

大型发电机变压器组发电机中性点接地方式的选择

中南电力设计院 戴正義

一、概 述

迄今为止，发电机中性点共有以下诸种接地方式：（一）不接地方式；（二）经电压互感器接地方式；（三）经消弧线圈接地方式；（四）经配电变压器接地方式；（五）经低电阻接地方式；（六）直接接地方式。

（一）至（六）顺序排列的特征是单相短路电流由小到大，过电压倍数由高到低。

对30万千瓦机组而言，由于其电容电流较大，已不允许采用第（一）、（二）种接地方式（一般电容电流均大于2安培），另为了保护大机组定子线圈不致受到过大的短路电流而遭致破坏，故第（六）种接地方式显然是不能采用的。

消弧线圈接地方式在我国已大量采用，由于它能有效地补偿流过接地点的电流，从而能消除间歇性电弧引起的弧光过电压，同时能让单相接地系统继续运行1~2小时，以便采取措施消除故障。这些都是消弧线圈接地方式的明显优点。但是，它也有特别是对大机组来说的致命弱点，即当发电机定子一点接地使发电机带病运行时，特别是在该一点接地发生在发电机中性点附近的情况下，如果接着又在发电机同相的引出线上发生第二点接地，则有可能使单相短路电流超过三相短路电流而造成发电机定子绕组的严重损害，正因为如此，电力建设总局颁发的大机组保护设计技术规定DLGJ—13-80中第3.0.1条规定当发电机定子绕组及发电机电压回路中诸元件的对地电容电流值超过2安时宜动作于解列灭磁。这反映了设计运行单位对大容量机组的安全性的关切，明显偏重于不采用消弧线圈接地方式。但这绝不等于排除了消弧线圈接地方式，事实上，新的继电保护和自动装置规程SDJ6—83中第2.2.4条指出仍可采用消弧线圈补偿方式，并不强调对大机组一定要解列灭磁。

由于消弧线圈接地方式已早被我国的设计运行人员所熟知，故此仅就配电变压器接地与低电阻接地这二种接地方式进行必要的论述与推导，得出接地装置的实用计算公式。

二、配电变压器接地方式

配电变压器接地方式的原理接线如图1所示。我国的引进工程如陡河、大港、宝山等发电厂及EBASCO导则均采用此种接地方式。

由图1可知，配电变压器接地方式实质上就是借助配电变压器二次侧的并联电阻R（低电阻）而转换成一次侧的高电阻 n^2R 的接地方式（ n —配电变压器的变比）。例如—

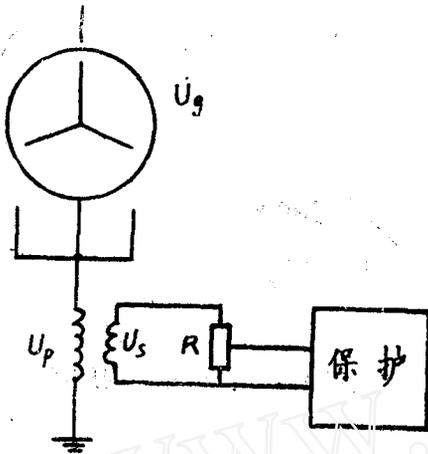


图1 配电变压器接地原理图

障点交换的能量加大，引起弧光过电压。如果设法在该物理系统中设置一个电阻元件，将静电电容中贮存的能量迅速地转化为电阻上的热能，则就大大阻尼了该物理系统的振荡，从而限制了暂态过电压。

计算与实验表明，过电压倍数与 P_R/Q_C 之比如图2所示 [3]：

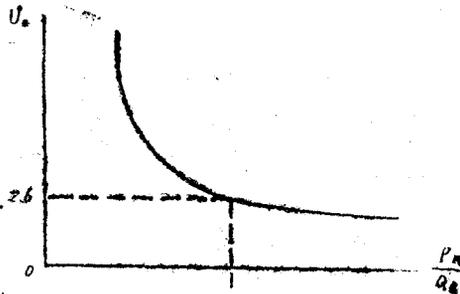


图2

P_R —电阻 R 上所消耗的有功 (kW)

Q_C —三相对地电容上所贮存的无功 (kVA)

般30万机所接的配电变压器的变比：

$$n = \frac{20000}{230} \approx 87$$

若 $R = 0.5 \Omega$ ，则一次的等效电阻 R' 为：

$$R' = 87^2 \times 0.5 = 3780 \Omega$$

对如此大的电阻，发电机引出线上一点接地时发电机中性点最大接地电流为

$$I = 1.05 \times \frac{20000}{\sqrt{3}} / 3780 = 3.2 \text{ A}$$

由于发电机绕组及发电机电压引出线部分对地存在着较大的电容，因此当平衡系统破坏时，电磁能量就会通过故障点进行交换，从而使物理系统发生振荡。当贮存在静电电容上的能量越大时，就愈使故

由图2知， $P_R/Q_C = 1$ 时，可把过电压倍数限制在额定相压的2.6倍以下。而

$$P_R = Q_C \quad \dots\dots (1)$$

正是计算电阻值 R ，配电变压器容量 S 的基础。正常运行状态下三相对地电容上所贮存的无功为：

$$Q_C = 3 \times \left(\frac{U_g}{\sqrt{3}} \right)^2 \times \omega C_{0\Sigma} \times 10^{-3} \\ = 0.314 U_g^2 C_{0\Sigma} \text{ (kVA)} \quad \dots\dots (2)$$

式中 $C_{0\Sigma}$ 为发电机变压器组每相对地的总电容值。在单相接地情况下配电变压器二次侧电阻 R 上所消耗的有功为

$$P_R = \frac{\left(\frac{U_g}{\sqrt{3}} \times \frac{U_s}{U_P} \right)^2}{R} \times 10^{-3} \text{ (kW)} \quad \dots\dots (3)$$

由(1)式，并在实用上常考虑有1.1倍的可靠系数后有

$$\frac{\left(\frac{U_g}{\sqrt{3}} \times \frac{U_s}{U_P} \right)^2}{R} \times 10^{-3} = 1.1 \times 0.314 U_g^2 C_{0\Sigma}$$

化简后得:

$$R = \frac{0.965}{C_{0\Sigma}} \times \left(\frac{U_s}{U_P} \right)^2 \times 10^{-3} \quad (\Omega) \quad \dots\dots (4)$$

配电变压器的容量为

$$\begin{aligned} S &= U_s I = U_s \times \left(\frac{U_g}{\sqrt{3}} \times \frac{U_s}{U_P} \right) / R \\ &= \frac{U_g U_s^2}{\sqrt{3} R U_P} \quad (\text{kVA}) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

当考虑到变压器的种类及最大运行时间的热系数K后, (5)式可写成:

$$S = \frac{U_g U_s^2}{\sqrt{3} K R U_P} \quad (\text{kVA}) \quad \dots\dots (6)$$

若变压器允许长期运行, 则K=1, 若使保护动作于解列灭磁, 则: 对充油变压器K=3; 干式变压器K=2

三、低电阻接地方式

我国的引进工程如元宝山、姚孟发电厂3、4号机等就采用这种接地方式, 其典型接线图如图3所示。

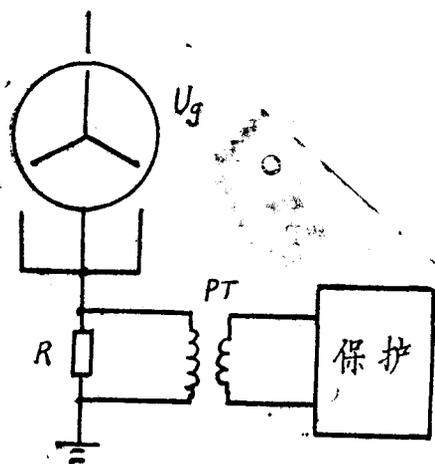


图 3

因为 $X_{CHL} \gg X_{CO\Sigma} > R$, 故图4可简化为图5

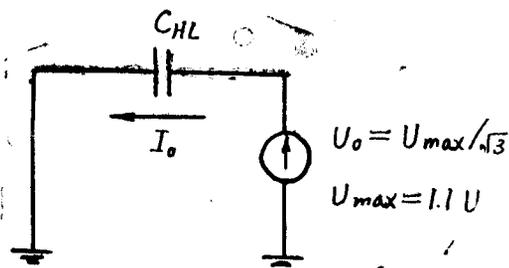


图 5

电阻R的选择主要按躲过主变高压侧单相短路使保护误动来进行设计的[6]。主变高压侧单相短路时的零序网路如图4示。

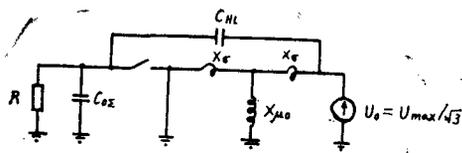


图 4 零序等效网路

$C_{0\Sigma}$ —发电机电压每相对地总电容
 C_{HL} —主变高低绕组间的杂散电容
 U_{max} —主变高压侧最高工作电压, 等于1.1U。

由此可得流过电阻的电流为

$$\begin{aligned} I &= 3I_0 \\ &= 3 \times \frac{U_{max}}{\sqrt{3}} \times 2\pi f C_{eL} \times 10^5 \\ &= 5.43 U_{max} C_{eL} \times 10^5 \quad (\text{A}) \\ &= 5.97 U_e C_{eL} \times 10^5 \quad (\text{A}) \quad \dots\dots (7) \end{aligned}$$

为了使保护在高压侧单相短路时不动作, 则必须满足: $IR \leq 5\% U_{g\phi}$ (8)
 意即将这样情况划到定子95%接地保护之外。由式(8)即可求出电阻R的值为:

$$R \leq 5\% U_{g\phi} / I \quad \text{..... (9)}$$

最大的中性点电流发生在发电机出口单相接地时, 此时的电流为

$$I_{n\max} = U_{g\phi\max} / R = \frac{1.05 U_g}{\sqrt{3} R} \quad \text{..... (10)}$$

四、计算实例

现以上海电机厂引进西屋公司技术生产的30万千瓦发电机变压器组为例来计算发电机中性点接地设备的参数。

已知:

C_{01} —发电机定子每相对地的电容, 为 $0.182\mu\text{f}$;

C_{02} —发电机引线每相对地电容, 按E导则推荐为每300米 $0.02\mu\text{f}$ ⁽⁴⁾;

C_{03} —主变低压绕组每相对地电容, 按E导则推荐为 $0.06\mu\text{f}$ ⁽⁴⁾;

C_{04} —厂变高压绕组每相对地电容, 按E导则推荐为 $0.02\mu\text{f}$ ⁽⁴⁾;

C_{z} —主变高低压绕组间的杂散电容, 为 $0.0069\mu\text{f}$ ⁽⁶⁾;

U_g —发电机额定电压, 20000伏;

U_g —主变高压侧额定电压, 242或550千伏;

(一) 配电变压器接地方式:

配电变压器一次侧的额定电压 U_p 一般选成等于发电机的额定线电压, 即为20000伏; 二次侧的额定电压 U_s 一般选为240伏。

发电机电压系统每相对地的总电容为

$$C_{0\Sigma} = C_{01} + C_{02} + C_{03} + C_{04} = 0.27\mu\text{f}$$

为此可算出单相接地时流过接地点的电容电流为:

$$I_c = 3 \times \frac{20}{\sqrt{3}} \times 10^3 \times 314 \times 0.27 \times 10^{-6} = 2.9 (\text{A})$$

由此可见一般30万机的电容电流均大于2安。

由(4)式可算得二次侧的并联电阻R:

$$R = \frac{0.965}{0.27} \times \left(\frac{240}{20000} \right)^2 \times 10^3 = 0.515 (\Omega)$$

由(6)式可算得配电变压器的容量为:

$$1、\text{充油变: } S = \frac{20 \times 240^2}{\sqrt{3} \times 3 \times 0.515 \times 20000} = 22 \text{ kVA}$$

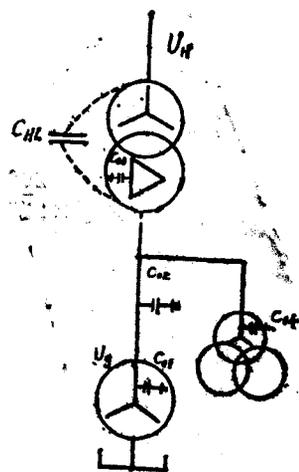


图 6

2、干式变: $S = 22 \times \frac{3}{2} = 33 \text{ kVA}$

(二) 低电阻接地方式:

由式(7)计算主变高压侧短路时流过接地电阻上的电流以及由(9)式计算所需的电阻值:

1、主变高压侧为242kV时

$$I = 5.97 \times 242 \times 0.0069 \times 10^{-6} \times 10^6 = 0.997 \text{ A}$$

$$R \leq \frac{5}{100} \times \frac{20000}{\sqrt{3} \times 0.997} = 579.77 \Omega$$

此时最大的中性点电流为

$$I_{max} = \frac{1.05 \times 20000}{\sqrt{3} \times 579.77} = 20.9 \text{ A}$$

2、主变高压侧为550kV时

$$I = 5.97 \times 550 \times 0.0069 \times 10^{-1} = 2.266 \text{ A}$$

$$R \leq \frac{5}{100} \times \frac{20000}{\sqrt{3} \times 2.266} = 255 \Omega$$

$$I_{max} = \frac{1.05 \times 20000}{\sqrt{3} \times 255} = 47.6 \text{ A}$$

五、保护配置

根据大机组保护规程DLGJ—13—80中第3.0.1条规定必须装备100%定子一点接地保护。为了实现100%的定子接地保护,一般可用多种方法来达到,但EBASCO所使用的也是我们认为最为简单有效的办法是利用二套死区错开的定子接地保护组合而成。^[4]

第一套为95%接地保护,为反应基波分量的过电压继电器,它能保护距中性点6%以外的任何金属性接地故障。

第二套为反应发电机固有的三次谐波电势的低电压继电器,正常时,在中性点及中性点附近有较大的谐波电势分布,继电器处于动作状态,而当中性点及中性点附近有接地故障时,三次谐波电压立即下降到最小程度,所以恰在95%接地保护的死区段,第二套保护有着最高的灵敏度。二套保护结合起来,就组成了可靠的100%接地保护。

图7示出了二套保护在正常时的电位分布及故障时的电压检测值:

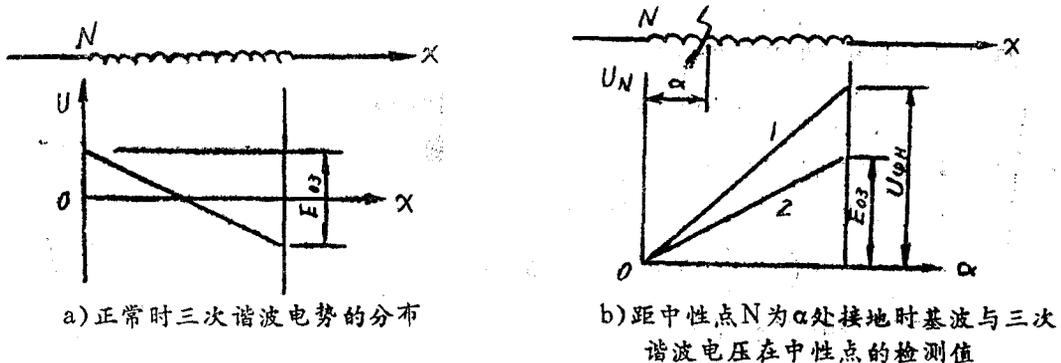


图7 1—基波, 2—三次谐波

应该指出,按E导则要求在以配电变压器接地时还应装一套次同步过电压继电器,它在20~50Hz范围内有很低的动作值,以保护发电机在启动或停机过程中的接地故障。另一方面,如按德国BBC公司对姚孟电厂的发电机的保护设计来看,只须装一套Ferraris型定子95%接地保护继电器就够了。

六、评 价

全面正确地以上三种接地方式进行评价是困难的,下面仅从限制过电压倍数、对铁芯损伤的程度、继电保护以及接地设备的经济性上这四个主要方面来进行比较以便最后作出评价。

(一)在限制暂态过电压方面,由于消弧线圈接地能将接地电流补偿到最小程度,从而消除弧光过电压。至于另二种接地方式,从理论上说低电阻接地对限制暂态过电压来说要好些,但是由图2可看出,当 $P_R/Q_C > 1$ 后, $U_*(P_R/Q_C)$ 曲线已趋平缓,即它在这方面所获得的效益是非常小的,因此从限制过电压来看,这三个方案都是极其有效的。

(二)对定子铁芯的损伤程度:

铁芯损伤的程度决定于故障电流的大小及其通过铁芯的时间。

从通过铁芯的故障电流的大小上看,消弧线圈接地时最小,其次是配电变压器的接地方式,如计算实例中的最大接地电流仅为

$$\frac{1.05 \times 240^2}{\sqrt{3} \times 0.515 \times 20000} = 4 \text{ (A)}$$

而低电阻接地方式最大(计算实例中为47.6安)

一般认为,如果将故障电流限制在15安以下时,则对铁芯就只会产生局部轻微损伤[2],由此看来,低电阻接地方式对铁芯损伤的程度最为严重。

从通过故障点的时间上看,一般是消弧线圈接地方式下将长期流过故障电流,其他二种接地方式都瞬时动作于跳闸(配电变压器接地方式亦可动作于信号,不过为了大机组的安全起见一般还是动作于停机),故障电流将很快切除。

由于消弧线圈补偿时应保持一定的脱谐度,所以消弧线圈补偿方式下长期通过故障电流不能不认为仍有可能产生对铁芯的烧伤[2]。

(三)从继电保护上看,由于低电阻接地方式中的接地电阻值是按躲过外部故障时不使保护误动的原则进行选择的,因此它有良好的选择性。而在配电变压器接地方式中,接地电阻是按 $P_R = Q_C$ 来选择的,使得故障时中性点的接地电流很小,保护的启动值很低。这样就带来了一个问题,即当外部故障时(如主变高压侧接地时),通过主变高、低压绕组间杂散电容而流入地的电流有可能使保护产生无选择性的动作。当然,要防止这种误动的方法是多种的,如用高压侧的零序电压来作保护的制动分量,或将保护进行一定的延时等。但无论如何,从保护的角度上看,低电阻接地方式略优于配电变压器接地方式。

至于消弧线圈接地方式,文中所述的定子100%接地保护对它具有足够的灵敏度和

选择性。人们过去普遍担心由于消弧线圈把故障电流限制得很小，从而使继电保护带来困难，主要是指当发电机带有直流配线时的小电流讯号问题，而在这儿我们所讨论的单元机组来说，这种担心是没有必要的

(四)从经济上，虽然目前还没有具体的有关产品价格资料，但可以预计，由于配电干式变压器的要求甚高，特别要求有较高的冲击耐压水平，所以估计低电阻接地装置的总价格要低于配电变压器接地方式。

一般认为消弧线圈的价格最高[3]。

综上所述，这三种接地方式都各有其优缺点，绝不可一概而论或用一种去否定另一种。

一般来说，在机组容量比较大，在系统容量中所占的比例也比较大时，即当机组的安全成为主导的因素时，宜采用动作于解列灭磁的保护，而适应于这种方式的主要的有配电变压器接地方式及低电阻接地方式。而如果机组的容量相对小些，运行上的要求希望确保系统的安全时，则宜采用消弧线圈接地的方式，保护动作于信号。

至于配电变压器与低电阻二种接地方式，从技术经济的全面比较来看，并不见得低电阻接地方式就显得低劣，特别是在接入系统的电压较低时，(例如110、220千伏)，接地电流还不很大，此时有可能使它在各方面来说都是最优的，因而我们认为不应该排斥低电阻接地方式在我国大机组上的应用。

参 考 文 献

- [1] 发电机中性点接地方式 《电力技术》 1982年第7期
- [2] 关于单元接线发电机中性点接地方式的商榷 《电力技术》1983年第12期
- [3] 发电机中性点接地方式的比较 宝山电厂初步设计书
- [4] 发电机中性点接地方式应用导则S50—101依巴斯公司
- [5] 电力系统继电保护 下册 山东工学院 第十四章 P.616
- [6] 姚孟* 3、4机组工程国内外设计电气部分介绍(二次线部分) 河南省电力勘测设计院·84.3

(上接37页)

在理想状况下， $X_{c1} = \sqrt{3}R_1$ ， $R_2 = \sqrt{3}X_{c2}$

即： \dot{I}_1 超前 $\dot{U}60^\circ$ ，($\varphi_1 = 60^\circ$)， \dot{I}_2 超前 $\dot{U}30^\circ$ ($\varphi_2 = 30^\circ$)，其矢量图如图2：

但是，实际上电阻值、电容值的实测值不等于标称值，并且电源频率也不是绝对的50Hz。因此，实际上b点在 \widehat{dbc} 上的一点，而a点在 \widehat{dac} 上的一点。当 R_1 比理论值大时， φ_1 变小，b点位于 b' ，反之位于 b'' 。同样当 R_2 比理论值大时， φ_2 变小，a点位于 a' ，反之位于 a'' 。

因此，在调试过程中，我们就可以根据以上讨论的结果，采取相应的措施，以达到要求。比如我们测得 $U_{ab} > U_{bc} > U_{ca}$ ，根据变化的轨迹图3，我们就可以适当地增大 R_2 的阻值。