

DOI: 10.7667/PSPC161504

# 大型汽轮发电机定子单相接地故障定位新方法

黄少锋, 贾文超

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 发电机定子绕组单相接地故障定位能扩展目前定子接地保护的功能, 为快速检修故障提供依据。分析了大型汽轮发电机的电动势分布特征, 推导了定子绕组电势与故障位置的关系, 给出了新的定子绕组电势表达式。分析了定子绕组单相接地故障时零序电压、三相电压的幅值变化特征, 推导了三相电压幅值变化与故障位置和接地电阻的关系。在此基础上, 提出了一种综合利用零序电压和三相电压幅值特征的定子绕组单相接地故障定位新原理。理论分析和仿真计算表明: 应用本方法能可靠识别故障位置, 且该方法不受中性点接地方式的影响。该方案仅需要零序电压和机端三相电压, 简单易行, 不需增加额外设备, 适用于高阻接地故障, 仿真数据验证了算法的可行性。

**关键词:** 汽轮发电机; 定子单相接地; 零序电压; 三相电压; 定位

## A new fault location method for stator single-phase ground fault in large turbine generator

HUANG Shaofeng, JIA Wenchao

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

**Abstract:** Fault location for stator single-phase ground fault can extend the function of stator ground fault protection, providing a reference for fast detecting the fault. The paper analyses the potential characteristics of the large turbine generator, deduces the relation between the stator winding potential fault position, and gives a new formula of winding potential. The characteristics of zero sequence voltage and three phase voltage are analyzed when stator single-phase ground fault is occurring, and the relation between three-phase voltage amplitude and fault position & grounding resistance is deduced. Therefore, a new fault location principle based on the amplitude of zero sequence voltage and three-phase voltage is proposed. The theoretical analysis and simulation show that this method can detect the fault location reliably. In addition, it is immune no matter which neutral grounding mode is used. The fault location scheme only uses zero sequence voltage and three phase voltage, is very simple, don't need additional equipment, and can be used to detect high impedance grounding fault. The simulation shows that it is feasible.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2016MS87).

**Key words:** turbine generator; stator single-phase ground fault; zero sequence voltage phase; three-phase voltage; fault location

## 0 引言

目前, 600 MW 级燃煤机组是世界多数国家火力发电的主力机组。发电机定子绕组单相接地故障是发电机的常见故障<sup>[1-2]</sup>。发电机定子单相接地故障可能造成定子铁心灼伤并容易发展成更严重的故障。

目前发电机定子单相接地保护的主要原理有: 基波零序电压保护<sup>[3-4]</sup>、3次谐波电压保护<sup>[5-6]</sup>、外加注入信号的注入式定子接地保护<sup>[7-10]</sup>, 这些保护在现场应用广泛, 但均不具备故障定位功能。

目前定子单相接地故障的检查方法为: 当基波零序电压接近 100 V 时, 判断故障位置在机端侧; 当三次谐波电压保护动作时, 判断故障位置在靠近中性点侧。但上述方法对于定子绕组单相经过渡电阻接地的故障, 故障定位困难。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2016MS87)

文献[11-12]利用行波信号实现发电机定子绕组单相接地故障定位,但行波信号受故障电压初相位和过渡电阻影响,高阻接地故障时,行波信号测量困难。文献[13]首先利用注入式保护计算接地电阻,再利用零序电压幅值计算故障点位置,原理简单,但其对于未装设注入式保护的机组不适用。文献[14]提出了一种不依赖注入信号的定子单相接地定位方法,其利用机端三相电压大小与过渡电阻有关的特征,通过最高相与次高相电压的平方差和最高相与故障相电压的平方差比值计算过渡电阻,但该方法没有考虑绕组合成电势和相电势的相位特征,定位方法不准确。

针对上述问题,本文考虑了发电机定子绕组电势的相位特征,提出了一种综合利用零序电压和机端三相电压幅值偏移特征的定子绕组单相接地故障定位新原理。基于 EMTDC 暂态仿真软件对所提方法进行了仿真分析。分析结果表明,该方案定位准确。

## 1 定子单相接地故障电压特征与故障定位

### 1.1 定子单相接地故障电压特征

假设发电机在 A 相接地前为空载对称稳态运行,三相定子绕组对地电容相等,当 A 相在距离定子绕组中性点  $\alpha$  处发生单相接地故障时,其原理图如图 1 所示。

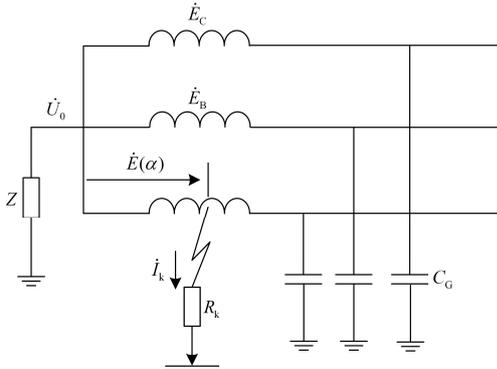


图 1 发电机定子单相接地故障原理图

Fig. 1 Diagram of stator ground fault of generator

图中:  $C_G$  表示发电机定子绕组每相对地电容值;  $R_k$  表示接地故障电阻;  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$  和  $\dot{E}_C$  分别表示发电机定子 A、B、C 三相的电动势;  $\dot{E}(\alpha)$  为故障点到中性点的电动势;  $\dot{I}_k$  为故障点的接地电流;  $Z$  表示中性点的接地阻抗,其数值与发电机中性点接地方式有关。

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:

$$\dot{U}_0 + \dot{E}(\alpha) = \dot{I}_k R_k \quad (1)$$

$$\dot{I}_k = -[(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C + 3\dot{U}_0)j\omega C_G + \frac{\dot{U}_0}{Z}] \quad (2)$$

联立式(1)、式(2)可得

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}(\alpha)}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j\omega C_{G\Sigma} R_k} \quad (3)$$

式中,  $C_{G\Sigma}$  为发电机三相对地总电容。

### 1.2 基于相电压特征的故障定位

发电机定子绕组单相接地故障时,传统分析均假设  $\dot{E}(\alpha) = \alpha \dot{E}_A$ , 即

$$\dot{U}_0 = -\frac{\alpha \dot{E}_A}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j\omega C_{G\Sigma} R_k} \quad (4)$$

故障位置  $\alpha$  的表达式为

$$\alpha = R_k / Z + 1 + j\omega C_{G\Sigma} R_k \left| \frac{\dot{U}_0}{\dot{E}_A} \right| \quad (5)$$

故障定位的关键是计算接地电阻值,对于采用注入式定子保护的机组,可利用注入信号计算接地电阻。如不采用注入式定子接地保护,文献[14]提出了一种不依赖注入信号计算接地电阻的方法,利用相电压偏移与过渡电阻的关系计算过渡电阻,对其简要说明如下。

发电机机端三相对地基波电压表达式为

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_0 = \left(1 - \frac{\alpha}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j\omega C_{G\Sigma} R_k}\right) \dot{E}_A \quad (6)$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_0 = \left(e^{-j120^\circ} - \frac{\alpha}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j\omega C_{G\Sigma} R_k}\right) \dot{E}_A \quad (7)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_0 = \left(e^{j120^\circ} - \frac{\alpha}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j\omega C_{G\Sigma} R_k}\right) \dot{E}_A \quad (8)$$

以中性点经高阻接地方式,发生 A 相接地故障为例,首先计算

$$k = \frac{|\dot{U}_C|^2 - |\dot{U}_B|^2}{|\dot{U}_C|^2 - |\dot{U}_A|^2} = \frac{2R_k}{\left[\frac{\sqrt{3}}{\omega C_{G\Sigma}} + R_k \left(\frac{\sqrt{3}}{Z} + \frac{1}{\omega C_{G\Sigma}}\right)\right]} \quad (9)$$

则接地电阻  $R_k$  的表达式为

$$R_k = \frac{\sqrt{3}}{\left(\frac{2}{k} - 1\right)\omega C_{G\Sigma} - \frac{\sqrt{3}}{Z}} \quad (10)$$

代入式(5)即可求解故障位置。

上述分析中假设  $\dot{E}(\alpha) = \alpha \dot{E}_A$ , 忽略了绕组电势

$\dot{E}(\alpha)$  与相电势  $\dot{E}_A$  间的相位关系。对于大型汽轮发电机, 其绕组合成电势和相电势间相位较大, 不能忽略考虑, 本文分析了汽轮发电机绕组合成电势相位特征, 提出了考虑绕组电势特征的故障定位改进方法。

## 2 大型汽轮发电机电势分布特征

大型汽轮发电机转速较高, 多采用三相隐极式同步发电机, 极对数  $p=1$ , 每相大多是 2 并联分支。以国内某汽轮发电机(QFSN-600-2YHG 型发电机) 为例, 其极对数  $p=1$ , 定子绕组槽数  $Q=42$ , 每极每相槽数  $q=7$ , 定子每相分支数为 2, 定子每相每分支串联匝数为 7, 绕组按  $60^\circ$  相带分布, 发电机的电角度  $\beta = \frac{p \times 360^\circ}{Q} = \frac{360}{42} = 8.57$ 。其发电机一相两分支匝电势分布图如图 2 所示。

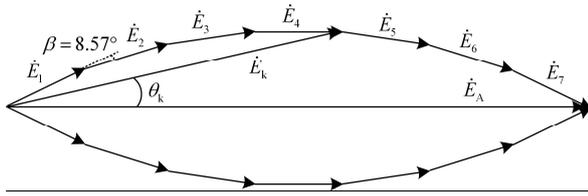


图 2 发电机匝电势分布图  
Fig. 2 Vector diagram of coils potential

定义机端相电势  $\dot{E}_A=1\angle 0^\circ$ , 假设第一分支绕组电势超前相电势, 则该绕组距中性点  $\alpha$  处的合成电势  $\dot{E}(\alpha)$  的幅值  $E(\alpha)$ 、相位  $\theta(\alpha)$  和故障位置  $\alpha$  的关系见表 1 所示。该绕组电势的相位  $\theta(\alpha)$  和故障位置  $\alpha$  的关系曲线见图 3 所示。

由图 2 发电机匝电势分布图分析可得: 当第一分支绕组距中性点  $\alpha > 14.3\%$  处发生单相接地故障时, 电动势  $\dot{E}(\alpha)$  与相电动势  $\dot{E}_\alpha$  的相位  $\theta(\alpha)$  和故障位置  $\alpha$  的关系为

$$\theta(\alpha) = (180^\circ - \beta \times q \times \alpha) / 2 - 60^\circ = 30^\circ(1 - \alpha) = \frac{\pi}{6}(1 - \alpha) \quad (11)$$

表 1 发电机电势  $\dot{E}(\alpha)$  和故障位置  $\alpha$  的关系

$\alpha$	$E(\alpha)$	$\theta(\alpha)$
1/7=14.3%	0.1495	25.71°
2/7=28.6%	0.2981	21.42°
3/7=42.9%	0.4450	17.13°
4/7=57.2%	0.5895	12.84°
5/7=71.4%	0.7307	8.58°
6/7=85.7%	0.8678	4.29°
7/7=1	1	0°

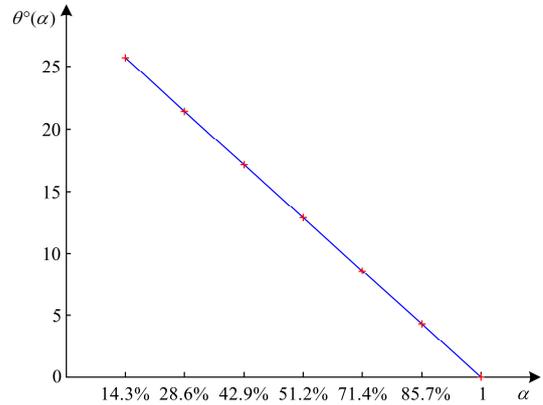


图 3 绕组电势的相位  $\theta(\alpha)$  与故障位置  $\alpha$  的关系曲线  
Fig. 3 Relation between the phase angle  $\theta(\alpha)$  and fault position  $\alpha$

同理, 可得第二分支绕组电动势的相位  $\theta(\alpha)$  和故障位置  $\alpha$  的关系为

$$\theta(\alpha) = -\frac{\pi}{6}(1 - \alpha) \quad (12)$$

发电机定子绕组单相接地故障时, 传统分析均假设  $\dot{E}(\alpha) = \alpha \dot{E}_A$ , 考虑到相位  $\theta(\alpha)$ , 本文定义  $\dot{E}(\alpha) \frac{\alpha \dot{E}_A}{\cos \theta} e^{j\theta} = \alpha \dot{E}_A (1 + j \tan \theta)$ , 则不同位置故障时计算电势和理论电势见表 2 所示。

表 2 绕组不同位置时理论电势与计算电势关系表  
Table 2 Relation between the theoretical potential and the calculative potential

$\alpha$	理论电势 $E(\alpha)$	$\alpha  \dot{E}_A $		$\frac{\alpha  \dot{E}_A }{\cos \theta}$	
		幅值	误差	幅值	误差
1/7=14.3%	0.1495	0.1429	-4.42%	0.1586	6.09%
2/7=28.6%	0.2981	0.2857	-4.15%	0.3069	2.96%
3/7=42.9%	0.4450	0.4286	-3.70%	0.4485	0.77%
4/7=57.2%	0.5895	0.5714	-3.07%	0.5861	-0.57%
5/7=71.4%	0.7307	0.7143	-2.24%	0.7224	-1.13%
6/7=85.7%	0.8678	0.8571	-1.22%	0.8596	-0.94%
7/7=1	1	1	0	1	0

当  $E(\alpha) = \alpha |\dot{E}_A|$  或  $E(\alpha) = \frac{\alpha |\dot{E}_A|}{\cos \theta}$  时, 计算电势和理论电势的误差绝对值曲线见图 4 所示。

由表 2 和图 4 分析可得: 定义绕组电势  $\dot{E}(\alpha) = \alpha \dot{E}_A (1 + j \tan \theta)$ , 当  $\alpha$  大于 20% 时, 绕组电势的模值误差比  $\dot{E}(\alpha) = \alpha \dot{E}_A$  还小, 并且该电势考虑了绕组电势的相位特征, 该绕组电势定义方法可行。

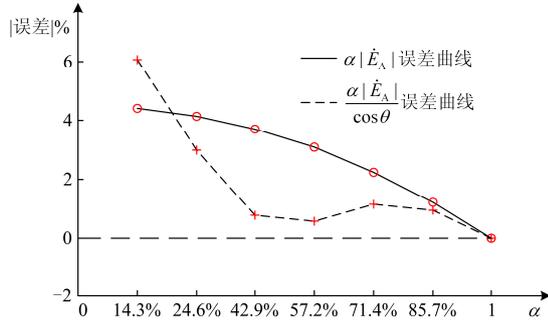


图4 两种计算方式下计算电势与理论电势的误差曲线

Fig. 4 Error of theoretical potential and the calculative potential in different calculation modes

### 3 考虑绕组电势相位的改进故障定位方法

对于大型汽轮发电机,考虑绕组电势相位特征,取  $\dot{E}(\alpha) = \frac{\alpha \dot{E}_A}{\cos \theta} e^{j\theta} = \alpha \dot{E}_A (1 + j \tan \theta)$ , 代入式(3), 可得零序电压为

$$\dot{U}_0 = -\frac{\alpha \dot{E}_A (1 + j \tan \theta)}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j \omega C_{G\Sigma} R_k} \quad (13)$$

机端三相对地基波电压表达式为

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_0 = \left(1 - \frac{\alpha(1 + j \tan \theta)}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j \omega C_{G\Sigma} R_k}\right) \dot{E}_A \quad (14)$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_0 = \left(e^{-j120^\circ} - \frac{\alpha(1 + j \tan \theta)}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j \omega C_{G\Sigma} R_k}\right) \dot{E}_A \quad (15)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_0 = \left(e^{j120^\circ} - \frac{\alpha(1 + j \tan \theta)}{\frac{R_k}{Z} + 1 + j \omega C_{G\Sigma} R_k}\right) \dot{E}_A \quad (16)$$

考虑发电机中性点接地方式有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点经高阻接地3种方式<sup>[15]</sup>, 定义:

$$\frac{R_k}{Z} + 1 + j \omega C_{G\Sigma} R_k = \text{Re}(Z') + j \text{Im}(Z') \quad (17)$$

以A相接地故障为例,计算故障超前相与滞后相电压有效值得:

$$|\dot{U}_C|^2 - |\dot{U}_B|^2 = \frac{2\sqrt{3}\alpha(\text{Im}(Z') - \tan \theta \text{Re}(Z'))}{\left|\frac{R_k}{Z} + 1 + j \omega C_{G\Sigma} R_k\right|^2} |\dot{E}_A|^2 \quad (18)$$

定义

$$m = \frac{|\dot{U}_B|^2 - |\dot{U}_A|^2}{|\dot{U}_0|^2} = \frac{2\sqrt{3}(\text{Im}(Z') - \tan \theta \text{Re}(Z'))}{\alpha(1 + \tan^2 \theta)} \quad (19)$$

当  $\theta$  值较小,  $\theta \leq \frac{\pi}{6}$  时, 满足  $\tan \theta \approx \theta$ , 代入

式(4)可得:

$$m = \frac{2\sqrt{3}(\text{Im}(Z') - \theta \text{Re}(Z'))}{\alpha(1 + \theta^2)} \quad (20)$$

将  $\theta(a) = \frac{\pi}{6}(1 - \alpha)$  或  $\theta(a) = -\frac{\pi}{6}(1 - \alpha)$  代入式(11)、式(12), 联立求解可得故障位置  $\alpha$ 。

求解过程中, 当第1分支发生接地故障时, 即  $\theta(a) = \frac{\pi}{6}(1 - \alpha)$ , 如代入  $\theta(a) = -\frac{\pi}{6}(1 - \alpha)$ , 计算可得伪根, 即  $a < 0$  或  $a > 1$ , 去除伪根。

### 4 仿真分析

为验证上述改进故障定位算法的可行性, 基于 EMTDC 建立了发电机分布参数电路模型, 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。本文取  $n = 7$ , 如图5所示。

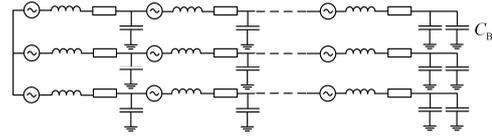


图5 发电机分布参数电路模型

Fig. 5 Generator model with distributed parameter

发电机仿真参数<sup>[1]</sup>: 额定电压  $U_n = 18 \text{ kV}$ , 定子绕组每相电阻为  $R_s = 3.6 \text{ m}\Omega$ , 每相电感为  $L_s = 227.05 \text{ }\mu\text{H}$ , 每相对地电容为  $C_G = 1.686 \text{ }\mu\text{F}$ 。取发电机出口母线相连的其他设备每相对地电容  $C_B = 0.2 \text{ }\mu\text{F}$ , 高阻接地  $R_N = 629.32 \text{ }\Omega$  ( $R_N = 1/3\omega C_G$ ), 消弧线圈电感  $L_N = 2.504 \text{ H}$  ( $0.8 \times \omega L_N = 1/3\omega C_G$ )。

对发电机中性点经高阻接地、不接地和经消弧线圈接地3种方式进行分析, 故障点位置距中性点(4/7)57.2%、85.7%(6/7)和机端处, 过渡电阻  $R_k$  分别为  $10 \text{ }\Omega$ 、 $200 \text{ }\Omega$ 、 $1000 \text{ }\Omega$ , 仿真结果如表3所示。

由表3可以看出:

1) 发电机机端故障时, 合成电势与相电势间相位角为  $0^\circ$ , 两种方法均能准确定位。

2) 忽略绕组电势相位的方法, 定位误差受过渡电阻和故障位置的影响, 过渡电阻越大, 误差越大, 已不能实现准确的定位。

3) 考虑绕组电势相位特征的改进方法, 适用于各种中性点接地方式, 在发电机定子绕组单相接地故障时, 故障位置的计算结果与设定值较接近, 误差均在5%范围内。对于高阻接地故障, 定位算法也具有较高的准确度。

表 3 仿真计算结果  
Table 3 Simulation result

中性点 接地 方式	故障位置	接地电 阻值/ $\Omega$	$U_0/E_A$	忽略绕组电势相位			改进算法		定位 误差	
				测量 电阻/ $\Omega$	测量 位置 $\alpha$	$\theta(\alpha)$	测量 电阻/ $\Omega$	测量 位置 $\alpha$		
经配电 变压器 高阻接地	A 相 $a = 57.2\%$	10	0.5802	0	0.4992	12.74°	9.75	0.5752	0.66%	
		200	0.4319	22.89	0.4479	12.85°	195.40	0.5713	-0.02%	
		1000	0.1877	345.39	0.3127	13.25°	961.35	0.5582	-2.31%	
	A 相 $a = 85.7\%$	10	0.8541	0	0.8139	4.10°	8.30	0.8632	0.71%	
		200	0.6357	129.74	0.7807	4.15°	197.04	0.8617	0.53%	
		1000	0.2763	682.32	0.6662	4.26°	988.69	0.8581	0.11%	
	A 相 $a = 100\%$	10	0.9842	10.14	1.0003	-0.004	10.09	1.0001	0.01%	
		200	0.7326	200.23	1.0003	-0.005	200.15	1.0001	0.01%	
		1000	0.3184	1000.8	1.0005	-0.07	1000.4	1.0002	0.02%	
不接地	A 相 $a = 57.2\%$	10	0.5895	0	0.6022	12.73°	9.62	0.5755	0.71%	
		200	0.5554	66.29	0.5593	12.78°	195.22	0.5738	0.42%	
		1000	0.2890	620.21	0.4302	13.44°	949.35	0.5519	-3.42%	
	A 相 $a = 85.7\%$	10	0.8676	0	0.8690	4.03°	7.54	0.8656	0.99%	
		200	0.8176	153.85	0.84764	4.07°	197.25	0.8642	0.82%	
		1000	0.4254	845.52	0.7679	4.26°	989.22	0.8581	0.11%	
	消弧线圈 接地	A 相 $a = 57.2\%$	10	0.5894	0	0.6038	12.74°	9.78	0.5754	0.70%
			200	0.5863	0	0.5908	12.74°	196.019	0.5752	0.66%
			1000	0.5265	499.3	0.5431	12.78°	981.29	0.5738	0.42%
A 相 $a = 85.7\%$		10	0.8676	0	0.8693	4.03	8.15	0.8654	0.96%	
		200	0.8632	52.94	0.8635	4.04	192.64	0.8651	0.93%	
		1000	0.7753	828.7	0.8407	4.02	994.24	0.8658	1.01%	

## 5 结论

本文基于发电机定子绕组单相接地故障时零序电压  $\dot{U}_0$  和机端三相电压的偏移特征, 考虑了绕组电势的相位特征, 提出了一种定子绕组单相接地故障定位的新原理, 完善了目前定子接地保护的功能, 为故障检修提供依据。

该故障定位方法适用于各种中性点接地方式, 定位准确, 高阻接地故障也能适用。该算法简单易行, 无需增加额外设备, 易于推广应用。理论分析、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.
- [2] 沈浩然, 张建华, 丁磊, 等. 双馈异步发电机单相接地故障瞬态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 6-11.  
SHEN Haoran, ZHANG Jianhua, DING Lei, et al. Transient characteristic research of doubly-fed induction generator during single-phase grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 6-11.
- [3] 王昕, 李乃永, 苏欣, 等. 消弧线圈接地机组的定子基波零序电压保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 140-144.

- WANG Xin, LI Naiyong, SU Xin, et al. Analysis on earth fault protection malfunction of generator with arc suppression coil grounding[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 140-144.
- [4] 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.
  - [5] 包明磊, 李玉平, 桑建斌, 等. 双频式定子接地保护的分析和改进[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 106-112.  
BAO Minglei, LI Yuping, SANG Jianbin, et al. Analysis and improvement of the dual frequency stator ground fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 106-112.
  - [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] 刘春秋, 葛宝明, 毕大强. 20 Hz 注入式定子接地保护

- 在扩大单元接线发电机组上的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 40-45.
- LIU Chunqiu, GE Baoming, BI Daqiang. Application of injecting 20 Hz source-based stator ground fault protection for generators in expanded unit connection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 40-45.
- [8] 贾文超, 黄少锋. 双频注入式定子接地保护方案[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 158-161.
- JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Stator single-phase grounding Protection with double-frequency injecting source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 158-161.
- [9] WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. The fault-current-based protection scheme and location algorithm for stator ground fault of a large generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 871-879.
- [10] 罗建, 熊再豹, 张强, 等. 发电机定子单相接地故障电阻在线监测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 136-140.
- LUO Jian, XIONG Zaibao, ZHANG Qiang, et al. Study of online monitoring of the stator single-phase grounding fault resistance in generator[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 136-140.
- [11] 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 Xiaoqiang, 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.
- [12] 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 Xiaoqiang, 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张琦雪, 王祥珩, 王维俭. 大型水轮发电机定子中性点高阻接地暂态分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 30-33.
- ZHANG Qixue, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Transient analyze on large hydro-generator with high resistance grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 30-33.

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2016-11-01

作者简介:

黄少锋(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障分析、微机保护等;

贾文超(1984-), 男, 通信作者, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: jiawenchao\_snow@163.com

(编辑 葛艳娜)