

补偿电网阻尼率及脱谐度问题研究

陈忠仁^{1,2}, 吴维宁², 陈家宏², 张勤²

(1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国家电网公司武汉高压研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 阻尼率和脱谐度是补偿电网的两个重要参数。针对补偿电网运行中出现的虚幻接地、三相电压不平衡等问题, 分别从中性点位移电压、三相电压不平衡度以及残流的有功分量、无功分量等方面, 分析了阻尼率和脱谐度对补偿电网运行特性的影响, 推导出了阻尼电阻和脱谐度的配置公式, 也解决了运行中出现的此类问题。

关键词: 补偿电网; 消弧线圈; 阻尼率; 脱谐度

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)04-0036-04

0 引言

近年来, 随着自动调谐式消弧线圈的广泛应用, 许多配电网变成了补偿电网。补偿电网区别于其他配电网的两个重要参数: 阻尼率和脱谐度, 不仅决定了中性点位移电压的大小、三相对地电压的平衡度, 而且还决定了接地残流的大小以及间歇性电弧的弧隙恢复电压的上升速度, 对电网的运行有着十分重要的意义。补偿电网运行中时有发生的一些问题, 如三相电压不平衡、虚幻接地、残流过大等, 都和这两个参数有关^[1]。因而有必要对此进行深入分析, 找到合理配置阻尼率和脱谐度的方法, 以解决补偿电网运行中出现的此类问题。

1 补偿电网阻尼率分析

1.1 补偿电网阻尼率构成

补偿电网的阻尼率为:

$$d = \frac{3g + g_L + g_R}{C} = d_0 + d_L + d_R \quad (1)$$

式中: $3g$ 为线路对地泄漏总电导; g_L 为消弧线圈绕组自身电导; C 为线路对地总电容; g_R 为阻尼电阻 R 的等效电导; d_0 、 d_L 、 d_R 分别为以上电导所产生的阻尼率。

通常, 架空线路的阻尼率 d_0 约为 3%~5%, 绝缘积污受潮时阻尼率可增大到 10%; 电缆线路的 d_0 约为 2%~4%, 绝缘老化时, 也可增至 10%; d_0 与导线的排列位置无关, 当电网一定时, 其值一定。 d_L 很小, 一般可以忽略。

而 d_R 的大小由阻尼电阻 R 决定 (对于预调式消弧线圈)。 R 既可和消弧线圈串联, 也可和消弧线圈并联。前者对电阻的热容量和短接开关的绝缘等

级要求低, 设备投资也低, 是消弧装置厂家广泛采用的方式。近年来为了配合接地故障选线的要求, 也有采用并联电阻的情况^[2,3]。两种方式 d_R 的计算有所不同, 对于并联方式

$$d_R = \frac{1}{R C} \quad (2)$$

对于串联方式, 要将其转化为等值的并联形式

$$R = R + \frac{(L)^2}{R} \quad (3)$$

一般, $L \gg R$, 式(3)简化为:

$$R = \frac{(L)^2}{R} \quad (4)$$

$$d_R = \frac{1}{R C} = \frac{R}{(L)^2 C} \quad (5)$$

消弧线圈全补偿时, $L = 1/C$, 过补偿或欠补偿时, $L \neq 1/C$, 于是上式可写为:

$$d_R = \frac{R}{L} \quad (6)$$

1.2 阻尼率对补偿电网运行特性的影响

1.2.1 对位移电压和三相不平衡电压的影响

由中性点位移电压公式

$$U_0 = \frac{K_C E}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (7)$$

在电网结构确定后, 不对称度 K_C 和相电压 E 均为定值, 增加阻尼率 d 可以降低位移电压 U_0 , 减小三相对地电压的不平衡度; 在全补偿位置或者调谐过谐振点时 (脱谐度 = 0), 增加阻尼率可有效限制线性谐振过电压。此外, 阻尼率的存在, 可以消耗铁磁谐振的能量, 对铁磁谐振过电压也有一定的抑制作用。

随调式消弧线圈一般不装阻尼电阻, 阻尼率相对较小, 平时运行在远离谐振点的位置, 脱谐度很

大,一般不会出现上述问题^[4,5]。但由于不装阻尼电阻,在调感测量接近谐振点附近时就有可能出现位移电压过大的情况。所以,随调式消弧线圈的调感测量要十分小心,尽量选取位移电压较小的点进行测量,避免引起线性谐振和虚幻接地。

预调式消弧线圈一般在谐振点附近运行,脱谐度较小,阻尼率对电网的运行起着重要的作用。对于不对称度较大的电网,增加阻尼率可降低位移电压,减小三相电压不平衡度,避免虚幻接地的产生。特别是采用谐振法测量原理的消弧线圈,为保证在调感过谐振点时不产生线性谐振过电压和避免引起虚幻接地,必须保证电网有合适大小的阻尼率,这就需要在消弧线圈和地之间串接一定阻值的阻尼电阻。

1.2.2 对接地残流的影响

电网单相接地时,流过接地点的残流由无功分量和有功分量组成;阻尼率决定了残流有功分量的大小,对电弧的熄灭有着重要的影响。

对于预调式消弧线圈,阻尼电阻在接地时被迅速地短接掉,残流有功分量 I_{da} 和接入随调式消弧线圈的情况相同,主要为线路的泄漏电导 $3g$ (消弧线圈绕组的电导很小,可忽略) 所产生的有功分量 I_{da0} ,

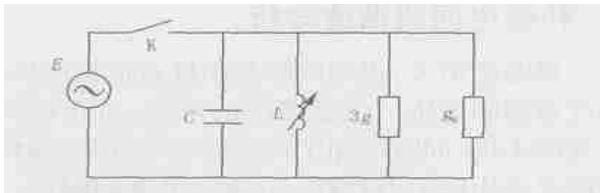


图1 补偿电网单相接地的零序等值电路

Fig.1 Zero-sequence equivalent circuit under compensation system single-phase grounding fault

$$d_0 = \frac{3g}{C} = \frac{3gE}{CE} = \frac{I_{da0}}{I_C} \quad 5\% \quad (8)$$

$$I_{da} = I_{da0} = d_0 I_C \quad 5\% I_C \quad (9)$$

式中: E 为等效电源; I_C 为电容电流。

如果系统的阻尼率较大,则残流有功分量就很可观 ($5\% I_C$)。随调式消弧线圈可把残流的无功分量做到近似为 0,其残流主要由有功分量组成;预调式消弧线圈的残流一般主要为无功分量,但如果系统的阻尼率较大,有功分量和无功分量接近时,就不应再忽略有功分量。

近年来,有人提出用非线性电阻取代线性电阻,认为非线性电阻不用短接开关,相对可靠^[6,7]。但非线性电阻在接地时阻值并不为零,一般在数欧姆

左右,这样就增大了残流有功分量,不利于电弧的熄灭。图 1 中,单相接地发生时,开关 K (相当于接地故障点) 闭合。

以非线性电阻在 10 kV 电网补偿电流 $I_L = 50$ A 时的阻值 $R = 5 \Omega$ 为例,所产生的残流有功分量为 I_{daR} 。

$$L = 6000/50 = 120$$

$$d_R = \frac{gR}{C} = \frac{gR E}{CE} = \frac{I_{daR}}{I_C} \quad \frac{R}{L} = \frac{5}{120} = 4.2\% \quad (10)$$

$$I_{daR} = 4.2\% I_C \quad (11)$$

总的残流有功分量为

$$I_{da} = I_{da0} + I_{daR} \quad 9.2\% I_C \quad (12)$$

此时残流有功分量接近甚至超过了无功分量 ($|I_{VC}| = 10\% I_C$),全接地电流幅值大大增加,可能导致熄不了弧而造成事故。

实际上,线性电阻运行的可靠性可通过多种途径来保证,其一是保证其热容量的选取符合要求,目前国内已经生产出不锈钢绕成的电阻带,散热面积大,在大电流通过情况下 5 s 内发热不损坏,短接开关有足够的时间动作,同时也降低了对开关响应速度的要求;其二是增加后备保护,在主开关 (交流驱动) 之外,增加了过流保护 (直流驱动),即使在变电站交流电源失电的情况下,也能保证阻尼电阻可靠地切除。

1.3 补偿电网阻尼率的确定

电网一定时,阻尼率 d_0 一定,但预调式消弧线圈可以通过改变阻尼电阻的阻值来改变整个系统的阻尼率,这就涉及到阻尼电阻的配置问题。配置阻尼电阻应考虑到电网运行时可能出现的各种问题:一要能避免虚幻接地;二要能抑制线性谐振过电压,使消弧线圈上的压降不超过其额定工频电压;三要能抑制三相对地电压的不平衡;四要考虑到 PT 断线信号二次电压定值是否配合的问题。前二者通常出现在消弧线圈调谐过谐振点时,脱谐度 $\nu = 0$;后者一般出现在调谐结束后,消弧线圈停留在过补偿位置,补偿电网有一定的脱谐度存在。

1.3.1 从避免虚幻接地的角度配置阻尼电阻

变电站母线的绝缘监察信号动作值一般整定在 $15\% E$ (规程规定的中性点长期运行电压上限值)。当消弧线圈调感至谐振点附近时 ($\nu = 0$),中性点位移电压达到最大值,如使其小于绝缘监察信号动作值,则可避免虚幻接地的产生。即

$$U_{0max} = \frac{K_C E}{\sqrt{\nu^2 + d^2}} = \frac{K_C E}{d} \quad 15\% E \quad (13)$$

$$d \frac{K_C}{15\%} \quad (14)$$

线路不对称度 K_C 的值通常为 $0.5\% \sim 2.5\%$

$$d \quad 3.3\% \sim 16.7\% \quad (15)$$

考虑到阻尼率 d_0 最小 (2%) 的情况, 由式 (6)、(15) 得:

$$\frac{R}{L} = d_R = d - d_0 \quad 1.3\% \sim 14.7\% \quad (16)$$

考虑到消弧线圈在最大感抗处 (最小补偿电流) 运行的情况:

$$R \quad (1.3\% \sim 14.7\%) (L)_{\max} \quad (17)$$

1.3.2 从抑制线性谐振过电压的角度配置阻尼电阻

消弧线圈调谐过谐振点时, 形成了串联谐振, $L = 1/\omega^2 C$, 如使消弧线圈上的压降不超过其额定电压 (等于相电压 E), 忽略 $3g$ 和 g_L , 则

$$\frac{K_C E}{R} L = E \quad (18)$$

$$R = K_C L \quad (19)$$

考虑消弧线圈在最大感抗处 (最小补偿电流) 运行的情况

$$R \quad (0.5\% \sim 2.5\%) (L)_{\max} \quad (20)$$

1.3.3 从抑制三相电压不平衡的角度配置阻尼电阻

欲使配电网正常运行时相电压的偏移不超过 $5\%E$, 位移电压 $U_0 = 5\%E^{[1]}$, 仿照 1.3.1 节推导可得

$$R = \left(\sqrt{\left(\frac{K_C}{5\%} \right)^2 - v^2} - d_0 \right) L \quad (21)$$

1.3.4 从配合 PT 断线信号二次电压定值的角度配置阻尼电阻

一般情况下, PT 断线信号二次电压启动值不超过 $10V$, 即要求 R 的选择满足位移电压 U_0

$10\%E$, 否则, 可能导致误发 PT 断线信号^[8]。仿照式 (21) 推导可得:

$$R = \left(\sqrt{\left(\frac{K_C}{10\%} \right)^2 - v^2} - d_0 \right) L \quad (22)$$

1.3.5 综合考虑, 合理配置阻尼电阻

从以上计算可以看出, 在系统不对称度已定的情况下, 如果 R 的取值满足式 (17), 则一定满足式 (20), 也就是说, 只要 R 的取值能够限制中性点位移电压使电网不出现虚幻接地, 则一定能够限制线性谐振过电压在消弧线圈上的压降小于其额定工频电压, 其绝缘不会出现危险; 在不对称度和脱谐度均

一定的情况下, R 的取值满足式 (21), 则一定满足式 (22), 也即, 在 R 的取值满足三相电压不平衡度小于 5% 的情况下, 不可能发生误发 PT 断线信号的情况。故计算电阻时取式 (17)、(21) 即可。

阻尼电阻的取值, 一方面要以理论计算为依据, 另一方面要结合实际, 既要考虑到和消弧线圈的配合, 又要考虑到其做工的简易程度和经济效益问题。在满足实际运行需要的基础上, 应尽量减少电阻的阻值, 以节约成本, 降低费用。

如消弧线圈的调节范围为 $30 \sim 75 A$, 系统不对称度 $K_C = 1\%$, 阻尼率 $d_0 = 2\%$, 设定脱谐度 $v = 10\%$, 则根据式 (17)、(21) 计算得到的电阻值分别为 $R = 9.3$ 、 $R = 12.3 \sim 30.6$, 实际配置阻尼电阻时, 取 $R = 12.3$ 即可。

河南信阳宝石桥变电站 $10 kV$ 电网, 在安装一台消弧装置后, 三相电压出现了严重的不平衡, 且经常报 (虚幻) 接地信号。后检查发现, 消弧线圈过谐振点时的位移电压为 $960 V$, 超过了绝缘监察电压动作值 ($860 V$), 将阻尼电阻由原来的 20 增加到 35 后, 最大位移电压降到 $600 V$ 以下, 消除了虚幻接地, 三相电压不平衡度也得到了明显的改善。

2 补偿电网脱谐度分析

脱谐度增大, 也可以降低中性点位移电压, 抑制线性谐振的发生。但脱谐度的增加, 对于预调式消弧线圈来说, 同时增加了残流的无功分量, 加快了弧隙恢复电压的上升速度, 不利于电弧的熄灭。这是一对矛盾, 兼顾二者需要合理地配置脱谐度。

预调式消弧线圈脱谐度的配置, 应首先使接地残流 I_d 小于规程要求的数值。对于不同电压等级和结构的电网, 规程有不同的要求。设规程允许的残流 I_d 为 K , I_{da} 、 I_{dc} 分别为残流的有功和无功分量,

$$I_d = \sqrt{I_{da}^2 + I_{dc}^2} = \sqrt{(dI_C)^2 + (vI_C)^2} = \sqrt{d^2 + v^2} I_C \quad (23)$$

$$|v| = \sqrt{\left(\frac{K}{I_C} \right)^2 - d^2} \quad (24)$$

若取 $K = 10 A$, $I_C = 50 A$, $d = 16.7\%$, 则脱谐度的大小为

$$|v| = \sqrt{\left(\frac{K}{I_C} \right)^2 - d^2} = 11\%$$

预调式消弧线圈脱谐度的取值还应考虑到熄弧后的恢复电压上升速度。脱谐度越小, 则恢复电压

上升速度越缓慢,接地电弧越难重燃。但消弧线圈又不宜工作在全补偿状态($\nu = 0$),因全补偿状态易引发线性谐振过电压和三相电压不平衡,所以消弧线圈通常运行在过补偿状态,脱谐度一般设定为 $-5\% \sim -10\%$ 。当系统不对称度较大、三相电压严重不平衡时,在满足残流要求的前提下,脱谐度也可适当取大一些,以利于补偿电网的正常运行。

如南阳枣林变电站 10 kV 电网运行有一套 50 A 容量的消弧装置,系统的电容电流为 17 A,三相对地电压出现了较大的不平衡。在软件里适当增大脱谐度后,三相电压不平衡得到了明显的改善。

而随调式消弧线圈一般不存在脱谐度配置的问题,其平时运行在脱谐度较大的位置,一旦接地发生,立即调谐到全补偿位置运行。但脱谐度过大,则位移电压很低,这对检测电路提出了更高的要求,否则就将影响测量跟踪的准确性^[4,5]。

3 结语

本文分析了补偿电网的两个重要参数:阻尼率和脱谐度,推导了阻尼电阻和脱谐度的配置公式。近年来,有采用非线性电阻的情况,分析认为,非线性电阻增加了残流的有功分量,不利于接地电弧的熄灭;而脱谐度在满足残流要求的前提下,也可适当取大些,以抑制三相电压较严重的不平衡,有利于补偿电网的正常运行。以上方法的应用也解决了电网运行中出现的相关问题,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 陈忠仁,董浩斌,李景禄.自动消弧装置的接入对配电网运行的影响及对策[J].华北电力技术,2000,(8):18-21.
CHEN Zhong-ren, DONG Hao-bin, LI Jing-lu. Influence on Distribution Network Connected to the Auto-compensation Arc Suppression Device and the Countermeasure[J]. North China Electric Power, 2003,(8):18-21.
- [2] 纪飞峰,王崇林,张文海,等.基于信号注入法的可控硅投切电容式消弧线圈[J].电力自动化设备,2002,22(11):50-52.
JI Fei-feng, WANG Chong-lin, ZHANG Wen-hai, et al. Arc Suppression Coil with Thyristor Series Capacitors Based on Injection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(11):50-52.
- [3] 周浩,张俊杰,袁海,等.10 kV 配电网并联电阻接地选线技术研究[J].电工技术杂志,2003,(11):56-59.
ZHOU Hao, ZHANG Jur-jie, YUAN Hai, et al. Research the Detection of Grounded Lines in 10 kV Distribution System by Parallel Resistor [J]. Electrotechnical Journal, 2003, (11):56-59.
- [4] 蔡旭,刘杰.偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J].电力系统自动化,2002,26(15):53-56.
CAI Xu, LIU Jie. Dynamic Resonance Adjusting Device of Arc-suppression Coil with Magnetic Bias[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(15):53-56.
- [5] 徐玉琴,陈志业,李鹏.晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应用研究[J].电力系统自动化,2001,25(7):38-40.
XU Yu-qin, CHEN Zhi-ye, LI Peng. Design and Application Research on Arc Suppression Coil with Thyristor Series Capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(7):38-40.
- [6] 容建伟.非线性电阻在消弧线圈接地系统的应用[J].山西电力技术,2000,(6):17-18.
RONG Jian-wei. The Role of Nonlinear Resistance in Petersen Coil Grounded System [J]. Shanxi Electric Power, 2000,(6):17-18.
- [7] 雷欢虎.自动跟踪补偿消弧线圈装置中阻尼电阻的选取[J].西北电力技术,2002,(5):47-49.
LEI Huan-hu. Damping Resistance Selection for Automatic Tracing Compensation Arc-suppression Coil [J]. Northwest China Electric Power, 2002,(5):47-49.
- [8] 孙海新.10 kV 消弧线圈自动跟踪补偿装置脱谐度的设定以及阻尼电阻的选择[J].河北电力技术,2002,21(2):48-49.
SUN Hai-xin. Setting of Out-of-resonance Degree of Automatic Tracing 10 kV Arc Suppression Coil Compensation Device and Damping Resistance Selection[J]. Hebei Electric Power, 2002,21(2):48-49.

收稿日期: 2004-06-11; 修回日期: 2004-08-30

作者简介:

陈忠仁(1971-),男,硕士研究生,工程师,研究方向为配电网自动化技术; E-mail: chenzhon0520@sohu.com

吴维宁(1964-),男,高级工程师,研究方向为电力系统监控技术和电磁兼容技术;

陈家宏(1960-),男,教授级高工,研究方向为电力系统监控技术和高压探测技术;

张勤(1958-),男,高级工程师,研究方向为高压测量和电力系统自动化。

(下转第 44 页 continued on page 44)

子科技大学出版社,2000.

LI Zai-ming. Digital Image Processing, Compression and Recognition Technology [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press,2000.

- [4] 龚超,罗毅,涂光瑜. 计算机视觉技术及其在电力系统自动化中的应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(1)-(2).
GONG Chao, LUO Yi, TU Guang-yu. Computer Vision Technology and Its Application to Automation of Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(1)-(2).

- [5] Nakano S. External Diagnosis of Power Transmission and Distribution Equipment Using X-ray Image Processing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,15(2):575-579.

收稿日期: 2004-06-11; 修回日期: 2004-10-10

作者简介:

夏志宏(1979-),男,硕士研究生,研究方向为计算机视觉识别技术在电力系统中的应用;E-mail: xzh-hust@163.com

罗毅(1966-),男,副教授,从事 EMS 和 DMS 的研究;

涂光瑜(1941-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统运行与控制研究。

Image auto-recognition of relay pressed board in on/off states based on visual information

XIA Zhi-hong, LUO Yi, TU Guang-yu, GONG Chao

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: That how to manage the on/off states of relay pressed board is very important to the safety and stability of power systems, but it is difficult to get its on/off states, which has not been solved all through. With upsent images of remote vision system, a static frame is drawn out from video signal of recorded protection screens, the auto-recognition of on/off states of relaying pressing board at the setting area is implemented by the arithmetic of computer image, and the recognition of on/off information is put to relay protection management system as the input data. The matching and comparing arithmetic research making use of local images indicates that this arithmetic has the capability of high veracity, anti-jamming and good real time.

Key words: video signal processing; image recognition; remote vision; relay management system

(上接第 39 页 continued from page 39)

Study on damping rate and out-of-resonance degree of power compensation network

CHEN Zhong-ren^{1,2}, WU Wei-ning², CHEN Jia-hong², ZHANG Qin²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan High Voltage Research Institute, State Power Grid Co., Ltd, Wuhan 430074, China)

Abstract: Damping rate and out-of-resonance degree are two important parameters of power compensation network. To resolve the existing problems on these two parameters, such as virtual earth and three-phase unbalanced voltages, this paper analyses some influence on power compensation network operation characteristics due to the changes of damping rate and out-of-resonance degree in some aspects, like neutral-to-ground voltage, unbalanced degree on the three-phase voltages, and component of residual current. It also gives reasonable formulae for setting damping rate and out-of-resonance degree. The adoption of these research methods also solves actual operation of arc suppression coils concerned.

Key words: power compensation network; arc-suppression coil; damping rate; out-of-resonance degree