

# 高电阻接地的特点和应用

平绍勋, 周玉芳

(江苏如皋供电公司, 如皋 226500)

**摘要:** 为研究高电阻接地的特点及其应用, 在现场进行了断线谐振和 TV 铁磁谐振过电压试验。根据试验和分析表明, 中性点经高电阻接地能有效地限制断线谐振过电压、铁磁谐振过电压和弧光接地过电压, 防串联谐振, 易于实现选择性的继电保护, 在可靠性、安全性和经济性等方面有较明显的优势。高电阻接地有较广泛的应用之处。

**关键词:** 中性点; 高电阻; 接地; 谐振; 过电压; 特点; 应用

**中图分类号:** TM86      **文献标志码:** B      **文章编号:** 1003-6520(2007)11-0245-04

## 0 引言

6~35 kV 系统中, 一般为中性点不接地方式运行, 在这种系统中经常发生 TV 铁磁谐振、弧光接地过电压、断线谐振过电压、电容传递过电压, 造成母线短路、母线避雷器爆炸、TV 烧坏、TV 熔丝熔断等事故, 严重威胁系统的安全运行。目前限制上述过电压的常用措施有: 系统中性点采用消弧线圈接地和小(中)电阻接地。应用中, 消弧线圈接地存在选线不正确和过电压倍数过高、小电阻接地存在跳闸率过高等不足, 故提出中性点经高电阻接地的运行方式。通过现场试验及吸取一些研究所(院校)现场试验的成果, 使其在运行中取得了较为满意的效果, 为推广应用高电阻接地这一运行方式取得了经验。

## 1 高电阻接地的试验

### 1.1 断线谐振过电压试验

断线谐振过电压试验主要进行激发和消除电源侧断线负荷侧接地的断线谐振, 因为这种过电压会危及母线避雷器等设备的安全。

试验是由江苏电科院在如皋么头变电站进行。10 kV 中性点接地电阻取 300  $\Omega$ , 10 kV 母线 A、B、C 三相与地之间并联适当的电容, 模拟一台 200 kVA 空载变压器高压 C 相断线负荷侧接地。在未投入接地电阻情况下, 断线相最大过电压为 3.76 p.u., 中性点电压最大值 10 kV, 与理论计算以及 EMTP 程序模拟相符。当中性点电阻投入的情况下, 谐振迅速消失, 三相电压均恢复到正常相电压。证明中性点经高电阻接地可以从根本上抑制断线过电压。在断线谐振发生后, 再投入中性点接地电阻也可使谐振消失<sup>[1]</sup>。

河北省电力试验研究所曾在邢台宁晋的 10 kV 系统进行了断线谐振试验<sup>[2]</sup>。10 kV 中性点接地等值电阻取 968  $\Omega$ , 谐振是在一条长 102 km 的线路上

激发的, 线路上接有 3 070 kVA 配变。在未投入接地电阻时, 发生了断线谐振过电压, 同时中性点电压达到 0.87 p.u.。在投入接地电阻后, 重复激发操作, 谐振不再出现, 中性点仅为系统不平衡电压。

### 1.2 TV 铁磁谐振过电压试验

TV 铁磁谐振过电压试验在河北进行, 其主要内容为:

#### 1.2.1 高频谐振试验

激发高频谐振是采用空投母线的方法, 空母线实测电容量为每相 1 100 pF, 其容抗  $X_C = 1/\omega C = 2.89 M\Omega$ , 10 kV 母线 TV 的  $X_{Le} = 512.8 k\Omega$ , 因此容抗与电抗比  $K = X_C/X_{Le} = 2890/512.8 = 5.64$ 。

此值落在彼德逊曲线的高频区内, 经 3 次空投母线都激发出稳定的二倍频谐振, 当系统投入接地电阻后, 再投空母线谐振现象消失。

#### 1.2.2 基频谐振试验

基频谐振是采用在单相接地时以熔丝熔断来激发。试验线路长 13 km, 每相对地电容量  $C_0 = 65 nF$ , 则  $X_C = 1/\omega C = 49 k\Omega$ , 所以,  $K = X_C/X_{Le} = 0.095$ 。

此值落在彼德逊曲线的基频区内, 经接地保险丝熔断激发 3 次, 均激发出不稳定的基频谐振, 仅维持了半个周期便变为周期渐长的衰减波形。当系统投入接地电阻, 接地熄弧后零序电压很快衰减为零, 基频谐振被消除。

#### 1.2.3 分频谐振试验

激发分频谐振也是采用在单相接地时以熔丝熔断来激发。试验线路长 28 km, 每相对地电容量  $C_0 = 140 nF$ , 则  $X_C = 1/\omega C = 22.7 k\Omega$ , 所以,  $K = X_C/X_{Le} = 0.044$ 。

此值落在彼德逊曲线的分频区内, 经接地保险丝熔断激发 3 次, 均激发出不稳定的分频谐振, 1/2 分频谐振持续约一个周期, 之后渐渐消失, 形成了不持续的 1/2 分频谐振。投入接地电阻, 接地熄弧后零序电压很快衰减为零, 分频谐振被消除。

### 1.3 弧光接地过电压试验

中性点不接地系统发生断续弧光接地会产生严重的过电压,高频熄弧弧光接地过电压可  $> 5 p. u.$ <sup>[2]</sup>,危害性极大。

文[2]中,试验是通过自制的旋转间隙来实现的。从安全考虑,试验是在系统投入中性点接地电阻的条件下进行的。人工模拟弧光接地间隙接在一条出线的出口处的一相上,弧光接地电压波形与系统接入接地电阻时高频熄弧 3 次重燃的波形相比较,3 次重燃的过电压最大值仅为  $2 p. u.$ ,可见系统接入接地电阻后完全消除了弧光接地过电压。

中国矿业大学在 3 kV 高压模拟电网上用低阻尼电容分压器、磁带记录仪记录高电阻接地系统弧光接地过电压信息<sup>[3]</sup>,计算机采集分析系统采集记录在磁带仪上的过电压信息并加以分析,结果说明:

1) 过电压倍数与中性点电阻值有关,当接地电阻  $R_N > 1/3 C_0$  时,过电压倍数明显增加;当  $R_N = 1.8 k \gg 1/3 C_0$  时,故障相最高过电压达  $2.1 p. u.$ ,健全相最高过电压达  $3.4 p. u.$ ;  $R_N = 1/3 C_0$  时,过电压倍数下降,故障相  $1.3 p. u.$ ,健全相  $2.2 p. u.$ 。当接地电阻  $R_N < 1/3 C_0$  时,过电压倍数明显下降。

2) 相间过电压水平低于相对地过电压。

3) 过电压振荡频率,即高频振荡频率在  $300 \sim 3000 \text{ Hz}$ ,持续时间可达  $0.2 \sim 2 \text{ s}$ 。

4) 随着中性点电阻值的减少,中性点电位在每半个工频周期内衰减加快,即系统能量泄放较快,从而有效地降低各相及中性点的过电压幅值。

## 2 高电阻接地的特点

### 2.1 限制过电压

高电阻接地后,对断线过电压、铁磁谐振过电压和弧光接地过电压有较大的限制作用,有效地防止了过电压对高压电机、电缆等薄弱绝缘设备的危害。

### 2.2 防止串联谐振

变电站内装有消弧线圈,通常为防止断线过电压采用过补偿运行。当主变进行操作时,因断路器三相不同期或上一级系统单相接地而引发电容传递电压,主变的高低电压间的电容  $C_{12}$  与消弧线圈的电感  $L$  (消弧线圈过补偿时系统呈感性,消弧线圈欠补偿时系统呈容性) 便形成串联谐振<sup>[4]</sup>,危及设备安全运行。变电站采用高电阻接地后,这就消除了串联谐振的基本条件<sup>[4]</sup>。

### 2.3 易于实现选择性的继电保护和选线

高电阻接地系统一般用于电容电流较小的系统,发生单相接地的线路其接地电流除了电容电流

外,尚有较大值电阻电流,系统接地电流大于电容电流,出线零序保护整定完全可用于跳闸或发信号。出线零序保护一般采用零序 TA,保护装置可利用微机保护中的零序保护,一般可不带方向,也不需增加设备。

电网电容电流较大情况下,可采用高电阻与消弧线圈并联运行。消弧线圈用于补偿电容电流,根据调谐度的要求其残流约在  $3 \sim 5 \text{ A}$ ,电阻电流约在  $5 \sim 6 \text{ A}$ ,总的残流约  $5 \sim 7 \text{ A}$ 。虽电阻电流增加了接地电流的残值,但不会影响电弧熄弧。其过电压水平不但低于消弧线圈,而且系统发生单相接地时,只需暂时切除高电阻的断路器,根据每条出线零序电流变化值,便可确定故障线路。解决了消弧线圈选线不准的问题。

### 2.4 运行的安全性

小电阻接地系统发生单相接地时,其故障大电流可至几千 A 的大电流,产生的故障电压也可  $> 1000 \text{ V}$ ,对变电站和低压用户这种过电压特别是低压侧 TT 和 TN 接地方式下,可危害电气设备绝缘和人身安全。而高电阻接地的故障电流仅几个 A,故障电压仅几十 V,不会危及设备和人身安全。

消弧线圈接地虽可以用来补偿电容电流,但因选线等问题,电缆线路一旦发生接地故障,较大的 5 次谐波对地电弧可以导致相间短路,降低了可靠性。而高电阻接地或高电阻与消弧线圈并联的接地方式,由于电阻可以迅速消耗一部分谐波能量,接地电流又小,因而不会发生上述现象。

### 2.5 运行的可靠性

高电阻一般工作电流为  $5 \sim 7 \text{ A}$ ,在 10 kV 系统其电阻功率为  $30 \sim 40 \text{ kW}$ ,6 kV 系统其电阻功率为  $18 \sim 25 \text{ kW}$ 。电阻器采用自然通风,表面温度  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,置于通风良好室内工作,周围环境温升也  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。置于通风良好的室外工作,电阻器表面温度和周围环境温升会更低。电阻器在单相接地时,允许连续工作 2 h,有充分时间查找故障。

### 2.6 经济性

高电阻与消弧线圈、消弧过电压保护器装置相比较,其结构简单,维护量少,价格低等优点,在经济上有明显的优势。

## 3 高电阻的应用

### 3.1 农村变电站的应用

农村变电站的特点是以架空线路为主,10 kV 系统的电容电流较小,大多  $< 7 \text{ A}$ ,采用高电阻接地对提高系统的安全运行是比较理想的。通常只需电阻电流大于电容电流,就能保证系统设备能承受各

种过电压。

如皋么头变电站(35/10 kV)担负向周围各乡镇及机场供电,特别是机场电缆已有使用40年的历史。为了保证安全供电,采用了10 kV高电阻接地。该站的电容电流为6 A,原本采用7 A(900 )的接地电阻,单相接地允许运行2 h。考虑到机场有备用电源和该地区人口比较密,改用300 接地电阻,零序保护0.5 s跳闸。由于该站10 kV线路质量和维护较好,高电阻接地运行,8条线路一年之中,只有二次单相接地跳闸,大大低于相间短路故障率。

### 3.2 城市变电站的应用

城市变电站的10 kV出线大多以电缆为主,系统电容电流一般 $>30$  A。由于小电阻接地系统特别是在有架空线路和电缆的混合线路,一般而言单相接地故障跳闸率较高,影响供电可靠性,推广上有争议。而消弧线圈接地的选线又不准,调容式消弧线圈如参数选择不当,还会造成5次谐波放大危及设备安全。而消弧线圈在单相接地时串联电阻又被短接,电阻的功能没有被充分发挥。高电阻接地与消弧线圈并联运行的方式,其工作原理类似消弧线圈与电阻串联<sup>[5]</sup>,差别仅在单相接地时并联电阻并不短接,当需查找接地线路时,可临时断开电阻的断路器,根据出线零序电流的变化幅值,便可确定接地线路。这种方式既解决选线问题,又解决了谐振问题,降低过电压水平。

高电阻与消弧线圈并联通常消弧线圈补偿到3~5 A,而高电阻可采用5~6 A的电阻器,电阻值可按系统相电压除以5<sup>[6]</sup>,即可得到所需电阻值。一般10 kV系统,5 A的电阻值取1 200 ,而6 kV系统,5 A的电阻值取730 。消弧线圈容量计算方法与不加高电阻时算法一个样。

我国有部分煤矿也采用这种接地方式,但发生单相接地后,高电阻立即退出运行,虽可解决选线问题,却不利于消除谐振。

### 3.3 发电厂厂用电和用户变电站的应用

发电厂厂用电和用户变电站的6~10 kV线路通常都采用电缆,由于供电线路相对较短,系统电容电流较小,而且负荷较重要,且发生单相接地的几率也较低。高电阻接地与消弧线圈接地,二者都允许单相接地运行2 h,但在过电压水平,还是选线问题,或经济、维护等问题高电阻接地有明显的优势。特别是10 kV系统空载或轻载,主变上一级有接地现象时,高电阻接地不存在因电容传递电压造成主变高、低绕组间的电容 $C_{12}$ 与消弧线圈电感L的串联谐振。而消弧线圈(一般消弧线圈调整在过补偿,降低断线过电压,因此系统呈电感性)却难以避免。

华能南通电厂的6 kV厂用电全都用电缆,它每段6 kV母线接有一台240 、15 A高电阻接地,当发生单相接地,出线的零序电流会发出接地信号,便于查找故障。运行十多年,没有发生过电压事故,查找故障也非常方便。

### 3.4 发电机中性点高电阻接地

发电机中性点在我国几十年来一直沿用谐振接地方式,其主要特点是:发电机一点接地时,继电保护可不直接动作于停机。但这种方式存在以下二个问题:一是带故障运行时增大了继发性故障发生的可能性;二是故障时的过电压较严重。从国内发电机运行情况看,70年代一年内发生5起铁芯严重烧损事故,其中相间短路有3起。由此造成巨大的经济损失。

高电阻接地在国外已有相当多的运行经验。世界上约73%的发电机(50~1 640 MVA)采用这种接地方式,内部故障时直接动作于停机。高电阻接地除了把故障电流限制到对铁芯无损坏外,还降低了故障时的过电压值和过电压持续时间,从而提高了发电机运行的可靠性。而当系统容量远大于单台发电机容量,显然采用高电阻接地比谐振接地更合理。我国发电机运行规程中规定,对于容量 $>150$  MW的汽轮发电机和 $>50$  MW的水轮发电机,定子出现单相接地时要求立即停机。

武高所曾对故障电流及其对铁芯的烧损作过试验,大电流方式为31.2 A,燃弧时间分别为0.92、1.20、1.68、1.68、1.66 s。小电流方式为5.3 A,持续时间1 h和2.8 A时2 h。从试验情况看,高电阻接地瞬时跳闸的运行方式,铁芯只有很轻微的焊熔现象,只需略作修补即可。而消弧线圈接地时,虽对铁芯的烧损甚小,但长时间带动故障运行对绝缘的破坏相当严重,且故障条件下电弧不稳定燃烧所引起的过电压比高电阻接地时更严重。

三峡左岸电站14台700 MW水轮发电机组的中性点接地方式均采用高电阻接地方式,从所提供高电阻接地装置的供货商ABB、加拿大GE和西门子等公司的高电阻运行业绩看都有良好的记录<sup>[7]</sup>。

### 3.5 配变低压中性点高电阻接地

当运行中设备都是动力设备或三相三线设备,可采用配电变压器低压供电的三相三线系统,中性点不接地,主要用于一些连续生产、工艺不允许间断的企业,如石化、发电厂厂用电等,不准因单相接地而切除故障点,否则会产生严重事故。

高电阻接在配变低压侧中性点,它限制接地故障电流,且允许运行2 h,系统接地时,利用零序钳形表能迅速查出接地故障出线和接地故障点。一般

400 V 系统的电容电流在 1 ~ 2 A ,电阻电流可选用 2 ~ 4 A ,电阻值  $R$  的取法为  $R = U / I_R$  ,  $U$  为相电压,  $I_R$  为流过电阻的电流。当电阻器上产生的接地电流  $I_R = I_C$  ( $I_C$  为低压系统的电容电流), 选择该值还能抑制过电压发生<sup>[8]</sup>。中性点不接地运行不便于寻找故障点。

山东兖州济三煤矿选煤厂采用 660 V 电压供电, 配变二次侧中性点高电阻接地。其中性点接地电阻为 500 ~ 1 000  $\Omega$ 。运行多年未发生大面积停电事故。对于设备的漏电, 采用分层分布式的选择性漏电保护系统, 避免了操作人员误伤害事故, 又保证系统安全用电<sup>[9]</sup>。

参 考 文 献

[1] 平绍勋, 李长益. 配电网中性点高电阻接地的特点[J]. 电力建设, 2006, 27(11): 31-34.  
 [2] 秦连城, 徐贵林. 不接地系统新型接地方式的实用研究[J]. 河北电力技术, 1990(4): 16-20.  
 [3] 许允之. 配电网中性点经高电阻接地安全性能的分析[J]. 电工

技术学报, 1999, 14(4): 62-66.  
 [4] 平绍勋. 电力系统内部过电压保护及实例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
 [5] 张圣建, 平绍勋. 高电阻与消弧线圈并联的接地方式[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 117-118.  
 [6] 王志英, 容健纲. 发电机中性点接地方式的研究[J]. 电网技术, 1994, 18(4): 32-36.  
 [7] 李毅军. 三峡发电机中性点接地方式及接地装置选型[C]. 06' 中国城市供电接地方式学术研讨会. 三亚, 2006.  
 [8] 张圣建, 平绍勋. 配变低压中性点高电阻接地技术[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 91-92.  
 [9] 高彦, 王彦文, 司书巍, 等. 选煤厂 660 V 高电阻接地系统选择性漏电保护装置的研究[C]. 中国国际供电会议 CICED2006. 北京, 2006.

平绍勋 1941 一, 男, 高工, 长期从事过电压工作和技术管理工作。  
 E-mail: rgpsx @126.com

周玉芳 1944 一, 女, 高工, 长期从事技术管理工作。电话: (0513) 87636216

收稿日期 2007-01-26 编辑 曹昭君

(上接第 233 页)

[6] Liberman M A, Groot J S De, Toor A, et al. Physics of high-density Z pinch plasmas [M]. New York: Springer Verlag, 1999.  
 [7] Shelkovenko T A, Sinars D B, Pikuz S A, et al. Point projection x-ray radiography using an X pinch as the radiation source [J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72(1): 667-670.  
 [8] Shelkovenko T A, Sinars D B, Pikuz S A, et al. Radiographic and spectroscopic studies of X pinch plasma implosion dynamics and x-ray burst emission characteristics[J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(4): 1305-1318.  
 [9] Kalantar D H, Hammer D A. The x-pinch as a point source of X rays for backlighting[J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(1): 779-780.  
 [10] Shelkovenko T A, Pikuz S A, Hammer D A, et al. Evolution of the structure of the dense plasma near the cross point in exploding wire X pinches[J]. Physics of Plasmas, 1999, 6(7): 2840-2846.  
 [11] Green J S, Bland S N, Collett M, et al. Effect of wire number on x-pinch discharges[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(26): 261.  
 [12] Xiaobing Zou, Rui Liu, Naigong Zeng, et al. A pulsed power generator for x-pinch experiments [J]. Laser and Particle Beams, 2006, 24(4): 503-509.  
 [13] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. Martin on pulsed

power[M]. New York and London: Plenum Press, 1996.  
 [14] Mercer S, Smith I, Martin T. A compact 3MV gas switch[C]. Proc Intern Conf on Energy Storage, Compression and Switching. Asti, Italy, 1974: 459-462.  
 [15] Tucker W K, Jones E E, Franklin T L, et al. Compact low jitter triggered spark gap [C]. 5th IEEE Pulsed Power Conference. Arlington, USA, 1985: 254-257.  
 [16] Schaefer G, Kristiansen M, Guenther A, et al. Gas discharge closing switches[M]. New York and London: Plenum Press, 1990.  
 [17] 李鹏, 邹晓兵, 曾乃工, 等. V/N 火花间隙开关的电场和电容模拟计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 43-44.  
 LI Peng, ZOU Xiao-bing, ZENG Nai-gong, et al. Simulation calculation of electric field distribution and capacitance of V/N spark switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 43-44.



何露芽

何露芽 1983 一, 女, 硕士生, 现从事脉冲功率技术和 X 箍缩等离子体的研究。电话: (010) 62785513; E-mail: hly05 @ mails. tsinghua. edu. cn

邹晓兵 1967 一, 男, 博士后, 助理研究员, 长期从事脉冲功率技术和 Z 箍缩等离子体研究。电话: (010) 62792280

收稿日期 2006-11-20 编辑 蔡爱姣