

# 发电机中性点接地方式探讨

刘其常<sup>1</sup>, 胡少强<sup>1</sup>, 刘蔚<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 江西吉安电厂, 江西 吉安 343009)

**摘要:** 介绍了发电机中性点接地方式的发展情况, 对当前广泛应用的中性点经消弧线圈接地和经接地变压器 - 电阻组合接地方式进行比较, 可以发现发电机经消弧线圈接地比接地变压器 - 电阻的组合有更多的优越性, 并用 Matlab 进行了仿真验证。

**关键词:** 发电机中性点; 接地变压器; 消弧线圈; Matlab 仿真

**中图分类号:** TM31; TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897 (2005) 13-0087-05

## 0 引言

随着电力系统的发展, 电力系统容量越来越大, 作为电力系统原动力的发电机组的单机容量也越来越大。大容量发电机的出现, 使发电机定子线圈接地故障的保护问题越来越引起人们的严重关注, 因为大容量的电机电容电流不断增大, 而发生定子接地故障时, 故障点的接地电流受发电机电容电流和中性点的运行方式的影响。

## 1 发电机中性点接地方式的发展

上世纪 70 年代初期, 捷克动力研究院组织了发电机单相接地故障电流允许值的科学实验, 接地故障电流允许值的标准是这样规定的: 在一定的故障电流和持续时间下, 五次试验中若有一次出现铁芯两层叠片烧结在一起, 该接地故障电流就是不允许的。试验值为 0.2 ~ 40 A, 持续时间为 0.3 ~ 1200 s, 结果表明: 按上述规定的标准, 临界电流是 2A<sup>[2]</sup>。考虑安全系数 1.3 ~ 2.0, 接地故障电流的允许值规定为 1.0 ~ 1.5 A。

国内有关科研单位, 对此问题也进行了相当的研究, 把不产生电弧的最大接地电流定义为安全电流, 并按不同电压等级推荐了发电机定子接地安全电流, 其值如下:

6.3 kV 及以下	4 A
10.5 kV	3 A
13.8 ~ 15.7 kV	2 A
18 kV 及以上	1 A

在上述安全电流下, 定子接地保护动作后只发信号, 而不跳闸, 对于容量大于 150 MW 的水轮发电机组应及时联系调度停机处理, 不再继续运行。

根据上述规定来讨论以下几种发电机中性点接地方式: 中性点直接接地; 中性点经低阻抗接地; 中性点不接地; 中性点经高阻抗接地; 中性点经消弧线圈接地。

### 1.1 发电机中性点直接接地

当发生单相接地故障时, 电弧接地过电压最低。同时, 接地继电保护最简单。但是, 现在大型机组的电压等级和单机容量均大幅度提高, 由于接地故障电流大, 即使继电保护迅速切机, 也会对发电机造成损害。

### 1.2 发电机经低阻抗接地方式

发电机经低阻抗接地运行方式可以部分限制单相接地电流, 但其阻值的选取是为了提供继电保护装置足够大的电流, 故障点接地电流幅值至少是 100 A, 在这个接地电流下继电保护能快速切机, 但是铁芯的严重烧毁仍然不可避免。

### 1.3 中性点不接地运行方式

**Abstract:** The paper introduces some relevant contents about failure protection in regulations and countermeasures, analyzes the startup logic of line failure protection and transformer failure protection. According to some startup modes permitted by microprocessor failure protection, it details the advantages and disadvantages in actual operation. Considering the features of microprocessor protection, it brings forward feasible schemes which are in accordance with regulations and countermeasures. It gives emphasis to analyze the scheme of failure protection when higher voltage breaker in transformer is replaced by bypass breaker and presents the proposal of design scheme and CT selection.

**Key words:** failure protection; startup; bypass breaker

发电机中性点不接地运行情况下,发电机采用发电机-变压器组的接线方式,发电机发生单相接地故障时,线路示意图如下:

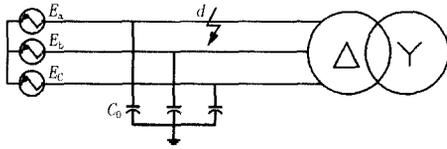


图 1 单相故障示意图

Fig 1 Schematic diagram of single-phase fault

在正常运行情况下三相对地电容  $C_0$  (包括发电机对地电容  $C_g$ , 变压器和封闭母线对地电容  $C_t$ ) 相同,在相电压作用下,每相都有超前于相电压  $90^\circ$  的电容电流流入大地。三相电流之和为零。当发生单相接地故障时,假设为 A 相,则有

$$U_{ad} = 0$$

$$U_{bd} = E_b - E_a = \sqrt{3}E_a e^{-j150^\circ}$$

$$U_{cd} = E_c - E_a = \sqrt{3}E_a e^{j150^\circ}$$

故障点的零序电压为

$$U_{d0} = \frac{1}{3}(U_{a-d} + U_{b-d} + U_{c-d}) = -E_a$$

在非故障相中流向故障点的电容电流为

$$I_b = U_{bd} j C_0$$

$$I_c = U_{cd} j C_0$$

此时,从接地点流回的电流为  $I_d = I_b + I_c$ 。其有效值为  $I_d = 3U C_0$ ,  $U$  为相电压,即是正常运行时三相对地电容电流之和。

根据此公式,我们参考某 300 MW 机组参数代入计算,发电机参数为:  $U = 20$  kV, 电容  $C_0 = 0.224 \mu\text{F}$ , 计算结果为  $I_d = 2.44$  A (还不包括主变等电容电流)。即在中性点不接地的情况下,当发生最严重的发电机单相接地故障,接地电流已经超过发电机允许值,故中性点不接地运行方式在大容量机组中也不适用,尤其在大型水轮机组中,发电机相对地电容更大,例如在三峡水轮机组中,发电机三相对地电容电流更是达到了 30 A 左右,远远超过了安全允许电流<sup>[6]</sup>。

因此,按照《IEEE GUIDE FOR GENERATOR GROUND PROTECTION》推荐,大容量的发电机中性点接地运行方式就主要有发电机中性点经高阻接地和中性点经消弧线圈接地两种运行方式。

#### 1.4 发电机经高电阻接地

当电网中性点不接地运行方式中,发生单相接地故障时,即使对地电容电流不大,由于对地电弧

的燃烧和熄灭的重复过程,使健全相的电位可能升高到破坏其绝缘水平,甚至发生相间短路故障。在中性点通过高电阻接地,则可在熄弧后释放其能量,降低中性点电位,故障相的电压恢复速度也变慢,减少了电弧重燃的可能性。高电阻阻值一般取  $R = 1/3 C_0$ 。中性点经高电阻接地有几种方案,其中以单相变压器-电阻器组合方式最优。

#### 1.5 发电机中性点经消弧线圈接地

发电机中性点经消弧线圈接地运行方式中,用消弧线圈补偿对地电容电流,能够有效地降低接地点的短路电流。在发电机内部发生短路时,降低了定子铁芯损害。使发电机能够在故障情况下运行一段时间,减少了对系统的冲击。提高了供电可靠性。

## 2 两种方式的比较

### 2.1 接地故障电流

在这里采用了某电厂 300 MW 机组的实际参数,具体参数如下:额定电压 20 kV,单相对地电容  $C_0 = 0.232 \mu\text{F}$ ,主变、高厂变、封闭母线对地电容  $C_t = 0.060 \mu\text{F}$ ,该厂采用接地变压器参数为:变比 20000/230,接地变压器容量为 30 kVA,接地电阻值为 0.519  $\Omega$ 。通过计算选择消弧线圈的参数为 11.56 H,电阻值  $R = 180 \Omega$ 。

当发生单相接地故障时,等值电路图<sup>[5]</sup>。

$U_x$  为故障点零序电压,  $R_f$  为故障点的接地阻抗,  $Y_n$  为中性点的对地导纳,  $C_g$  和  $C_t$  为发电机和外部回路对地电容。

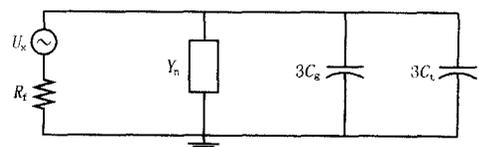


图 2 发电机零序等值电路图

Fig 2 Zero-sequence equivalent circuit of generator

故障点的零序电压我们考虑为发电机出口金属性接地短路 ( $R_f = 0$ ),即所有条件均为最严重的故障。

故障点电流为

$$I_d = U_x \times [Y_n + j\beta (C_g + C_t)]$$

在发电机中性点经高阻接地系统中,  $Y_n$  为  $1/R$  (变压器电抗在工频电压下可以忽略),故障电流为:

$$I_d = U_x \times \left[ \frac{1}{R} + j\beta (C_g + C_t) \right]$$

将实际参数代入可求得短路点的接地电流  $I$  为 9.38 A。

即故障点电流有三相对地电容电流和中性点电阻电流叠加。所以发电机中性点经高阻接地则必须在发生单相故障时马上切机,而且由于大型机组的对地电容电流逐渐增大,均已经超过了安全电流的界限,甚至达到了 30 多安培。所以,发电机中性点经电阻接地在发生单相故障停机后,应该进行定子铁芯的检查。

在中性点经消弧线圈接地系统中,

$$Y_N = \frac{1}{R + jL}$$

$R$  为消弧线圈串联电阻

故障点的电流为:

$$I_d = U_x \times \left[ \frac{1}{R + jL} + j3(C_g + C_t) \right]$$

将计算所选择参数代入上式计算,得到故障点的接地电流  $I$  为 0.23 A。满足安全电流的允许值,所以可以只发信号,运行人员上报调度部门申请转移负荷停机。

### 2.2 对继电保护的影响

发电机单相接地保护主要有零序保护,三次谐波保护,外加电源型单相接地保护。

在中性点不接地系统中,零序电压保护动作电压是取自发电机端部的开口三角形的电压,因此,灵敏度在中性点经高阻接地和经消弧线圈接地差别不大。

因为零序电压保护动作电压的整定值一般在 5% 左右,即在中性点附近有 5% 的动作死区。为了实现发电机定子无死区保护,发电机还应采用其他保护,例如三次谐波保护来实现。

在发电机正常运行中,均有三次谐波电压存在,大概在 3% 基波电压左右,当发生中性点接地故障时,等值电路图如图 3、图 4<sup>[1]</sup>。

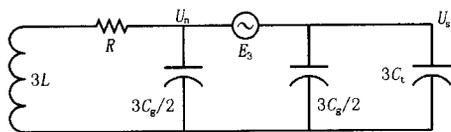


图 3 正常运行三次谐波等值电路图

Fig 3 Third-harmonic equivalent circuit of generator on normal operation

在正常运行方式中

$$\frac{|U_s|}{|U_n|} = \frac{|Y_N|}{|Y_s|} = \frac{\left| \frac{1}{R + j(3)L} + j(3) \left( \frac{3}{2} C_g \right) \right|}{\left| j(3) \left( \frac{3}{2} C_g + 3C_t \right) \right|}$$

在中性点通过消弧线圈接地运行方式中,一般

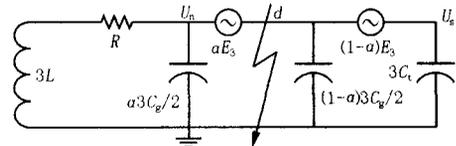


图 4 接地故障三次谐波等值电路图

Fig 4 Third harmonic equivalent circuit of generator on ground fault

消弧线圈串联电阻,其大小影响故障情况下的动态过电压和接地电流,将消弧线圈参数代入公式中我们计算在正常运行中,  $U_s/U_n = 0.4746$ ,考虑安全系数  $K(1.1)$ ,三次谐波保护能保护 60% 定子线圈。

在中性点通过变压器和电阻组合接地运行方式中,  $R$  为电阻折算到一次侧的数值,  $L$  为接地变压器等效变换数值。将接地变与电阻参数代入计算,求得  $U_s/U_n = 1.1$ ,考虑到安全系数  $K(K$  取 1.1),三次谐波保护的整定值 1.32。即三次谐波保护只能保护 40% 左右。该电厂实测正常运行时三次谐波的比值为 1.41,保护整定值为 1.552。

故障时,无论是中性点经电阻还是经消弧线圈接地,  $U_n$  为  $E_s$ ,  $U_s$  为  $(1 - )E_s$ ,  $U_n/U_s = 1/(1 - )$ ;

因此,考虑安全系数,中性点经接地变压器组合接地的三次谐波单相接地保护的覆盖范围较小,而消弧线圈则能保护到中性点至定子线圈 60% 的范围。

### 2.3 过电压

消弧线圈能将故障电流限制到推荐值之内,因此故障点不建立电弧或使电弧瞬间熄灭。这样,便将接地电弧暂态过电压降低到高电阻接地方式时的水平,其值仅为 2.3 pu。

清华大学电机工程有关科技人员认真组织了发电机单相接地的动态过电压仿真试验,得出的结论是:在额定频率 (50 Hz) 附近,消弧线圈 (串联电阻) 接地方式的发电机单相接地故障不比经配电变压器高阻接地方式大<sup>[4]</sup>。在消弧线圈接地方式中,单相接地故障不作用于跳闸,只发信号,由值班人员转移负荷再手动跳闸、灭磁,这样就可以避免在单相接地故障暂态过程中频率偏移太大。

同时,文献 [7] 仿真结果也说明,在中性点非直接接地系统中,只要频率维持恒定,不同的接地方式不会显著增加单相接地暂态过电压。

在发电机中性点高阻接地系统中,由于故障点接地电流已经严重超过发电机安全允许电流,发生单相接地故障必须迅速跳机。在用满负荷的情况下

动态电动势可达到  $1.133 p_u$ 。考虑到甩负荷的动态电动势的升高效应,中性点经高阻接地系统将可能产生更高的暂态过电压。

在单元制接线方式中,由于目前大容量发电机多数通过主变和 220 kV 及以上系统相联,主变中性点直接接地方式运行,所以从高压侧传递过电压基本上可以避免。

### 3 Matlab 仿真

根据前面提到某电厂的实际参数,用 Matlab 分别仿真发电机出口在 0.1 s 发生金属性短路,仿真时间为 1 s,得到故障电流的波形如图 5、图 6。

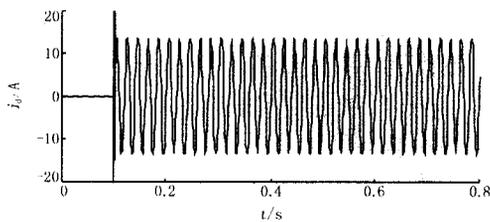


图 5 接地变压器方式故障点电流波形

Fig 5 Ground-fault current in neutral of generator grounded through grounding-transformer

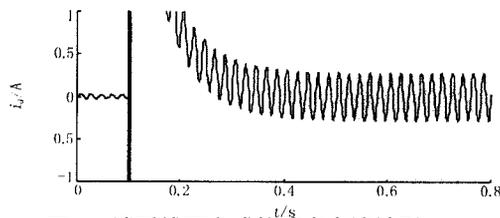


图 6 消弧线圈方式故障点电流波形

Fig 6 Ground-fault current in neutral of generator grounded through neutralizer

通过仿真结果,我们可以看到,通过接地变压器和电阻组合的接地故障电流为 9.28 A。因此,这种接地方式发生单相接地故障时必须马上跳机。而通过消弧线圈接地能够将故障电流降低到安全电流的允许值以下,电流为 0.20 A。在 0.1 s 发生短路时,均有暂态接地电流,这个电流幅值和频率主要与暂态电容有关,其幅值还受故障初始相角影响,暂态电流幅值虽然很大,但是持续时间很短,约为 (1~3) 个工频周波,一般不会对电弧的熄灭带来多少影响。

在发电机中性点接地运行中,一般消弧线圈采用欠补偿方式,因为在发电机采用单元制接线方式,发电机对地电容基本不变,不会导致谐振现象的发生。同时,容性电流的电弧比感性电流的电弧更容易熄灭。

在正常情况下,当在仿真中叠加 1% 三次谐波时,中性点通过消弧线圈接地检测发电机机端三次谐波的  $U_s/U_n$  的比值为 0.5。

在发电机通过接地变压器与电阻的组合接地时,三次谐波  $U_s/U_n = 1.2$ 。

从 Matlab 仿真结果也可以得出三次谐波保护在中性点经消弧线圈接地运行方式有更大的保护范围。

### 4 结论

通过对发电机两种接地运行方式的比较,可以看到发电机经消弧线圈接地比接地变压器和电阻的组合有更多的优越性。

1) 限制了故障电流的幅值,在大容量机组中,由于对地电容值比较大,当发生接地故障时,故障电流远远超过了安全电流值,通过消弧线圈的接地运行方式则能限制故障电流,避免了发电机单相接地故障导致定子铁心的损害。同时,接地故障电流的减少也降低了故障点电弧重燃的概率,避免了电弧接地过电压的产生。

2) 减少故障停机次数,作为大容量机组,尤其是汽轮发电机,发生全部甩负荷对发电机损害较大,而采用消弧线圈补偿的方式可以带故障运行一段时间,在申请调度转移负荷后手动停机,同时也减少了大容量机组跳机对系统的冲击。

3) 提高了继电保护的動作可靠性,现在运用比较广泛的三次谐波和基波零序电压 100% 定子接地保护在消弧线圈方式下有更高的灵敏度。

### 参考文献:

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principle of Relaying Protection in Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [2] Bemann J, Kripsky A, Skalka M. Protection of Large Alternators Connected to Step-up Transformers against the Consequences Earth Faults in Stator Winding [A]. CIGRE Proceeding of the 24th Session Paris 1972 1-8.
- [3] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance Grounding of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [4] 李润先. 中压电网系统接地实用技术 [M]. 北京: 中国

- 电力出版社, 2002  
LI Run-xian Grounding Operative Technology of Medium Voltage Network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002
- [5] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998  
WANG Wei-jian Application of the Protection of Generator and Transformer [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998
- [6] 王维俭, 刘俊宏, 汤连湘. 从三峡发电机组安全的观点分析机组中性点接地方式 [J]. 电力自动化设备, 1995, (4): 2-7  
WANG Wei-jian, LI Jun-hong, TANG Lian-xiang An Analysis of Generator Neutral Grounding Methods from Viewpoint of San-xia Generators Safety [M]. Electric Power Automation Equipment, 1995, (4): 2-7.
- [7] Fulczyk M, Bertsch J. Ground-fault Currents in Unit-connected Generators with Different Elements Grounding Neutral [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17 (1).
- [8] Fulczyk M, Piasecki W, Bertsch J. Influence of Element Grounding Generator Neutral and Resistance of Break-down Channel on Fast Transient Process in Unit-connected Generator [A]. IEEE/PES Conference and Exhibition Transmission and Distribution Asia Pacific: 2002
- [9] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 发电机中性点经消弧线圈谐振方式接地中串联电阻对定子接地保护的影响 [J]. 继电器, 2001, 29(11): 5-8  
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian Effects of Series Resistance on Stator Ground Fault Protection of Large-capacity Generator by Resonant Neutral Grounding [J]. Relay, 2001, 29(11): 5-8
- [10] 王怀智. 300MW 发电机中性点采用消弧线圈补偿接地方式在大坝电厂的应用 [J]. 继电器, 2002, 30(9): 70-73.  
WANG Huai-zhi Application of 300 MW Generator Neutral Point Adopting Arc Suppression Coil Compensation Ground in Daba Power Plant [J]. Relay, 2002, 30(9): 70-73.

收稿日期: 2004-09-27; 修回日期: 2004-11-05

作者简介:

刘其常 (1977 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统安全监控与继电保护; E-mail: lqcx@163.com

胡少强 (1955 - ), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统故障检测与控制的教学和研究工作;

刘蔚 (1977 - ), 女, 助理工程师, 从事电力试验和控制技术工作。

## Discussion on generator neutral grounding methods

LIU Qi-chang<sup>1</sup>, HU Shao-qiang<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>

(1. Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Ji an Power Plant, Ji an 343009, China)

**Abstract:** This paper introduces the development of generator neutral grounding methods. It can be found that grounding through neutralizer has more advantages than that through transformer-resistance by comparing the two popular grounding methods. It is also showed by Matlab simulation.

**Key words:** generator neutral; grounding-transformer; neutralizer; Matlab simulation

## 征稿启事

《继电器》杂志自本期设立“继电保护专栏”后,将更多关注电力系统继电保护领域的发展,为此,本专栏将陆续推出:750 kV特高压输电变电继电保护技术;电力系统事故(故障)分析;继电保护配置与整定计算;保护算法探讨等不同的专题。热烈欢迎大家踊跃投稿,共同促进我国继电保护技术的繁荣与发展。

投稿邮箱:deps@xjgc.com    deps@sina.com    联系电话:0374—3212254

联系地址:河南省许昌市许继大道32号许昌继电器研究所《继电器》编辑部    邮编:461000