核电机组注人式定子接地保护若干问题探讨

陈佳胜,张琦雪,郭自刚,王 光,陈 俊 (南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

摘要:针对大型核电机组注入式定子接地保护在现场应用中的问题,提出了单双接地点切换的注入式接地电 阻计算模型和分段相角补偿的方法,满足了大型核电机组定子接地保护的需要。实际工程应用表明,单双接 地点切换和分段相角补偿可以大幅提高核电机组注入式定子接地保护的接地电阻计算精度。针对现有注入 式定子接地保护回路断线判别逻辑以及特殊故障情况下保护的动作行为,进行了分析并给出了相应的建议。 关键词:核电机组;注入式定子接地;单双接地点切换;分段相角补偿 中图分类号:TM 615;TP 273 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.026

0 引言

172

根据中电联发布的《2014 年上半年全国电力供 需形势分析预测报告》,截至 2014 年 6 月底,我国 核电机组装机容量 1.778×10⁴ MW、装机容量不超过 全国总装机容量的 2%,与世界上核电发达国家的 装机容量平均水平 17% 相差甚远;近年来随着环境 恶化,雾霾频发,核能发电作为一种成熟可靠的清洁 能源,也迎来了加速发展的契机。

当前1000 MW 级特大型机组已成为核电站的 主流机型,其具有单机容量大、造价昂贵、定转子额 定电压高、轴向长度与直径之比增大、电机设计参数 裕度小等特点,要求继电保护更灵敏快速地切除故 障,以保障核电机组的安全稳定运行。

注入式定子接地保护可在未加励磁或静止状态 下提供对发电机定子绕组的绝缘监测;定子绕组任 意位置接地时具有一致的高灵敏度,保护范围为 100% 定子绕组;注入信号频率为低频,与工频及 3 次谐波频率有明显差异,不受发电机本体电气频率 的影响^[1-3];因此,注入式原理的定子接地保护在大 型核电机组上得到了广泛应用。

近年来在特大型核电机组上也出现了一些特殊 情况,需要对注入式定子接地保护进行适应性研究。 如核电机组主变低压侧一般经过接地变接地,在发 电机并网前后,系统分别具备单个和2个接地点,导 致常规注入式定子接地保护测量电阻值发生变化; 核电机组并网前后,如果发电机一次系统3次谐波 零序电压变化较大,会导致注入式定子接地保护电 阻测量出现较大偏差,严重时甚至会接近报警值。

为此,本文对核电机组应用注入式定子接地保护的若干问题进行探讨。

1 单双接地点切换的计算模型

对于 1000 MW 核电机组,如浙江方家山、福建 福清核电站,其一次系统具有 2 个接地点:发电机中

收稿日期:2015-08-01;修回日期:2016-08-29

性点经接地变接地;考虑到核电站存在长期倒送电运行工况,为限制此运行方式下接地重燃弧过电压,主变低压侧多经配电变接地,副边并联有电阻。 在发电机并网运行时,有2个接地点;当发电机机端 断路器(GCB)断开,发电机独立运行时,只有1个接地点,具体如图1所示。



Fig.1 Main wiring diagram of generator-transformer unit for nuclear power generator

常规注入式定子接地保护按照机组只有1个接 地点的情况进行补偿和计算,在单、双接地点切换过 程中,计算的接地电阻差异很大,可能导致保护误报 警。为此,本文提出建立新的注入式定子接地保护 等效计算模型,该模型能够适应工况变化,进行多 参数补偿,自动切换其电阻计算模型,确保各种工况 下均获得较高的计算精度。

注入式定子接地保护等效电路图如图 2 所示。 图中, R_{n1} 为发电机中性点接地变副边并联电阻, R_{n2} 为主变低压侧接地电阻; R_E 为定子绕组对地电阻值; U_{co} 为注入的 20 Hz 低频电压信号; I_{co} 为注入的低频 电流信号;N为发电机中性点接地变的变比。在 GCB 断开的情况下,注入式定子接地保护计算出的 电阻只包含 R_{E} ;在 GCB 闭合的情况下,计算出的电 阻包含 R_{E} 和 R_{n2} 2 个部分。因此注入式定子接地保 护计算模型在单、双接地点切换前后是不同的,需要 根据不同工况下不同的零序回路进行切换。



图 2 单双接地系统注入式定子接地保护等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of injection-type stator grounding protection for system with single-dual point grounding

当 GCB 断开时,电阻计算公式如式(1)所示。

$$R_{\rm E} = N^2 / [R_{\rm e}(I_{\rm CO}/U_{\rm CO})]$$
(1)
当 GCB 闭合时,电阻计算公式如式(2)所示。

$$R_{\rm E} = \frac{1}{1/R'_{\rm E} - 1/R_{\rm n2}} , \ R'_{\rm E} = \frac{1}{R_{\rm e}(I_{\rm c0}/U_{\rm c0})} N^2 \qquad (2)$$

其中, R'_E为根据 GCB 闭合时测量得到的 20 Hz 电 压、电流计算出的电阻测量值。

新计算模型根据 GCB 的通断状态,结合电流判据,可自动适应大型核电机组单、双接地系统的切换。

某 1000 MW 级核电机组,主变低压侧接地位置 在厂变高压侧(单相配电变接地),并联电阻为 1.44 Ω,折算到原边,则有:

$$R_{n2} = 1.44 \times \left(\frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3}} / 500\right)^2 = 0.768 \ (k\Omega)$$

根据上式分析不进行单、双接地点切换时接地 电阻测量值的差异,结果如表1所示。

表 1 接地电阻测量值 Table 1 Measured grounding resistances _{kΩ}

		-	-	K 3 L
序号	$R_{ m n2}$	$R_{ m E}$	$R_{ m E}^{\prime}$	偏差
1	0.768	0.5	0.303	-0.197
2	0.768	1	0.434	-0.566
3	0.768	5	0.666	-4.334
4	0.768	10	0.713	-9.287
5	0.768	20	0.740	-19.260

由表1可见, R_{n2} 的存在导致并网运行状态下, 接地电阻测量值出现明显偏差;在 $R_{E}=1$ k Ω 时负偏 差为-0.566k Ω ,且偏差程度随着 R_{E} 的增大逐渐增 大, $R_{E}=20$ k Ω 时负偏差达到-19.26k Ω ,严重影响了 注入式定子接地保护的正常运行。

因此,采用单、双接地点切换的计算模型,提高 了注入式定子接地保护电阻测量的精度。

2 分段相角补偿方法

2.1 注入低频信号相角变化机理

如图 2 所示,保护装置检测的 U_{co} 和 I_{co} 含有多

种频率分量,静止时刻只含有 20 Hz 信号;发电机正 常运行时,除了注入 20 Hz 信号外,还有发电机本体 产生的 50 Hz 及 150 Hz 信号。某 1000 MW 级核电 机组在并网前后,注入低频信号相角发生明显的偏 移,并网前相角为 270°,并网后相角突变到 280°,导 致正常情况下的电阻值大幅下降,缩小了接地电阻 的测量范围,影响保护正常运行。

根据注入式定子接地电阻计算公式,假定 20 Hz 电压、电流信号的幅值不变,仅相角发生变化,电阻 折算系数为5,则接地电阻测量值的变化情况见表2。

表 2 不同相角下的接地电阻测量值 Table 2. Measured grounding resistances for

able 2	measureu	groundi	ng resistances	101
	differen	t phase	angles	

序号	$ig U_{ ext{GO}} ig / ig I_{ ext{GO}} ig $	相角/(°)	接地电阻测量值/k Ω
1	100	269	28.650
2	100	267	9.550
3	100	265	5.730
4	100	262	3.590
5	100	260	2.875

由表 2 可见,当相角在 270°附近变化时,较小的 角度偏移也会导致接地电阻测量值的大幅度变化, 如从 269°变化到 260°时,接地电阻测量值相差接近 10 倍,可能接近电阻报警定值,导致不正确报警。

发电机机端发生金属性单相接地故障时,流过 接地变副边电阻上的工频电流有几百安培,因此其 中间电流互感器的变比一般选得较大;而注入 20 Hz 电源功率有限,一般不超过 100 V·A,短路时输出的 20 Hz 电流在 3 A 左右。对于中间电流互感器而言, 20 Hz 信号太小,仅相当于其额定值的 0.5%,落在其 传变特性的起始段,传变误差呈现出非线性的特点。 中间电流互感器工作点的位置不同,20 Hz 信号相角 误差也不同。

前文所述的 1000 MW 核电机组在 GCB 断开和 闭合时,发电机机端电容参数发生明显变化(由 0.44 μF 变化到 0.70 μF),导致机端和中性点 3 次谐波电 压的分配发生变化,进而引起接地变副边 3 次谐波 电流的变化,中间电流互感器的工作点发生变动,其 20 Hz 电压、电流间的相角偏移了 10°。

为验证 3 次谐波电流对中间电流互感器传变特性的影响,笔者采用若干只中间电流互感器进行试验得出如下结论:①中间电流互感器传变 20 Hz 小信号时处于其非线性区,当流过 3 次谐波电流,导致 其工作点变动后,相角和幅值误差均发生变化,其 中相角误差明显;②中间电流互感器的小信号传变 特性和物理安装位置关系不大。

因此,发电机在不同工况下,因为流过不同的3次谐波电流,使得20Hz信号相角误差不再是一个固定值。传统计算模型中默认其相角误差固定,通过

唯一的相角补偿定值进行修正,在上述情况下其对 地绝缘电阻计算误差大,影响保护的正确运行。

2.2 分段相角补偿方法

根据前文分析和中间电流互感器特性试验的结果,可知中间电流互感器在不同工作点,对于固定幅 值和相角的低频信号的传变误差为非线性,为提高 精度,可采用数学方法进行拟合^[4]。

在发电机启动前,通过静态试验的方法获取中间 电流互感器的相角传变误差值,该数据在坐标轴上 为一系列的离散点,如图3中*点所示。



图 3 中间电流互感器相角传变误差及线性插值 Fig.3 Phase deviation of intermediate CT and linear interpolation

常规处理方法:用一系列直线将离散的*点连接起来,如图3中的实线所示。当离散数据点足够密集时,该方法得到的结果会逼近真实结果。但是 工程上无法提供足够数据,保护实现上也较困难。

在原始数据有限的情况下,为提高精度,可以考虑采用拉格朗日插值法。

分段拉格朗日插值的结果如图 3 中的虚线所示,分成 2 段进行拟合。拟合曲线在全局范围内 与离散数据点较吻合,且运算量小,便于程序实现。 分的段数越多,则拟合结果越接近真实值,相应的计 算量也会增大。

3 其他问题及工程应用

3.1 注入电源回路异常监视

工程实际中,注入电源回路可能发生异常,如电 流回路断线、电压回路短路等,根据式(1)和式(2)可 知,如果程序不进行特别处理,则计算出的对地绝缘 电阻可能错误,从而导致保护不正确动作。

现有注入式定子接地保护均具有电源回路异常 报警功能,并瞬时闭锁接地电阻判据,电源回路恢复 正常后该报警延时返回并重新开放接地电阻判据。 常见注入回路异常判别逻辑有2种^{①,②}。

a. 注入低频电流和注入低频电压同时低于门槛,报注入回路异常,如式(3)所示。

$$U_{\rm C0} < U_{\rm C0set} \perp I_{\rm C0} < I_{\rm C0set}$$
 (3)

其中, U_{co} 和 I_{co} 分别为 U_{co} 和 I_{co} 的幅值; U_{Coset} 和 I_{Coset} 分别为注入低频电压、电流门槛值。

b. 注入低频电流或注入低频电压低于门槛,报 注入回路异常,如式(4)所示。

$$U_{\rm G0} < U_{\rm G0set} \ \Bar{I}_{\rm G0} < I_{\rm G0set} \tag{4}$$

采用式(3)所示判别逻辑时,因电源回路异常判 别过于严格,在注入低频回路电流断线或电压短路 情况下,容易出现误动作,近年来的现场动作案例也 多次验证了这一点。

采用式(4)所示判别逻辑时,因为考虑到了注入 低频回路电流断线或电压短路等情况,不易因回路 的故障误动;但也存在因注入电源回路故障条件易 于满足而导致拒动风险增大的问题,但是考虑到注 入式定子接地保护具备接地电流后备段,即使暂时 闭锁接地电阻段,接地电流段也能正常动作。

综上所述,注入电源回路异常判据采用式(4)的 判别逻辑是合理的。

当发生严重的单相接地短路故障,如机端开口 三角零序电压值大于 20 V 时,宜自动解除注入电源 回路异常闭锁,以利于保护的快速动作。

3.2 特殊故障类型的动作行为

采用双重化原则配置的发电机保护,一般A套 配置基波零序电压+3次谐波零序电压原理定子接 地保护,B套配置注入式定子接地保护。定子接地 故障发生时,2套保护均应动作,并可根据计算出的 过渡电阻值结合基波零序电压大小,计算出故障位置^[5]; 但在某些特殊故障类型下,双重化配置的定子接地 保护可能出现动作不一致的情况,不能一概而论。

例如某 1000 MW 级机组,曾经出现过 A 套基波 零序电压动作而 B 套注入式定子接地电阻基本不变 化的情况^[6]。事故停机后对发电机定子绕组及封闭 母线、机端电压互感器等附属设备绝缘进行检查,均 未发现异常。重新开机后,缓慢升压到 30% 额定电 压时,发电机定子接地零序电压持续报警,注入式定 子接地保护未启动,接地电阻测量值依然为 30 kΩ。 经过逐段排查,最终发现 GCB 近发电机侧 C 相电容 器电解液泄漏,电容量和 A、B 相相差 5 倍,导致定 子三相对地等效电容不对称,中性点零序电压产生 偏移,"误"发定子接地信号;注入式定子接地保护测 量对象为定子绕组对地绝缘电阻,不受中性点零序 电压偏移影响,对地绝缘电阻没有下降,因此注入式 定子接地保护未启动。

又如某 660 MW 机组在停机检修结束,重新开 机运行一段时刻后,注入式定子接地保护动作而基 波零序电压和 3 次谐波零序电压无变化。原因是发 电机定子绕组冷却水脏污或配方有问题,导致对地 绝缘降低,更换过定子冷却水后,注入式定子接地测 量对地电阻恢复正常。

因此,当不同原理的定子接地保护出现动作行

174

① 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-985 发电机注入式定子转子接 地保护技术和使用说明书. 2007.

② 西门子电气有限公司.多功能发电机/电动机/变压器保护 7UM62.2002.

为不一致时,不应简单判定为保护误动或拒动,应具体问题具体分析;同时还可利用两者动作行为的差异,为故障快速定位提供参考。

4 工程应用情况

综合应用前述技术的注入式定子接地保护,在 某 1000 MW 级核电机组上的电阻测量数据如表 3 所示。由表 3 可见,测量电阻误差能控制在 ±5% 以 内,保证了注入式定子接地的正常可靠运行。

表 3 并网前后接地电阻测量数据

Table 3 Measured grounding resistances, before and after grid-connection

并网状态	静态电阻/k Ω	测量电阻值/k Ω	误差/%
	11	11.53	4.77
并网前	5	5.11	2.11
	0.5	0.49	-2.00
	13	13.37	2.83
并网后	5	4.95	-1.00
	0.5	0.49	-2.00

5 结论

本文根据特大型核电机组特点,结合注入式定 子接地保护的应用,提出了单双接地点切换的计算 模型和分段相角补偿的方法,提高了各种工况下注入 式定子接地保护的接地电阻计算精度。应用本文方 法的核电机组注入式定子接地保护已在现场应用多 年,其可靠性相比常规注入式定子接地保护有较大 提升。本文还简要分析了注入电源回路异常判别的 逻辑,以及特殊故障情况下注入式定子接地保护的 动作行为,从完善保护功能和故障分析角度提出建议。

参考文献:

[1] 邰能灵,尹项根,胡玉峰. 注入式定子单相接地保护的应用分析 [J]. 继电器,2000,28(6):15-17.

TAI Nengling, YIN Xianggen, HU Yufeng. Analysis and application of injection voltage scheme against generator stator ground faults[J]. Relay, 2000, 28(6):15-17.

[2] 兀鹏越,陈飞文,黄旭鹏,等. 1036 MW 机组注入式定子接地保

护调试及动作分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):147-150. WU Pengyue,CHEN Feiwen,HUANG Xupeng,et al. Commissioning and operational analysis of voltage-injection stator grounding protection for 1036 MW unit[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):147-150.

- [3] 刘亚东,王增平,苏毅,等. 注入式定子接地保护的现场试验,整定和分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):150-154.
 LIU Yadong,WANG Zengping,SU Yi,et al. Field test,setting and analysis of injecting source-based stator grounding protection [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):150-154.
- [4] 陈佳胜,张琦雪,陈俊. 基于动态相角补偿的注入式定子接地保护[C]//第 20 届亚太电协供电工业会议(CEPSI 2014). 韩国,济州:亚太电协,2014:1-5.
 CHEN Jiasheng,ZHANG Qixue,CHEN Jun. The stator earth fault protection with voltage injection based on dynamic phase compensation [C]//CEPSI 2014. Jeju, Korea: the Asia Pacific Power Association,2014:1-5.
- [5] 毕大强,王祥瑜,李德佳,等.发电机定子绕组单相接地故障的定位方法[J].电力系统自动化,2004,28(22):55-57.
 BI Daqiang,WANG Xiangyu,LI Dejia,et al. Location detection for the stator single-phase ground fault of a generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(22):55-57.
- [6] 陈飞文,兀鹏越,陈佳佳,等.发电机外部"定子接地"故障分析及 处理[J].电气技术,2013,14(11):56-59.
 CHEN Feiwen,WU Pengyue,CHEN Jiajia,et al. Analysis and treatment of generator external "stator grounding" [J]. Electrical Engineering,2013,14(11):56-59.

作者简介:



陈佳胜(1975—),男,湖北大冶人,高级 工程师,硕士,主要从事电力主设备继电保 护研究、开发工作(E-mail:chenjs@nrec.com); 张琦雪(1974—),男,江苏沭阳人,研究

员级高级工程师,博士,主要从事电力主设备继电保护研究、开发工作:

陈佳胜

郭自刚(1979—),男,湖北随州人,高级 工程师,硕士,主要从事电力主设备继电保

护研究、开发工作;

王 光(1980—),男,内蒙古达拉特旗人,高级工程师, 硕士,主要从事电力主设备继电保护研究、开发及管理工作; 陈 俊(1978—),男,江苏姜堰人,高级工程师,硕士,主 要从事电力主设备继电保护研究、开发及管理工作。

Discussion on injection-type stator grounding protection of nuclear power generator

CHEN Jiasheng, ZHANG Qixue, GUO Zigang, WANG Guang, CHEN Jun

(Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Aiming at the problems in the field application of injection-type stator grounding protection for large-scale nuclear power generator, a single-dual point grounding mode switching model for calculating the injection-type grounding resistances and a method of segmental phase-angle compensation are proposed to meet the requirements of stator grounding protection for large-scale nuclear power generator. Its field application shows the accuracy of calculated grounding resistance is significantly improved. The circuit-break discriminating logic of existing injection-type stator grounding protections and its operative behavior in abnormal conditions are analyzed, and the corresponding suggestions are given.

Key words: nuclear power generator; injection-type stator grounding protection; single-dual point grounding mode switching; segmental phase-angle compensation