基于零序电压有源调控的发电机定子 接地故障消弧方法及保护对策

徐 雯1,2,王义凯1,2,尹项根1,2,乔 健1,2,谭力铭1,2,李 伟3

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室,湖北 武汉 430074;

3. 国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院,北京 100032)

摘要:瞬时性接地故障易威胁发电机安全运行,造成巨大经济损失。传统的消弧线圈和大电阻消弧效果有限,因此在发电机中性点引入零序电压调控的有源消弧装置。分析表明接地故障发生后,根据故障定位结果在中性点注入电流可以精确地补偿故障点电压至0,从而使接地故障电流降为0,达到消弧的目的。为防止消弧过程中性点零序电压抬升导致发电机零序电压保护误动,提出了一种故障辨别方法,通过减小注入电流,根据中性点零序电压和零序电流的基波分量的变化分辨瞬时性接地故障。所提消弧方法和保护对策可维持发电机可靠不停电运行,保证系统供电可靠性。PSCAD / EMTDC 仿真结果表明所提消弧方法和保护对策具有较高的准确性与实用性。

关键词:有源消弧;零序电压调控;发电机定子接地故障;瞬时性接地故障;中性点零序电压;中性点零序电流
 中图分类号:TM 772
 文献标志码:A
 DOI:10.16081/j.epae.202112031

0 引言

大型发电机易发生弧光接地故障,从而损伤绕 组绝缘、破坏定子铁芯,且维修不便,这是发电机保 护的一大难题。国内外大型发电机组普遍采用中性 点经消弧线圈或配电变压等非有效接地方式,从而 限制单相接地故障电流。而此类无源消弧方法仅能 补偿故障点工频无功残流,无法补偿有功电流,且无 法适应各种复杂的发电机定子接地故障情况,消弧 能力有限。间歇性弧光接地故障易形成过电压,产 生的故障电流如不及时消除,可能烧毁发电机定子 绕组^[1]。但若定子接地保护在瞬时性接地故障情况 下动作并切除发电机,将引发长时间机组停电事故, 影响供电可靠性,造成巨大的经济损失。

针对消弧问题,文献[2]提出一种基于零序电压 柔性控制的配电网接地故障消弧与保护新原理,通 过特定装置注入电流并控制故障相电压为0,从源 头上实现瞬时接地故障的100%消弧。在此基础 上,文献[3-5]提出针对配电网接地故障的选线选相 方法。但针对发电机定子接地故障消弧方面的应用 却鲜有研究,随着新能源并网比例增大,主力机组的 重要性逐渐提升,发生瞬时性故障时轻易切机不利 于电网的稳定运行。零序电压调控独特的有源消弧 和补偿能力可以消除定子绕组瞬时性弧光接地故 障,保持发电机稳定持续运行,其经济效益不容

收稿日期:2021-04-19;修回日期:2021-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877089) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877089) 忽视。

针对发电机定子接地故障,现有的保护主要为 基波零序电压保护、3次谐波电压保护和低频注入 式保护。基波零序电压保护与3次谐波电压保护共 同构成的100%定子接地保护已在工程上得到广泛 应用,并已有大量研究对其进行修正和改进^[6-10]。但 零序电压有源调控在调控零序电压进行消弧时会造 成零序电压保护误动,扩大故障范围。低频注入式 保护^[11-12]在大型机组中可与100%定子接地保护构 成双重化保护,但在外加零序电压调控装置的基础 上装配注入式保护的经济可行性不高。上述保护方 法均无法独立分辨瞬时性定子接地故障,在此情况 下无法保证发电机持续供电。

因此,为了能够有效消弧,本文在发电机中性点 引入零序电压有源调控装置,通过理论分析和仿真 证明其能够有效降低故障点电压和电流,同时补偿 故障电流的无功、有功分量。在此基础上,提出一种 基于零序电压有源调控的故障辨别方法,基于注入 电流后中性点零序电压和电流的特性,辨别故障是 否消弧,有效区分瞬时性接地故障和永久性接地故 障。本文所提的保护对策可与现有保护配合,实现 在发生瞬时性接地故障时发电机的不停电运行,避 免频繁停机和计划外停机检修,保证系统的供电可 靠性。

1 零序电压有源调控及其影响

1.1 零序电压有源调控的消弧方法

接地故障消弧的机理为[13-14]:交流电流过零点

熄弧后,绝缘介质的恢复速度快于故障相电压的恢 复速度,从而有效阻止电弧重燃。影响消弧的主要 因素有残流大小、恢复电压幅值和恢复电压上升速 度。故障电流越小,介质损伤越小,越有利于绝缘介 质恢复:故障相恢复电压的幅值越小、恢复初速度越 慢、恢复时间越长,使得绝缘介质越难以重新击穿, 阻止电弧重燃,有利于接地故障消弧。

零序电压有源调控根据交流电弧熄灭机理,主 动调控故障点电压,使故障恢复电压低于绝缘恢复 强度(电弧重燃电压),阻止电弧重燃,实现故障彻底 熄弧,将传统接地消弧问题转化为故障点电压控制 问题,由传统被动电流消弧转化为主动电压消弧[2]。

发电机零序电压有源调控示意图如图1所示, 在发电机中性点接地变压器副边接入小容量柔性可 控电流源,利用改变注入电流的幅值及相位调节中 性点电压的方法,实现任意位置定子对地电压的灵 活调控,现有已投入工程应用的零序电压有源调控 装置容量在50kV·A以内。以调控C相电压为例进 行说明:在发电机中性点外加零序电源,当中性点对 地电压发生偏移时,各相出现零序电压,即A、B、C 相对地电压发生变化,但各相之间的线电压不受影 响;且一般发电机所接变压器低压侧为三角形接线, 零序电压变化不影响高压侧负载,故负载侧不受C 相降压和零序电压调控的影响。



图1 发电机零序电压有源调控示意图

Fig.1 Schematic diagram of zero-sequence voltage regulation for generator

考虑故障发生在C相距离中性点 α 处,则注入 的电流 L 可表示为:

$$I_{s} = U_{N}Y_{N} + [(E_{A} + U_{N})Y_{A} + (E_{B} + U_{N})Y_{B} + (E_{c} + U_{N})Y_{C} + (E_{f} + U_{N})Y_{f}](1 - Z_{T}Y_{N})$$
(1)

式中: E_A 、 E_B 、 E_C 分别为发电机A、B、C相电动势; E_{f} 为故障点至中性点的绕组电动势; Y_{A} 、 Y_{B} 、 Y_{C} 分 别为A、B、C相绕组对地导纳;U、为中性点零序电 压;R₆为单相接地过渡电阻;Y₆为故障相对地导纳, $Y_{f}=Y_{c}+\frac{1}{R_{c}}$; Y_{N} 为中性点对地导纳; Z_{T} 为中性点接地

变压器的短路阻抗和短路损耗所对应的阻抗。

为实现单相接地故障消弧,保证故障点电压 为0,应调节中性点零序电压 $U_{\rm N}$ =- $E_{\rm f}$,将其代入式 (1)可得:

$$I_{s} = E_{A}Y_{A} + E_{B}Y_{B} + E_{C}Y_{C} - E_{f}[(Y_{A} + Y_{B} + Y_{C})(1 - Z_{T}Y_{N}) + Y_{N}]$$
(2)

假设发电机三相完全对称,且各相对地电容 相等,则需要向中性点注入的电流为- E_{f} [($Y_{A} + Y_{B} +$ Y_{c})(1 – $Z_{T}Y_{N}$) + Y_{N}]。 E_{f} 可由发电机在线故障定位得 到,定位方法已有很多较为成熟的研究[15-18],可利用 注入式保护或基波零序电压故障分量求得E.。其中 注入式保护对过渡电阻的测量会影响故障定位精 度,过渡电阻的增加会导致测量误差的增加,影响注 入量的计算,但仍然能将故障电流降低至安全电流 1A以下,达到有效消弧的效果。

通过注入电流将中性点零序电压箝制为U_x= $-E_{c}$,可以实现抑制故障点电压至0的目的,从而使 得接地故障电流消失,同时补偿故障电流的无功、有 功分量。该方法弥补了现有接地消弧技术的不足, 可100%补偿发电机接地故障电流基波分量。

仿真0.2 s时在发电机定子C相绕组距中性点 α =0.875 处发生 $R_{\rm f}$ =2000 Ω 的接地故障, 0.5 s 时进 行有源消弧控制,测得故障接地电流和故障点基波电 压的幅值变化情况如图2所示。图中:I_t为故障接地 电流幅值;I_n为故障接地电流基波幅值;I_n为故障接 地电流3次谐波幅值;U_n为故障点基波电压幅值。



Fig.2 Amplitude change of fault grounding current and voltage

分析图2可知,引入零序电压有源调控后,故障 接地电流的基波分量和故障相电压基波幅值均下降 为0,而故障接地电流的3次谐波分量基本没有受到 影响,因此总的故障接地电流将衰减到3次谐波电 流的大小。特别地,在注入电流后,这个消弧过程并 不是故障接地电流迅速下降为0,而是在快速下降 一定程度后进入一个缓冲的过程,该过程中故障接 地电流和故障点电压近似以固定的斜率下降,且降 到最低值需要一定的时间。

因此分别对故障位置距中性点α=0.875 和α= 0.125的不同故障类型的消弧效果进行仿真,结果 见表1。

从仿真结果可以看出,零序电压有源调控能够

198

表1 不同故障类型的消弧效果

Table 1 Arc suppression effect of different fault types

拉山井萨米刊		$I_{\rm fl}$,	/ A	$U_{\rm f1}$ / V		
按地取陧天望	α	消弧前	消弧后	消弧前	消弧后	
金属性接地	0.875	3.21	0.19	0	0	
	0.125	0.75	0.10	0	0	
$R_{\rm f}$ =100 Ω	0.875	2.96	0.13	247.0	13.3	
	0.125	0.71	0.06	58.6	6.3	
$R_{\rm f}$ = 2 000 Ω	0.875	1.24	0.03	1960.0	60.0	
	0.125	0.28	0.02	466.0	48.0	

有效地降低故障接地电流和电压,可以起到主动接 地消弧的作用,保证发电机的持续稳定运行。

1.2 对现有发电机定子接地保护的影响

对于3次谐波定子接地保护而言,由于零序电 压有源调控仅是在中性点侧注入工频电流,基本不 会影响系统中的3次谐波电压的分布情况。因此, 主动降压不停电运行方式基本不会影响3次谐波电 压保护的运行情况。

对于注入式保护而言,注入式保护与零序电压 有源调控装置同时接入时(可考虑分别从中性点和 机端接入),由于注入式保护检测的是特殊的低频 量,因此接入的工频注入电压或电流并不会影响注 入式保护。

对于零序电压定子接地保护而言,在不考虑三 相对地电容不平衡的情况下,实际是在中性点注入 电流使得故障点处的电压为0。由此可知此时中性 点电压为- E_f 。发生瞬时性弧光接地时,注入电流后 故障点电压降为0,电弧消失,但此时中性点零序电 压仍为- E_f ,这会导致发电机零序电压定子接地保护 误动。

仿真 0.2 s时在发电机定子 C 相绕组距中性点 α=0.875 处发生 $R_{\rm f}$ =100 Ω 的瞬时性接地故障,持续 时长为 0.1 s, 0.22 s时进行有源消弧控制,可测得 $I_{\rm f}$ 和中性点基波零序电压幅值 $U_{\rm NI}$ 的变化如图 3 所示。



图 3 故障接地电流和中性点基波零序电压的幅值波形图 Fig.3 Amplitude change of fault grounding current and fundamental zero-sequence voltage of neutral point

从图3中可以看出,注入零序电流后故障接地 电流幅值降低,故障消失后中性点基波零序电压幅 值持续上升。但零序电压保护和调控装置均无法辨 别接地故障是否消失,导致保护误动切机,造成不必要的经济损失。

综上所述,通过采用外加零序电源,主动调控中 性点零序电压,实现故障相电压控制,可在发生瞬时 性接地故障时使故障点熄弧,增加发电机带接地故 障安全可靠运行时间。但其中性点零序电压调控方 式在消除瞬时性接地故障后会导致中性点零序电压 上升,致使基波零序电压保护误动。为此,需要在有 源消弧后,对接地故障是否消失进行辨别。

2 基于零序电压调控的接地故障辨别

发电机定子接地故障示意图见图4。图中: U_{Ag} 、 U_{Bg} 、 U_{Cg} 分别为A、B、C相绕组对地电压; I_N 为中性点 零序电流; I_{Ag} 、 I_{Bg} 、 I_{Cg} 分别为A、B、C相对地电流。



图4 发电机定子接地故障示意图

Fig.4 Schematic diagram of generator stator grounding fault

减小注入电流使中性点零序电压变化量为 $\Delta U_{\rm N}$,可得各相接地电流变化为:

$$\begin{cases} \Delta I_{Ag} = \Delta U_N Y_A & (3) \\ \Delta I_{Bg} = \Delta U_N Y_B & \\ \Delta I_{Cg} = \Delta U_N Y_C + I_f & \end{cases}$$

若此时故障点已经消弧,则 $I_{f}=0$, $|\Delta I_{Ag}|=|\Delta I_{Bg}|=|\Delta I_{Cg}|$,说明改变中性点零序电压,各相接地电流变化相等。若是永久性接地故障,则 I_{f} 一直存在,故障相接地电流变化依然大于其他两相。

然而各相绕组接地电流并不容易测量,因此用 更容易测量的发电机中性点零序电流来代替相接地 电流作为判据。根据电路特性可知,发电机中性点 零序电流表达式为:

 $I_{\rm N} = I_{\rm AN} + I_{\rm BN} + I_{\rm CN} = I_{\rm AS} + I_{\rm Ag} + I_{\rm BS} + I_{\rm Bg} + I_{\rm CS} + I_{\rm Cg}$ (4) 式中: $I_{\rm AN}$ 、 $I_{\rm BN}$ 、 $I_{\rm CN}$ 分别为中性点侧A、B、C相电流; $I_{\rm AS}$ 、 $I_{\rm RS}$ 、 $I_{\rm CS}$ 分别为机端A、B、C相电流。

式(4)说明相接地电流的变化可体现在中性点 零序电流中,即:

 $\Delta I_{\rm N} = \Delta I_{\rm Ag} + \Delta I_{\rm Bg} + \Delta I_{\rm Cg} = \Delta U_{\rm N} (Y_{\rm A} + Y_{\rm B} + Y_{\rm C}) + I_{\rm f} (5)$

根据式(5)可知,如果消弧成功,令 $I_{f}=0$,通过测量不同时刻得到的 ΔI_{N} 和 ΔU_{N} 可以求得 I_{f} 。将2组 ΔI_{N} 和 ΔU_{N} 数据分别记为 ΔI_{N1} 、 ΔU_{N1} 和 ΔI_{N2} 、 ΔU_{N2} , 可得:

$$I_{\rm f} = \Delta U_{\rm N2} - \frac{\Delta U_{\rm N1} - \Delta U_{\rm N2}}{\Delta I_{\rm N1} - \Delta I_{\rm N2}} \Delta I_{\rm N2} \tag{6}$$

因此,在零序装置有源调控一段时间后,减小注入电流幅值,通过测量中性点零序电流和零序电压的基波变化量来判断是否消弧。*I*_f=0则说明消弧成功,否则为永久性接地故障。计及互感器测量及误差问题,为防止误判,将判据的阈值选取为0.1,即 *I*_f=0.1A。

发生永久性金属性接地故障时,由于故障点直接与大地相连,过渡电阻为0,则此时减小注入电流并不能在故障点引起电压的变化,导致中性点所测得零序电压的变化为0,则计算所得 $|I_{f}|=0$,会造成误判。因此需设定一个前提,若第2次测量的 $\Delta U_{N2}=0$,说明发生了永久性接地故障,无需再计算 $|I_{f}|$ 。计及互感器测量及误差问题,取 $|\Delta U_{N2}|=0.1V$ 作为阈值。

综上所述,可得判据如下:

 $\begin{cases} \left| \Delta U_{N2} \right| < 0.1 \text{V} & \hat{\mathbf{x}} \wedge \text{there} \\ \left| \Delta U_{N2} \right| > 0.1 \text{V} \perp \left| \mathbf{I}_{\text{f}} \right| > 0.1 \text{A} & \hat{\mathbf{x}} \wedge \text{there} \end{cases}$ (7) $\left| \Delta U_{N2} \right| > 0.1 \text{V} \perp \left| \mathbf{I}_{\text{f}} \right| \le 0.1 \text{A} & \text{there} \mid \text{there} \end{cases}$

式中:I_f由式(6)计算得到。

3 保护对策流程

200

为使零序电压有源调控与现有定子接地保护有效配合,区分瞬时性接地故障和永久性接地故障,使接地消弧时保护不误动,提出保护对策流程,见附录A图A1。采用100%定子接地保护启动零序电压有源调控装置,非注入式或注入式保护均可。进行在线故障定位获得- E_f ,注入电流使 $U_N = -E_f$ 进行消弧。延时0.5 s后减小注入电流幅值,测量中性点零序电流和零序电压的基波变化量得到 ΔI_{NI} 、 ΔU_{NI} 和 ΔI_{N2} 、 ΔU_{N2} 。根据式(7)进行判断:若故障已消弧,则停止注入电流,而后返回保护;若是永久性接地故障,则返回保护由保护进行后续动作。该保护对策可以实现瞬时性接地故障的动态识别和消除,避免绝缘击穿,使发电机做到不停电持续运行,有效保证了供电的可靠性。

4 仿真验证

4.1 发电机模型

为了验证本文所提发电机定子接地保护方法的 可行性,根据图1在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模 型。发电机中性点经配电变压器接电阻接地采用高 阻接地方式,并在变压器副边接入可控电流源用于 零序电压调控。发电机参数及接地变压器参数见附 录B表B1。负荷采用三相平衡的恒定阻抗负载模 型,统一等效为P=1000 MW和 Q=800 Mvar。

定子接地模型参考文献[19]建立,采用准分布 电容参数模型,定子B相内部结构如图5所示。定 子每相由两分支构成,每分支定子绕组分为8个单 元电路,每相定子绕组的电感、电阻、电动势以及对 地电容按照一定规律分配到各单元电路,同一分支 的各单元电路串联。每一个单元电路包括基波电动 势、3次谐波电动势、电路电阻、电路电抗以及并联 在电路两侧的对地电容。



图5 定子B相绕组电路结构图



4.2 仿真结果与分析

在所建立模型上进行故障位置距中性点 α = 0.875 和 α =0.125 的不同故障类型的仿真,消弧后减小注入电流幅值,测得中性点零序电流和零序电压的基波变化量 ΔI_{N1} 、 ΔU_{N1} 、 ΔI_{N2} 、 ΔU_{N2} ,将其代入式(6)、(7)得到的结果如表2、3所示。

从表2、3可以看出,发生永久性金属性接地故障时改变注入电流幅值并不会引起中性点零序电压的变化,完全符合2.1节的理论分析结果。无论是瞬时性故障还是永久性故障,通过式(7)判据得到的结果均与仿真情况一致。故障位置和过渡电阻均不会对结果产生影响。

表 2 α=0.875 时不同故障情况的仿真结果

Table 2	Simulative	results	of	different	fault	conditions	when	$\alpha = 0.873$
---------	------------	---------	----	-----------	-------	------------	------	------------------

接地故障	章类型	$\Delta I_{ m N1}$ / A	$\Delta I_{\rm N2}$ / A	$\Delta U_{ m N1}$ / kV	$\Delta U_{ m N2}$ / kV	$\left I_{\rm f} \right $ / A	判断结果
金属性接地	瞬时性	0.65∠2°	0.65∠2°	0.86∠14°	0.86∠14°	0	正确
	永久性	3.28∠61°	2.69∠3°	0	0	_	正确
$R_{\rm f}$ =100 Ω	瞬时性	0.77∠2°	0.32∠2°	0.93∠14°	0.43∠14°	0.07	正确
	永久性	0.85∠47°	1.02∠26°	3.85∠77°	5.16∠-51°	24	正确
$R_{\rm f}$ =2000 Ω	瞬时性	0.77∠2°	0.32∠2°	1.03∠14°	0.43∠14°	0.02	正确
	永久性	1.07∠43°	1.76∠19°	0.73∠-28°	3.48∠-33°	7.2	正确

Table 5 Simulative results of different fault conditions when $\alpha = 0.125$							
接地故障	类型	$\Delta I_{ m N1}$ / A	$\Delta I_{ m N2}$ / A	$\Delta U_{ m N1}$ / kV	$\Delta U_{ m N2}$ / kV	$I_{\rm f}$ / A	判断结果
金属性接地 瞬时	瞬时性	0.13∠-28°	0.19∠-28°	0.17∠-34°	0.26∠-34°	0.03	正确
	永久性	0.74∠60°	0.52∠59°	0	0	—	正确
$R_{\rm f}$ =100 Ω	瞬时性	0.12∠27°	0.20∠27°	0.17∠-34°	0.26∠-34°	0.07	正确
	永久性	0.79∠66°	0.54∠78°	0.56∠58°	0.81∠-7°	0.69	正确
$R_{\rm f}$ = 2000 Ω	瞬时性	0.13∠-27°	0.19∠-28°	0.17∠-34°	0.26∠-34°	0.03	正确
	永久性	0.60∠-89°	0.61∠-46°	1.24∠-52°	0.78∠−24°	0.76	正确

表 3 α=0.125 时不同故障情况的仿真结果

Table 3 Simulative results of different fault conditions when α =0.125

5 结论

本文在发电机中性点引入零序电压调控装置进 行有源消弧,提出一种接地故障辨别方法,然后结合 现有保护构成一种新的保护对策。最后在PSCAD/ EMTDC 仿真环境中验证了本文所提消弧方法和保 护策略的可行性,得出如下结论:

1)零序电压有源调控装置根据故障定位结果注 入电流,可以补偿故障点电压电流至0,100%补偿 故障电流基波分量,达到消弧的目的;

2)为区分瞬时性故障和永久性故障,在消弧后 减小注入电流,基于中性点零序电压和电流的基波 变化量的特征构成判据,能有效辨别不同接地故障 情况;

3)所提方法可与现有发电机定子接地保护进行 灵活配合,区分瞬时性接地故障和永久性接地故障 并进行针对性处理,有效消除瞬时性接地故障并保 证保护不误动,利于发电机的持续可靠运行。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]党晓强,邰能灵,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.

[2] 曾祥君,王媛媛,李健,等.基于配电网柔性接地控制的故障 消弧与馈线保护新原理[J].中国电机工程学报,2012,32(16): 137-143.

ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):137-143.

[3] 卓超,曾祥君,彭红海,等. 配电网接地故障相主动降压消弧 成套装置及其现场试验[J]. 电力自动化设备,2021,41(1): 48-58.

ZHUO Chao, ZENG Xiangjun, PENG Honghai, et al. Arc suppression device with active reduction of grounding fault phase voltage and field test for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):48-58.

 [4] 刘宝稳,曾祥君,张慧芬,等. 注入电流馈线分布特征及其在接 地故障检测中的应用[J]. 电网技术,2021,45(7):2731-2740.
 LIU Baowen,ZENG Xiangjun,ZHANG Huifen, et al. Distribution model of injection current in feeder and its application in single phase to ground fault detection [J]. Power System Technology, 2021, 45(7):2731-2740.

 [5]曾祥君,胡京莹,王媛媛,等.基于柔性接地技术的配电网三相 不平衡过电压抑制方法[J].中国电机工程学报,2014,34(4): 678-684.

ZENG Xiangjun, HU Jingying, WANG Yuanyuan, et al. Suppressing method of three-phase unbalanced overvoltage based on distribution networks flexible grounding control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):678-684.

- [6] ZIELICHOWSKI M, FULCZYK M. Analysis of operating conditions of ground-fault protection schemes for generator stator winding [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1):57-62.
- [7] 贾文超,黄少锋.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[J].电力自动化设备,2016,36(5): 116-121.

JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Phase selection based on fault component phase characteristics of zero-sequence voltage for generator stator single-phase grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):116-121.

[8] 毕大强,王祥珩,桂林,等. 基于零序电压故障暂态分量的发电 机定子单相接地保护方案研究[J]. 中国电机工程学报,2003, 23(11):39-44.

BI Daqiang, WANG Xiangheng, GUI Lin, et al. Protection scheme based on the fault transient component of zerosequence voltage under the stator ground fault of generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 39-44.

- [9] TAI N L, AI Q. Protection technique based on delta-zero sequence voltages for generator stator ground fault[J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2004, 151 (5):651-657.
- [10] 苏洪波,尹项根,陈德树. 高灵敏度的三次谐波式发电机定子接地保护[J]. 电力系统自动化,1997,21(3):36-38.
 SU Hongbo,YIN Xianggen,CHEN Deshu. A highly sensitive relay against generator stator ground faults with third harmonic voltage[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(3): 36-38.
- [11] 姚晴林,赵斌,郭宝甫,等. 20 Hz 自适应新原理发电机定子接 地保护深入分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):71-74. YAO Qinglin, ZHAO Bin, GUO Baofu, et al. Study of selfadaptive generator stator ground fault protection based on 20 Hz electric source injection[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(22):71-74.
- [12] 曾祥君,尹项根,陈德树,等. 注入信号法补偿式高灵敏度发 电机定子接地保护[J]. 中国电机工程学报,2000,20(11):52-56,61.

ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Ground fault protection for generator stator windings with inductance compensating based on injecting signal [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11):52-56, 61.



[13] 许颖.对消弧线圈"消除弧光接地过电压"的异议[J]. 电网技术,2002,26(10):75-77.
 XU Ying. Dissidence to "the elimination of ground arcing

faults caused overvoltage by peterson's coils"[J]. Power System Technology,2002,26(10):75-77.

- [14] 艾绍贵,李秀广,黎炜,等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. 高压电器,2017,53(3):178-184.
 AI Shaogui,LI Xiuguang,LI Wei,et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(3):178-184.
- [15] 殷林鹏,桂林,张琦雪,等. 基于基波电势分布特征的大型发电 机定子接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(7): 141-146.

YIN Linpeng, GUI Lin, ZHANG Qixue, et al. Stator grounding fault location method based on distribution characteristics of fundamental wave potential[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7); 141-146.

- [16] 黄少锋,贾文超.大型汽轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(9):35-40.
 HUANG Shaofeng, JIA Wenchao. A new fault location method for stator single-phase ground fault in large turbine generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 35-40.
- [17] 贾文超,黄少锋.水轮发电机定子单相接地故障定位新方法 [J].电力自动化设备,2017,37(2):134-139.

JIA Wenchao, HUANG Shaofeng, Stator single-phase grounding fault location for hydro-generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):134-139.

[18] 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.

[19] 李旭升.大型发电机故障仿真及保护测试技术研究[D]. 武 汉:华中科技大学,2019.

LI Xusheng. Study on large generator protection fault simulation and protection test technology[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2019.

作者简介:



徐雯

edu.cn).

徐 雯(1998—),女,硕士研究生,研 究方向为电力系统继电保护(E-mail: 18810207012@163.com);

王义凯(1996—),男,满族,博士研究 生,通信作者,研究方向为电力系统继电保 护(**E-mail**:742657004@qq.com);

尹项根(1954—),男,教授,博士研究生 导师,博士,主要研究方向为电力系统继电 保护与安全自动控制(E-mail; xgyin@hust.

(编辑 任思思)

Arc suppression method and protection countermeasures of generator stator grounding fault based on active control of zero-sequence voltage

XU Wen^{1,2}, WANG Yikai^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, QIAO Jian^{1,2}, TAN Liming^{1,2}, LI Wei³

 State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430047, China;
 Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
 Pumped-Storage Technological & Economic Research Institute of State Crid Vieweng Coursense Ltd. Beijing 100022, China)

State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: Transient grounding fault can easily threaten the safe operation of generators and cause huge economic losses. Traditional arc suppression coils and large resistance arc suppression have limited effects. Therefore, an active arc suppression device with zero-sequence voltage regulation is introduced at the neutral point of the generator. The analysis shows that after grounding fault occurs, injecting current at the neutral point according to the fault locating result can accurately compensate the voltage of fault point to zero, thus reducing the grounding fault current to 0, and achieving the purpose of arc suppression. In order to prevent the malfunction of generator zero-sequence voltage protection caused by the rise of the neutral point zerosequence voltage during the arc suppression process, a fault identification method is proposed. By reducing the injected current, the instantaneous grounding fault can be distinguished according to the fundamental frequency component changes of the neutral point zero-sequence voltage and the zero-sequence current. The proposed arc suppression method and protection countermeasures can maintain the reliable operation of the generator without power failure, and ensure the reliability of the system power supply. Simulative results with PSCAD / EMTDC show that the proposed arc suppression method and protection countermeasures have high accuracy and practicability.

Key words: active arc suppression; zero-sequence voltage regulation; generator stator grounding fault; transient grounding fault; neutral point zero-sequence voltage; neutral point zero-sequence current

附录 A





附录 B

元件 参数 参数值 元件 参数 参数值 注入式保护注入源 额定容量/(MV・A) 1278 30 内电势/V 发电机 注入式保护注入源 无功功率/Mvar 1150 8 内阻/Ω 额定电压/kV 变比 24kV/0.866 kV 24 发电机 额定电流/A 30739 容量/(kV・A) 125 定子绕组每相对地 接地变压 短路阻抗/% 0.397 6 电容/μF 器 机端设备每相对地 0.405 短路损耗/W 2250 电容/μF 定子每相直流电阻/mΩ 1.528 副方电阻/Ω 2

表 B1 发电机及接地变压器参数表

TableB1 Paramete	er of generation	ator and grou	inding tran	sformer