

发电机中性点接地方式及运行分析

李朝阳 向祚主

西安交通大学(西安 710049)

文 摘 本文阐述了发电机中性点各种接地方式,并对其运行作了分析比较。在由大容量发电机构成的现代电网中,经副边带高电阻的配电变压器接地优于其它接地方式,这种接地方式亦将在我国广为采用

主题词 发电机 中性点接地 消弧线圈 接地 变压器

分类号 TM7

电力系统的中性点系泛指发电机和变压器绕组的中性点。其接地目的主要在于限制单相接地故障电流,保障人身设备安全,防止在故障点产生间歇电弧引起过电压,危及设备绝缘,运行稳定性和供电可靠性。中性点的接地方式,配置和设备选型,应依据电力系统复合序网的结构,结合电气绝缘水平、保护装置和过电压防护措施,综合地进行技术经济分析及序网参数计算,使其单相接地电流限制在允许范围内。

随电压等级的不同以及设备的特性和工作条件的差异,其中性点接地方式概括可分为三种类型,即中性点不接地方式,经消弧线圈或阻抗接地方式和直接接地方式。我国在110kV以上高压网络一般多为中性点直接接地系统,60kV以下中性点为不接地或经消弧线圈接地系统。发电机电压皆在20kV以下隶属中性点不接地系统,尤其对旋转机械其定子绕组和铁芯通过故障电流的限制较严格,为防止在绝缘薄弱点发生绝缘击穿,特别是水轮发电机中性点大都通过消弧线圈接地或通过接

地变压器,经高阻抗或高电阻接地,以使发电机电压电网中的单相接地电流小于5A。

1 发电机中性点接地方式及特点

当今应用在大中型发电机中性点的接地,概括有以下几种类型:

1.1 中性点经消弧线圈接地

1.1.1 中性点直接接入消弧线圈

图1所示是我国目前普通采用的发电机中性点接地方式,消弧线圈实质上是一个具有铁芯的电感线圈,线圈的电阻很小,电抗很大。为了保持电流与电压之间的线性关系,采用具有空气隙的铁芯,间隙中填衬着绝缘纸板,既可避免铁芯饱和又可得到稳定的电抗值。为适应补偿度的调节,一般消弧线圈的最大补偿电流和最小补偿之比为2:1或2:5,在这个范围内设有5~9个分接头,可供调节电抗值,保证在过补偿运行状态,其容量为:

$$S_c = 1.35I_c \frac{V_c}{\sqrt{3}} \text{ kAV}$$

式中 I_c ——接地电容电流;

V_c ——发电机所在电网中的额定电

收稿日期:1992年9月18日

压。

中性点经消弧线圈接地方式比较简单,但随着系统容量及单机容量的增大,当发生单相接地故障时,可能引起电网谐振,出现铁磁谐振过电压。

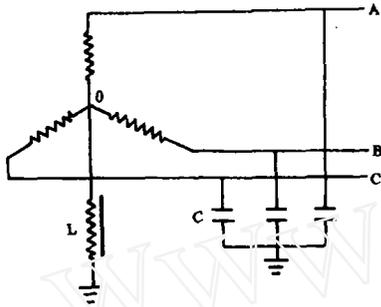


图1 发电机中性点直接接入消弧线圈

1.1.2 中性点经接地故障消除器接地(又称动圈式感应电抗器)

发电机中性点经接地变压器的一次绕组接地,其二次侧并联一个动圈式感应电抗器(如图2)。电抗器具有不易饱和的伏安特性,一般按回路中零序容抗的1/3选择(归算至一次回路),以保证运行处于过补偿状态。

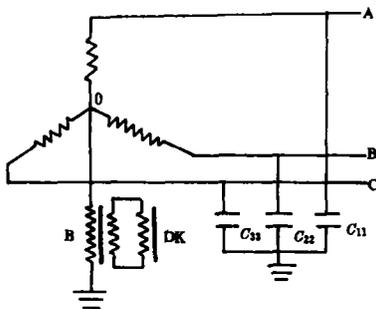


图2 发电机中性点经动圈式感应电抗器接地

1.2 中性点经接地变压器接地

中性点经接地变压器接地(高电阻),如图3。其一次侧额定电压等于或略大于发电机相电压,接在发电机中性点与地之间,二次侧电压为240V(或120V)。一般接地变压器都设计有两个副绕组,其一用于接高电阻;其二可作

为发电厂辅助电源,供继电保护或其它配电之用。故而把接地变压器又称为配电变压器。二次侧并联高电阻的目的在于限制最大单相接地故障电流,同时又对可能出现的过电压幅值和陡度进行阻扼和扼制,以防止产生串联电压铁磁谐振。高电阻的阻值是按发生单相接地故障时,电阻吸收功率等于或大于发电机绕组零序电抗损耗功率值来选择。接地变压器的容量目前已系列化,如与200MW~300MW机组配套的接地变压器容量为25~50kVA,与50MW~100MW发电机组配套的接地变压器容量为10~20kVA。

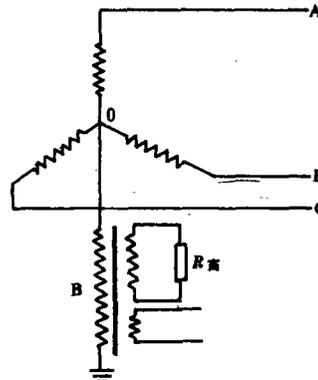


图3 发电机经接地变压器接地

当发电机中性点由于结构、设计、制造工艺等原因不便引出机组时,可以人为地设置发电机中性点,常见的有以下两种方式:

(a)发电机出线经接地变压器接地(高电阻),如图4,在发电机出口处接入三台单相

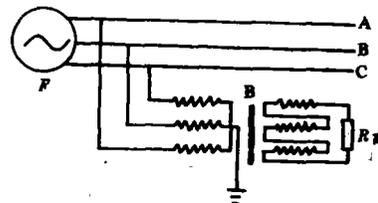


图4 发电机出线经接地变压器接地 接地变压器。其一次绕组“Y”联接后中性点接

地,二次绕组为开口三角形,可串接高电阻后闭合,其电阻亦按发生单相接地时电阻吸收功率等于或大于发电机绕组X。损耗功率值来选择。

(b)发电机出口处经接地变压器接地(中电阻),如图5所示。接地变压器可采用“Y- Δ ”联接或“Z”字形联接的配电变压器。其一侧与发电机出线联结,电阻接在配电变压器中性点与地之间。有效接地阻抗应按保证供给接地保护有足够的电流来选择。

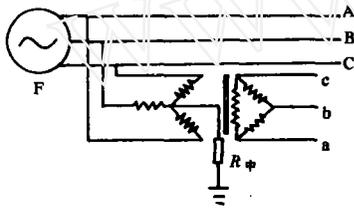


图5 发电机出口经接地变压器接地

1.3 中性点经电阻接地

发电机中性点经高电阻接地,如图6所示。该接地方式在单相接地时可以人为提供发电机接地保护所需要的动作电流,

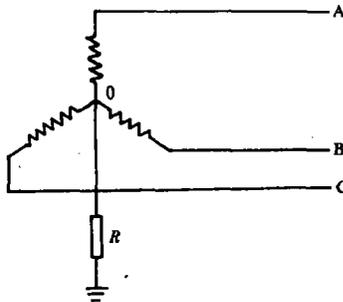


图6 发电机中性点经高电阻接地示意图

使其保护动作,同时亦可降低由于故障点间电弧出现的过电压。电阻一般采用高电阻,其电阻容量按把接地故障电流限制到5~15A来选择。这种接地方式相对于不接地系统讲,在单相故障时人为地加大了流经故障点的接地电流,可能增加发电机遭受损坏程度,同时

所采用的接地保护装置接线较为复杂。也有少数发电机中性点采用低电阻接地,此时故障电流很大可达1500A以上。相应的机组绝缘水平与继电保护装置等均应予以适应。

1.4 中性点不接地

发电机中性点不接地时,发电机必须采用全绝缘。当发生单相接地故障时,正常相对地电压将升高为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。通常水电厂处于雷电日较高的地区时,应在发电机中性点装接100%线电压避雷器作为过电压保护。

2 中性点接地方式运行分析

发电机中性点经消弧线圈接地与经接地变压器实现接地方式工作原理基本相同,但采用接地变压器方式则具有更多的优点:

接地变压器的原边绕组能起着电感线圈的补偿作用,而副边绕组接高电阻当折合到原边时,阻值即升高到变比的平方倍,相当于高电阻接地方式,因而既限制单相接地电流又扼制接地间歇电弧引起的过电压幅值和陡度,从而将减少电流、电压等各种铁磁谐振的机率。

利用接地变压器使其原副边绕组之间将电路隔离开。一、二次侧通过磁耦合相联系,提高了运行的安全性,亦相应减小了正常运行时的损耗。

接地变压器的二次侧可以选用多绕组形式从而可方便地获得辅助电源,为接地保护和其它用提供可靠和足够的电流源。当然在结构设施及投资上较采用消弧线圈直接接地方式将有所增加。

随着电力系统容量及发电机单机容量的增大,以上优点将显得更为重要。国外已广为采用这种接地方式。我国一些新建的大中型水电厂亦向此方向发展,下面对其运行状态可能出现的现象予以剖析。

2.1 中性点电位偏移

三相对称电路正常运行时,中性点电位 $U=0$ 。当发生单相接地故障时,中性点电位将发

生偏移。

2.1.1 中性点接入电感 L 性质

如图 7,其接地电流为:

$$I_{\mu} = -E_c [j\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33}) - j\frac{1}{\omega L}] \quad (1)$$

式中, C_{11} 、 C_{22} 、 C_{33} 分别为故障回路各相之等效电容; L 为等效补偿电感。

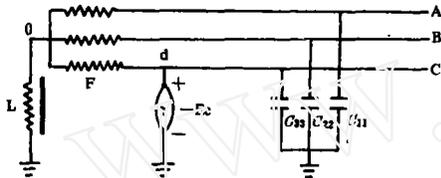


图 7 发电机中性点接入电感等值电路图
中性点电位为:

$$U_0 = \frac{-j\omega(C_{11}E_A + C_{22}E_B + C_{33}E_C)}{j\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33}) - j\frac{1}{\omega L}} \quad (2)$$

脱谐度为:

$$\gamma = \frac{\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33}) - \frac{1}{\omega L}}{\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33})} \quad (3)$$

可见,当全补偿时,

$$\omega L = \frac{1}{\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33})}$$

I_{μ} 接地电流最小,而 U_0 中性点偏移最大,可能发生串联谐振过电压。

当欠补偿时,

$$\omega L > \frac{1}{\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33})}$$

脱谐度 γ 为正值,在频率发生变化或运行方式突然变动,诸如一相断线出现非全相运行,或者一回馈线跳闸等,都可能变为全补偿。

当过补偿时,

$$\omega L < \frac{1}{\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33})}$$

脱谐度为负值,是实际工程中常采用的补偿方式,根据脱谐度,结合具体电路序网结构来选择合适的电路参数,以保证中性点位移电压不

超过额定电压的 15% 及单相接地故障电流处在允许范围之内。

2.2.2 中性点接入高电阻性质

当发生单相接地时,接地电流:

$$I_{\mu} = -E_c [j\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33}) + \frac{1}{R}] \quad (4)$$

中性点电位:

$$U_0 = \frac{-j\omega(C_{11}E_A + C_{22}E_B + C_{33}E_C)}{j\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33}) + \frac{1}{R}} \quad (5)$$

可见,中性点接入高电阻后,发生单相短路时对接地电流有一定的限制,亦不致于引起串联谐振。但正常运行时,在电阻上会产生损耗,由于三相对称通过中性点电流很小,损耗不大。

2.2.3 当中性点经接地变压器且副边接一高电阻时,则具有以上两者共有的特点。

2.2 单相接地时故障相电流与非故障相电压

同一点当发生单相短路或三相短路时,故障点单相故障电流 $I_f^{(1)}$ 与三相短路电流 $I_f^{(3)}$ 之比为:

$$\frac{I_f^{(1)}}{I_f^{(3)}} = \frac{3}{2 + Z_0/Z_1} \quad (6)$$

式中, Z_0 、 Z_1 为归算到故障点的综合零序和正序阻抗。如 C 相接地,则非故障相 A、B 的对地电压为

式中, U_{rj} 为最高运行相电压:

$$U_A = U_B = a_j U_{rj} \quad (7)$$

a_j 为接地系数:

$$a_j = \sqrt{\frac{(1.5Z_0/Z_1)^2}{(Z_0/Z_1 + 2)^2} + \frac{3}{4}}$$

由式(6)和式(7)可求得故障相电流(虚线)与非故障相电压(实线)的变化曲线如图 8 所示。可见接地电流和非故障相电压都与 Z_0/Z_1 的比值有关。令 $K = Z_0/Z_1$ 由曲线可以看出:

2.2.1 非故障相的电压升高

A. 中性点直接接地或经低电阻接地时,0

$<K \leq 3$, 非故障相电压: $U_A \approx 1.38U_{\phi}$, 即等于最高线电压, 不致出现过高的电压因此可选用灭弧电压等于 80% 线电压的避雷器作为过电压保护。

B. 中性点经电抗接地时, 通常运行在过补偿状态, Z_0 为感性, $K \rightarrow +\infty$, 非故障相工频电压最高将升为线电压, 因此过电压保护可采取灭弧电压为 100% 线电压的避雷器。

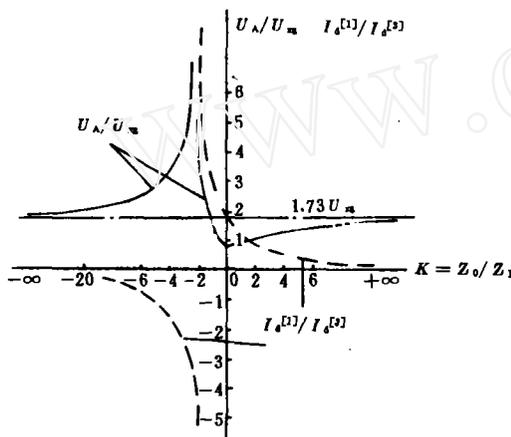


图8 单相接地时故障相电流(虚线)与非故障相电压(实线)变化曲线

当欠补偿时, Z_0 为容性, $K \rightarrow -\infty$ 当全补偿时, $K = (-20 \sim -1)$, 此时接地电流很大, $I_d^{(1)}/I_d^{(3)}$ 比值也很大, 尤其 $K = -2$ 时出现完全谐振状态, 电气设备将无法工作。

C. 中性点经高电阻接地

$K = Z_0/Z_1 = R_0 + jX_0/jX_1$, 由于 R_0, X_0 较 X_1 为大, 所以 K 的模较大, 相角在 $0^\circ \sim -90^\circ$ 之间, 非故障相电压:

$$U_A = U_B = a_j U_{\phi} = \sqrt{\frac{(1.5K)^2}{(K+2)^2} + \frac{3}{4}} \cdot U_{\phi}$$

其最大值也不会超过线电压。

2.2.2 故障相接地电流

当接地电流达到一定数值时, 故障点就产生电弧。当电弧电流过零时电弧自然熄灭, 尔后恢复。电压超过介质强度电弧即复燃, 在故障点依次出现电弧的熄灭—复燃—熄灭—复

燃形成间歇电弧, 伴随产生过电压, 同时亦影响电力系统的稳定运行。

当中性点接入电感量后, 补偿了回路中电容电流, 使故障电流减小, 有利于熄灭间歇电弧, 重燃次数减少, 在故障消除后, 相电压将以拍频回归正常, 中性点电压以工频摇摆呈指数衰减回归。

当中性点接入电阻时, 接地故障电流受抑制, 有利于熄弧。故障消除后相电压及中性点的电位均会很快按指数规律回归正常。

2.3 谐振过电压

正常运行时, 零序网络的自振角频率 ($\omega = 1/\sqrt{3LC}$) 与电力网的角频率相近, 即补偿网络的脱谐度不大。当发电机运行方式突然变化发生不对称故障时, 出现零序电压, 通过电容的静电耦合和互感的电磁耦合, 在故障回路中容抗和感抗接近相等时, 即会在相邻线路或变压器之间, 以及与发电机中性点的电感或电压互感器之间, 形成工频电压传递现象, 传递电压使铁芯饱和出现铁磁过电压, 感励发电机绝缘。由试验和计算发现: 当故障点发生在电网侧时, 由零序电压引起的工频电压传递, 通过变压器由高压侧传至低压侧引向发电机。此时形成的铁磁谐振对机组的绝危害较大; 而当发电机侧故障产生零序电压, 传递至高压侧时, 其危害程度则较轻。

当在发电机中性点采取接地变压器接地, 副边接入高电阻时, 增大了补偿回路的阻尼度, (阻尼率 $d = g/3\omega c$, 其中 g 为等值电导) 对其幅值和陡度有明显的阻尼作用。即或发生断相, 出现非全相运行时, 容抗增大, 亦不会发生铁磁谐振过电压。

3 结束语

随着发电机容量的增大, 因受发电机出口断路器及限流电抗器选择的限制, 大多采用发电机—变压器组单元接线形式。发电机三相对称性较高, 发生单相接地故障机率较小, 而电力网发生单相接地故障机率较多。因此, 近年

来发生传递过电压,引起铁磁谐振现象时有发生,不仅危及系统安全运行,而且损坏设备,严重时亦可能烧坏发电机定子绕组和铁芯。

根据国际大电网第23届学术委员会对世界上具有代表性的33个电力公司754台机组的实例征询其结果:

发电机中性点接配电变压器接地者共有16个公司256台发电机,占34%;

发电机出线经配电变压器接地者(有两个辅助二次绕组)有12个公司140台发电机,占19%;

发电机中性点直接经高电阻接地者有15个公司154台发电机,占20%;

发电机中性点经低电阻接地者有2个公司106台发电机,占14%;

发电机中性点经接地故障消除器接地有3个公司17台发电机;

发电机中性点不接地运行者有7个公司77台发电机。

我国运行的发电机中性点大多采用经消

弧线圈直接接地或不接地运行方式。

接地方式的选择受到历史条件及技术方面诸多因素的制约,相应采取的保护措施也不尽相同,技术特性有很大差异。从运行安全以及限制过电压幅度、扼制铁磁谐振的发生和传递,以及减小接地故障电流等方面考虑,大中型发电机组宜采用接地变压器副绕组接入高电阻的接地方式较为合理,它将是我国今后逐渐发展的必然趋势。

参考文献

- 1 Report on methods for earthing of generator step-up transformer and generator winding neutrals as practised throughout the world electra. CIGRE WG23-06, NO. 121, 1988
- 2 Generator neutral grounding some aspects of application for distribution trans-former with secondary resistor and resonant types. IEEE on PAS. 1978, 97, NO. 3: 683-694
- 3 解广润. 电力系统过电压. 水利电力出版社
- 4 电机工程手册, 第三卷. 机械工业出版社

Discussion on the types of generator neutral grounding and the analysis for their operation

Li chaoyang Xiang Zuozhu

(Xian Jiaotong University)

Abstract Various types of generator neutral grounding are discussed. they are analyzed and compared in their operation behaviour. In modern powersystem made up of large capacity generators, the type of grounding through distribution transformer with secondary high resistor prevails over one's else. This type of grounding will be adopted extensively in our country.

Descriptors Generators, Neutral grounding, Arc suppression coil, Earthing