

发电机定子绕组接地故障混合柔性消弧方法

王义凯¹, 郑海然¹, 乔健¹, 尹项根², 汤宸骁¹, 欧洁¹

(1. 华北电力大学(保定) 新能源电力系统全国重点实验室, 河北 保定 071000;

2. 华中科技大学 强电磁技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:有源消弧方法能够实现发电机定子接地故障可靠消弧,但需要大容量逆变电源,体积大且造价高,工程应用受限。为降低逆变电源容量,提出发电机定子绕组接地故障混合柔性消弧方法,将双频有源消弧方法与消弧线圈接地方式相结合,利用消弧线圈补偿接地故障电流中大部分的基波分量,剩余的基波分量和谐波分量通过有源消弧装置实现补偿。在可靠实现接地故障消弧的前提下,该方法可极大地减小逆变电源的容量,具有较高的经济性和实用性。仿真和动模试验结果验证了所提方法的有效性。

关键词:定子绕组接地故障;混合柔性消弧;双频有源消弧;消弧线圈;逆变电源容量

中图分类号: TM77

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202501013

0 引言

大型同步旋转电机包括各类大型发电机、抽蓄发电电动机、调相机等^[1-3],定子绕组单相接地故障是最常见故障之一^[4-6]。接地故障电流主要由对地电容电流构成,当前大型发电机的固有对地电容电流普遍达到20 A以上^[7],单机容量较大者如乌东德电站某发电机的固有对地电容电流甚至高达55.27 A。较大的接地故障电流会产生电弧,破坏绕组绝缘、烧伤铁心和烧结铁心叠片^[8]。故障点持续的燃弧作用还易引发损毁性短路故障,严重威胁设备安全。为减轻接地电弧对发电机的损伤,亟需提出可靠的接地故障消弧方法。

发电机定子绕组接地故障消弧主要分为无源消弧方法和有源消弧方法。目前,大型发电机普遍采用中性点不接地、经消弧线圈接地、经高阻接地3种方式^[9-10]。相较于中性点不接地方式而言,高阻接地方式会增加故障电流中的电阻分量,无法实现对故障电流的抑制。消弧线圈接地方式能够在发生接地故障后产生电感电流,补偿接地故障产生的电容电流,属于无源消弧方法^[11-12],对抑制故障电流、防止故障蔓延起到了积极作用。然而,消弧线圈仅补偿单一频次故障分量,无法补偿故障电流中的谐波分量,补偿后残流仍较大^[13]。实际运行经验表明,现有发电机中性点接地方式均无法在不同故障场景下实现可靠的故障消弧^[14]。

有源消弧方式通过外加注入源控制故障点电压

低于电弧重燃电压,从原理上避免电弧重燃^[15-16]。由于发电机相电势中含有一定的3次谐波电势^[17-19],因此文献[20]提出一种双频有源电压消弧方案。然而仅将该方法应用于小型发电机,消弧过程中发电机中性点仍保持经电阻接地方式,导致有源消弧装置输出的大部分功率被中性点接地电阻所消耗。大型发电机电压等级高且对地电容电流大^[21],若将有源消弧装置应用于实际工程中,则需要大容量逆变电源构成消弧装置,导致有源消弧装置体积大且造价高,难以大范围推广^[22]。

为降低逆变电源的容量,本文将双频有源消弧方法与消弧线圈接地方式相结合,提出发电机定子绕组接地故障混合柔性消弧方法。其中,消弧线圈能够补偿接地故障电流中大部分的基波分量,有源消弧装置仅需要补偿故障电流中的3次谐波分量和小部分的基波分量。据此,有源消弧装置中逆变电源的容量可得到大幅降低。仿真和动模试验结果表明,本文所提方法不受接地故障场景、发电机运行方式及励磁调节影响,能够实现可靠的接地故障熄弧。

1 发电机中性点混合柔性接地方式

别列科夫理论指出:若熄弧峰压小于弧道介质的恢复强度,则接地电弧便会熄弧;否则,接地电弧便会重燃。为实现可靠消弧,阻止电弧重燃,应抑制故障点电压至电弧重燃电压以下^[23]。发电机定子绕组处于密闭环境中,接地故障导致电弧燃烧时,故障点电压保持相对稳定状态。本文处理故障时考虑从本质上消除接地故障,将故障点电压抑制至0作为目标。

发电机中性点混合柔性接地方式如图1所示。图中:各相量均包含基波和3次谐波分量,分别用下标“1”和“3”表示;定子绕组A相发生单相接地故障,接地过渡电阻为 R_f ; E_A 、 E_B 、 E_C 为发电机定子绕组三

收稿日期:2024-07-13;修回日期:2024-12-04

在线出版日期:2025-01-16

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2024MS098);国家自然科学基金资助项目(52407100)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2024MS098) and the National Natural Science Foundation of China(52407100)

相相电势; C_f 为发电机定子绕组每相对地电容, C_l 为直连系统在机端的每相等效对地电容值; U_f 和 I_f 分别为故障点对地电压和接地电流; E_f 为故障电势, 即发电机中性点到故障点间的感应电势, 可通过在线接地故障定位结果计算得到, 文献[20]中给出了基波、3次谐波故障电势的具体计算方法; U_n 为中性点电压; L_n 为消弧线圈等效电感值; I_i 和 γ_i 分别为双频有源消弧装置向系统注入的电流幅值和相角。

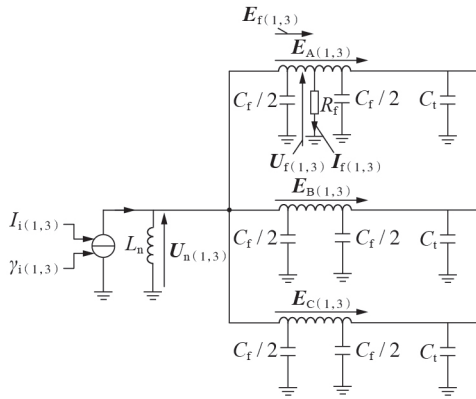


图1 基于混合柔性接地方式的发电机定子绕组示意图
Fig.1 Schematic diagram of generator stator winding based on hybrid flexible grounding mode

发生单相接地故障时, 发电机接地故障电流主要由对地电容提供的容性电流构成。消弧线圈产生感性电流, 能够补偿接地故障电流的工频容性电流, 属于无源消弧方式。但消弧线圈仅能够补偿故障电流中的部分基波分量, 剩余的基波分量和3次谐波分量由有源消弧装置进行补偿。

双频有源电压调控装置通过对输出电压幅值、相角进行任意调控, 使中性点电压强制并保持为所需要的电压值。根据基尔霍夫电压定律, 故障点电压满足:

$$U_{n(1,3)} + E_{f(1,3)} = U_{f(1,3)} \quad (1)$$

将故障点电压强制调控为0时, 基于式(1), 中性点电压应满足:

$$U_{n(1,3)} = -E_{f(1,3)} \quad (2)$$

此时, 故障点基波和3次谐波电压均被抑制至0, 故障电流中的基波和3次谐波分量均能够得到有效抑制。

2 混合柔性接地实现方式

文献[20]中提出的有源消弧装置未配合消弧线圈使用, 有源消弧装置需要补偿对地电容电流中全部的基波和3次谐波分量。对于大型发电机而言, 电压等级高, 对地电容电流大, 这将导致逆变电源容量过大, 造成有源消弧装置的体积过大、造价过高。

为降低有源消弧装置中逆变电源的容量, 本文提出发电机中性点混合柔性接地方式, 将双频有源

消弧技术与消弧线圈接地方式相结合, 形成一种高效的接地故障补偿系统。

当考虑发电机中性点通过消弧线圈接地, 并在该中性点注入基波电流 I_{i1} 时, 建立关于中性点的基尔霍夫电流方程, 如式(3)所示。

$$I_{i1} = \left(U_{n1} j\omega C_s + \frac{U_{n1} + E_{f1}}{R_f} \right) + \frac{U_{n1}}{j\omega L_n} \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; C_s 为定子绕组和外接直连系统三相对地电容之和。

当故障点基波电压被强制调控为0时, $U_{n1} = -E_{f1}$, 此时注入的基波电流为:

$$I_{i1} = -j \left(\omega C_s - \frac{1}{\omega L_n} \right) E_{f1} \quad (4)$$

为计算3次谐波注入电流, 建立故障相(A相)定子绕组等效模型, 如图2所示。

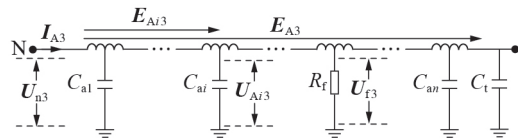


图2 发电机定子故障相绕组等效结构图
Fig.2 Equivalent structure diagram of generator stator's fault phase winding

图2中: I_{A3} 为A相3次谐波对地电流; E_{A3} 为A相第 i 匝线圈中点对中性点3次谐波电势; n 为A相定子绕组总匝数; C_{ai} 为A相第 i 匝线圈的等效对地电容值; U_{A3} 为A相故障绕组第 i 匝线圈中点对地3次谐波电压。对A相绕组列写基尔霍夫电流方程为:

$$I_{A3} = \sum_{i=1}^n j3\omega \frac{C_{ai}}{n} U_{A3} + j3\omega C_l (U_{n3} + E_{A3}) + \frac{U_{f3}}{R_f} \quad (5)$$

同理, 对B、C相绕组, 有:

$$I_{B3} = \sum_{i=1}^n j3\omega \frac{C_{bi}}{n} U_{B3} + j3\omega C_l (U_{n3} + E_{B3}) \quad (6)$$

$$I_{C3} = \sum_{i=1}^n j3\omega \frac{C_{ci}}{n} U_{C3} + j3\omega C_l (U_{n3} + E_{C3}) \quad (7)$$

式中: C_a 、 C_b 、 C_c 为发电机定子绕组三相线圈的等效对地电容值; I_{B3} 、 I_{C3} 分别为B、C相3次谐波对地电流; U_{B3} 、 U_{C3} 分别为B、C相绕组第 i 匝线圈中点对地3次谐波电压。

流过中性点接地消弧线圈上的3次谐波电流为:

$$I_{N3} = \frac{U_{n3}}{j3\omega L_n} \quad (8)$$

根据基尔霍夫电流定律, 注入3次谐波电流可表示为:

$$I_{i3} = I_{A3} + I_{B3} + I_{C3} + I_{N3} \quad (9)$$

将式(5)—(8)代入式(9)中, 由于3次谐波电压呈零序性质, $E_{A3} = E_{B3} = E_{C3}$, $U_{A3} = U_{B3} = U_{C3} = U_{B3}$ 。三相

定子绕组参数对称, $C_a=C_b=C_c$, 则有:

$$I_{i3} = \sum_{i=1}^n j9\omega \frac{C_a}{n} (U_{n3} + E_{Ai3}) + j9\omega C_t (U_{n3} + E_{A3}) + \frac{U_{i3}}{R_f} + \frac{U_{n3}}{j3\omega L_n} \quad (10)$$

故障点3次谐波电压 U_{i3} 跟随电流源输出电流 I_{i3} 变化。调节 I_{i3} 时, 若能够迫使 $U_{i3}=0$, 则可有效补偿故障电流中的3次谐波分量。当故障点基波电压被强制调控为0时, $U_{n3}=-E_{i3}$, 此时注入的3次谐波电流为:

$$I_{i3} = \sum_{i=1}^n j9\omega \frac{C_a}{n} (-E_{i3} + E_{Ai3}) + j9\omega C_t (-E_{i3} + E_{A3}) - \frac{E_{i3}}{j3\omega L_n} \quad (11)$$

由于消弧线圈能够补偿较大部分的基波对地电容电流, 因此有源消弧装置仅需要输出3次谐波对地电容电流和部分基波对地电容电流即可, 这将极大地减小逆变电源的容量。

实际工程中, 为避免主变高压侧发生单相接地故障时的传递过电压影响, 利用低频注入式保护的启动判据作为有源消弧装置的启动判据。发生定子单相接地故障后, 有源消弧装置启动, 依据故障位置与故障电势间的一一映射关系, 利用在线故障定位结果确定故障电势^[24], 并基于式(4)和式(11)确定注入的基波和3次谐波电流, 实现故障消弧。

3 仿真试验验证

以某核电机组为原型, 利用PSCAD/EMTDC软件建立准分布参数模型^[24]开展仿真分析。该发电机容量为30 kV·A, 额定电压为10.5 kV, 额定电流为2.86 A, 每个分支由8个线圈串联构成, 极对数为1, 总槽数为48, 对应槽距电角度为7.5°, 定子绕组每相对地电容为0.397 μF, 机端直连设备每相等效对地电容为0.405 μF。以A相第1分支为例开展分析, 各匝线圈连接处发生接地故障时, 对应的基波和3次谐波故障电势的幅值如附录A表A1所示。表中: 每匝线圈对应的基波和3次谐波电势均基于定子绕组的分布系数及短距系数计算得到。基于表A1中的数据可建立准分布参数模型, 从而对不同故障位置下的接地故障进行仿真分析。

3.1 接地故障消弧效果验证

为验证混合柔性接地方式的消弧效果, 0.2 s时在发电机A相机端设置单相接地故障, 接地过渡电阻为500 Ω。针对有源消弧方式, 在0.24 s时向发电机中性点注入4.579 7∠-116.25° A的基波电流和0.658 7∠223.395 8° A的3次谐波电流, 计算方法见文献[7]。针对混合柔性接地方式, 依据式(4)、(11), 在0.24 s时向发电机中性点注入0.059 5∠37.5° A的基波电流和1.618 9∠12.578 3° A的3次谐波电流。发电机中性点不接地, 采用经消弧线圈接地的方式,

仅采用有源消弧方式以及混合柔性接地方式下的接地故障电流仿真结果如图3所示。图中: i_f 为 I_f 的时域形式; 消弧线圈接地方式对应欠补偿情况, 欠补偿度为10%; 有源消弧方式下, 中性点在正常运行和初始故障下为不接地方式, 0.24 s投入双频有源消弧装置; 混合柔性接地方式下, 中性点在正常运行和初始故障下为经消弧线圈接地方式, 欠补偿度为10%, 0.24 s投入双频有源消弧装置。

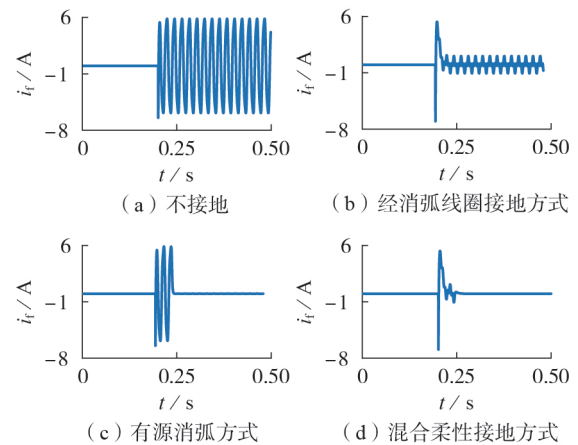


图3 不同接地方式下的接地故障电流仿真结果

Fig.3 Simulative results of grounding fault current under different grounding modes

分析图3可知: 若中性点采用不接地方式, 则接地故障电流较大, 对发电机安全不利; 对于消弧线圈接地方式, 由于消弧线圈仅能部分补偿故障电流中的基频电容电流, 无法补偿3次谐波电流, 仅能抑制故障电流, 无法实现有效熄弧; 在接入有源消弧装置的情况下, 能够可靠实现故障点熄弧。其中, 对于混合柔性接地方式, 在初始故障下消弧线圈已经抑制了部分故障电流, 因此故障后接地故障电流稳态值较低, 有利于定子铁心安全。

为验证混合柔性接地方式在不同故障位置的消弧效果, 在0.2 s时逐次在发电机A相故障匝比 $\alpha=0.125, \alpha=0.375, \alpha=0.675, \alpha=0.875$ 对应的位置设置单相接地故障, 在0.24 s时投入有源消弧装置, 接地过渡电阻为500 Ω。4种不同故障位置的接地故障电流仿真结果如图4所示。根据仿真结果可知, 本文所提方法不受故障位置影响, 在不同位置发生故障时均能够将故障电流抑制为0, 实现有效消弧。

针对经消弧线圈接地, 仅采用有源消弧方式以及所提混合柔性接地方式, 在不同故障场景下进行仿真分析, 得到有源消弧补偿装置投入前、后故障点对地电压、电流仿真结果如附录A表A2所示。表中: 分别采用恒定电阻模型和Cassie电弧模型模拟接地过渡电阻。表A2中的仿真结果表明, 针对不同接地方式下的不同的故障位置及接地过渡电阻情况, 混合柔性接地方式均能够有效抑制故障点对地电压, 从而抑制接地故障电流并实现有效熄弧, 避免

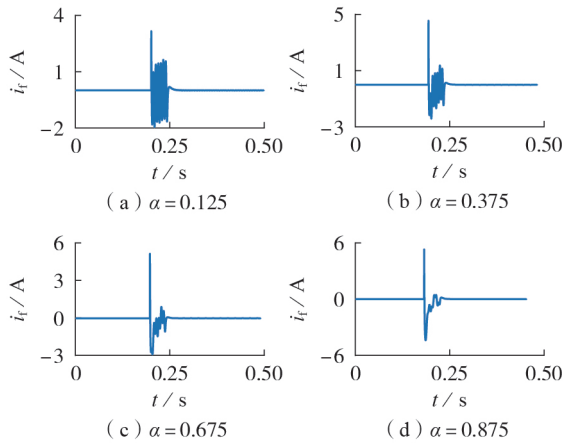


图4 不同故障位置下的接地故障消弧仿真结果
Fig.4 Simulative results of grounding fault arc suppression under different fault points

对发电机定子铁心造成损伤。

3.2 逆变电源容量仿真分析

为证明混合柔性接地方式相对传统的有源消弧方式而言能够降低逆变电源的容量,在此针对不同故障情况下逆变电源的输出容量进行仿真分析。由于采用双频有源消弧装置,输出容量 S 包含基波和3次谐波分量,其计算公式为:

$$S = U_{n1} I_{i1} + U_{n3} I_{i3} \quad (12)$$

式中: U_{n1} 、 U_{n3} 分别为中性点基波电压和3次谐波电压有效值; I_{i1} 、 I_{i3} 分别为电源注入中性点基波电流和3次谐波电流有效值。

不同故障情况下,单一使用双频有源消弧装置和采用混合柔性接地方式对应的逆变电源输出容量仿真结果如附录A表A3所示。表中:下标中的T、H分别表示仅使用双频有源消弧装置、采用混合柔性接地方式;注入容量为双频注入装置注入的基波和3次谐波容量之和。将表A3中2种消弧方式的逆变容量计算结果可视化,将得到更为直观且显著的对比效果,如图5所示。

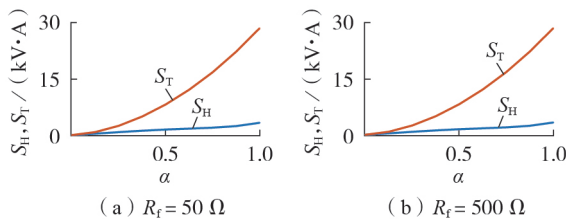


图5 2种消弧方式下逆变电源容量的对比

Fig.5 Comparison of inverter power supply capacity between two arc suppression modes

由图5可见:在 $R_f=50\Omega$ 时与 $R_f=500\Omega$ 时的整体情况区别不大,有源消弧装置所需容量的大小均得到了大幅降低;对于仅采用双频有源消弧装置的情况而言,故障点越靠近机端,需要注入的基波电流

越大,注入源提供的容量随之增加,逆变电源的容量至少应为 $28\text{ kV}\cdot\text{A}$;对于本文所提混合柔性接地方式,由于消弧线圈能够补偿大部分的基频分量,因此注入源输出的基波电流大幅降低,逆变电源的容量仅需 $4\text{ kV}\cdot\text{A}$ 左右,能够极大地减少有源消弧装置的体积与造价。

3.3 逆变电源对比

逆变器的体积和造价会受到多种因素的影响,包括逆变器的类型、功率等级、设计复杂性、使用的材料、制造品牌等。一般而言,逆变器体积和造价与容量正相关,容量越大,所需要的组件尺寸通常也需要更大,因此整体体积也将增加;大功率逆变器需要更多的原材料,同时其需要更强的结构来支撑重量、更好的散热系统以防止过热,以及更为复杂的电路设计,因此制造成本也随之增加。

本文以浙江某公司生产的 220 V 直流电逆变为 10.5 kV 交流电的逆变器为例,容量为 $4\text{ kV}\cdot\text{A}$ 的逆变器价格为 9850 元,质量为 50 kg 左右;容量为 $30\text{ kV}\cdot\text{A}$ 的逆变器价格为 17500 元,质量为 200 kg 左右。因此混合柔性接地方式不仅降低了其体积与造价,也提高了其在实际工程应用中的经济性与可行性。

4 动模试验验证

仿真试验分析中采用准分布参数模型,无法模拟不同负载工况下负荷的去磁作用和发电机的励磁调节过程,无法证实本文所提方法在不同负载工况下均能够取得良好的消弧和限流效果。为此,在发电机不同负载工况下对本文所提方法进行动模试验分析,动模发电机容量为 $15\text{ kV}\cdot\text{A}$,额定电压为 400 V ,采用中性点经消弧线圈接地方式,欠补偿度为 10% 。利用可编程交流电源模拟有源消弧装置,其容量为 $15\text{ kV}\cdot\text{A}$,单相输出电流有效值调节范围为 $0\sim 10\text{ A}$,相角调节范围为 $-180^\circ\sim 180^\circ$,频率调节范围为 $15\sim 1600\text{ Hz}$,可同时输出任意有效值和相位的基波和3次谐波电流。利用滑线变阻器模拟接地过渡电阻,可调节范围为 $0\sim 2000\Omega$ 。动模试验系统接线图如图6所示,图中: L 为消弧线圈; KD 为中性点处开关; KY 为接地故障处开关。动模试验系统实物图如附录B图B1所示。

设置不同的发电机定子绕组单相接地故障场景及负载工况。依据式(4)、(11),基于发电机实测故障电势与相电势,在线计算中性点注入电流补偿量。以A相机端处发生单相接地故障为例,此时的故障电势为A相相电势。空载运行条件下,在线测量得到的发电机相电势中的基波、3次谐波分量分别为 $222.69\angle -44.25^\circ$ 、 $2.91\angle 123.75^\circ\text{ V}$,计算得中性点注入电流的基波、3次谐波补偿量分别为 $0.0169\angle 45.75^\circ$ 、

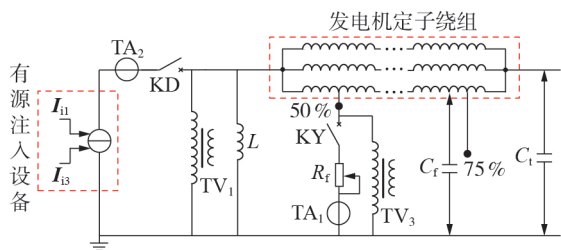


图6 动模实验系统接线图

Fig.6 Wiring diagram of dynamic model experimental system

0.0021∠260.2849° A。设置可编程交流电源输出电流与计算所得补偿值相等,试验过程中,投入机端与滑线电阻器之间的开关用于设置接地故障,设置接地过渡电阻为240 Ω,投入可编程交流电源与发电机中性点之间的开关用于投入有源消弧装置。在此过程中,故障点对地电压及接地故障电流波形如图7所示。

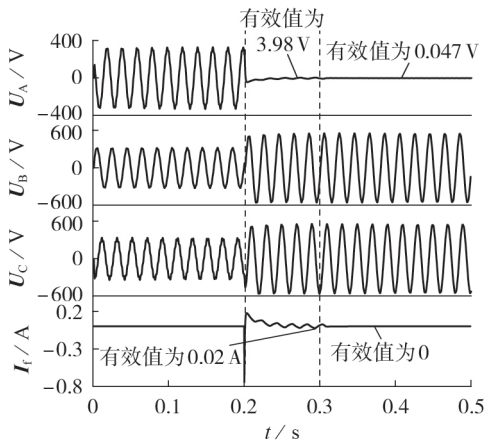


图7 接地故障消弧试验结果

Fig.7 Results of arc suppression experiment under grounding fault

由图7可见:发生接地故障后,故障点对地电压有效值为3.98 V,接地故障电流有效值为0.02 A;在投入外加电源后,故障点对地电压降低,有效值为0.047 V,故障电流抑制为0。中性点电压调控使得非故障相电压升高至线电压,由于系统绝缘按照线电压水平设计,不会对系统绝缘安全造成影响。

分别在不同运行工况和故障场景下重复该实验,实验结果如附录B表B1所示。实验结果表明,混合柔性接地方式能够实现可靠的接地故障熄弧,不受接地故障位置、接地过渡电阻、系统运行工况和发电机励磁调节影响。

5 结论

为降低有源消弧装置中逆变电源的容量,本文提出发电机中性点混合柔性接地方式,将有源消弧策略与消弧线圈接地方式相结合,并得出以下结论:

1)本文将双频有源消弧方法与消弧线圈接地方式相结合,利用消弧线圈补偿接地故障电流中大部分的基波分量,剩余的基波分量和谐波分量通过有源消弧装置实现补偿,从原理上减小有源消弧装置的输出电流,有效降低消弧装置的容量;

2)仿真分析结果表明,相较于传统的有源消弧方法,混合柔性接地方式中逆变装置的容量大幅减小,由传统方式中的28 kV·A降低至4 kV·A左右,降低了其体积与造价,提高了其在实际工程应用中的经济性与可行性;

3)仿真分析与动模试验结果表明,混合柔性消弧方法能够实现可靠的接地故障熄弧,不受接地故障位置、接地过渡电阻、系统运行工况和发电机励磁调节影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 司雨欣,桂林,张琦雪,等. 大型水轮发电机定子绕组分布电容对位移电压影响分析[J]. 电力自动化设备,2024,44(10):172-178.
SI Yuxin, GUI Lin, ZHANG Qixue, et al. Analysis of impact of distributed capacitance in stator windings of large hydroelectric generators on displacement voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(10): 172-178.
- [2] 郝亮亮,陈建林,桂林,等. 核电多相环无刷励磁系统故障分析及继电保护原理[J]. 电力系统自动化,2023,47(9):137-146.
HAO Liangliang, CHEN Jianlin, GUI Lin, et al. Fault analysis and relay protection principle for multi-phase ring brushless excitation system of nuclear power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 137-146.
- [3] 卢庆辉,乔健,尹项根,等. 基于时域动态过程的变速抽蓄机组外部故障短路电流计算方法[J]. 电力自动化设备,2024,44(3):172-179.
LU Qinghui, QIAO Jian, YIN Xianggen, et al. Calculation method of external fault short circuit current of variable speed pumped storage unit based on time-domain dynamic process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 172-179.
- [4] 王义凯,尹项根,乔健,等. 海洋核动力平台发电机定子绕组单相接地故障风险分析与实时定位[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):178-183.
WANG Yikai, YIN Xianggen, QIAO Jian, et al. Risk analysis and real-time locating of single-phase grounding fault of generator stator winding for offshore nuclear power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 178-183.
- [5] 高俊国,孟睿潇,胡海涛,等. 电机定子绝缘老化寿命预测研究进展[J]. 电工技术学报,2020,35(14):3065-3074.
GAO Junguo, MENG Ruixiao, HU Haitao, et al. Research progress on prediction of aging life of motor stator insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3065-3074.
- [6] 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.
- [7] 龚衡, 桂林, 周光厚, 等. 发电机定子单相接地故障下定子铁芯的电弧烧损过程[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 197-203. GONG Heng, GUI Lin, ZHOU Guanghou, et al. Arc burning process of stator core under stator single-phase grounding fault of generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 197-203.
- [8] 王义凯, 尹项根, 谭力铭, 等. 基于波形匹配电流源注入的网源直连系统接地故障有源消弧技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5381-5390. WANG Yikai, YIN Xianggen, TAN Liming, et al. Active arc suppression technology based on waveform-matching current source injection for ground fault of generator-grid directly connected system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5381-5390.
- [9] 贾文超, 曹嵩. 大型水电机组组合型接地方式参数优化设计[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 79-85. JIA Wenchao, CAO Song. Parameter optimization design of combination-type grounding mode for large-sized hydropower units [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 79-85.
- [10] 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.
- [11] 尹项根, 王义凯, 谭力铭, 等. 基于双频有源调控的大型机组定子接地故障电弧抑制及自适应保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 1-9. YIN Xianggen, WANG Yikai, TAN Liming, et al. Dual-frequency active regulation-based arc suppression and adaptive protection for a stator ground fault in large generators [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 1-9.
- [12] 曾祥君, 贺世庚, 喻焜, 等. 配电网中性点柔性接地装置四象限运行机理与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8406-8421. ZENG Xiangjun, HE Shigeng, YU Kun, et al. Four-quadrant operation mechanism and control method of flexible grounding device at neutral point in distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8406-8421.
- [13] WANG W, YAN L, ZENG X, et al. Principle and design of a single-phase inverter-based grounding system for neutral-to-ground voltage compensation in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1204-1213.
- [14] 徐雯, 王义凯, 尹项根, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 197-202. XU Wen, WANG Yikai, YIN Xianggen, et al. Arc suppression method and protection countermeasures of generator stator grounding fault based on active control of zero-sequence voltage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 197-202.
- [15] 王义凯, 尹项根, 谭力铭, 等. 发电机定子接地故障双频有源消弧策略及故障类型辨识[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4835-4847. WANG Yikai, YIN Xianggen, TAN Liming, et al. Generator stator ground fault active arc suppression and fault type identification method based on dual-frequency voltage regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4835-4847.
- [16] 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): 48-54. 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): 48-54.
- [17] FRIEDEMANN D F, MOTTER D, OLIVEIRA R A. Stator-ground fault location method based on third-harmonic measures in high-impedance grounded generators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 794-802.
- [18] WANG Yikai, YIN Xianggen, QIAO Jian, et al. Generator stator windings ground fault diagnosis for generator-grid directly connected system of floating nuclear power plant [J]. Energy Reports, 2021, 7: 460-469.
- [19] 尹项根, 王义凯, 谭力铭, 等. 故障机理深度关联的大型发电机保护新原理探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 1-7. YIN Xianggen, WANG Yikai, TAN Liming, et al. Discussion on a new principle of large generator protection deeply associated with fault mechanisms [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 1-7.
- [20] WANG Yikai, YIN Xianggen, XU Wen, et al. Active arc suppression algorithm for generator stator winding ground fault in the floating nuclear power plant [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5356-5265.
- [21] XIONG Bin, ZHOU Long, DING Shuye. Study on dynamic characteristics of single-phase grounding fault of 1 000 MW hydro generator under different grounding modes [J]. Machines, 2022, 10(7): 554.
- [22] 郭谋发, 游建章, 郑泽胤. 配电网单相接地故障柔性消弧技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4232-4246. GUO Moufa, YOU Jianzhan, ZHENG Zeyin. Review of flexible arc suppression technology for single-phase-to-ground fault in distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4232-4246.
- [23] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 基于介质击穿原理的配电线路高阻接地故障精确建模[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 62-66, 106. WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. High-impedance fault modeling based on solid dielectric electrical breakdown theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 62-66, 106.
- [24] 王义凯. 海洋核动力平台电力主设备安全风险防控与保护关键技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023. WANG Yikai. Key technologies of safety risk preventive control and protection for the main electric power equipment of the floating nuclear power plant [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.

作者简介:

王义凯(1996—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: wangyikai@ncepu.edu.cn);

郑海然(2003—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: zlcstr@163.com);

乔健(1997—), 男, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: qiaojian@ncepu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

(下转第123页 continued on page 123)

作者简介:

叶鹏举(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(**E-mail**:yepengju@zju.edu.cn);
许昊(1997—),男,博士,主要研究方向为电力系统稳

定分析与控制(**E-mail**:eexuhao@zju.edu.cn);

甘德强(1966—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(**E-mail**:dgan@zju.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

GPSS mechanism analysis and multiple-unit parameter optimization considering regulation performance of single unit

YE Pengju¹, XU Hao¹, YANG Mingliang², LUO Yao², LI Jinqiu², ZHAO Yong³,
JIANG Chuyang³, CHEN Gang³, GAN Deqiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Yunnan Power Grid Corporation Limited, Kunming 650011, China;

3. China Southern Power Grid Scientific Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of new energy in the power system, the overall inertia of the system decreases and the frequency stability becomes a primary concern in the safe and stable operation of the Yunnan Power Grid. The traditional method of adjusting proportional-integral-differential parameters can not give consideration to both stability performance and adjusting speed. The limitation of this method is analyzed in frequency domain, and the governor-side power system stabilizer (GPSS) is used to improve the system stability performance and the unit adjusting speed. From the perspective of transfer function, the mechanical analysis of GPSS is carried out and the influence of GPSS parameters on the regulation performance and stability of power system is analyzed. Based on the properties of GPSS, a GPSS parameter optimization setting method is proposed from the perspective of frequency domain, which comprehensively considers the stability margin and the regulation performance of a single unit. The method can improve the regulation performance of each unit installed with GPSS and the whole system at the same time and optimize the stability margin. The simulative results of Yunnan Power Grid demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: GPSS; frequency stability; regulation performance; stability analysis; parameter optimization design

(上接第114页 continued from page 114)

Hybrid flexible arc suppression method of generator stator winding grounding fault

WANG Yikai¹, ZHENG Hairan¹, QIAO Jian¹, YIN Xianggen², TANG Chenxiao¹, OU Jie¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The active arc suppression method can realize reliable arc suppression of generator stator winding fault, but it requires a large-capacity inverter power supply, which is large in size and high in cost, and the engineering application is limited. In order to reduce the capacity of the inverter power supply, a hybrid flexible arc suppression method for generator stator winding grounding fault is proposed, which combines the dual-frequency active arc suppression method with the grounding mode of the arc suppression coil, and uses the arc suppression coil to compensate for most of the fundamental components in the grounding fault current, and the remaining fundamental components and harmonic components are compensated by the active arc suppression device. Under the premise of reliably realizing grounding fault arc suppression, this method can greatly reduce the capacity of the inverter power supply, and has high economy and practicability. Simulation and dynamic model test results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: stator winding grounding fault; hybrid flexible arc suppression; dual-frequency active arc suppression; arc suppression coil; inverter power capacity

附录 A

表 A1 示例发电机仿真模型故障电势参数表
Table A1 Fault potential of simulation generator model

故障位置	$ E_{f1} /V$	$\varphi_{f1}/(^{\circ})$	$ E_{f3} /V$	$\varphi_{f3}/(^{\circ})$
0.125	792.93	-52.5	193.96	22.5
0.25	1582.5	-48.75	380.47	33.75
0.375	2365.2	-45	552.35	45
0.5	3137.9	-41.25	703.01	56.25
0.625	3897.0	-37.5	826.65	67.5
0.75	4639.6	-33.75	918.53	78.75
0.875	5362.2	-30	975.10	90
1	6061.9	-26.25	994.21	101.25

表 A2 不同故障场景下的消弧效果
Table A2 Arc elimination effect under different fault scenarios

接地方式		混合柔性接地方式						有源消弧方式						消弧线圈	
故障场景		U_f/V			I_f/A			U_f/V			I_f/A			U_f/V	I_f/A
故障点	R_f/Ω	补偿前	补偿后	占比	补偿前	补偿后	占比	补偿前	补偿后	占比	补偿前	补偿后	占比	消弧后	消弧后
0	50	95.32	0.21	0.22%	1.96	0.0042	0.21%	95.33	0.20	0.21%	1.90	0.0041	0.22%	95.31	1.91
	500	677.02	1.49	0.22%	1.35	0.0030	0.22%	631.17	1.40	0.22%	1.26	0.0028	0.22%	670.24	1.34
	Cassie	86.61	8.58	12.53%	2.12	0	0.00%	80.88	9.84	12.17%	2.09	0	0.00%	702.9	1.26
0.125	50	89.86	0.23	0.26%	1.78	0.0043	0.24%	89.42	0.22	0.25%	1.77	0.0042	0.24%	89.25	1.78
	500	635.34	1.32	0.21%	1.27	0.0027	0.21%	630.28	1.29	0.20%	1.21	0.0026	0.21%	627.6	1.25
	Cassie	86.08	7.28	8.46%	1.63	0	0.00%	84.29	7.10	8.42%	1.62	0	0.00%	1860.21	9.0
0.25	50	81.1	0.20	0.25%	1.60	0.004	0.25%	80.9	0.20	0.25%	1.59	0.004	0.25%	80.2	1.60
	500	571.52	1.25	0.22%	1.14	0.0025	0.22%	568.42	1.20	0.21%	1.14	0.0025	0.22%	563.3	1.13
	Cassie	74.77	2.37	3.17%	1.65	0	0.00%	73.90	2.31	3.13%	1.64	0	0.00%	1946.2	9.4
0.375	50	69.06	0.26	0.38%	1.38	0.0052	0.38%	69.04	0.26	0.38%	1.37	0.0053	0.39%	67.9	1.35
	500	488.90	1.32	0.27%	0.98	0.0026	0.27%	486.52	1.31	0.27%	0.92	0.0026	0.28%	481.1	0.96
	Cassie	66.77	1.24	1.86%	1.40	0	0.00%	65.65	1.23	1.87%	1.40	0	0.00%	2072.3	10.0
0.5	50	55.01	0.36	0.65%	1.07	0.0080	0.75%	55.01	0.36	0.65%	1.07	0.0080	0.75%	53.8	1.08
	500	393.76	1.56	0.40%	0.78	0.0031	0.40%	394.05	1.57	0.40%	0.79	0.0031	0.39%	387.4	0.78
	Cassie	60.22	1.57	2.61%	1.06	0	0.00%	61.21	1.59	2.60%	1.06	0	0.00%	2234.8	10.8
0.625	50	37.96	0.46	1.21%	0.78	0.0078	1.00%	37.95	0.47	1.24%	0.79	0.0079	1.00%	38.7	0.79
	500	297.24	1.84	0.62%	0.59	0.0037	0.63%	295.39	1.81	0.61%	0.60	0.0037	0.62%	294.0	0.58
	Cassie	50.19	2.41	4.80%	0.73	0	0.00%	49.95	2.37	4.74%	0.74	0	0.00%	2424.6	11.8
0.75	50	24.63	0.57	2.31%	0.52	0.0114	2.19%	24.63	0.57	2.31%	0.53	0.0115	2.17%	26.6	0.55
	500	224.47	2.19	0.98%	0.45	0.0044	0.98%	222.75	2.15	0.97%	0.45	0.0045	1.00%	226.5	0.45
	Cassie	43.54	2.65	6.09%	0.48	0	0.00%	43.17	2.56	5.93%	0.47	0	0.00%	2633.1	12.8
0.875	50	17.53	0.69	3.94%	0.52	0.0013	0.25%	17.51	0.69	3.94%	0.50	0.0013	0.26%	24.4	0.50
	500	217.82	2.51	1.15%	0.44	0.0050	1.14%	216.11	2.48	1.15%	0.40	0.0050	1.25%	226.5	0.45
	Cassie	38.21	3.53	9.24%	0.45	0	0.00%	38.16	3.52	9.22%	0.42	0	0.00%	2854.0	14.0
1	50	26.91	0.73	2.71%	0.64	0.0017	0.27%	26.91	0.73	2.71%	0.64	0.0017	0.27%	35.5	0.70
	500	286.55	2.84	0.99%	0.57	0.0057	1.00%	284.89	2.53	0.89%	0.57	0.0057	1.00%	296.7	0.59
	Cassie	26.08	3.75	14.38%	0.64	0	0.00%	25.99	3.73	14.35%	0.64	0	0.00%	268.2	0.4

表 A3 不同接地故障场景下的逆变装置注入容量
Table A3 Injection capacity of inverters in different grounding fault scenarios

故障场景		混合柔性接地注入					双频有源电流装置注入				
故障点	R_f/Ω	I_{i1H}/A	I_{i3H}/A	U_{n1}/kV	U_{n3}/kV	$S_H/(kV \cdot A)$	I_{i1T}/A	I_{i3T}/A	U_{n1}/kV	U_{n3}/kV	$S_T/(kV \cdot A)$
0	50	0	$1.73 \angle -0.43^\circ$	0.034	0.011	0.019	0	$1.73 \angle -0.43^\circ$	0.034	0.011	0.019
	500			0.034	0.011	0.019			0.034	0.011	0.019
	Cassie			0.034	0.011	0.019			0.034	0.011	0.019
0.125	50	$0.06 \angle -142.50^\circ$	$1.62 \angle 12.24^\circ$	0.79	0.21	0.39	$0.60 \angle -142.50^\circ$	$1.61 \angle 14.12^\circ$	0.79	0.21	0.82
	500			0.79	0.20	0.39			0.78	0.21	0.82
	Cassie			0.79	0.22	0.39			0.79	0.22	0.82
0.25	50	$0.12 \angle -138.75^\circ$	$1.45 \angle 25.18^\circ$	1.58	0.42	0.80	$1.12 \angle -138.75^\circ$	$1.44 \angle 29.34^\circ$	1.58	0.42	2.50
	500			1.58	0.42	0.80			1.59	0.41	2.50
	Cassie			1.58	0.42	0.80			1.58	0.42	2.50
0.375	50	$0.18 \angle -135.00^\circ$	$1.22 \angle 38.68^\circ$	2.37	0.62	1.18	$1.79 \angle -135.00^\circ$	$1.22 \angle 45.87^\circ$	2.38	0.62	4.98
	500			2.38	0.62	1.18			2.38	0.62	4.98
	Cassie			2.38	0.62	1.18			2.39	0.63	4.98
0.5	50	$0.24 \angle -131.25^\circ$	$0.95 \angle 53.34^\circ$	3.14	0.78	1.49	$2.37 \angle -131.25^\circ$	$0.96 \angle 65.01^\circ$	3.14	0.78	8.19
	500			3.14	0.78	1.49			3.14	0.78	8.19
	Cassie			3.14	0.78	1.49			3.14	0.79	8.19
0.625	50	$0.29 \angle -127.50^\circ$	$0.65 \angle 71.01^\circ$	3.90	0.91	1.74	$2.94 \angle -127.5^\circ$	$0.70 \angle 89.96^\circ$	3.90	0.91	12.12
	500			3.90	0.91	1.74			3.89	0.91	12.12
	Cassie			3.91	0.91	1.74			3.90	0.90	12.12
0.75	50	$0.35 \angle -123.75^\circ$	$0.35 \angle 100.02^\circ$	4.64	1.01	1.99	$3.51 \angle -123.75^\circ$	$0.50 \angle 128.29^\circ$	4.64	1.01	16.77
	500			4.64	1.01	1.99			4.64	1.01	16.77
	Cassie			4.64	1.01	1.99			4.63	1.01	16.77
0.875	50	$0.41 \angle -120.00^\circ$	$0.20 \angle 183.55^\circ$	5.36	1.06	2.41	$4.05 \angle -120.00^\circ$	$0.48 \angle 181.54^\circ$	5.37	1.06	22.24
	500			5.36	1.06	2.41			5.36	1.05	22.24
	Cassie			5.37	1.07	2.41			5.36	1.06	22.24
1	50	$0.46 \angle -116.25^\circ$	$0.45 \angle 242.41^\circ$	6.06	1.10	3.29	$4.58 \angle -116.25^\circ$	$0.66 \angle 223.40^\circ$	6.06	1.10	28.49
	500			6.06	1.10	3.29			6.06	1.10	28.49
	Cassie			6.07	1.10	3.29			6.07	1.10	28.49

附录 B



图 B1 动模试验系统实物图

Fig.B1 Physical diagram of dynamic experiment system

表 B1 不同场景下的消弧效果

Table B1 Arc suppression results under different fault scenarios

负载率	故障场景		故障时				补偿后			
	α	R_f/Ω	U_{f1}/V	U_{f3}/V	I_{f1}/A	I_{f3}/A	U_{f1}/V	U_{f3}/V	I_{f1}/A	I_{f3}/A
0	0.50	500	4.34	1.1	0.009	0.002	0.07	0.003	0.0001	0
		2000	17.0	1.5	0.09	0.0008	0.3	0.005	0.0001	0
	0.75	500	6.4	0.4	0.01	0.0008	0.1	0.009	0.0002	0
		2000	25.05	0.6	0.01	0.0003	0.4	0.01	0.0002	0
100%	0.50	500	4.5	2.5	0.009	0.006	0.08	0.006	0.0002	0
		2000	17.5	3.8	0.009	0.002	0.3	0.009	0.0002	0
	0.75	500	6.6	1	0.01	0.002	0.08	0.02	0.0002	0
		2000	25.9	1.4	0.01	0.0007	0.3	0.02	0.0002	0