

# 大型汽轮发电机中性点接地方式问题的商榷

清华大学 王维焱

## 内 容 摘 要

正确选择发电机中性点消弧线圈的参数,将使单相接地电流小于安全值、减小过电压倍数和提高接地保护灵敏度。作者对低阻接地方式持否定态度,认为不应继续引进或仿制,对已引进的这类机组应予改造;对于高阻接地方式,作者持保留态度,由于它增大了接地故障电流,不满足安全电流的要求,不应推广应用,对已有这类机组可继续运行、积累资料;消弧线圈(欠补偿)接地方式在我国大中型水轮发电机组上已取得丰富经验,值得大型汽轮发电机借鉴。

### 一、问题的提出和讨论的前提

我国35年来的电力建设,大型发电机中性点接地方式计有四种,即

1. 中性点不接地(包括经YH接地)方式;
2. 中性点经高阻接地(经配电变压器接地)方式;
3. 中性点经低阻接地方式;
4. 中性点消弧线圈接地(包括欠补偿和谐振接地)方式。

作为讨论中性点接地方式的前提是:

1. 讨论仅限于单机容量在10万千瓦以上的发电机—变压器单元接线方式的机组。
2. 大型机组定子线棒采用环氧粉云母绝缘,表面均有半导体防晕层。
3. 基于过电压理论的修正和试验实测的数据,我国过电压保护规程SDJ7—79第7条已明确指出“间歇性电弧接地过电压一般不超过3.0倍最高运行相电压,个别可达3.5倍”。对于单机容量在1万千瓦及以上,额定电压在10.5千伏及以上的发电机,它们的出厂试验电压为3.7~4.0倍最高运行相电压,因此电弧接地过电压不会对正常绝缘造成危害。

4. 为了大型机组的安全,绝不允许在定子接地保护动作后,故障机组继续长期运行。对于绝缘水平较差的发电机,在定子接地保护动作后应迅速跳闸灭磁停机。对于绝缘正常的发电机,当单相接地电流小于安全电流(详见后)时,定子接地保护动作后应立即请示调度,迅速转移负荷而后停机。

5. 接于发电机中性点的消弧线圈,在抽头按补偿度要求调定后应确定其有电压

变比。中性点电压互感器一次侧额定电压按发电机额定相电压选定,不应装设熔断器。机端三相电压互感器应装设熔断器,同时应有电压断线闭锁装置。如有必要,可在电压互感器副方装设防铁磁谐振的消振电阻或其它消振措施。

6. 按过电压保护规程装设必要的过电压保护设备(如磁吹阀型避雷器、冲击波吸收电容)。

7. 定子单相接地保护应具有100%的保护区,即不应有保护死区。

## 二、需要讨论明确的几个问题

这里对涉及发电机中性点接地方式和定子接地保护的几个尚待讨论明确的问题,逐一分析如下。

1. 正常运行时,发电机中性点的位移电压:

常有人担心发电机中性点经消弧线圈接地特别是谐振接地时,由于三相对地电容不可能完全相同,正常运行时将发生中性点电位的异常过压(理论上可达无穷大)!

设发电机三相电势 $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ 完全对称,三相对地电容(国产30万千瓦18千伏汽轮发电机实测数据)为 $C_a = 0.174\mu\text{f}$ ,  $C_b = 0.178\mu\text{f}$ ,  $C_c = 0.176\mu\text{f}$ , , 中性点消弧线圈的感抗为 $j\omega L$ , 并有等效对地电导 $g_L$ 与 $j\omega L$ 并联, 这时中性点位移电压 $U_0$ 为:

$$\dot{U}_0 = -\frac{K_{c0} \dot{E}_a}{v_c - jd} \quad (1)$$

$$\text{式中 } K_{c0} = \frac{C_a + \alpha^2 C_b + \alpha C_c}{3C_0} \quad 3C_0 = C_a + C_b + C_c = 0.528\mu\text{f}$$

$$v_c = 1 - \frac{1}{\omega L \cdot 3\omega C_0} \quad (\text{脱谐度})$$

$$d = g_L / 3\omega C_0 \quad (\text{阻尼率, 忽略介质损耗})$$

当 $g_L = 0$  ( $d = 0$ ), 且 $\omega L = 1/3\omega C_0$  (谐振接地,  $v_c = 0$ ) 则三相对地电容小小的不一致而使 $K_{c0} \neq 0$ , 中性点位移电压 $U_0 = \infty$ 。实际上, 在发电机中性点谐振接地时, 虽有 $v_c = 0$ , 但消弧线圈的电阻不可能为0 (甚至根据需要可适当增大 $g_L$ 值),  $d$ 也就不可能为0, 例如在上述三相电容实有值下 $K_{c0} = 0.00568$ , 若取 $d = 15\%$ , 则 $U_0 \approx 0.0378E_a = 393.5$ 伏, 这一数值已比国外提供的实际数据大得多, 例如一台102.6万千瓦伏安(22kV, 60Hz)的汽轮发电机,  $K_{c0} = 0.00011$ , 中性点不接地时 $U'_0 \approx K_{c0} E_a = 1.4$ 伏(一次值), 若中性点谐振接地, 且有 $d = 5\%$ , 则 $U_0 = 28$ 伏(一次值)或 $U_0 = 0.22\%$ , 此机的中性点三次谐波电压为800伏(一次值), 即6.29%。另一台60万千瓦伏安(18kV, 60Hz)汽轮发电机,  $K_{c0} = 0.000253$ , 中性点不接地时中性点基波电压为 $U'_0 \approx K_{c0} E_a = 2.63$ 伏, (三次谐波电压为182伏), 当谐振接地且 $d = 5\%$ 时有 $U_0 = 52.6$ 伏(0.506%)。

由此可见, 只要发电机中性点经消弧线圈接地的回路中有一定的损耗( $d \neq 0$ ), 纵然按谐振方式接地, 在正常运行时中性点位移电压 $U_0$ 也是很小的, 而且 $U_0$ 的大小可

以通过改变消弧线圈回路的有效电阻来调整, 详见第三节之实例计算。

还应顺便指出: 上述由于三相对地电容不对称而引起的中性点位移电压 $U_0$ , 有人联想到发电机机端接三相冲击波吸收电容而发生机端单相接地故障时, 将出现三相对地电容的严重不对称, 因而担心有更危险的过电压, 这是一种误解, 因为式(1)是在三相绕组仅通过对地电容和消弧线圈与大地发生联系的条件推出的, 现在问题转为一相直接接地故障, 就不能再用式(1), 物理概念上就是已完全破坏L-C谐振条件, 这时的健全相电压将为线电压(当计及故障点过渡电阻时略大于线电压), 中性点位移最大为相电压, 因此决无危险过电压可言。一种可能产生的单相断线状态的线性谐振过电压(例如一相冲击波吸收电容断开)理论上是存在的, 但是这种三相冲击波吸收电容器组是死接于机端的, 一相断开的可能性不大, 退一步言, 即使发生了谐振过电压, 当消弧线圈电压达到1.3~1.5额定电压时, 铁芯开始饱和, 电感急剧减小, 自动脱离谐振状态, 因此这种单相断线过电压也是不必担心的。

### 2. 超高压系统接地故障时的传递过电压:

当超高压系统发生接地故障时, 故障点的零序电压 $E_{H0}$ 〔对有效接地系统,  $E_{H0} \approx (0.33 \sim 0.60)U_x$ 〕将通过变压器高低压绕组间的耦合电容 $C_M$ 传到发电机侧, 其数值 $U_0$ 将与发电机侧等效零序阻抗 $Z_0$ 有关(图1), 而 $Z_0$ 当然与发电机中性点接地方式密切相关。若发电机中性点经理想的消弧圈(电阻为0)谐振接地时,  $Z_0 = \infty$ ,  $U_0 = E_{H0}$ , 发电机受到极大的过电压威胁, 但是实际上消弧线圈不能是无阻的, 而且我们还可人为地增大其电阻, 这时 $Z_0$ 就成为一个可以按需要调整其大小的参数, 决定 $Z_0$ 大小的条件为:

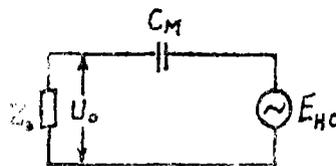


图 1

- (1) 尽量减少发电机单相接地故障电流, 理想条件就是谐振接地方式;
- (2) 发电机正常运行时的中性点位移电压应小于5~10%, 保证基波零序电压型定子接地保护有90~95%的保护区;
- (3) 使传递过电压小于发电机所允许的最高相对地电压值(一般为发电机的额定线电压)。

同时满足上述三条件来选定消弧线圈的电感和电阻是可能的(见第三节实例计算), 这样也就消除了传递过电压的顾虑。

### 3. 机组单相接地故障时的弧光过电压:

中性点不接地系统的接地弧光过电压也是人们长期担心的问题。在第一节中已谈到对于绝缘正常的发电机, 这种过电压并不构成威胁, 但是由于它广为流传, 普遍为大家关心, 有必要进一步讨论。文献〔3〕和〔4〕都提到当中性点经高阻接地方式的电阻功耗(KW)大于或等于发电机回路的充电容量(KVAr)时, 接地电弧过电压可限制在2.6倍以内, 这是40年代美国借助暂态分析仪的试验结果。文献〔2〕指出: 中性点不接地的发电机, 当电容电流达到某一临界值时, 接地电弧就不能最终自灭, 电弧接地过电压会造成危害。但是若电容电流小于允许接地电流(以下称安全电流), 电弧便可

瞬间熄灭，不再发生因电弧重燃而出现的累积性电压升高（即电弧接地过电压）这样中性点不接地的发电机，无需增添任何设备，暂态过电压就能低于2.6倍。

文献〔14〕的讨论中，M.V.Haddad和J.L.Koepfingev利用暂态网络分析仪（TNA）模拟分析了表1中1026MVA、22kV、60Hz发电机的两种不同中性点接地方式的暂态过电压问题，如图2所示。

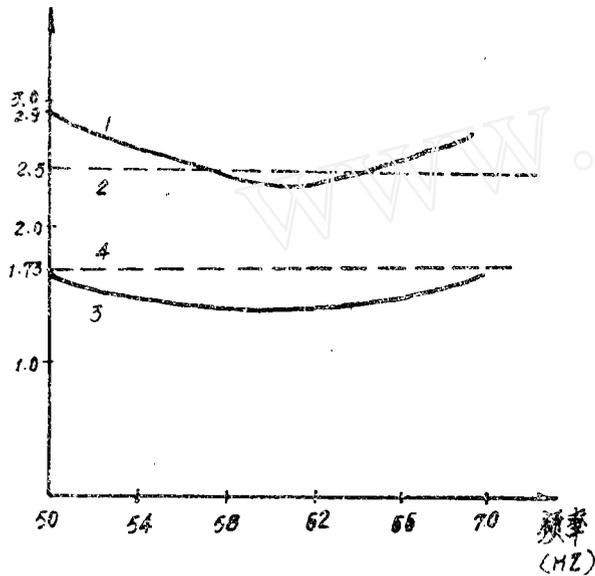


图 2

图中曲线1和3是谐振接地方式下相对地和中性点对地的最大暂态过电压倍数（包括接地故障的开始，重燃和切除所引起的暂态电压）；曲线2是高阻接地方式下相对地最大暂态过电压倍数；曲线4是谐振接地方式下在故障切除后由节拍振荡所引起的最大动态过电压倍数。必须指出：这些实验结果都是在谐振接地方式的消弧线圈电路中已加入附加电阻 $R_L$ 的条件下获得的；如果不考虑 $R_L$ ，则过电压倍数要大些。由图2可见，只要准确选择 $R_L$ ，在56~66Hz的频率区间，谐振接地方式下的暂态过电压

绝不会超过高阻接地方式；只是在偏离工频（60Hz）较远时才出现谐振接地方式暂态过电压较大的问题，但也仅达2.9倍额定相电压（幅值）。如果发电机的电容电流大于安全电流，则采用中性点经消弧线圈（欠补偿或谐振方式）接地，使接地电容电流减小到安全电流以下，既达到减小接地故障点电流的目的，又可降低暂态过电压，简单可靠地限制了故障的发展。这里由弧光过电压问题的讨论中又提出了发电机接地故障的安全电流问题。

#### 4. 发电机单相接地安全电流：

1981年河南省电力科学试验所主持了发电机安全接地电流的试验研究。所谓安全接地电流是指发电机单相接地故障点不产生电弧或电弧瞬间熄灭的最大接地电流。根据试验结果，并留有一定安全裕度，发电机安全接地电流定为

6.3千伏及以下	4安
10.5千伏	3安
13.8~15.75千伏	2安（氢冷发电机2.5安）
18千伏及以上	1安

关于发电机定子单相接地故障，我国长期沿用苏联1933年的研究结果，即大于5安时跳闸，小于5安时允许短时（例如2小时）运行。应该指出这个5安并非安全接地电

流,因为当时苏联制订5安这个标准时允许铁芯有一定烧损(熔化迭片少于16~17片,烧损深度小于4.0~4.5毫米,烧损容积不大于90~120立方毫米),如果说对当时容量不大的发电机,这种烧损还是允许的话,那么对于当前大型发电机(造价高、制造和检修工艺复杂、停电影响大)就不能容忍了。为此在70年代捷克制订了更为严格的安全接地电流,要求在这一电流下五次试验,没有一次发生铁芯迭片的任何熔化焊接现象。据此将安全接地电流降为1.5~1.0安。我国新制订的标准当然也不会发生铁芯迭片的熔化焊接现象,但更合理地按电压等级分别制订安全接地电流标准,因为铁芯的烧损是和故障点耗散的能量有关,电压等级高的安全电流理应小些。

凡是接地电流小于上述规定者,发电机中性点即可接不接地方式运行,如果接地电流超过上述规定,则简易可靠的安全措施应是发电机中性点经消弧线圈(欠补偿或谐振方式)接地。由于单元接线的发电机电压回路三相对地电容是固定数值,因此单相接地电流大小也是稳定地小于安全电流的,单相接地故障点将很少可能产生电弧或者电弧自行瞬间熄灭。

#### 5. 定子接地保护的出口行为:

一切按安全接地电流要求而采取的中性点接地方式,发电机定子接地保护动作后没有必要也不应该自动跳闸停机,但也决非长期继续带故障运行,为了大型机组的安全,当接到定子接地故障信号后,应立即请示上级调度,尽快转移负荷然后停机检查。这样做既可避免大机组保护跳闸停机给系统带来的扰动,又可避免对大型机组本身以及辅机的严重冲击,这正是大容量发电机组所希望的。由于现代大型机组采用环氧粉云母绝缘,绝缘的积累和老化效应已很不明显,而且又有了无死区的定子接地保护装置,因此在一点接地故障的处理过程中紧接着发生第二点接地故障的可能性是极少的,至于说由定子接地故障在处理过程中迅速扩展为相间或匝间短路,若接地故障电流小于安全电流且持续时间仅为转移负荷到停机的过程,肯定是不可能的,否则就不是真正的安全接地电流了。

当然对于那些已知绝缘水平较差的大型发电机,还应根据实际情况,采用定子接地保护动作于跳闸灭磁可能更为稳妥,但这不应作为一般大型发电机定子接地保护的出口做法。

#### 6. 预防为主,加强定期预防性耐压试验:

为了确保大型机组的安全,比中性点接地方式和定子接地保护更为积极的是及时发现和消除绝缘缺陷隐患,这就需要定期地进行预防性耐压试验。对于大型发电机(特别是水轮发电机),它们的对地电容电流较大,工频耐压试验设备就有困难。现在为了使发电机的接地电流小于安全电流,大容量的发电机必将采用消弧线圈接地方式,而且由于高压大机组的安全电流小,消弧线圈的电感量最好能连续可调(参阅[10]),现在已经研制成功这种消弧线圈,这就为应用串联谐振工频耐压试验提供了设备条件,从而为机组的正常安全运行创造了良好前提,消弧线圈成为多功能电抗器,既安全又经济。

### 三、两个算例和五点结论

表1中列举了两台大型发电机的有关原始数据,详细地按步骤实际计算了发电机中性点经消弧线圈谐振接地或经配电变压器高阻接地时,接地设备的一次参数和基波电压型定子接地保护动作电压和灵敏度。在计算过程中特别注意到我国大型发电机(单相接地电流超过安全电流者)实际采用的三种中性点接地方式(经消弧线圈接地、经配电变压器高阻接地、经低阻接地)的技术对比。通过实例计算,清楚地说明了下列结论:

1. 大型发电机中性点经低阻接地的方式在任何情况应予摒弃。它使机端发生单相接地故障时的接地电流比其它方案的同一电流大出近10倍或数十倍,远远超过安全接地电流。已经引进的这类机组应研究它们的改造问题,对今后国产设计或引进设备,更应杜绝这种接地方式重现。

2. 机组越大,电压必然越高,如果再装设冲击波吸收电容器,则单相接地故障的电容电流必然要增大,而安全接地电流却随机组额定电压增高而减小,这势必导致单机容量越大采用消弧线圈的必要性越明显。我国已经积累了水轮发电机中性点经消弧线圈欠补偿接地方式的大量运行经验,目前迫切需要的是取得消弧线圈谐振接地的经验,特别是汽轮发电机中性点经消弧线圈谐振接地的经验。对于已引进的经配电变压器高阻接地的发电机,可以继续按此方式运行,但对于国产机组或今后将引进的大容量机组,实无必要推广这种接地方式,因为它不但不能减小接地电流,反而使接地电流增大 $\sqrt{2}$ 倍以上。

3. 从继电保护方面看,目前和将来采用的定子接地保护主要是零序电压型的,消弧线圈的采用对这种保护装置是有利的,决不会因减小接地电流而降低保护灵敏度。由于发电机正常运行时有相当大的三次谐波电压(例如举例的102.6万千瓦安机组,三次谐波中性点电压为800伏,而基波零序电压仅1.4伏),而三次谐波的电流滤波不及电压滤波方便,因此基波零序电流型的定子接地保护不及零序电压型的灵敏度高,在国外使用零序电流型接地继电器仅作为机端附近接地故障的保护,因为它不怕电压互感器高压熔断器开断造成误动,比较简单可靠。当然零序电压型(基波)继电器不能保护100%的定子绕组,必须有其它接地保护继电器,例如三次谐波电压型、外加直流型、外加12.5Hz电源型等,所有交流信号保护都能成功地用于消弧线圈接地的发电机,但对中性点经低阻接地的发电机不是不能用(外加直流或12.5Hz电源型),就是要降低灵敏度(三次谐波电压型)。关于三次谐波电压型接地保护就不在本文作分析了,祇提出一点:国外广为采用的中性点三次谐波低电压保护,其灵敏度一定比我国兼用机端和中性点三次谐波电压的接地保护要低。。

4. 表1的分析计算中没有包括过电压问题。本文中对大家关心的几种过电压现象作了简要的解释,为了大型机组采用消弧线圈(欠补偿或谐振)接地方式的安全,热诚希望更多的过电压保护技术工作者对各种实际可能发生的过电压问题提出全面的科学分析。

5. 安全接地电流的标准是设计运行部门的重要技术依据, 到目前为止还没有为国内同行普遍承认和应用。由于这是一个影响颇大的技术标准参数, 希望对此有不同意见的同志, 积极提出建设性建议或质询, 直至再组织科学试验, 当然首先应了解已经进行的试验工作。那种对“国外有的总是对的, 国内创新总是怀疑”的态度, 不利于我国技术力量的成长和国内经验的总结。

水电部生产司周庆昌总工程师审阅本文。作者在此表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 周庆昌 “大型发电机的安全运行” 水电部总工程师电网研究班讲义
- [2] 要焕年 “大型发电机中性点接地方式的再商榷” 《电力技术》1984年11月
- [3] 杨淑云 “发电机中性点接地方式” 《电力技术》1982年7月
- [4] 游高麟 “关于单元接线发电机中性点接地方式的商榷” 《电力技术》1983年12月
- [5] 戴正义 “大型发电机变压器组发电机中性点接地方式的选择” 《继电器》1985年4月
- [6] R·维尔罕姆 M·华尔斯 吴维诚等译《高压输电系统的中性点接地》《中国工业出版社》
- (7) K.J.S.Khunkhun……“RESONANT GROUNDING (GROUND FAULT NEUTRALIZER) OF A UNIT CONNECTED GENERATOR” IEEE PAS V o 1—96 No 2 1977
- (8) A.C.Pierce “GENERATOR GROUND PROTECTION GUIDE” IEEE PAS V o 1—103 No 7 1984
- (9) Edward M. Gulachenski……“NEW ENGLAND ELECTRIC'S 30 YEARS OF EXPERIENCE WITH RESONANT NEUTRAL GROUNDING OF UNIT-CONNECTED GENERATORS” IEEE PAS V O 1-103 NO 9 1984
- [10] 要焕年 “大型发电机串联谐振工频耐压试验” 《电力技术》1980年10月
- [11] 王维、侯炳蕴 《大型机组继电保护理论基础》水电出版社 1982年
- [12] 解广润 《电力系统过电压》水电出版社1985年
- [13] В.Ю.Гессен Я.Д.РХЗНН  
“К вопросу о Допускимальных Токах замыкания Генераторов на землю” 《Э. С.》 1934
- [14] P.G.Brown I.B.Johnson J.R.Stevenson I.E.E.E.V O 1.PAS—79 No3 1978