

1000 MW 发电机变压器组保护配置探讨

周建¹, 周卫巍², 王锋²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 国核电力规划设计研究院, 北京 100094)

摘要: 某电厂 1 000 MW 机组主变压器采用三台单相变压器, 变压器纵差保护在接地故障发生时灵敏度偏低; 常规的基波零序电压和三次谐波电压式定子接地保护, 其三次谐波含量受发电机运行状态影响, 不能满足在发电机运转前先投入定子接地保护的要求。应用短路电流计算结果和发电机变压器回路的对地电容值, 通过整定变压器零序差动保护, 选择与注入式定子接地保护相配合的发电机中性点接地电阻, 分析了零序差动保护和注入式定子接地保护在设计中应该注意的问题。提出了主变压器增加零序差动保护、定子接地采用基波零序电压和三次谐波电压式与注入式两套不同原理保护的方案。

关键词: 零序差动保护; 定子接地保护; 基波零序电压和三次谐波电压式; 注入式

Study of 1000 MW generator-transformer unit protection configuration

ZHOU Jian¹, ZHOU Wei-wei², WANG Feng²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co.Ltd., Jinan 250013, China;
2. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: A 1 000 MW power plant uses three single-phase transformers as the generator-transformer (GT). The transformer differential relay's sensitivity is low when earthed. The stator earth fault relay is based on fundamental voltage and third harmonic voltage measurement. The third harmonic component is influenced by the generator operation mode, so the earth relay cannot work properly before the generator operates. Using the short results and the GT-ground capacitor, the transformer zero-sequence differential relay is set, the generator neutral resistor matched with injection method stator earth fault relay is selected. The concerned problems in the design of zero-sequence differential relay and injection method stator earth relay are analyzed. Two protection schemes are put forward, i.e. the GT zero-sequence differential relay and the stator earth fault relay using the fundamental voltage and third harmonic voltage measurement method and the injection method.

Key words: zero-sequence differential relay; stator earth fault relay; fundamental voltage and third harmonic voltage measurement; injection method

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)11-0126-04

0 引言

1 000 MW 机组为特大容量的发电机组, 特大容量机组的损坏或运行中突然跳闸, 将造成很大的经济损失, 且对电力系统造成较大的冲击。因此, 为确保特大容量发电组的安全、经济运行, 对其配置安全完整、性能良好、动作可靠、构成合理的继电保护装置是非常必要的。

1 1 000 MW 机组的主要特点

1 000 MW 机组的主要特点及其对保护的影响主要有以下几点:

1) 机组由于价值更高, 相应损坏后维修成本很高。因此, 要求保护更加灵敏、快速, 如能实现

大型机组在停机状态或起、停机过程中的定子接地故障保护、转子接地故障保护等。

2) 容量很大, 停电损失巨大。停电 1 h 即 100 万度电。假设上网电价 0.3 元/度, 即每小时损失 30 万元人民币。因此, 要求保护更加安全、可靠。

3) 主变压器因重量大、体积大、运输难度高等原因, 通常采用单相变压器。因此主变相间故障的几率大为降低, 接地短路的几率相对增加, 有必要加强这方面的保护。零序差动保护对于变压器高压绕组的接地故障表现出很高的灵敏度, 受涌流的影响也小。在纵差保护对高压绕组单相接地灵敏度不够时可配置零差保护。

4) 发电机容量增加后, 主回路额定电流越来越大, CT 参数也相应大幅提高, 导致 CT 选择和设

计时要更加全面；故障电流增加，CT饱和情况更加严重，差动保护需考虑CT严重饱和时保护的动作特性。

5) 定子绕组多采用水内冷。由于机械损伤或发生漏水等原因，导致发电机中性点附近的定子绕组发生单相接地是完全存在的。发电机单相接地后，由于电容电流引起的间歇性电弧，将有可能对发电机定子铁芯等部件严重灼伤。如果这种发电机单相接地不能及时发现并处理，将引发匝间短路、相间短路或两点接地短路等，从而严重损坏发电机定子线圈等部件。大型发电机由于材料利用率高，结构紧凑，发生定子铁芯等部件严重灼伤或定子线圈损坏等故障后，修复将变得十分困难。

2 1 000 MW 机组的电气主接线

某电厂 1 000 MW 机组电气主接线如图 1。

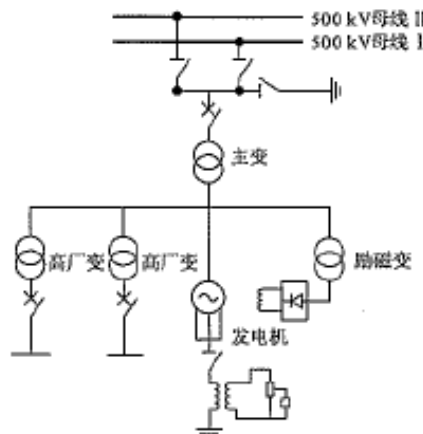


图 1 某电厂 1 000 MW 机组电气主接线图

Fig.1 Main electrical wiring diagram of 1 000 MW power plant unit

该工程选用东方电机股份有限公司生产的 QFSN-1039-2-27 型发电机，采用自并励静止励磁系统，由三台并接于发电机机端的单相励磁变（容量约为 $3 \times 3\ 300\ \text{kVA}$ ）作为励磁电源，经可控硅整流后供给发电机磁场电流。机组以发电机—主变压器单元接线接入 500 kV 系统，500 kV 配电装置为屋内 GIS，双母线接线。主变压器为三台单相变压器，高压侧中性点直接接地。

3 主变压器零序差动保护的配置

该工程主变压器采用三台单相变压器，容量为 $3 \times 380\ \text{MVA}$ ，高压侧接入 500 kV 升压站。单相变压器绕组的短路类型主要是绕组对铁芯（即地）的绝缘损坏（即单相接地短路故障），相间短路故障出现的可能性极小。变压器纵差保护是比较变压器高

低压相电流的差，对于变压器相间短路故障的灵敏度很高。对于 Y_N, d 接线变压器，当接地故障点位于高压绕组的部分范围内时，其故障电流在保护装置中呈现穿越性^[1]，此时纵差保护灵敏度很低，或者根本不会动作。因此该工程主变压器配置了零序差动保护作为变压器的接地保护，其保护配置接线见图 2。

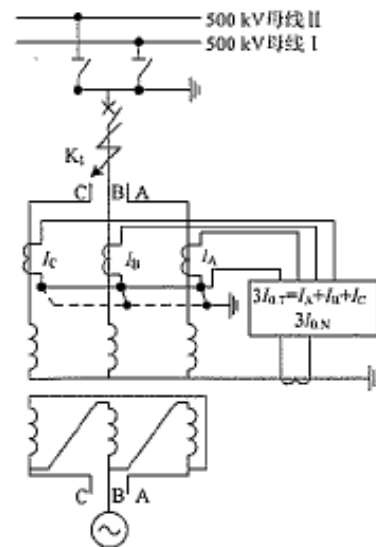


图 2 零序差动保护接线示意图

Fig.2 Schematic diagram of zero-sequence differential protection

在主变压器高压侧发生故障时（见图 2 K1 点），三相短路电流为 36.68 kA，两相接地短路电流为 37.49 kA，单相短路电流为 38.65 kA。保护整定计算如下^[2]：

躲过外部单相接地故障时的不平衡电流：

$$I_{op,0} = K_{rel}(K_{ap}K_{CC}K_{er} + \Delta_m)I_{k0,max}^{(1)} / n_a = 4.4(\text{A})$$

躲过外部三相短路时的不平衡电流：

$$I_{op,0} = K_{rel}K_{ap}K_{CC}K_{er}I_{k,max}^{(3)} / n_a = 2.751(\text{A})$$

躲过励磁涌流产生的不平衡电流：

$$I_N / n_a = \frac{S_T}{(\sqrt{3}U_T \times n_a)} = 0.658(\text{A})$$

$$I_{op,0} = (0.3 - 0.4)I_N / n_a = (0.197 - 0.263)(\text{A})$$

式中： $I_{op,0}$ 为零序差动保护动作电流； K_{rel} 为可靠系数，取 1.5； K_{ap} 为非周期分量系数，取 2； K_{CC} 为电流互感器同型系数，取 0.5； K_{er} 为电流互感器的比误差，取 0.1； Δ_m 为由于电流互感器变比未完

全匹配而产生的误差,取 0.5; n_0 为变压器电流互感器变比,取 2000/1 A; $I_{k0,max}^{(1)}$ 为保护区外最大单相或两相接地短路电流,该工程取单相接地短路电流; $I_{k,max}^{(3)}$ 为外部最大三相短路电流; I_N/n_0 为变压器基准侧额定二次电流; S_T 为变压器的容量; U_T 为变压器基准侧电压。

由上述计算可知,保护整定动作电流取计算结果的最大值 4.4 A,远远大于变压器的额定电流 0.685 A,其内部接地短路的灵敏度并不高。为此将保护改为比率制动式原理,采用最大相电流制动的原理的保护装置,其零序制动电流:

$3I_{0bs} = \max(\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C)$, 制动电流取高压侧的最大相电流作为制动电流,零序差动电流为 $3I_{0d}$ 。其保护动作情况见表 1。

表 1 最大相制动电流零差保护动作情况

Tab.1 Result of zero-sequence differential protection based on maximum braking phase-current

序号	故障类型	差动电流 $3I_{0d}/A$	制动电流 $3I_{0bs}/A$	保护动作情况
1	外部三相短路	$< I_{op,0}=2.751$	$I_k^{(3)}/n_0=18.34$	可靠制动
2	外部 AB 相间短路	$< I_{op,0}=2.751$	$I_k^{(2)}/n_0=18.75$	可靠制动
3	外部 A 相接地短路	$< I_{op,0}=4.4$	$I_k^{(1)}/n_0=19.33$	可靠制动
4	内部 A 相接地短路	$ 3\dot{I}_{0T}-3\dot{I}_{0N} $	$ \dot{I}_A =3 \dot{I}_{0T} $	可靠动作(说明)

说明:区内故障 \dot{I}_{0N} 与 \dot{I}_A 方向相反,且 $|\dot{I}_{0N}|$ 总是大于 $|\dot{I}_A|$ [3]。因此,区内单相接地故障时差动电流总是远大于制动电流的。

4 发电机定子接地保护的配置

对图 1 所示的发变组接线提出以下定子接地保护配置方案。

4.1 基波零序电压和三次谐波电压式接地保护

机端开口三角基波零序电压,保护机端至中性点端 90%~95%范围内的线圈。保护装置由反映在发电机机端至中性点 90%范围内的基波零序电压构成 90%定子接地保护。

由于中性点通过的电流为零序电流,产生基波和三次谐波电压,其中三次谐波电压较大,经过滤波滤去基波,得到三次谐波参数,与机端开口三角三次谐波比较,来保护发电机中性点附近的 10%定子绕组,从而构成对定子绕组的 100%保护。

这种保护原理已经在工程中广泛应用。由于不同的发电机之间有不同的三次谐波分布,定值通常需要经过进行一次侧试验后实测得到;另外三次谐波的测量位置如在中性点,在机端电压达到标称电压之前检测不到;再则三次谐波含量也部分地受到发电机运行工况的影响(如受到有功功率和无功功率的影响),因此在应用这个原理的保护时有一定的限制。

4.2 注入式定子接地保护

由于发电机存在中性点附近发生接地故障的风险,因此需要配置一套采用完全不同保护原理的装置,以避免同原理的共性缺陷。另外,由于发电机在起动过程中或大修以后发生定子接地故障的几率大于连续运行时,而大型机组倾向于在静止无励磁情况下仍有定子绕组接地保护,有必要对定子接地保护提出更高的要求,即保护的测量原理应该与发电机的运行工况无关。因此,配置了一套注入式定子接地保护。这种保护的基本原理为:在发电机的定子绕组中性点和地之间外加一个低频交流电压,该电压的幅值很小(小于 1%~3%的发电机额定电压)。当定子绕组发生接地故障时,通过接地电阻形成闭合回路,产生低频的故障电流。这种测量接地故障的方法与定子绕组故障点的位置无关。并且可以在发电机运转前可以先投入定子接地保护。图 3 为注入式定子接地保护的接线示意图。

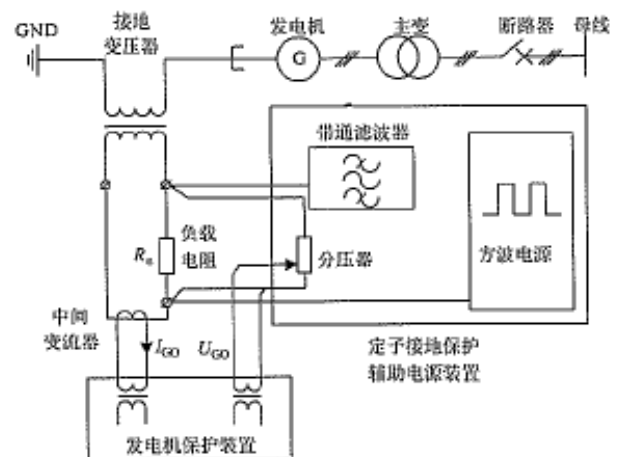


图 3 注入式定子接地保护示意图

Fig.3 Schematic diagram of injection method stator earth fault protection

辅助电源装置将低频电压加在负载电阻 R_n 上,

并通过接地变压器,将低频电压信号注入到发电机定子绕组对地的零序回路中;带通滤波器:通过 20 Hz 低频电压信号,防止 50 Hz 电压倒灌入电源;保护装置检测注入的电压、电流信号,通过保护计算判断接地故障。

注入式定子接地保护可以反映定子绕组绝缘的均匀下降,起到监督绝缘老化的作用;并且不受运行工况的影响,在发电机静止、起停过程、空载运行、并网运行、甩负荷等各种工况下,均能提供定子接地保护;保护范围为 100%,灵敏度高;受定子绕组对地电容影响小;接地电阻的实测结果、电阻判据中的电阻定值为一次值,更直观。目前国内几大保护厂家相继开发了外加电源式保护且已有一些良好的应用业绩,多年的实际运行情况表明,保护非常灵敏、可靠,基本不需要维护。

4.3 发电机中性点电阻选择

根据注入式定子接地保护的要求,发电机中性点接地变压器二次侧电阻要求 $>0.5 \Omega$,而该电阻的阻值是与发电机主变压器主回路有关的。其选择条件为发电机中性点经高电阻接地后,可以达到:

- 1) 限制过电压不超过 2.6 倍额定相电压;
- 2) 限制接地电流不超过 10~15 A。

设计中取发电机中性点接地电阻值等于或小于发电机主变压器回路对地容抗值。在本工程中,发电机电压为 27 kV,发电机定子线圈单相对地电容为 $0.2096 \mu\text{F}$,离相封闭母线单相对地电容为 $0.01128 \mu\text{F}$,高厂变高压侧、主变低压侧、励磁变高压侧绕组单相对地电容为 $0.034 \mu\text{F}$,所以发变组回路的总电容为 $0.76464 \mu\text{F}$ 。接地电阻值选择如下:

$$R' \leq \frac{1}{\omega C} \times 10^6 = \frac{1}{0.76464} \times 10^6 = 4163 \Omega$$

按以往设计,接地变压器二次侧电压一般取 230 V,因此接地变压器二次侧电阻值为:

$$R \leq \frac{R'}{1.1N^2} = \frac{4163}{1.1 \times (27000/230)^2} = 0.275 \Omega$$

此变压器二次侧电阻不能满足定子注入式保护的要求。为了满足保护要求,将发电机中性点接地变压器的二次侧电压设计为 500 V,此时二次侧电阻值为 1.29Ω ,实际取值为 1.25Ω 。

保护装置的内阻为 8Ω ,低频方波电压源为 25 V,则注入电压为:

$$(27000/500) \times 1.25 \times 25 / (1.25 + 8) = 182.43 \text{ V}$$

注入电压幅值为 $\frac{182.43}{27000/\sqrt{3}} = 0.0117$,即

1.17%的发电机额定电压,满足保护要求。

5 结束语

1) 对于三台单相的主变压器建议配置零序差动保护,采用比率制动原理时保护装置动作更加灵敏可靠。

2) 因零差保护的動作电流与变压器的穿越电流没有直接关系,故该保护動作电流与变压器调压分接头的调整和励磁涌流都无直接关系,因此用于发电厂主变压器时,发电机出口是否装设断路器对保护装置没有影响,只是保护出口要多一个,用于跳发电机出口断路器。

3) 从保护整定中可见,电流互感器的同型系数对零差保护的動作电流影响较大,因此工程设计时应尽可能要求零差保护所用的电流互感器型式、变比和容量一致。

4) 根据保护配置双重化的理念,定子接地保护配置两套不同原理的保护,一套采用零序电压+三次谐波电压式接地保护,另一套采用注入式定子接地保护,该保护可以兼做启停机保护。

5) 注入式定子接地保护的输入电阻与发电机中性点接地变压器的二次侧电阻阻值的选择有关;因此在设计中要注意一次专业与二次专业之间的配合。

参考文献

- [1] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].二版.北京:中国电力出版社,2002.
WANG Wei-jian. The principle and application electrical main equipment[M]. Second Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T684-1999 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[M].北京:中国电力出版社,1999.
State Economic and Trade Commission of P.R.C. DL/T684-1999 guide of calculating settings of Relay protection for large generator and transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] 王维俭,等.大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M].北京:中国电力出版社,2006.
WANG Wei-jian, et al. Analysis of internal fault and relay protection for great generator-transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [4] 毕大强,王祥珩,王维俭.发电机中性点接地装置等效电路的分析[J].继电器,2003,31(1):12-17.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian. Analysis on the equivalent circuit of grounding equipments at the neutral of power generator[J]. Relay, 2003, 31(1): 12-17.

(下转第 146 页 continued on page 146)

(上接第 129 页 continued from page 129)

- [5] 邰能灵, 尹项根, 胡玉峰, 等. 注入式定子单相接地保护的应用分析[J]. 继电器, 2000, 28 (6): 15-19.
TAI Neng-ling, YIN Xiang-gen, HU Yu-feng, et al. Analysis and application of injection voltage scheme against generator stator ground faults[J]. Relay, 2000, 28 (6): 15-19.
- [6] 王维俭, 徐振宇, 张振华. 大型发电机定子单相接地保护的研讨[J]. 继电器, 1999, 27 (4): 6-9.
WANG Wei-jian, XU Zhen-yu, ZHANG Zhen-hua. Research and discussion on single-phase earth protection

of large generator stator[J]. Relay, 1999, 27 (4): 6-9.

收稿日期: 2009-12-11; 修回日期: 2010-03-03

作者简介:

周 建 (1959-), 女, 高级工程师, 从事发电厂电气设计工作; E-mail: jzhou001@126.com

周卫巍 (1971-), 女, 高级工程师, 从事发电厂电气设计工作;

王 锋 (1972-), 男, 注册电气工程师, 高级工程师, 从事发电厂电气设计工作。