

水轮发电机定子单相接地的继电保护技术

宋全林¹, 桂林², 党晓强²

(1 成都电业局双流供电局调度所, 四川 成都 610200; 2 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:阐述了水轮发电机定子单相接地保护所涉及的相关内容,着重对其继电保护的動作方式、双频式保护的基本原理和影响其保护動作的注意因素进行了分析和评述,同时对注入式保护做了介绍,最后对前述相关内容以及后续研究做了结论和展望。

关键词:水轮发电机;定子单相接地;继电保护

Abstract: The principle theory of relaying protection and its relevant contents for stator single-phase grounding of hydraulic generator are analysis. The neutral point ground pattern and two-frequency grounding protection are the focuses. The selective schemes for generator single-phase grounding are discussed, and the new development trend for the single-phase grounding is predicted lastly.

Key words: hydraulic generator; stator single-phase grounding; relaying protection

中图分类号: TM623.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0092-04

水轮发电机定子绕组与铁心间的绝缘破坏,就形成了定子单相接地故障,这是一种最常见的发电机故障。发电机单机容量的增大,一般使三相定子绕组对地电容增加,对应的单相接地电流也增大,当接地电流大到能在故障点引起电弧时,将使定子绕组的绝缘和定子铁心烧坏,容易发展成危害更大的定子绕组相间或匝间短路,所以大型水轮发电机对定子绕组接地保护的灵敏性和可靠性要求很高。有文献指出,许多相间短路都是由单相接地发展而来的,其中有专家组对三峡发电机组提出:“对于单相接地故障,定子铁心不用修复”,即是说任何对定子铁心的“轻微损坏”也是不允许的^[1-2]。

水轮发电机单相接地的 100% 保护存在的问题很多,一般由两部分组成,一部分由零序电压保护定子绕组的 85% 以上,其余部分由其他原理(如三次谐波原理或叠加电源方式原理)进行保护。双频式 100% 接地保护是定子单相接地的传统保护,双频式保护是对基波零序电压保护和三次谐波电压保护的统称,实践证明该保护在选择性、可靠性和灵敏性方面并不令人满意,其中三次谐波电压保护存在原理上的缺陷,灵敏度较低,在运行中存在的问题最多。近年来外加电源的低频注入式定子单相接地保护逐步普及开来,它除了能和零序电压保护共同实现 100% 保护以外,还能起到监视绕组绝缘下降作用,有

逐步取代双频式保护配合的趋势^[3-8]。

1 继电保护的動作方式

中国大中型水电厂针对定子单相接地保护動作方式的基本思想可分为两种:一种为近年新建大型水力发电厂引进国外技术,如二滩电厂、三峡电厂和广州抽水蓄能电厂的水轮发电机组,其保护非常谨慎,为了使定子免遭破坏,同时避免保护拒动或误动,由外加电源式保护与零序电压保护配合构成 100% 接地保护。保护直接作用于跳闸,但对系统的供电有冲击,建设中的小湾、龙滩和溪洛渡等大型水电厂也是按照此思路配制的保护。另一种保护思想动作于信号,故障机组经转移负荷后平稳停机,其对系统的供电冲击没有那么大,对应的机组容量小了很多,如早些年建设的李家峡电厂、小浪底电厂、葛洲坝电厂和天生桥电厂等规模稍小些的水电厂,其保护配制原来多由基波零序电压保护和三次谐波电压保护构成的双频式保护。接地保护主要考虑的是过电压和铁心的烧损问题;接地故障电流的大小和持续时间长短将直接影响定子铁心的烧伤程度和修复期;由于接地故障的存在,会引起接地弧光过电压,可能导致发电机其他位置绝缘的破坏,形成危害严重的相间或匝间短路故障。

定子单相接地保护的動作方式与发电机中性点

的接地方式密切相关,中性点接地方式的不同直接影响着接地电流的大小。按照《IEEE Guide for Generator Ground Protection》推荐,大容量的发电机中性点接地运行方式主要有中性点经高阻接地和中性点经消弧线圈接地两种运行方式,水轮发电机中性点的接地方式在欧美以经配电变压器高阻接地为主,中国新建大型水力发电厂多采用配电变压器进行接地,老电厂多采用消弧线圈。如果发电机的中性点不接地,那么接地时会产生较大的注入容性接地电流;当中性点采用消弧线圈接地时,由于消弧线圈的电感电流的抵消,接地电流将被减小;中性点采用变压器接地相当于经一个大电阻直接接地,可以避免产生弧光过电压,但会产生很大的接地电流。经消弧线圈接地是国内专家的主流设计,将接地故障电流变小限制在安全范围之内,使得定子铁心免于遭受损坏,可以在发生接地后允许发电机运行一段时间,只报警不跳闸,但可能引起谐振过电压;经变压器接地是国外主流设计,由于流过故障点电流较大,为保证机组安全,就必须瞬间停机灭磁。这在国外系统备用容量充足的情况下是可取的,但对于中国来说,就不能认为是合理的,但同时也应看到经消弧线圈接地的约束条件比较多,这在具体情况时是需要进行谨慎深入考虑的。在中国曾经发生过中性点经配电变压器接地的大型水轮发电机退掉接地保护继续运行的情况。

2 基波零序电压保护

现代大容量水轮发电机组通常按发电机、变压器组单元接线与高压或超高压电网直接相连,由于发电机与系统中其他元件没有电联系,其接地电容电流比较小,通常采用基于零序电压的保护。基波零序电压型保护是在发生单相接地时,通过检测机端或中性点处零序电压来判别接地故障。假设相接地发生在定子绕组距中性点 α 处, α 表示由中性点到故障点的绕组占全部绕组匝数的百分数,如图 1 所示。则机端各相对地电压 \dot{U}_{dA} 、 \dot{U}_{dB} 、 \dot{U}_{dC} 为

$$\dot{U}_{dA} = (1-\alpha)\dot{E}_A \quad (1)$$

$$\dot{U}_{dB} = \dot{E}_B - \alpha\dot{E}_A \quad (2)$$

$$\dot{U}_{dC} = \dot{E}_C - \alpha\dot{E}_A \quad (3)$$

因此故障点的零序电压为

$$\dot{U}_{d0(\alpha)} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{dA} + \dot{U}_{dB} + \dot{U}_{dC}) = -\alpha\dot{E}_A \quad (4)$$

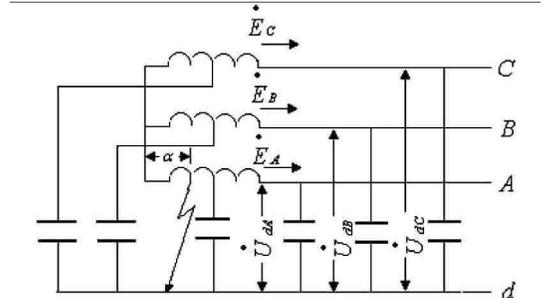


图 1 定子单相接地电路图

上式表明,故障点的零序电压将随着故障点位置的不同而改变。当发电机内部单相接地时,由于电压互感器二次开口三角侧的输出电压在机端接地时为 100 V,故障点的零序电压可以表示为

$$\dot{U}_{d0(\alpha)} = 100\alpha \text{ (V)} \quad (5)$$

由于发电机三相绕组对地电容不完全对称,正常运行时中性点存在位移电压,该方案在中性点附近存在保护死区,并且保护区内经过渡电阻接地时灵敏度不高,所以需要和其他原理共同构成 100% 接地保护。保护的动作电压 $U_{d0(\alpha)}$ 应按躲过正常运行时中性点单相电压互感器或机端三相电压互感器开口三角绕组的最大不平衡电压及三次谐波电压整定。实际测试表明,发电机正常运行时,不平衡零序电压有可能超过 10 V,有时因电压互感器饱和,甚至超过 20 V。继电器内设置三次谐波滤波环节,可以降低整定值,使其主要反映基波的零序电压,提高灵敏度。使用该保护时同时也要校验高压侧系统或高压厂用变压器低压系统发生的单相接地通过耦合电容传递的零序电压,其也有可能引起零序电压保护误动,通常的处理方法是从动作电压整定值及延时两方面与系统接地保护配合。

3 三次谐波电压单相接地保护

由于发电机气隙磁通密度的非正弦分布和铁磁饱和的影响,在定子绕组中要产生一定的三次谐波电动势。三次谐波电压定子接地保护原理是基于单相接地故障前后发电机中性点与机端处三次谐波电压变化特点不同构成的,正常运行时中性点三次谐波电压 U_{N3} 幅值比机端三次谐波电压幅值 U_{S3} 大,而靠近中性点附近定子接地时则 U_{N3} 幅值比 U_{S3} 幅值小,基于此其与前述零序电压联合共同组成 100% 定子单相接地保护。

如果把发电机的对地电容等效看作集中在发电机的中性点 N 和机端 S 且每相的电容大小都是

0.5C_{0F}, 并将发电机端引出线、升压变压器、厂用变压器以及电压互感器等设备的每相对地电容 C_{0W} 也等效在机端, 并设三次谐波电动势为 E₃, 假定接地发生在 α 处, 其等值电路如图 2 所示。

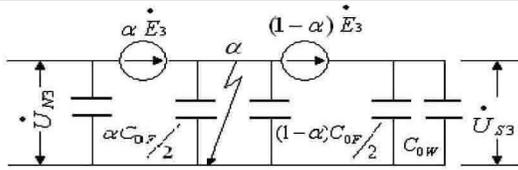


图 2 单相接地时三次谐波电动势分布的等值电路

α 表示由中性点到故障点的绕组占全部绕组匝数的百分数, 此时不论发电机中性点是否经消弧线圈接地, 均近似有如下关系。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{N3} &= \alpha \dot{E}_3 \\ \dot{U}_{S3} &= (1-\alpha) \dot{E}_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

则, $\frac{|\dot{U}_{S3}|}{|\dot{U}_{N3}|} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$ (7)

可以看出当 α ≤ 50% 时, |U_{S3}| ≥ |U_{N3}|, 且越接近中性点, 灵敏度越高。三次谐波电压单相接地保护有两种判据, 一种是 |U_{N3}| < |U_{S3}|, 另一种是 |K_pU_{N3} - U_S| > K_b|U_{N3}|, 其中 K_p、K_b 为调整系数, 动作区为中性点侧 20% ~ 50%, 保护装置需使用两组电压互感器。后一种判据由于有相对更好的灵敏度和防误动能力, 故通常被现场所采用。

水轮发电机在起停机时刻和运行方式改变较大的时候会引起 U_{N3} 和 U_{S3} 发生较大的改变, 从而容易引起其三次谐波电压保护的误动。由于水轮发电机三次谐波电压分布复杂且缺乏规律性, 针对不同的机组需要建立的模型不同, 理论上缺乏归纳性。因此既要保证发电机在各种工况下三次谐波电压保护的动作灵敏度, 又要确保并网前后的动作可靠性, 单纯用调试的方法来达到目的是不可能的。目前对应于启、停机时刻造成的误动, 一般采取设两套保护, 并网前后投切不同的保护, 当然这样做增加了保护的投资和复杂程度。已有文献对运行方式变化引起保护误动提出的解决办法是, 通过自动跟踪中性点与机端两侧的三次谐波电压采用自适应三次谐波电压相量比差方案和基于三次谐波电压故障分量的定子接地保护, 改善效果仍不明显。

变压器铁心磁路的饱和使得各相电动势中存在三次谐波 E_{3H} 对三次谐波电压保护也会产生影响。

高低压绕组之间存在耦合电容, 设每相为 C_M, 每相高低压绕组的电耦合由各匝匝电势 E_{3H} 和匝耦合电容 ΔC_M 的分布参数表现出来, 文献 [1] 中提到对大型水轮发电机三次谐波电压保护而言, C_M 的存在所造成的影响可以忽略不计, 对于中小型水轮发电机则需要认真对待。具体分析: 设每相有 E_{3H} 和绕组首末两端为 C_M/2, 三次谐波零序等效电路如图 3 所示, E_{3H} 的存在影响 U_S 和 U_N 的大小和相位。设 E_{3H} = 0 时有 U_G 和 U_{nG}, E₃ = 0 时候有 U_{st} 和 U_{nT}, 则实际 U_S 和 U_N 为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_S &= \dot{U}_G + \dot{U}_{st} \\ \dot{U}_N &= \dot{U}_{nG} - \dot{U}_{nT} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, U_{st} = U_{nT} = γ E_{3H}

式中, γ 为复系数, 由图 3 中参数 C_M、C_S、C_N、Z 决定。

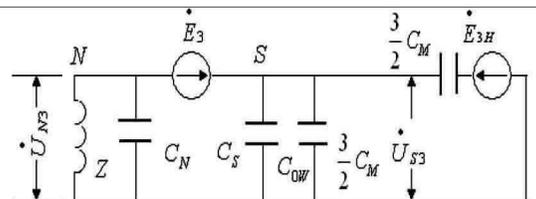


图 3 发电机—变压器组三次谐波零序等效电路

由式 (8), 在不计机端外接元件对地电容时, 则 C_S = C_N = 3/2 C_G (C_G 为发电机每相对地电容), 这时 E_{3H} 经高低压绕组间耦合电容 C_M 传递到发电机的三次谐波零序电压 U_{st}, 完全由下述参数关系决定。

$$\begin{aligned} U_{st} = U_{nT} = \gamma E_{3H} &= \frac{\frac{3}{2} C_M}{3(C_G + \frac{C_M}{2})} E_{3H} \\ &= \frac{C_M / 2}{C_G + C_M / 2} E_{3H} \end{aligned} \quad (9)$$

不难看出, E_{3H} 对 U_S 的影响不同于 E_{3H} 对 U_N 的影响, 最简单的情况: Z = ∞ (发电机中性点绝缘)、C_N = C_S 有 U_G = U_{nG} = E₃/2; 由于 E_{3H} 的出现, 将有

$$\dot{U}_S = \frac{\dot{E}_3}{2} + \gamma \dot{E}_{3H} \quad (10)$$

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_3}{2} - \gamma \dot{E}_{3H} \quad (11)$$

假设 E_{3H} 与 E₃ 同相位, 则该发电机在正常运行时, 由于 E_{3H} 的影响, 已有 |U_S| / |U_N| > 1.0, 即已满足

保护动作条件,保护势必误动。因为 \dot{E}_{3H} 的大小和相位随变压器铁心工作状态而改变,而铁心工作状态又与变压器运行工况有关,因此,变压器运行工况的改变,将影响 \dot{U}_S 和 \dot{U}_N ,可能造成三次谐波电压式定子接地保护误动或拒动,所以 \dot{E}_{3H} 的影响不容忽视。

4 外加电源方式的定子接地保护

外加电源的注入式发电机定子单相接地保护根据发电机正常情况下整个三相定子回路对地是绝缘的,而发生单相接地故障时对地绝缘被破坏的特征,在发电机定子回路与大地之间外加一个信号电源,在正常情况下,信号电源不产生或很少产生信号电流,发生接地故障后才产生相应频率的接地电流,使保护动作。通常外加低频电源主要是 12.5 Hz 和 20 Hz 两种,是在发定子绕组中性点(由接地配电变压器或消弧线圈的二次绕组)或机端(由 TV 副方开口三角形)持续地将信号注入到发电机定子的系统,其可以单独完成定子接地的 100% 保护。不足之处在于,对电源的可靠性和性能有较高要求,现场调试也比较复杂,中性点接地方式和外加电源内阻的大小会在一定程度上影响保护的灵敏度。外加电源式保护能够独立检测接地故障,不受运行方式影响,且在发电机静止、启停情况下均有保护作用,同时具有灵敏度高和可以进行绝缘监测的突出优点,在许多水轮发电机单相接地保护的技术改造中都有改三次谐波保护为注入式保护的实例。

5 结 语

分析了水轮发电机定子单相接地保护的所涉及的基本原理和相关内容,具体针对其中性点的接地方式、零序基波电压保护和三次谐波电压保护以及外加电源的注入式保护做了论述。中性点经消弧线圈接地运行在中国已积累了充分丰富的经验,同时也是适合中国国情的水轮发电机安全运行的有效措施。零序基波电压保护原理简单技术可靠,但其理论上的缺陷使其不能够保护定子的全部范围,与之配合共同完成 100% 保护的三次谐波保护存在的问题很多,且难以改进。外加电源的注入式保护具有广泛的应用前景,有取代三次谐波电压保护的趋势。另外对于扩大单元接线的发电机组前面的保护措施都缺乏对定子

单相接地故障机的选择性,扩大了故障所影响的范围,同时也不能对单元接线机组的故障点是位于机内或机外进行判别,这方面的技术在研究,但都还不太成熟,没有推广应用开来。

基于在线监测与故障诊断思想结合智能技术、挖掘新的保护和故障点定位特征量以及先进的故障分析方法是水轮发电机定子单相接地进行深入研究的前沿,总之,不断追求原理上新的突破,融合借鉴相关领域科技进步的新成就,这是发电机保护也是所有科学技术发展的永恒主题。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第 2 版) [M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [2] 王维俭,王祥珩,王赞基. 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.
- [3] 刘宇明,陈伟. 浅谈小浪底水电厂发电机定子单相接地保护 [J]. 水力发电, 2004, 30(9): 15-17.
- [4] 唐清弟,谭建华. 3 ω 定子接地保护误动原因分析和对策 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 59-61.
- [5] 张德胜. 浅析李家峡水电站三次谐波(3 ω) 定子接地保护动作不可靠的原因及技改措施 [J]. 青海电力, 2005, 24(1): 24-27.
- [6] 夏景祥. 发电机定子接地保护动作分析 [J]. 中国科技信息, 2005, 17(20): 124.
- [7] 郭爱军. 三次谐波电压型定子接地保护整定计算探讨 [J]. 继电器, 2004, 32(3): 32-38.
- [8] 王维俭,鲁华富. 三次谐波电压式定子接地保护的运行和改进 [J]. 中国电力, 1995, 28(11): 46-49, 53.
- [9] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [10] 王维俭,桂林,毕大强. 大型发电机一变压器组继电保护的探讨 [J]. 中国电力, 2001, 34(1): 39-44.
- [11] 安振山. 大型水轮发电机组中性点接地方式 [J]. 四川电力技术, 1998(1): 1-4.
- [12] 卢琪,熊伟,行生. 提高三次谐波电压式定子接地保护动作可靠性的研究 [J]. 陕西电力, 2007, 356(6): 42-44.
- [13] 党晓强,刘俊勇,刘继春,等. 水轮发电机定子接地的行波差动保护与故障选相研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 74-78.
- [14] 党晓强,刘俊勇,杨可,等. 水轮发电机定子单相接地故障行波定位 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 74-78.
- [15] 党晓强. 大型发电机内部故障在线诊断及行波应用新原理 [D]. 成都:四川大学, 2006.

(收稿日期: 2010-09-10)