

某核电站发电机中性点接地电阻改进分析

研究核电厂接地变压器二次侧接地电阻对单相接地故障电流和暂态过电压的影响。首先介绍了核电站发电机中性点接地方式和主要设备参数,然后通过计算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 $2.6\ \Omega$,可将接地故障电流限制到合理范围内,满足机组暂态过电压要求,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的中性点接地装置(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(发电机中性点经高阻接地和厂用变压器中性点经高阻接地)。经校核,供应商的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

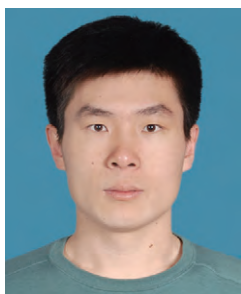
1.1 核电发电机中性点接地方式

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除机组时,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,经高阻消耗元件,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



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·
故障电流·

器 (GCB), 厂用变压器高压侧采用星形接线方式, 在发电机中性点及厂用变压器高压侧采用单相接地保护, 某核电工程发电机回路接线如图1所示。此方案无论机组在任何运行方式下, 回路都能保证经高阻接地, 运行安全性高。

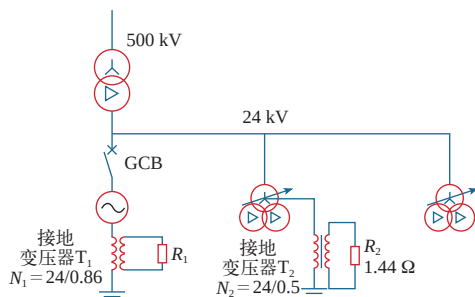


图1 某核电工程发电机回路接线图

1.2 主要设备参数

发电机中性点一次侧额定电压为 $U_{1N}=24\text{ kV}$; 发电机中性点接地变压器 T_1 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 T_1 电压比为 $N_1=24/0.86=27.9$; 厂用变压器中性点接地变压器 T_2 电压比为 $N_2=24/0.5=48$ 。

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: $0.022\text{ }\mu\text{F}$ 。
- 2) 离相封母 (主封母) 对地电容: 94×10^{-6} ($\mu\text{F/m}$), 封母长度75 m/相。
- 3) 离相封母 (分支封母) 对地电容: 32×10^{-6} ($\mu\text{F/m}$), 封母长度32 m/相。
- 4) 发电机出口断路器恢复电容 (主变压器低压侧): $0.26\text{ }\mu\text{F}$ 。
- 5) 发电机出口断路器恢复电容 (发电机侧): $0.13\text{ }\mu\text{F}$ 。
- 6) 高压厂用变压器A每相电容: $0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F}$ 。
- 7) 高压厂用变压器B每相电容: $0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F}$ 。
- 8) 发电机电容 $C_{F0}=0.319\text{ }\mu\text{F}$ 。

发电机24 kV系统总电容为

$$C = 0.022\text{ }\mu\text{F} + 94 \times 10^{-6} (\mu\text{F/m}) \times 75\text{ m} + 32 \times 10^{-6} (\mu\text{F/m}) \times 32\text{ m} + 0.26\text{ }\mu\text{F} + 0.31\text{ }\mu\text{F} + 0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F} + 0.020\text{ }597\text{ }\mu\text{F} + 0.319\text{ }\mu\text{F} = 0.780\text{ }\mu\text{F}$$

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 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。根据文献[3]第6~9节中性点接地电阻计算公式

$$R_1 = \frac{10^6}{N_1^2 \times 3\omega \times 1.1 \times C} = \frac{10^6}{27.9^2 \times 3 \times 314 \times 1.1 \times 0.79} \Omega = 1.6\text{ }\Omega$$

故接地变压器二次侧接地电阻选 $1.6\text{ }\Omega$ 。

3.2 原接地电阻存在的问题

3.2.1 发电机单相接地故障电容电流为

$$I_C = \sqrt{3} U_e \omega C \times 10^{-3} = 1.732 \times 24 \times 314 \times 0.780 \times 10^{-3} \text{ A} = 10.18\text{ A}$$

3.2.2 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 $1.6\text{ }\Omega$, 等效一次侧接地电阻为: $R'_1 = 1.6 N_1^2 = 1.6\text{ }\Omega \times 27.9^2 = 1\text{ }246.08\text{ }\Omega$ 。

$$\text{接地阻性电流: } I_{R1'} = \frac{U}{\sqrt{3} R'_1} = \frac{24 \times 1000\text{ V}}{\sqrt{3} \times 1\text{ }246.08\text{ }\Omega} =$$

11.12 A。

(2) 变压器侧接地阻性电流

二次侧接地电阻 1.44Ω ，等效一次接地电阻为： $R_2' = 1.44 N_2^2 = 1.44 \Omega \times 48^2 = 3\,317.76 \Omega$ 。

$$\text{接地电流: } I_{R2'} = \frac{U}{\sqrt{3}R_2'} = \frac{24 \times 1000 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 3\,317.76 \Omega} = 4.18 \text{ A}。$$

(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 $I = I_{R1'} + I_{R2'} = 11.12 \text{ A} + 4.18 \text{ A} = 15.30 \text{ A}$ 。

3.2.3 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： $I_K = \sqrt{I_C^2 + (I_{R1'} + I_{R2'})^2} = 18.37 \text{ A} > 15 \text{ A}$ 。

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进行改进。

3.2 接地电阻改进方案

3.2.1 接地电阻改进原则

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。

3.2.2 接地电阻改进计算

(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 $I_K = \sqrt{I_C^2 + I_R^2} < 15 \text{ A}$ 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

$N_2 = 48$ ，二次侧接地电阻 $R_2 = 1.44 \Omega$ ，则等效一次侧接地电阻为 $1.44 \Omega \times N_2^2 = 1.44 \Omega \times 48^2 = 3\,317.76 \Omega$ ，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 $I_K = \sqrt{I_C^2 + I_R^2} < 15 \text{ A}$ ，即 $I_K = \sqrt{10.18^2 + (I_{R1'} + 4.18)^2} < 15 \text{ A}$ ，同时应满足 $I_R \geq 1.1 I_C$ ，可得 $I_{R1'} < 6.84 \text{ A}$ 。

因为发电机中性点接地变压器 T_1 电压比 $N_1 = 27.9$ ，二次侧接地电阻 R_1 ，等效一次接地电阻 $R_1 \times (24 \div 0.86)^2 = 778 R_1$ 。

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， $R_1 \geq 2.6 \Omega$ 。

3.2.3 接地电阻改进后的暂态过电压校验

发电机中性点

$$X_{CN} = 10^6 / 2\pi f 3C = [10^6 / (314 \times 3 \times 0.780)] \Omega = 1\,361 \Omega$$

$$R_N = 2.6 \times (24 \div 0.86)^2 \Omega = 1\,257 \Omega$$

$$X_{CN} / R_N = 1\,361 \Omega \div 1\,257 \Omega = 1.08$$

接地电阻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，即满足《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。

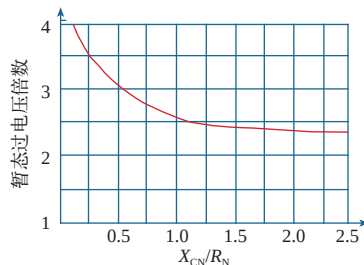


图2 接地电阻与暂态过电压倍数关系曲线

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应由1.6 Ω 改为2.6 Ω 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，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。

3.2.4 实施效果

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，核电机
(下转第77页)

- [3] Kakigano H, Nishino A, Ise T. Distribution voltage control for DC microgrid with fuzzy control and gain-scheduling control [C]. Jeju, 2011.
- [4] Dragicevic T, Guerrero J M, Vasquez J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (2) : 695-706.
- [5] 李彦林. 微电网电能质量主动控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [6] 杨文杰. 光伏发电并网与微电网运行控制仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [7] 冯敏. 风光柴储微电网系统的负荷预测算法及控制策略研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [8] 霍群海, 唐西胜, 孔力. 分布式电源本地不平衡负荷控制策略分析 [J]. 电力自动化设备, 2009 (8) : 63-66.
- [9] Raghani A, Ameli M T, Hamzeh M. Primary and secondary frequency control in an autonomous microgrid supported by a load-shedding strategy [C]. Tehran, 2013.
- [10] Vandoorn T L, Renders B, Degroote L, et al. Active load control in islanded microgrids based on the grid voltage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2 (1) : 139-151.
- [11] 周啸, 金新民, 唐芬, 等. 三相四桥臂微电网变流器在离网不平衡负载下的控制策略及其实现 [J]. 电力系统保护与控制, 2013 (19) : 24-31.
- [12] 吕志鹏, 罗安, 荣飞, 等. 电网电压不平衡条件下微电网PQ控制策略研究 [J]. 电力电子技术, 2010 (6) : 71-74.
- [13] 王瑞琪. 分布式发电与微电网系统多目标优化设计与协调控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [14] 李福东, 吴敏. 微电网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011 (13) : 18-25.
- [15] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [16] Siew-Chong Tan. 电力电子变换器的滑模控制技术与实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [17] Haibing H, Qingbo H, Zhengyu L. A simple repetitive controller embedded in PI-based UPS for reducing Total Harmonic Distortion with nonlinear loads [C]. Jeju, 2006.
- [18] 李俊林. 单相逆变器重复控制和双环控制技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [19] Jeong C Y, Cho J G, Kang Y, et al. A 100 kVA power conditioner for three-phase four-wire emergency generators [C]. IEEE PESC' 98, Fukuoka, Japan, 1998.
- [20] Ryan M J, Rik W De Doncker, Lorenz R D. Decoupled control of a four-leg inverter via a new 4'4 transformation matrix [J]. IEEE Transactions on PE, 2001, 16 (5) : 694-700.
- [21] 彭力, 白丹, 康勇, 等. 三相逆变器不平衡抑制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (5) : 174-178.

(收稿日期: 2015-12-21) EA

(上接第58页)

组于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.

(收稿日期: 2015-04-12) EA