = 6\sqrt{3}$ kV 时, 当某一电网的最大电容电流 $I_C = 20$ A 时的 $R = 4.33$ k Ω , $I_R = 0.8$ A。当实际电网由于某种原因导致不平衡度 K_C 增大至较大值 (如 $K_C = 0.04$) 时, 中性点位移电压 U_0 为:

$$U_0 = K_C (I_C / I_R) U_\phi = 0.04 \times \frac{20}{0.8} U_\phi = U_\phi > 15\% U_\phi$$

当 $n=10$, $U_\phi = 6\sqrt{3}$ kV 时, 当某一电网的最大电容电流 $I_C = 20$ A 时的 $R = 8.67$ k Ω , $I_R = 0.4$ A。

当实际电网由于某种原因导致不平衡度 K_C 增大至较大值 (如 $K_C = 0.04$) 时, 中性点位移电压 U_0 为:

$$U_0 = K_C (I_C / I_R) U_\phi = 0.04 \times \frac{20}{0.4} U_\phi = 2 U_\phi > 15\% U_\phi$$

当 $n=15$, $U_\phi = 6\sqrt{3}$ kV 时, 当某一电网的最大电容电流 $I_C = 20$ A 时的 $R = 13$ k Ω , $I_R = 0.27$ A。当实际电网由于某种原因导致不平衡度 K_C 增大至较大值 (如 $K_C = 0.04$) 时, 中性点位移电压 U_0 为:

$$U_0 = K_C (I_C / I_R) U_\phi = 0.04 \times \frac{20}{0.27} U_\phi = 2.96 U_\phi > 15\% U_\phi$$

从上面分析可以看出, 针对某一电网来说, 按不平衡度 K_C 取太小的值来选电阻 R 是不合理的。因为当实际电网由于某种原因 (断线或开关非同期操作) 导致不平衡度 K_C 增大至较大值时, 中性点位移电压 U_0 很有可能超过相电压的 15%。

2.2 按 K_C 取极大值 (如 0.04), $n=5, 10, 15$ 时选取 R

当 $n=5$, $U_\phi = 6\sqrt{3}$ kV 时, 当某一电网的最大电容电流 $I_C = 20$ A 时的 $R = 0.22$ k Ω , $I_R = 15.75$ A。一般实际电网不平衡度 K_C 小于 0.04, 当 $K_C = 0.03$ 时, 中性点位移电压 U_0 为:

$$U_0 = K_C (I_C / I_R) U_\phi = 0.03 \times \frac{20}{15.75} U_\phi = 0.0381 U_\phi < 15\% U_\phi$$

当 $n=10$, $U_\phi = 6\sqrt{3}$ kV 时, 当某一电网的最大电容电流 $I_C = 20$ A 时的 $R = 0.435$ k Ω , $I_R = 8$ A。一般实际电网不平衡度 K_C 小于 0.04, 当 $K_C = 0.03$ 时, 中性点位移电压 U_0 为:

$$U_0 = K_C (I_C / I_R) U_\phi = 0.03 \times \frac{20}{8} U_\phi = 0.075 U_\phi < 15\% U_\phi$$

当 $n=15$, $U_\phi = 6\sqrt{3}$ kV 时, 当某一电网的最大电容电流 $I_C = 20$ A 时的 $R = 0.65$ k Ω , $I_R = 5.33$ A。一般实际电网不平衡度 K_C 小于 0.04, 当 $K_C = 0.03$ 时, 中性点位移电压 U_0 为:

$$U_0 = K_C (I_C / I_R) U_\phi = 0.03 \times \frac{20}{5.33} U_\phi = 0.113 U_\phi < 15\% U_\phi$$

从上面分析可以看出, 针对某一电网来说, 按不平衡度 K_C 取本电网的可能极大值来选电阻 R 是合理的。在满足中性点位移电压不超过 15% 相电压的情况下, 当然有功电流越小越好, 所以 n 应取较大值。

综上所述, 阻尼电阻 R 的选取应该遵循两个原则: 针对某一具体电网来说, 在知道其最大电容电流

的情况下,取本电网不平衡度 K_C 的可能极大值;另一个是中性点位移电压在满足不超过 15%相电压的情况下, n 应在 10 至 15 之间取值。

K_C 的取值应该考虑实际电网的具体情况,若是电缆线路为主的网络则其不平衡度比较小,若是架空线为主的网络则其不平衡度相对要大一些。

2.3 阻尼电阻的容量问题

在阻尼电阻的大小确定以后,还应考虑其容量和热稳定性。

由于阻尼电阻只在电网正常运行时起作用,为保证单相接地时消弧线圈的补偿效果,需要在单相接地发生时瞬时切掉阻尼电阻,为此在正常运行时消耗的有功功率不大,但在电网单相接地时在几秒以内的短时有功功率容量比较大。为保证可靠性,其容量可按 $P = U^2 / R$ 来计算,即使是短时容量其功率也比较大。

比如在一以架空线为主的 10 kV 网络,其最大电容电流为 60 A,在加装自动调谐调匝式消弧线圈时,其阻尼电阻按式 (10) 进行计算得:

$$R = \frac{n \cdot U_{\phi}}{100} \cdot \frac{1}{K_C} \cdot \frac{1}{I_c} = \frac{10 \times 10 \times 5 \sqrt{3}}{100} \times \frac{1}{0.04} \times \frac{1}{60} = 253$$

其有功容量 $P = 145$ kW。

如果采用串联阻尼电阻的方法,则:

$$R_0 = \frac{R^2 L^2}{R^2 + L^2} = 34$$

上式中的电抗 L 可按消弧线圈的最小电抗值来计算。

3 结束语

对于自动调谐调匝式消弧线圈来说,如果阻尼电阻选取合理的话,就可以完全解决电网正常运行时全调谐状态下的串联谐振过电压问题,那么这种消弧线圈就可以采用全补偿运行方式。所以这种调匝式消

弧线圈可以工作在过补偿、欠补偿及全补偿三种运行方式下。这种方法在河北某电网的实际运行中至今没有发生过烧毁事故,说明这种算法是切实可行的。

参考文献:

- [1] 杜永忠,李红霞,陈刚,等. 并阻尼电阻消弧线圈自动跟踪装置的研究与应用 [J]. 继电器, 2001, 29 (9): 53-55.
DU Yong-zhong, LI Hong-xia, CHEN Gang, et al. The Research and Application of the Automatic Trace Device for Multi-tap Arc-suppression Coil Paralleled Damp-resistance [J]. Relay, 2001, 29 (9): 53-55.
- [2] 杜永忠. 全数字化并阻尼调匝式消弧线圈及接地选线控制系统 (硕士学位论文) [D]. 北京: 中国矿业大学, 2001.
DU Yong-zhong. The Fully Control System of Multitap Arc-suppression Coil Paralleled Damp and Discriminate Grounded Line. Thesis [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2001.
- [3] 赵智大. 电力系统中性点接地问题 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
ZHAO Zhi-da. The Grounding of the Neutral Point for the Power System [M]. Beijing: China Industry Press, 1965.
- [4] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
LI Fu-shou. The Running for the Power System of the Inefficient Grounding of the Neutral Point [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.

收稿日期: 2004-10-08; 修回日期: 2004-11-01

作者简介:

杜永忠 (1968 -), 男, 工学硕士, 高级工程师, 现从事供电管理工作; E-mail: dyz_lhm@sina.com

阎国强 (1962 -), 男, 高级工程师, 现从事供电管理工作;

韩加凌 (1964 -), 男, 高级工程师, 现从事供电管理工作。

Selecting principle analysis of damping resistance for automatic-tuning multi-tap arc-suppression coil

DU Yong-zhong, YAN Guo-qiang, HAN Jia-ling

(Lu an Mining Group Corporation, Changzhi 046204, China)

Abstract: The automatic-tuning multi-tap arc-suppression coil is used widely in middle and low voltage power system now. The advanced tuning scheme is used in this kind of multi-tap arc-suppression coil. That is to say the reactance of the arc-suppression coil equals the capacitive reactance of the power system in normal power system. In order to control the series resonance over-voltage, the damping resistance is employed. But it is difficult to select damping resistance. This paper analyses the selecting principle of damping resistance for the automatic-tuning multi-tap arc-suppression coil in detail. The method has some practical value.

Key words: arc-suppression; damping resistance; off-tuning degree; damping ratio series resonance over-voltage