

基于零序电压故障分量相位特征的发电机 定子单相接地故障选相

贾文超, 黄少锋

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 分析了不同中性点接地方式下定子单相接地故障时的机端三相电压特征, 指出基于相电压大小的传统选相算法在高阻接地故障时灵敏度低且可能出现误选相。为此提出了一种基于零序电压突变量 ΔU_0 和 A 相电势 E_A 相位特征的发电机定子单相接地故障选相新原理, 计算角度 $\arg(\Delta U_0/E_A)$, 根据该角度所在的相位区域判断故障相。理论分析和仿真验证表明: 该方法适用于各种中性点接地方式, 提高了选相算法的抗过渡电阻能力; 且该方法无需增加额外设备, 简单易行。

关键词: 发电机; 定子单相接地故障; 零序电压; 故障分量; 相位特征; 选相

中图分类号: TM 31

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.05.020

0 引言

发电机定子绕组单相接地故障是发电机常见的一种故障^[1]。发电机单机容量增大使得定子绕组对地电容增大, 当接地电流较大时, 将造成定子铁芯灼伤并容易发展成更严重的故障^[2-3]。国内外学者对发电机定子单相接地故障仿真和保护做了大量研究, 目前应用的主要原理有: 基于基波零序电压^[4-5]和 3 次谐波电压^[6-7]构成的 100% 定子接地保护、外加信号的注入式定子接地保护^[8-9], 这些保护在现场得到广泛应用, 但是均不能实现故障选相和定位功能。研究发电机定子单相接地故障的选相能扩展目前定子接地保护的功能, 减小检修故障工作量, 为快速排查故障提供依据。

文献[10-12]利用发电机端三相电压的大小比较实现定子接地故障选相, 考虑电压最低相为故障相。但分析表明, 发电机定子单相接地故障时, 电压最低相不仅与中性点接地方式有关, 还与定子绕组对地容抗和接地过渡电阻有关。针对中性点经配电变压器高阻接地且接地电阻值不大于定子三相对地容抗的发电机, 该方法可行, 但当发生单相经高阻接地故障时, 该选相方法的灵敏度很低; 若发电机中性点不接地或经消弧线圈接地, 当定子单相经高阻接地故障时, 会出现误选相。文献[13]分析了定子单相接地故障初始半波期间的行波信号, 利用凯伦贝尔矩阵进行了相模变换, 利用接地行波的模式特征实现故障选相。文献[14]在此基础上给出了基于电压行波信号的故障定位方法, 但发电机行波首半波持续时间很短, 保护测量困难, 并且当在工频相电

压瞬时值过零点时发生定子绕组单相接地, 该保护很难反应。

针对上述问题, 本文提出了一种利用零序电压突变量 ΔU_0 和 A 相电势 E_A 相位特征的发电机定子单相接地故障选相新方法, 并利用仿真数据进行了验证。该方法扩展了传统定子接地保护的功能, 提高了选相算法的抗过渡电阻能力。

1 发电机定子单相接地故障特征分析

1.1 定子单相接地时故障特征分析

发电机定子绕组 A 相接地故障的示意图如图 1 所示, α 为故障点到中性点的定子绕组匝数占总绕组匝数的百分比, 用以表征故障位置大小。

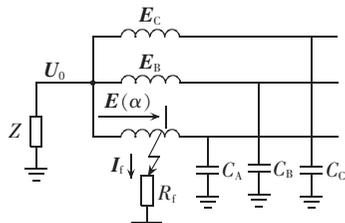


图 1 发电机定子单相接地故障原理图
Fig.1 Schematic diagram of generator stator single-phase grounding fault

图 1 中, C_A 、 C_B 和 C_C 分别为定子绕组 A、B、C 相对地电容; R_f 为接地故障电阻; $E(\alpha)$ 为故障点到中性点的电动势; I_f 为故障点的接地电流; E_A 、 E_B 和 E_C 分别为发电机定子 A、B、C 三相的电动势; U_0 为故障后的零序电压; Z 为中性点的接地阻抗, 其数值与发电机中性点接地方式有关。

正常运行时:

$$\frac{U_0^{(0)}}{Z} = -j(E_A \omega C_A + E_B \omega C_B + E_C \omega C_C) - j\omega C_{C\Sigma} U_0^{(0)} \quad (1)$$

其中, $U_0^{(0)}$ 为故障前的零序电压; $C_{C\Sigma}$ 为发电机三相对地总电容。

收稿日期: 2015-08-20; 修回日期: 2016-04-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016-MS87)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016MS87)

发生单相接地故障后,忽略分布电容产生的暂态电压分量,仅考虑基波电压分量,由图1可得:

$$U_0 + E(\alpha) = I_f R_f \quad (2)$$

$$I_f = - \left[j(E_A \omega C_A + E_B \omega C_B + E_C \omega C_C) + jU_0 \omega C_{C\Sigma} + \frac{U_0}{Z} \right] \quad (3)$$

联立式(1)~(3)可得:

$$\Delta U_0 = U_0 - U_0^{(0)} = - \frac{E(\alpha) + U_0^{(0)}}{R_f/Z + 1 + j\omega C_{C\Sigma} R_f} \quad (4)$$

其中, ΔU_0 为故障后零序电压的突变量。

当发电机参数三相对称时,正常运行时产生的零序电压 $U_0^{(0)} = 0$ 。当发电机三相电压不对称时,由式(4)分析可得:正常运行时产生的零序电压 $U_0^{(0)}$ 对故障后零序电压突变量 ΔU_0 的影响与故障位置有关。

当故障位置 α 较小时, $U_0^{(0)}$ 的影响较大,但单相接地故障所允许的最大过渡电阻小,传统的低电压选相可正确判别。当故障位置 α 较大时,取 $\alpha > 40\%$,正常运行时的零序电压 $U_0^{(0)}$ 已远远小于故障位置绕组的合成电势 $E(\alpha)$,可以忽略 $U_0^{(0)}$ 对 ΔU_0 的影响。

当故障位置 $\alpha > 40\%$ 时,式(4)可近似表示为:

$$\Delta U_0 = U_0 - U_0^{(0)} \approx - \frac{E(\alpha)}{R_f/Z + 1 + j\omega C_{C\Sigma} R_f} \quad (5)$$

发电机定子绕组单相接地故障时,传统分析均假设 $E(\alpha) = \alpha E_A$,考虑到电动势 $E(\alpha)$ 的相位角 θ ,本文定义 $E(\alpha) = \alpha E_A (1 + j \tan \theta)$,代入式(5)可得:

$$\Delta U_0 = - \frac{\alpha E_A (1 + j \tan \theta)}{R_f/Z + 1 + j\omega C_{C\Sigma} R_f} \quad (6)$$

忽略正常运行时的零序电压和发电机定子绕组的压降,则机端三相电压表达式为:

$$U_A = E_A + U_0 = \left[1 - \frac{\alpha(1 + j \tan \theta)}{R_f/Z + 1 + j\omega C_{C\Sigma} R_f} \right] E_A \quad (7)$$

$$U_B = E_B + U_0 = \left[e^{-j120^\circ} - \frac{\alpha(1 + j \tan \theta)}{R_f/Z + 1 + j\omega C_{C\Sigma} R_f} \right] E_A \quad (8)$$

$$U_C = E_C + U_0 = \left[e^{j120^\circ} - \frac{\alpha(1 + j \tan \theta)}{R_f/Z + 1 + j\omega C_{C\Sigma} R_f} \right] E_A \quad (9)$$

1.2 不同中性点接地方式时机端电压分析

1.2.1 中性点经高阻接地方式

当中性点经接地变压器接地时 $Z = R_N$, R_N 为接地变压器负载电阻的一次值。为使间歇性单相接地故障产生的尖峰过电压小于 2.6 倍的额定电压,变压器负载电阻设计原则为:其折算到一次侧的阻值应不大于发电机定子侧系统对地电容的容抗^[15]。

一般按照发电机单机运行时取:

$$R_N = 1 / [\omega(C_{C\Sigma} + C_{B\Sigma})] \quad (10)$$

其中, $C_{B\Sigma}$ 为发电机外部连接设备的三相对地总电容。

将 $Z = R_N$ 代入式(7)~(9),比较机端三相电压的有效值得:

$$|U_B|^2 - |U_A|^2 = \left\{ \frac{\alpha[(3/R_N - \sqrt{3}\omega C_{C\Sigma})R_f + 3]}{(R_f/R_N + 1)^2 + (\omega C_{C\Sigma} R_f)^2} + \frac{\alpha \tan \theta [3\omega C_{C\Sigma} R_f + \sqrt{3}(R_f/R_N + 1)]}{(R_f/R_N + 1)^2 + (\omega C_{C\Sigma} R_f)^2} \right\} |E_A|^2 \quad (11)$$

$$|U_C|^2 - |U_B|^2 = \frac{2\sqrt{3}\alpha[\omega C_{C\Sigma} R_f - \tan \theta (R_f/R_N + 1)]}{(R_f/R_N + 1)^2 + (\omega C_{C\Sigma} R_f)^2} |E_A|^2 \quad (12)$$

文献[10-11]指出,对于中性点经高阻接地方式,当发电机负载电阻 $R_N \leq 1/[\omega(C_{C\Sigma} + C_{B\Sigma})]$ 时,故障相电压最低,但上述结论忽略了绕组合成电势的相位角。目前,大型发电机多采用分支结构,其绕组合成电势既可能超前相电势,也可能滞后于相电势。当绕组合成电势滞后于相电势,即 θ 为负值时,由式(11)可得,可能出现 $|U_B| < |U_A|$ 。

文献[1]指出,某些大型发电机,如二滩水电机组,已不按 $R_N \leq X_{C\Sigma}$ 设计,即不由动态过电压条件来决定 R_N ,完全按照尽量减小单相接地电流来选择,此时 R_N 值较大。由发电机中性点经接地变压器接地,取其负载电阻 $R_N = 1.5 X_{C\Sigma}$,其中 $X_{C\Sigma}$ 为发电机定子绕组和外部连接设备的三相对地容抗,绕组合成电势 $E(\alpha)$ 的相位角 $\theta = -10^\circ$,以机端 A 相经过渡电阻接地短路为例,根据式(7)~(9)计算机端三相电压,发电机机端三相电压大小与接地故障电阻的关系曲线如图2所示,其中纵坐标 U/E_A 表示机端三相电压的标幺值, U 、 E_A 分别表示相电压和 A 相电势的有效值,横坐标 $R_f/X_{C\Sigma}$ 表示接地故障电阻与三相对地容抗的比值。

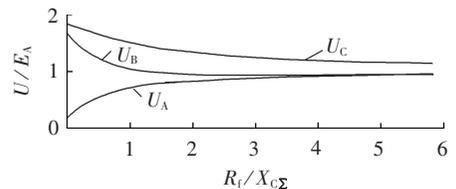


图2 中性点经高阻接地时三相电压与故障电阻的关系

Fig.2 Relationship between three-phase voltage and transition resistance when neutral point is grounding via high resistance

由式(11)、(12)和图2分析可得:当不完全按照 $R_N \leq X_{C\Sigma}$ 设计时,经高阻单相接地时, A 相和 B 相电压大小比较接近,基于相电压大小的选相算法可能难以识别故障相别。

1.2.2 中性点不接地方式

当中性点不接地时,将 $Z = \infty$ 代入式(7)~(9),比较机端三相电压的有效值得:

$$|U_B|^2 - |U_A|^2 = \left[\frac{\sqrt{3}\alpha(\sqrt{3} - \omega C_{C\Sigma} R_f)}{1 + (\omega C_{C\Sigma} R_f)^2} + \frac{\alpha \tan \theta (3\omega C_{C\Sigma} R_f + \sqrt{3})}{1 + (\omega C_{C\Sigma} R_f)^2} \right] |E_A|^2 \quad (13)$$

$$|U_C|^2 - |U_B|^2 = \frac{2\sqrt{3}\alpha(\omega C_{G\Sigma}R_f - \tan\theta)}{1 + (\omega C_{G\Sigma}R_f)^2} |E_A|^2 \quad (14)$$

发电机中性点不接地,考虑绕组合成电势 $E(\alpha)$ 的相位角 $\theta=0^\circ$,以机端 A 相经过渡电阻接地短路为例,根据式(7)—(9)计算机端三相电压,发电机机端三相电压大小与接地故障电阻的关系曲线如图 3 所示。

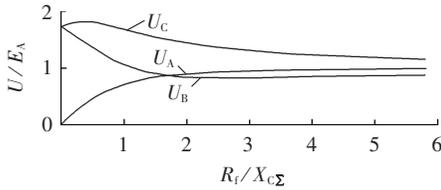


图 3 中性点不接地时三相电压与故障电阻的关系

Fig.3 Relationship between three-phase voltage and transition resistance when neutral point is not grounded

由式(13)、(14)和图 3 分析可得:中性点不接地方式下,发电机 A 相经过渡电阻接地时,电压最低相不一定是故障相,其故障点绕组合成电势的相角和接地电阻大小有关。当 $\theta=0^\circ$,过渡电阻和定子绕组总对地容抗比值小于 $\sqrt{3}$ 时,故障相电压最低;当接地过渡电阻和定子绕组总对地容抗比值大于 $\sqrt{3}$,即 $R_f/X_{C\Sigma} > \sqrt{3}$ 时, $|U_B| < |U_A|$, B 相(非故障相)电压值最低。当绕组合成电势相位滞后于相电势时,所需接地电阻值更小,就可能出现非故障相电压值最低。高阻接地故障时,基于相电压大小的选相元件会出现误选相。

中性点经消弧线圈接地时 $Z=jX_N$, X_N 为消弧线圈的电抗。发电机一般采用欠补偿方式,定义补偿度系数 $v=1/(\omega^2 L_N C_{G\Sigma})$ 。发电机 A 相经过渡电阻接地时,机端三相电压的特征相当于中性点不接地时发电机总对地电容减小为 $C'_{G\Sigma}=(1-v)C_{G\Sigma}$ 。中性点经消弧线圈接地时,电压的故障特征与中性点不接地相似,仅需将中性点不接地方式的 $C_{G\Sigma}$ 替换为 $C'_{G\Sigma}=(1-v)C_{G\Sigma}$ 。

综合几种中性点接地方式可得:发电机 A 相经过渡电阻接地时,电压最低相不一定是故障相,其与发电机中性点接地方式、定子绕组对地电容和接地电阻大小有关。基于相电压大小的选相元件在高阻接地故障时灵敏度低,且可能出现误选相。

2 基于电压相位特征的故障选相

2.1 启动元件

当接地过渡电阻很大、接地位置非常靠近中性点时,基波零序电压可能比较小,会影响电压相位的精度,设置基波零序电压的下限 U_{0min} ,只有超过 U_{0min} 时才计算相位。 U_{0min} 可以取定子接地保护动作门槛

值,即 15% 的额定电压。

2.2 定子单相接地时电压相位特征

相电压选相元件在高阻接地故障时灵敏度较低,甚至出现误选相。为了有效实现故障选相,本文分析了定子绕组接地故障时零序电压和相电势的相位关系,提出了一种基于电压相位特征的故障选相方法。

定义零序电压突变量 ΔU_0 和 A 相电势 E_A 的相位角 ϕ_m 为:

$$\phi_m = \arg \frac{\Delta U_0}{E_A} \quad (15)$$

其中,发电机 A 相电势 E_A 不能直接测量,可由 $E_A = \frac{(U_A - U_B)e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}}$ 计算得到。

取基波零序电压保护的定值为 15 V,由式(5)可得,在发电机中性点不接地情况下,机端单相接地短路时能反应的最大过渡电阻 $R_f \approx 6.67X_{C\Sigma}$,故取过渡电阻 R_f 的分析范围为 $[0, 6.7X_{C\Sigma}]$ 。

以定子绕组 A 相接地为例,将式(6)代入式(15)可得:

$$\phi_m = \arg \frac{-\alpha \times e^{j\theta}}{R_f/Z + 1 + jR_f/X_{C\Sigma}} = 180^\circ + \theta - \arg(R_f/Z + 1 + jR_f/X_{C\Sigma}) \quad (16)$$

过渡电阻 R_f 取 $[0, 6.7X_{C\Sigma}]$ 时,分析不同中性点接地方式时 ϕ_m 的变化范围。

(1)中性点经高阻接地方式。

$$\phi_m \text{ 范围为 } \left[180^\circ + \theta_1 - \arctan \frac{R_f/X_{C\Sigma}}{1 + R_f/R_N}, 180^\circ + \theta_2 \right]。$$

其中, θ_1 表示绕组电势滞后于相电势的角度; θ_2 表示绕组电势超前于相电势的最大角度。

为了抑制尖峰过电压,一般按照 $R_N \leq X_{C\Sigma}$ 设计,此时 ϕ_m 范围约为 $[135^\circ + \theta_1, 180^\circ + \theta_2]$ 。其中, $R_f=0$ 时对应 $\phi_m = \arg(\Delta U_0/E_A)$ 趋向于 $180^\circ + \theta_2$; 当 $R_f/X_{C\Sigma}$ 趋向于 6.7 时,对应 $\phi_m = \arg(\Delta U_0/E_A)$ 趋向于 $135^\circ + \theta_1$ 。

即使不按照 $R_N \leq X_{C\Sigma}$ 设计,考虑 $R_N = 3X_{C\Sigma}$ 时, $\arg(R_f/Z + 1 + jR_f/X_{C\Sigma}) \leq 70^\circ$, 即 ϕ_m 范围为 $[110^\circ + \theta_1, 180^\circ + \theta_2]$ 。

(2)中性点经消弧线圈接地。

$$\phi_m \text{ 范围为 } \left[180^\circ + \theta_1 - \arctan \frac{(1-v)R_f}{X_{C\Sigma}}, 180^\circ + \theta_2 \right]。$$

考虑发电机采用欠补偿方式,取补偿度系数 $v = 1/(\omega^2 L_N C_{G\Sigma}) = 0.8$, $\arctan[(1-v)R_f/X_{C\Sigma}] \leq 55^\circ$, 即 ϕ_m 的范围为 $[125^\circ + \theta_1, 180^\circ + \theta_2]$ 。

(3)中性点不接地方式。

ϕ_m 范围为 $[180^\circ + \theta_1 - \arctan(R_f/X_{C\Sigma}), 180^\circ + \theta_2]$, 即 $[100^\circ + \theta_1, 180^\circ + \theta_2]$ 。

单相接地故障时,零序电压突变量 ΔU_0 和 A 相电势 E_A 的相位角 ϕ_m 与故障点绕组合成电势的相位

θ 有关。

大型汽轮发电机转速较高,多采用三相隐极式同步发电机,每分支两绕组,绕组按 60° 相带分布。对于每相两分支按 60° 相带分布的大型汽轮发电机,定子绕组槽数为 z ,极对数为 p ,相数为 m ,每极每相槽数 $q = z / (2pm)$,发电机电角度 $\beta = p \times 360^\circ / z$ 。超前相电势的绕组合成电动势 $E(\alpha)$ 与相电动势 E_φ 的相位 $\theta(\alpha)$ 和故障位置 α 的关系为:

$$\theta(\alpha) = (180^\circ - \beta q \alpha) / 2 - 60^\circ = 30^\circ (1 - \alpha) \quad (17)$$

其绕组合成电势的角度极限值为 30° ,且当 α 大于 40% 时, θ 小于 20° ,故 θ_2 取合成电势相位超前于相电势, $\theta_2 = 20^\circ$ 。

θ 的大小随故障位置的增大而减小,机端故障时绕组合成电势的相位角度为 0° 。 θ_1 的取值应考虑合成电势相位滞后于相电势。上述取 $R_f / X_{c\Sigma} = 6.7$ 分析时,为机端故障, θ_1 为 0 。

由于 θ_1 和单相接地所承受的最大过渡电阻都与故障位置 α 有关。前面分析时考虑任意位置故障时过渡电阻最大值均为 $R_f / X_{c\Sigma} = 6.7$,考虑到所承受过渡电阻和故障位置的关系,故障位置为 α 时,所承受的最大过渡电阻为 R_{fmax} , θ_1 的取值应为:

$$\theta_1 = \theta(\alpha) - \arg(R_{fmax} / Z + 1 + jR_{fmax} / X_{c\Sigma}) + \arg(6.7X_{c\Sigma} / Z + 1 + j6.7)$$

对 3 种中性点接地方式分析得 θ_1 的最大取值为 $\theta_1 = -5^\circ$ 。

大型水轮发电机转速较慢,多为凸极发电机,极对数较多,每极每相槽数 q 一般为分数槽绕组,范围为 2~4;由于定子绕组每分支匝数较多,故定子绕组合成电势与相电势的相角差相比于汽轮机小得多。

同理可得 B 相和 C 相接地故障时 ϕ_m 的变化范围。

由上述分析可得,不同故障相时零序电压突变量和发电机 A 相电势的相位关系如表 1 所示。

表 1 不同故障相时 ΔU_0 和 E_A 的相位关系
Table 1 Phase angle between ΔU_0 and E_A for different faulty phases

中性点 接地方式	ϕ_m		
	A 相接地	B 相接地	C 相接地
高阻接地	$105^\circ \sim 200^\circ$	$-15^\circ \sim 80^\circ$	$-135^\circ \sim -40^\circ$
消弧线圈接地	$120^\circ \sim 200^\circ$	$0^\circ \sim 80^\circ$	$-125^\circ \sim -40^\circ$
不接地	$95^\circ \sim 200^\circ$	$-25^\circ \sim 80^\circ$	$-145^\circ \sim -40^\circ$

2.3 选相算法及其性能分析

根据零序电压突变量 ΔU_0 和 A 相电势 E_A 的相位关系,给出故障选相方法如下。

a. 由基波零序电压保护作为启动元件,检测定子绕组单相接地故障。

b. 当基波零序电压和三次谐波电压保护均动作时,检测为靠近中性点侧故障,利用低电压保护选相。

c. 仅基波零序电压保护动作,计算零序电压突

变量 ΔU_0 和 E_A 的相位角。当 $90^\circ \leq \arg(\Delta U_0 / E_A) \leq 210^\circ$ 时,表明 A 相接地;当 $-30^\circ \leq \arg(\Delta U_0 / E_A) \leq 90^\circ$ 时,表明 B 相接地;当 $-150^\circ \leq \arg(\Delta U_0 / E_A) \leq -30^\circ$ 时,表明 C 相接地。

画出以 E_A 为基准相量的选相区域图,如图 4 所示,其中故障区域对应最严重的中性点不接地方式,零序电压突变量 ΔU_0 落在不同的相位区,对应于不同的故障相。

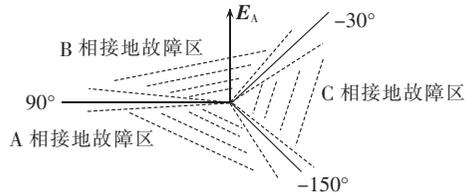


图 4 选相区域图

Fig.4 Diagram of phase-selection zones

对发电机中性点不接地、经高阻接地和经消弧线圈接地 3 种方式下选相算法的灵敏度进行分析。其中,设消弧线圈的补偿度系数 $v = 0.75$,接地变压器的负载电阻 $R_N = 1.1X_{c\Sigma}$ 。取绕组合成电势 $E(\alpha)$ 与相电动势 E_φ 的相位 $\theta = 0^\circ$,过渡电阻 R_f 的分析范围为 $[0, 6.7X_{c\Sigma}]$ 。

根据式 (16) 计算相位角 ϕ_m ,不同中性点接地方式下 ϕ_m 与接地故障电阻的关系曲线如图 5 所示。

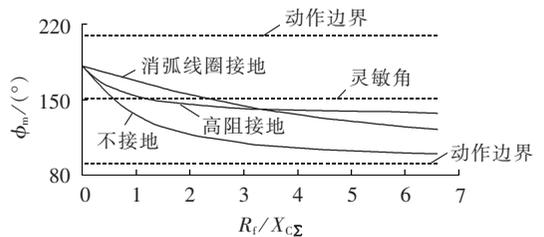


图 5 不同中性点接地方式下 ϕ_m 与故障电阻的关系

Fig.5 Curve of ϕ_m vs. transition resistance for different neutral grounding modes

由上述分析可得,基于零序电压突变量相位特征的选相算法特点如下。

(1) 中性点的接地方式直接影响选相算法的灵敏度,中性点经高阻接地方式的灵敏度与中性点接地电阻值有关,当按照 $R_N \leq X_{c\Sigma}$ 设计时,其灵敏度最高;带消弧线圈补偿的接地方式比中性点不接地的灵敏度高。

(2) 单相经高阻接地故障时,该选相算法能可靠判别。

(3) 发电机自身参数不对称影响相位的计算精度,其影响与故障位置 α 有关。故障位置 α 较大时,影响较小,可忽略。

3 仿真分析

为验证上述故障选相算法的可行性,本文基于

EMTP 建立了发电机分布参数电路模型^[1],即将定子每相绕组划分为 n 个单元电路,定子绕组的电阻、漏电感和对地分布电容都均分到各单元中,各单元绕组的电势幅值相等,相位考虑定子绕组按 60° 相带分布,本文取 $n=5$,如图 6 所示。

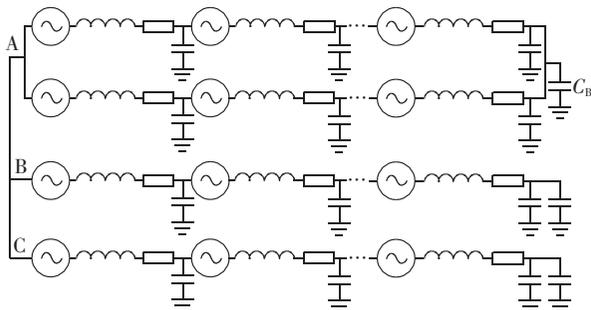


图 6 发电机分布参数电路模型

Fig.6 Generator model with distributed parameters

发电机仿真参数^[1]:额定容量 $P_N=550$ MW,额定电压 $U_N=18$ kV,定子绕组每相电阻 $R_s=3.6$ m Ω ,每相电感 $L_s=227.05$ μ H,每相对地电容 $C_C=1.686$ μ F。取发电机出口母线相连的其他设备每相对地电容 $C_T=0.2$ μ F,高阻接地 $R_N=1\ 125.7$ Ω ($R_N=2X_{C\Sigma}$),消弧线圈电感 $L_N=0.8\times\omega L_N=1/(3\omega C_C)=2.504$ (H)。

考虑 A 相绕组电势滞后于相电势的分支上发生故障,故障位置 $\alpha=80\%$,接地电阻 R_f 分别为 100 Ω 、 500 Ω 、 $2\ 000$ Ω 、 $5\ 000$ Ω 、 10 k Ω 、 20 k Ω ,考虑发电机三相参数平衡和不平衡 2 种情况,不平衡时取 $C_A=C_B$, $C_C=0.95C_A$,针对 3 种中性点接地方式进行仿真分析,结果如表 2 所示。

由表 2 可以得出如下结论。

(1)利用低电压选相方法,以三相参数平衡的情况为例,采用中性点经高阻接地方式,过渡电阻大于 $5\ 000$ Ω 时出现误选相;中性点不接地方式,过渡电阻大于 $2\ 000$ Ω 时出现误选相,结果表明,发生高阻接地故障时,利用低电压选相方法在中性点不接地和经高阻接地方式都可能出现误选相。

(2)基于零序电压突变量 ΔU_0 和 A 相电势 E_A 相位角 ϕ_m 的选相方法,适用于各种中性点接地方式。对于高阻接地故障,中性点经高阻接地和经消弧线圈接地方式均能够可靠选相。中性点不接地方式下,低电压选相方法在接地电阻 2 k Ω 时出现误选相,当接地电阻取 10 k Ω 时, ϕ_m 接近动作边界,但相比低电压选相方法,新的选相算法大幅提高了抗过渡电阻能力。

(3)当故障位置远离中性点时,发电机自身参数不平衡对算法的影响较小。仿真结果与上述理论分析吻合。

表 2 仿真计算结果

Table 2 Simulative results

中性点 接地方式	发电机 参数	接地电阻 值/ Ω	$\frac{U_A}{U_B}$	$\arg \frac{\Delta U_0}{E_A}$	选相 结果		
经配电 变压器 高阻接地	三相平衡	100	0.260	168.16	A 相		
		500	0.660	150.93	A 相		
		2000	0.980	134.45	A 相		
		5000	1.010	128.32	A 相		
		10000	1.010	125.88	A 相		
	$C_C=0.95C_A$	20000	1.010	124.52	A 相		
		500	0.650	151.61	A 相		
		5000	1.002	129.15	A 相		
		不接地	三相平衡	100	0.240	167.49	A 相
				500	0.750	143.21	A 相
2000	1.170			109.82	A 相		
5000	1.080			95.44	A 相		
10000	1.038			90.59	A 相		
$C_C=0.95C_A$	20000	1.020	86.80	误选			
	500	0.730	144.32	A 相			
	5000	1.080	96.36	A 相			
	经消弧 线圈接地	三相平衡	100	0.190	174.31	A 相	
			500	0.360	168.15	A 相	
2000			0.710	160.80	A 相		
5000			0.870	158.34	A 相		
10000			0.930	157.35	A 相		
$C_C=0.95C_A$		20000	0.970	156.82	A 相		
		500	0.345	170.91	A 相		
		5000	0.860	161.48	A 相		

4 结论

本文基于发电机定子绕组单相接地故障时零序电压突变量 ΔU_0 和 A 相电势 E_A 的相位特征,提出了一种定子绕组单相接地故障选相的新方法,该方法完善了目前定子接地保护的功能,为快速故障检修提供依据。

该选相算法适用于各种中性点接地方式,对于中性点经高阻接地和经消弧线圈接地方式,高阻接地故障均能可靠选相。对于中性点不接地方式,该方法与低电压选相方法相比,大幅提高了抗过渡电阻能力。同时该方法无需增加额外设备,简单易行。仿真数据验证了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2002:223-245.
- [2] 党晓强,邵能灵,王海田,等. 大型水轮发电机定子接地方式及其继电保护的相关问题分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):25-29.
DANG Xiaoqiang, TAI Nengling, WANG Haitian, et al. Analysis of stator grounding modes of large-scale hydro-generator and its protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 25-29.
- [3] 孙宇光,黄子果,李晖,等. 大型发电机内部故障分析与计算机软件的开发和应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):151-157.
SUN Yuguang, HUANG Ziguang, LI Hui, et al. Development and

- application of internal fault analysis and calculation software for large-scale generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(2):151-157.
- [4] TAI Nengling, STENZEL J. Differential protection based on zero-sequence voltages for generator stator ground fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007,22(1):116-121.
- [5] 姚晴林,郭宝甫,解波,等. 大型发电机基波零序过流过压保护新方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008,36(14):1-3.
YAO Qinglin, GUO Baofu, XIE Bo, et al. Research on zero-sequence fundamental over-current and over-voltage protection of large generator[J]. Power System Protection and Control, 2008,36(14):1-3.
- [6] 卢琪. 提高三次谐波电压式定子接地保护动作可靠性的措施[J]. 电力自动化设备, 2008,28(1):119-121.
LU Qi. Reliability of stator grounding protection based on 3rd harmonic voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(1):119-121.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 贾文超,黄少锋,焦利霞. 双频注入式定子单相接地保护方案[J]. 电力自动化设备, 2014,34(6):158-161.
JIA Wenchao, HUANG Shaofeng, JIAO Lixia. Stator single-phase grounding protection with double-frequency injecting source [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(6):158-161.
- [10] 毕大强,王祥珩,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 Xiangheng, LI Dejie, 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.
- [11] 陈俊,刘梓洪,王明溪,等. 不依赖注入式原理的定子单相接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2013,37(4):104-107.
CHEN Jun, LIU Zihong, WANG Mingxi, et al. Location method for stator single-phase ground fault independent of injection type principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(4):104-107.
- [12] 王育学,尹项根,张哲,等. 基于接地电流的大型发电机定子接地保护及其精确定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(31):147-154.
WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A novel protection and precise location method based on grounding currents for stator ground faults of large generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(31):147-154.
- [13] 党晓强,刘俊勇,刘继春,等. 水轮发电机定子接地的行波电流差动保护与故障选相[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(7):79-83.
DANG Xiaoliang, LIU Junyong, LIU Jichun, et al. Current differential protection and faulty phase identification based on traveling waves for stator single phase to ground of hydro generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(7):79-83.
- [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.
DANG Xiaoliang, LIU Junyong, YANG Ke, et al. Location for stator single phase to ground of hydro-generators based on fault traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(23):74-78.
- [15] 毕大强,王祥珩,王维俭. 大型水轮发电机中性点接地方式的若干问题分析[J]. 电工技术学报, 2002,17(4):7-12.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Study on how to ground for the neutral point of large-sized hydro-generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002,17(4):7-12.

作者简介:



贾文超

贾文超(1984—),男,河北保定人,讲师,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:jiawenchao_snow@163.com);

黄少锋(1958—),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统微机保护等。

Phase selection based on fault component phase characteristics of zero-sequence voltage for generator stator single-phase grounding fault

JIA Wenchao, HUANG Shaofeng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The three-phase voltage characteristics of generator terminal during the stator single-phase grounding fault are analyzed for different neutral grounding modes and it is pointed out that, the traditional phase-selection algorithm may function improperly due to its lowered sensitivity during a high-impedance grounding fault. A phase-selection principle based on the zero-sequence voltage sudden change, ΔU_0 , and the phase-A potential, E_A , is proposed for the generator stator single-phase grounding fault, which calculates the angle, $\arg(\Delta U_0/E_A)$, and judges the faulty phase according to the phase zone of this angle. Theoretical analysis and simulative verification show that, without any additional equipment, this method is simple, feasible and suitable for various neutral grounding modes, and has better performance against transition resistance.

Key words: electric generators; stator single-phase grounding fault; zero-sequence voltage; fault component; phase characteristics; phase selection