

大型发电机定子单相接地保护的研讨

王维俭, 徐振宇, 张振华

(清华大学, 北京 100084)

【摘要】 针对三峡电站和秦山核电二期工程的发电机单相接地保护,对比了双频式零序电压型和外加 20Hz 电源型两种方案的优缺点,着重分析后一方案在发电机中性点两种不同接地方式下的动作性能(前一方案的相应分析已发表在参考文献^[1])。

【关键词】 定子接地保护; 20Hz 电源; 双频式零序电压; 动作特性分析

1 大型发电机单相接地保护的技术要求

对于单机容量为 600~700MW 的秦山核电站和三峡水电站,单相接地保护的技术要求高,具体说有如下 4 条:

1) 单相接地保护应保证发电机发生单相接地故障后不烧伤定子铁心。

为达到这一要求,最有效的技术措施是发电机中性点经消弧线圈接地,藉此减小接地故障电流至 1A 以下(GB14235---93),确保定子铁心的安全,完全不需检修铁心,对于经接地变压器高阻接地方式的发电机,单相接地故障电流必将大大超过 1A,为保证定子铁心安全,单相接地保护动作应立即跳闸并快速灭磁。使单相接地故障大电流持续时间尽可能短些。

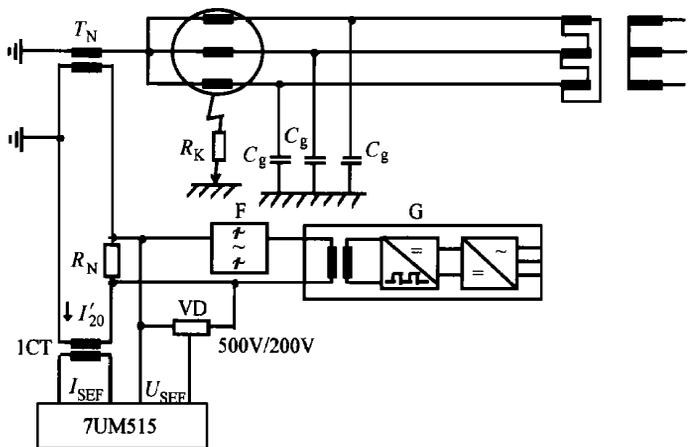
2) 绝对不准单相接地轻微故障转化为灾难性的相间或匝间短路。

为此,必须降低单相接地故障过程中由于间歇性弧光引起的动态过电压大小,根据 GE 公司 P. G. Brown 等人、新英格兰系统 M. V. Haddad 等人和清华大学王祥珩、王善铭等分别做的发电机单相接地故障、间歇性弧光过电压仿真试验的三份试验报告,它们的过电压幅值虽各不相同,但有一点三家观点一致,即在维持工频条件下,消弧线圈谐振接地方式的动态过电压值不超过经接地变压器高阻接地方式的动态过电压大小(2.6pu),这就从科学试验结果提供了发电机中性点消弧线圈接地方式不会产生严重过电压的科学依据;我国 40 余年大中型水电(也包括部分大型火电)机组和新英格兰系统所有大中型发电机中性点经消弧线圈接地的成功运行经验,也充分证明这种接地方式是优越的。现有唯一的问题是如何保证发电机单相接地故

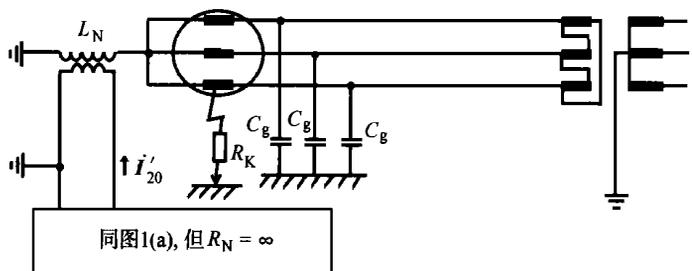
障过程中频率维持在工频 50Hz?

若采用接地变压器电阻接地方式,发生定子单相接地故障时,接地保护必须立即跳闸,虽有灭磁装置,但电压衰减不可能即时,这就必然产生在频率严重偏离额定时的单相接地动态过电压的大幅值(GE 公司的数据是 3.8pu)。对于消弧线圈接地方式,接地保护动作后仅发信号,立即转移负荷,平稳实现停机,整个过程中发电机始终联网,保持系统工频,动态过电压小于或接近 2.6pu,运行实践证明单相接地故障不可能迅速扩展为恶性相间或匝间短路。

3) 对于这些特大型发电机组,单相接地保护应



(a) 发电机中性点经接地变压器 T_N 电阻接地



(b) 发电机中性点经消弧线圈 L_N 接地

图 1 接于中性点的 20Hz 定子单相接地保护

没有动作死区,并有足够的保护灵敏度。

上述两种单相接地保护方案均能满足此要求。

4) 在大型发电机的启、停过程中,单相接地保护应不失去作用。

外加 20Hz 电源方案能满足此要求;对双频式零序电压方案为满足这点要求,必须增设启、停机过程的定子接地保护装置。

2 外加 20Hz 电源型单相接地保护分析用等值电路

外加 20Hz 电源型单相接地保护的原理接线图(20Hz 电源由中性点输入)见图 1。

分析保护动作行为用的 20Hz 等值电路如图 2 所示,图中诸参数为

$3C_g$ ——发电机三相对地电容(已折合到 T_N 或 L_N 副方);

I_N ——发电机中性点消弧线圈(已折合到 T_N 或 L_N 副方);

R_K ——单相接地故障过渡电阻(已折合到 T_N 或 L_N 副方);

R_N ——接地变压器副方电阻;

R_i ——20Hz 电源内阻, $R_i = 8 \Omega$ 。

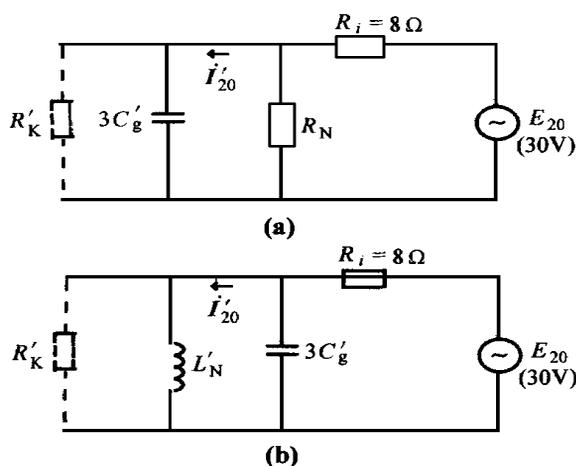


图 2 20Hz 等值电路图

3 已知参数

发电机额定电压 $U_N = 20kV$;

发电机每相对地电容 $C_g = 1\mu F, 2\mu F, 5\mu F$;

20Hz 电源电压(数字滤波之后) $E_{20} = 30V$;

中间电流互感器 1CT 变比 400/5A;

分压器 VD 分压比 500/200V。

4 接地变压器 T_N 的选型设计

选型设计目的在于确定 T_N 的变比 N 和容量 S_{TN} ,设计条件是:

1) 设正常运行时发电机三次谐波电动势 E_3 为 $E_3 = \frac{20000}{\sqrt{3}} \times 10\% = 1155V$

在 E_3 作用下,接地变压器原边有三次谐波持续电流 I_3 , T_N 不致过载。

2) 为限制动态过电压,应使 $R_N \times N^2 \geq 1/3 C_g$ 。

3) 作为经验,要求 $R_N > 1$,这有利于减小 20Hz 电源的正常负荷和提高接地保护灵敏度。

首先计算由 E_3 作用,在 T_N 原边流过的电流 I_3 ,为此画出发电机三次谐波等值电路(图 3)。

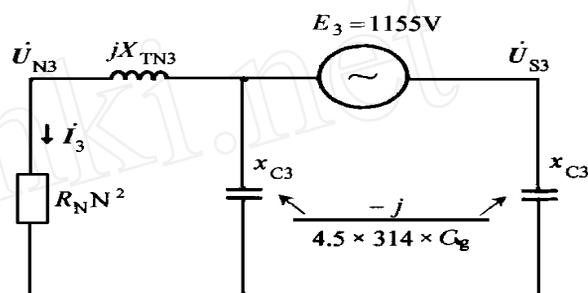


图 3 三次谐波等值电路

由于 T_N 尚未选定,它的三次谐波漏电抗 X_{TN3} 只能暂予忽略不计,即设 $X_{TN3} = 0$,影响很小。

发电机三相对地三次谐波容抗(不计机端外接各元件电容)分接于机端和中性点,为 X_{C3} , $X_{C3} = 1/0.5 \times 3 \times 3 C_g = 1/4.5 \times 314 \times C_g$

当 $C_g = 1 \times 10^{-6}F, 2 \times 10^{-6}F, 5 \times 10^{-6}F$ 时有 $X_{C3} = 708, 354, 142$

发电机三相对地工频总容抗 X_C 为 $X_C = 1/3 \times 3 C_g = 1062, 531, 212$

试选 $N = \frac{20000}{\sqrt{3}} / 600 = 19.24$

根据动态过电压要求, $R_N \times N^2 \geq X_C$, 取

$R_N \times N^2 = 1000, 500, 200$

则有 $R_N = 2.7 (C_g = 1\mu F), 1.35 (C_g = 2\mu F), 0.54 (C_g = 5\mu F)$

由此可见,对于 $C_g = 1\mu F$ 或 $2\mu F$ 的发电机, R_N 已大于 1;

但 $C_g = 5\mu F$ 时, R_N 仅 0.54,为此宜减小 N ,重选 $N = \frac{20000}{\sqrt{3}} / 1000 = 11.55$, 则 $R_N = 200 /$

$(11.55)^2 = 1.5 > 1.0$ 。(T_N 副方电压 1000V 安全否?)

设 $X_{TN3} = 0$, 在 E_3 作用下计算得接地变压器的 \dot{U}_{N3} 和 \dot{I}_3 (图 3), 则按发电机正常运行时由于 E_3 使接地变压器承受的负荷为

$$\begin{aligned} S_{TN3} &= U_{N3} \times I_3 = 295.84 \text{VA} (C_g = 1\mu\text{F}) \\ &= 578.98 \text{VA} (C_g = 2\mu\text{F}) \\ &= 1489.60 \text{VA} (C_g = 5\mu\text{F}) \end{aligned}$$

考虑到正常运行中, 外加 20Hz 电源在接地变压器中产生的电流更小, 所以正常运行中要求 S_{TN} S_{TN3} 。在机端发生金属性单相接地故障时, T_N 中将

流过工频电流为 I_1 , $I_1 = \frac{20000}{\sqrt{3}} / R_N N^2 = 11.54 \text{A} (C_g = 1\mu\text{F})$, $23.09 \text{A} (C_g = 2\mu\text{F})$, $57.7 \text{A} (C_g = 5\mu\text{F})$, 因为高阻接地方式下, 单相接地保护动作于跳闸灭磁, 考虑到接地变压器 10 秒内流过 $15 I_{TN}$ 仍是安全的, 所以按 $I_1 / 15 = 0.769 \text{A} (C_g = 1\mu\text{F})$; $1.54 \text{A} (C_g = 2\mu\text{F})$; $3.85 \text{A} (C_g = 5\mu\text{F})$ 来选择 S_{TN} , 即

$$S_{TN} = \frac{20000}{\sqrt{3}} \times \frac{I_1}{15} = 8.9 \text{kVA} (C_g = 1\mu\text{F}), 18 \text{kVA} (C_g = 2\mu\text{F}), 45 \text{kVA} (C_g = 5\mu\text{F})$$

最终选定接地变压器的容量 S_{TN} 和变比 N 为

$$\text{当 } C_g = 1\mu\text{F} \text{ 时, } S_{TN} = 10 \text{kVA}, N = \frac{20000}{\sqrt{3}} / 600。$$

$$C_g = 2\mu\text{F} \text{ 时, } S_{TN} = 20 \text{kVA}, N = \frac{20000}{\sqrt{3}} / 600。$$

$$C_g = 5\mu\text{F} \text{ 时, } S_{TN} = 50 \text{kVA}, N = \frac{20000}{\sqrt{3}} / 1000。$$

正常运行时 $S_{TN} \gg S_{TN3}$

5 消弧线圈 L_N 的选型设计

发电机中性点经消弧线圈接地可采用两种参数, 即

1) 欠补偿方式 $L_N > 1/3 \times 3 C_g (I_C - I_L < 1\text{A})$

2) 谐振接地方式 L_N 消弧线圈有电阻 R_L (或适当外加小电阻), 此时 $R_L + j L_N$ 与 $-j(1/3 C_g)$ 的并联总阻抗为 Z_N 。当 $L_N = (3 C_g)^{-1}$ 时

$$\begin{aligned} Z_N &= \frac{(R_L + j L_N)(-j/3 C_g)}{R_L + j(L_N - 1/3 C_g)} \\ &= \frac{1}{R_L} \left(\frac{L_N}{3 C_g} - j \frac{R_L}{3 C_g} \right) = \frac{L_N}{3 R_L C_g} - j \frac{1}{3 C_g} \\ &= \frac{1}{9^2 C_g^2 R_L} - j \frac{1}{3 C_g} \frac{1}{9^2 C_g^2 R_L} \quad (\text{阻性}) \end{aligned}$$

因为 $C_g^2 R_L$ 很小, 使 Z_N 呈现很大阻值, 有利于

提高单相接地保护的灵敏度。最终选择 $L_N = 1/3^2 C_g$, 则有 $L_N = 3.382 \text{H} (C_g = 1\mu\text{F})$; $1.691 \text{H} (C_g = 2\mu\text{F})$; $0.675 \text{H} (C_g = 5\mu\text{F})$; $R_L 50 \sim 100$

消弧线圈二次绕组的匝数选择即一、二次匝数比 N 的选择与接地变压器变比选择相同。

6 计算经 R_K 发生单相接地故障时的 20Hz 电流 I_{20}

图 1(a)、1(b)和图 2(a)、2(b)中, $R_K = 1\text{k}$ 、 5k 、 10k 时, 计算 $C_g = 1\mu\text{F}$ 、 $2\mu\text{F}$ 、 $5\mu\text{F}$ 条件下的 20Hz 电流 I_{20} 。

1) 发电机中性点经接地变压器电阻接地的 I_{20} 大小(表 1)

表 1 I_{20} (A) 大小, 中性点 $R_N N^2$ 接地

R_K (k)	1	5	10
C_g (μF)			
1 ($N = 19.24$)	2.378	2.607	2.635
2 ($N = 19.24$)	2.570	2.799	2.846
5 ($N = 11.55$)	2.697	2.861	2.860

2) 发电机中性点经消弧线圈 ($L_N = 1/3^2 C_g$) 接地的 I_{20} 大小(表 2)

表 2 I_{20} (A) 大小, 中性点谐振接地

R_K (k)	1	5	10
C_g (μF)			
1 ($N = 19.24$)	3.223	1.099	0.603
2 ($N = 19.24$)	3.223	1.099	0.603
3 ($N = 11.55$)	1.935	0.660	0.362

图 2(a)和 2(b)中 C_g 、 L_N 、 R_K 均为折合到 T_N 或 L_N 副方的数值, 当 T_N 或 L_N 的变比均为 N 时,

$$C_g = C_g N^2; L_N = L_N / N^2; R_K = R_K / N^2。$$

I_{20} 经中间互感器 1CT(400/5A) 得 I_{SEF} , 再经数字滤波后, 得 20Hz 的正弦电流 I_{20} 。

由 20Hz 外加电源 G[图 1(a)] 经带通滤波器和分压器 VD(500/200V), 得 U_{SEF} , 再经数字滤波后, 得 20Hz 正弦电压 U_{20} 。

测量 U_{20} 和 I_{20} 大小, 结合各中间变换环节, 推算 R_K 大小, 当 $R_K < R_{Kop}$, 接地保护动作。

R_{Kop} 有两挡, 大定值作用于信号, 小定值作用于延时跳闸。

当 I_{20} (亦即 I_{SEF}) 很大时, 不经数字滤波环节, 也不推算 R_K 大小, 直接作用于延时跳闸。

当 U_{20} 和 I_{20} 很小, 或发电机组的工作频率低于 40Hz、或保护装置有故障时, 接地保护被闭锁。

7 利用 U_{20} 和 I_{20} , 计算过渡电阻 R_K 的大小

对于保护接于中性点侧的定子一点接地保护, 其一次侧过渡电阻 R_K 计算如下:

$$R_K = \frac{K_U}{K_I} \times N_V^2 \times R_{K'} = K_R \times R_K$$

式中 K_U 为中间电压变换器的变比;

K_I 为中间电流变换器的变比;

$R_{K'}$ 为微机保护计算得到的电阻值();

N_V 为中性点接地变压器(或消弧线圈)的变

比。

K_R 为中间电阻变换系数

$$K_R = \frac{K_U}{K_I} \times N_V^2 = \frac{500/200}{400/5} \times \left(\frac{20000/\sqrt{3}}{600} \right)^2 = 11.57$$

因此有 $R_K = 11.57 R_{K'}$

即一次电阻为二次计算电阻的 11.57 倍。

20Hz 定子一点接地保护实际上仅在有限的频率范围内计算的电阻才是有效的, 其频率范围与所采用的滤波器有关。要求有效频率范围能达到 $f = 40 \sim 55\text{Hz}$, 在发电机启停机过程中, 只要超出这个范围就不计算 R_K 值, 而靠接地过流保护动作。

[参考文献]

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京: 中国电力出版社, 1998.

收稿日期: 1999-03-15

作者简介: 王维俭(1930-), 男, 教授, 博导, 长期从事大机组保护教学及科研工作; 徐振宇(1954-), 男, 华北电力大学博士, 现在清华大学电机系博士后流动站从事继电保护研究; 张振华(1967-), 男, 硕士生, 工程师, 现从事发变组保护的设计研究工作。

RESEARCH AND DISCUSSION ON SINGLE-PHASE EARTH PROTECTION OF LARGE GENERATOR STATOR

WANG Wei-jian, XU Zhen-yu, ZHANG Zhen-hua
(Qinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract To the earth protection of single-phase winding of the generator stator in Three-Gorges Power station and Qinshan Project, this paper mainly analyzes protective performance of 20Hz power supply scheme in comparing double-frequency zero-sequence voltage type scheme with 20Hz bias power supply type scheme.

Key words stator earth protection; 20Hz power supply; double-frequency zero-sequence voltage; protective performance analysis