

某核电站发电机中性点接地电阻改进分析

在介绍核电站发电机中性点接地方式和主要设备参数的基础上,通过接地故障电流和机组的暂态过电压的计算分析,将发电机中性点接地变压器二次侧接地电阻由 $1.6\ \Omega$ 变更为 $2.6\ \Omega$,从而保证了核电机组安全稳定运行。

高学冲 叶育林/中广核工程有限公司

0 引言

发电机中性点经接地变压器的接地方式,已在国内近年投产的大型机组上被广泛采用,其二次负载阻值的选取直接关系到配电变压器接地优越性能否充分发挥。

核电站汽轮发电机组和中性点接地装置(包括二次侧的接地电阻)一般由供应商成套设计和供货,而供应商则参照常规火电的一点接地方式计算发电机中性点接地电阻值为 $1.6\ \Omega$ 。但与常规火电不同的是,我国在建或已建成的CPR1000核电机组多采用两点接地方式(发电机中性点经高电阻接地和厂用变压器中性点经高电阻接地),主要是因为核电机组技术引进时,其参考电站采用这种接地方式。经校核,供应商对接地变压器二次侧接地电阻阻值 $1.6\ \Omega$ 选择过小,造成发电机单相接地故障电流达到了 18.37 A ,该值已超过了国内外普遍认可的经高电阻接地方式要求的故障最大电流值 15 A ,存在损坏发电机定子铁心的风险。根据核电两点接地方式和相关标准规范要求,将发电机中性点接地变压器二次侧接地电阻由 $1.6\ \Omega$ 变更为 $2.6\ \Omega$,可满足接地故障电流和机组的暂态过电压要求,从而保证核电机组安全稳定运行。

1 核电机组接地方式简介

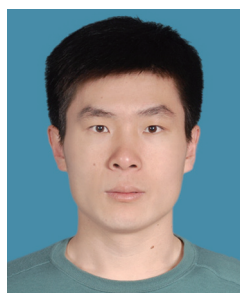
1.1 核电发电机中性点接地方式

根据DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压和绝缘配合》第3.1.3条规定:3~20 kV具有发电机的系统,发电机内部发生单相接地故障不要求瞬时切机时,单相接地故障电容电流应满足相应的允许值。

目前我国大容量发电机主要采用经接地变压器的高电阻接地方式,其目的是在电容回路中加入适当的电阻,在发电机回路发生单相短路故障时,保护动作,发电机跳闸,并限制健全相的瞬时过电压不超过2.6倍额定相电压。相对于消弧线圈接地方式,接地变压器接地方式在机组正常运行的大多数时间内都不会引起中性点电压的偏移增大,起到限制过电压的作用。可见,经高电阻接地利于机组的绝缘和正常运行,有预防机组绝缘损坏或绝缘薄弱处被击穿而导致定子接地的作用。另外,经高电阻消能元件,增大零序回路阻尼,无传递过电压和暂态过电压危险。因此,经接地变压器的高电阻接地方式得到了广泛运用。

我国在建或已建成的CPR1000核电站主要采用的也是经接地变压器的高电阻接地方式。但与常规火电不同的是,CPR1000核电机组多采用两点接地方式,主要是因为核电机组技术引进时其参考电站采用这种接地方式。

核电机组在发电机出口装设断路器,厂用变压器高压侧采用星形接线方



高学冲/工程师

关键词/Keywords

核电站·
发电机·
接地电阻·
接地变压器·

式,在发电机中性点及厂变高压侧采用单相接地保护。某核工程发电机回路接线如图1所示,无论机组在任何运行方式下,回路都能保证经高电阻接地,运行安全性高。

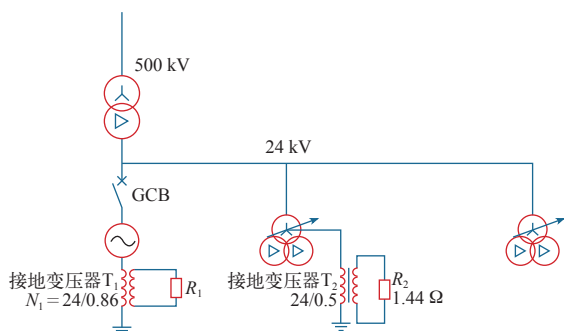


图1 某核工程发电机回路接线

1.2 主要设备参数

发电机中性点一次侧额定电压 $U_{1N}=24\text{ kV}$,接地变压器二次侧额定电压为 $U_{2N}=0.86\text{ kV}$,发电机中性点接地变压器电压比 $N_1=24/0.86=27.9$ 。

厂用变压器中性点接地变压器电压比 $N_2=24/0.5=48$ 。

发电机24 kV系统电容参数(实际设备参数)为:①主变压器低压绕组每相对地电容为 $0.022\text{ }\mu\text{F}$;②离相封闭母线对地电容为 $94\times 10^{-6}\text{ }\mu\text{F/m}$,封闭母线长度为75 m/相;③离相封闭母线对地电容为 $32\times 10^{-6}\text{ }\mu\text{F/m}$,封闭母线长度为32 m/相;④发电机出口断路器恢复电容(主变压器低压侧)为 $0.26\text{ }\mu\text{F}$;⑤发电机出口断路器恢复电容(发电机侧)为 $0.13\text{ }\mu\text{F}$;⑥高压厂用变压器A每相电容为 $0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F}$;⑦高压厂用变压器B每相电容 $C_6=0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F}$;⑧发电机电容 $C_{F0}=0.319\text{ }\mu\text{F}$ 。

发电机24 kV系统总电容: $C=0.022\text{ }\mu\text{F}+94\times 10^{-6}\text{ }\mu\text{F/m}\times 75\text{ m}+32\times 10^{-6}\text{ }\mu\text{F/m}\times 32\text{ m}+0.26\text{ }\mu\text{F}+0.13\text{ }\mu\text{F}+0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F}+0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F}+0.319\text{ }\mu\text{F}=0.780\text{ }\mu\text{F}$

2 接地变压器接地电阻选型计算

2.1 厂用变压器中性点接地变压器选型计算原则

当发电机出口断路器断开时,取厂用变压器中性点接地变压器一次侧电阻不大于主变压器低

压侧三相对地总容抗即可满足要求;当发电机出口断路器闭合时,在正常运行时间内,发电机中性点接地变压器检修及退出运行的概率较小,所以选择厂用变压器中性点接地变压器一次侧电阻时,不需考虑发电机侧三相对地总容抗。

2.2 发电机中性点接地变压器选型计算原则

当发电机出口断路器闭合时,接地变压器一次侧电阻在理论上取不大于发电机侧三相对地总容抗值即可,但考虑厂用变压器高压侧接地变压器可以检修及退出运行的情况,所以取中性点接地变压器一次侧电阻不大于发电机侧及主变压器低压侧三相对地总容抗之和,从而使单相接地故障有功电流等于或大于电容电流。

3 接地电阻阻值改进过程

3.1 改造之前的接地电阻计算

3.1.1 接地电阻未改进时的阻值计算

为使得单相接地故障有功电流等于或大于电容电流,考虑1.1倍系数,可以防止故障状态下的对地电弧。接地电阻计算公式为

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{10^6}{3N_1^2\omega\times 1.1C} \\ &= \frac{10^6}{3\times 27.9^2\times 314\times 1.1\times 0.78} \Omega \\ &= 1.6 \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

故接地变压器二次侧接地电阻选 $1.6\text{ }\Omega$ 。

3.1.2 改造之前的接地电阻校核

(1) 发电机单相接地故障电容电流

接地故障容性电流计算公式为

$$\begin{aligned} I_C &= \sqrt{3}U_e\omega C\times 10^{-3} \\ &= 1.732\times 24\text{ kV}\times 314\times 0.780\text{ }\mu\text{F}\times 10^{-3} \\ &= 10.18\text{ A} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 发电机单相接地故障阻性电流

1) 发电机侧接地阻性电流。二次侧接地电阻 $1.6\text{ }\Omega$,等效一次接地电阻 $R_1=1.6N_1^2=1.6\text{ }\Omega\times 27.9^2=1\text{ }246.08\text{ }\Omega$ 。接地电流: $I_{R1}=24\text{ }000\text{ V}\div 1.732\div 1\text{ }246.08\text{ }\Omega=11.12\text{ A}$ 。

2) 变压器侧接地阻性电流。二次侧接地电阻 1.44Ω , 等效一次接地电阻 $R_2 = 1.6N_2^2 = 1.6 \Omega \times 48^2 = 3\,317.76 \Omega$ 。接地电流: $I_{R2} = 24\,000 \text{ V} \div 1.732 \div 3\,317.76 \Omega = 4.18 \text{ A}$ 。

3) 单相接地总阻性电流。分析发电机出线部位故障模式电阻电流(接地故障最大阻性电流情况)两个接地变压器回路等效为并联, 当发生单相接地故障时: 单相接地总阻性电流为 $I_R = I_{R1} + I_{R2} = 11.12 \text{ A} + 4.18 \text{ A} = 15.30 \text{ A}$ 。

(3) 发电机单相接地故障总电流

发电机定子绕组发生一点接地故障时, 接地故障电流的大小主要取决于相对地电容值的大小、中性点接地电阻的大小及接地点的位置。

单相接地故障总电流计算公式为

$$I_K = \sqrt{I_C^2 + (I_{R1} + I_{R2})^2} = 18.37 \text{ A} > 15 \text{ A} \quad (3)$$

根据上面的计算结果, 18.37 A 已超过了国内外普遍认可的经高电阻接地方式要求的故障最大电流值 15 A, 存在损坏发电机定子铁心的风险。故需对发电机中性点接地变压器的二次侧接地电阻阻值需改造。

3.2 接地电阻改进方案

根据 DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》的要求, 高电阻接地系统单相接地故障电阻性电流按照 1.1 倍电容性电流选取, 并结合西北电力设计院出版的《电力工程电气设计手册 电气一次部分》, 发电机中性点采用经高电阻接地方式时, 应限制单相接地故障电流不超过 10~15 A。

3.2.1 发电机中性点接地电流计算

通过提高发电机中性点接地变压器接地电阻阻值来降低发电机单相接地故障总电流。按总接地故障电流 $I_K = [I_{C2} + I_{R2}]^{1/2}$ 小于 15 A 控制, 选择发电机接地电阻 R_1 值。

因为高厂用变压器中性点接地变压器电压比 $N_2 = 24/0.5 = 48$, 二次侧接地电阻为 1.44Ω , 则等效一次侧接地电阻 R_2 为 $1.44 \Omega \times N_2^2 = 1.44 \Omega \times 48^2 = 3\,317.76 \Omega$, 此电阻的接地电流 $I_{R2} = 24\,000 \text{ V} \div 1.732 \div 3\,317.76 \Omega = 4.18 \text{ A}$ 。

由前面计算知, 接地故障容性电流 $I_C = 10.18 \text{ A}$ 。

按照 $I_K = [I_C^2 + I_R^2]^{1/2} < 15 \text{ A}$, 即 $[(10.18)^2 + (I_{R1} + 4.18)^2]^{1/2} < 15 \text{ A}$, 同时应满足 $I_R \geq 1.1I_C$, 可得 $I_{R1} < 6.84 \text{ A}$ 。

因为发电机中性点接地变压器电压比 $N_1 = 27.9$, 二次侧接地电阻为 R_1 , 等效一次侧接地电阻为 $R_1 \times (24 \div 0.86)^2 = 778 R_1$ 。

根据接地电流: $I_{R1} \leq 24\,000 \text{ V} \div 1.732 \div 778 R_1 = 6.84 \text{ A}$ 可得, $R_1 \geq 2.6 \Omega$ 。

3.2.2 暂态过电压校验

计算系统暂态过电压。

发电机 24 kV 系统容抗计算公式为

$$X_{CN} = 1/2\pi f 3C \quad (4)$$

$$= [10^6 / (314 \times 3 \times 0.780)] \Omega = 1\,361 \Omega$$

发电机中性点接地变压器等效一次电阻为 $R_1 = 2.6 \Omega \times (24 \div 0.86)^2 = 2\,024.8 \Omega$ 。

发电机 24 kV 系统接地电阻

$$R_N = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{2\,024.8 \Omega} + \frac{1}{3\,317.76 \Omega}} = 1\,257 \Omega$$

$X_{CN}/R_N = 1\,361 \Omega \div 1\,257 \Omega = 1.08$ 。 X_{CN}/R_N 值与暂态过电压倍数关系曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 发电机暂态过电压倍数为 2.5 倍左右。满足《电力工程电气设计手册 一次部分》发电机暂态过电压倍数不超过 2.6 倍的要求。

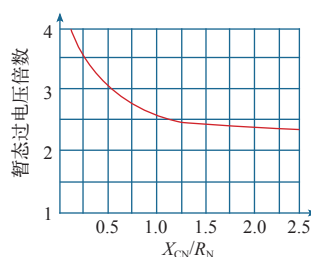


图2 X_{CN}/R_N 值与暂态过电压对应曲线

根据计算结果, 发电机中性点接地变压器二次侧电阻的阻值由 1.6Ω 改为 2.6Ω 是满足上述规定和手册的要求的, 即发电机发生单相接地故障时, (下转第 65 页)

制要求,主控制器用于实现系统不平衡下双环叠加控制算法;从控制器利用有功电流均等分配来控制直流侧电容电压平衡。仿真与实验结果验证了该方法的有效性,具有一定的工程参考价值。

参考文献

- [1] Lee C K, Leung J S K, Hui S Y R, et al. Circuit-level comparison of STATCOM technologies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18 (4): 1084-1092.
- [2] 李春华,黄伟雄,袁志昌,等.南方电网±200 Mvar 链式STATCOM系统控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (3): 116-121.
- [3] 范瑞祥,吴素龙,孙旻,等.移动式配电网静止同步补偿器的设计与应用 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (11): 72-76.
- [4] Liu W, Zhao X, Song Q, et al. Research on unbalance load compensation by cascaded STATCOM with star configuration [C]. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, Canada, IEEE, 2012: 734-738.
- [5] 刘钊,刘邦银,段善旭,等.系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究 [J]. 中国电机工程

学报, 2011, 28 (9): 1-7.

- [6] Song Qiang, Liu Wenhua. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (1): 45-58.
- [7] 马晓军,姜齐荣,王仲鸿,等.静止同步补偿器的分相不对称控制 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (1): 52-56.
- [8] Song Q, Liu W H, Yuan Z H. Multilevel optimal modulation and dynamic control strategies for STATCOMs using cascaded multilevel inverters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (3): 1937-1946.
- [9] 查晓明,张茂松,孙建军.链式D-STATCOM 建模及其状态反馈准确线性化解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (28): 107-113.
- [10] Soto D, Pena R. Nonlinear control strategies for cascaded multilevel STATCOMs [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (4): 1919-1927.
- [11] 李圣清.电能质量治理技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

(收稿日期: 2015-07-03) **EA**

(上接第59页)

满足故障点电阻性电流是电容性电流的1.1倍和总的接地故障电流在15 A以内,且在发生单相接地故障时暂态过电压也满足手册要求。

发电机中性点接地变压器二次侧阻值改进是在设备安装阶段完成的。经调试验证后,核电站于2013年年底并网运行至今,未发生不良反馈。

4 结束语

本文在介绍核电站发电机中性点接地方式和主要设备参数的基础上,通过接地故障电流和机组的暂态过电压的计算分析,将发电机中性点接地变压器二次侧接地电阻由1.6 Ω 变更为2.6 Ω ,从

而保证了核电机组安全稳定运行。

参考文献

- [1] 殷建刚,彭丰,王维俭.合理配置发电机中性点接地方式 [J]. 电力设备, 2001 (4): 67-70.
- [2] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1996.
- [3] 水利电力部西北电力设计院.电力工程电气设计手册 [M]. 北京:中国电力出版社, 1989.
- [4] 李毅军.三峡左岸电站发电机中性点接地方式的选型与计算 [J]. 水力发电, 1999 (4): 48-51.
- [5] 秦高原.某核电工程发电机中性点接地方式及接地装置选型的研究 [J]. 广东电力, 2010 (1): 59-60.

(收稿日期: 2015-08-15) **EA**