



电网技术
Power System Technology
ISSN 1000-3673,CN 11-2410/TM

《电网技术》网络首发论文

题目：大型发电机定子接地故障柔性融合消弧方法
作者：黄俊杰，郭谋发，张彬隆
网络首发日期：2024-05-27
引用格式：黄俊杰，郭谋发，张彬隆. 大型发电机定子接地故障柔性融合消弧方法
[J/OL]. 电网技术. <https://link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20240524.1804.007>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

大型发电机定子接地故障柔性融合消弧方法

黄俊杰, 郭谋发*, 张彬隆

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建省 福州市 350108)

Flexible Fusion Arc Suppression Method for Large Generator Stator Ground Fault

HUANG Junjie, GUO Moufa*, ZHANG Binlong

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian Province, China)

ABSTRACT: A single-phase ground fault in the stator of a large generator may produce an arc, causing core burnout or even serious accidents such as fire. A flexible fusion arc suppression method is proposed to achieve ground fault current suppression and reliable arc suppression by controlling the neutral point voltage and the converter injection current in parallel. The existing flexible arc suppression method for generator stator single-phase ground fault has poor arc suppression effect under low or high resistance conditions. The proposed method considers the stator impedance of the generator and the number of stator parallel branches. It is applicable to different generators and is capable of quickly suppressing the ground fault currents to a safe range under different ground fault transition resistances, different fault locations, and so on. The effectiveness of the proposed method are verified by Matlab/Simulink.

KEY WORDS: large generator; stator ground fault; flexible arc suppression; voltage arc suppression; current arc suppression; fusion arc suppression

摘要: 大型发电机发生定子单相接地故障可能会产生电弧, 导致铁心烧损, 甚至引发火灾等严重事故, 提出一种柔性融合消弧方法, 通过并行控制中性点电压和变流器注入电流, 实现接地故障电流抑制和可靠消弧。现有发电机定子单相接地柔性消弧方法在低阻或高阻的情况下消弧效果不佳, 所提方法考虑了发电机的定子阻抗和定子并联分支数, 适用于不同的发电机, 在不同接地故障过渡电阻、不同故障位置等情况下, 均能够将接地故障电流快速抑制到安全范围内。Matlab/Simulink 仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 大型发电机; 定子接地故障; 柔性消弧; 电压消弧; 电流消弧; 融合消弧

DOI:

基金项目: 福建省自然科学基金计划项目(2023J05106)。

Project Supported by Provincial Natural Science Foundation of Fujian, China (2023J05106).

0 引言

随着我国电力系统的发展, 对系统运行的经济性要求日渐严格, 小容量发电机组逐渐被大容量发电机组取代。作为电力系统的原动力, 发电机在运行过程中必须具备应对突发故障的能力, 大型发电机如果可以免于突发故障造成的影响, 则可以为电力系统带来巨大的经济效益, 同时可有效提供发电的可靠性。据统计, 在各种突发故障中, 发电机定子绕组和铁心间绝缘破坏引发的定子单相接地故障最为常见^[1-2]。发电机定子发生单相接地故障时, 如果没有合理的保护措施, 较大的接地故障电流有可能会产生电弧, 造成定子铁心烧损, 且有可能发展成更严重的相间短路或匝间短路故障, 使发电机遭受严重破坏, 甚至引发火灾等事故^[1-3]。因此, 大型发电机的定子单相接地保护逐渐成为研究热点。

根据 GB/T 14285-2006《继电保护和安全自动装置技术规程》, 额定容量在 300MW 以上的大型发电机定子单相接地故障电流的最大允许值为 1A, 研究中称其为安全接地电流^[4]。为限制发电机定子接地故障电流, 发电机中性点的连接方式发生过多改变, 起初为直接接地、经低阻接地、不接地; 后来, 由于发电机容量增大导致定子对地电容增大, 其中性点连接方式逐渐发展为经变压器高阻接地或经消弧线圈接地。目前国内的大型发电机组, 特别是水轮发电机组, 主要采用中性点经消弧线圈接地, 通过消弧线圈抑制接地故障电流和可能产生的电弧, 属于无源消弧方法^[1-3]。然而, 发电机相电动势中总含有一定的三次及更高次谐波分量^[2,5], 在发电机的机端发生单相接地故障时, 消弧线圈只能补偿故障电流中的基频无功分量, 残余的谐波分量仍可能引发电弧, 造成定子铁心损伤。此外, 消弧线圈的电感值是根据发电机定子及其外部设备总

的对地电容确定的,如果接地故障发生在发电机内部,故障电流基频分量也有可能超过安全接地电流。大型发电机在发生定子永久性接地故障或故障电流大于允许值时需要带时限动作于跳闸,但如果因此切除大容量发电机组,就会增加对电力系统备用容量的需求。文献[1,3]指出,若将接地故障电流限制在安全接地电流的范围内,可以允许发电机带故障运行一段时间,进而提高发电机和电力系统的运行可靠性。因此,为了在发电机定子的任意点处发生接地故障时均能实现可靠消弧,保护发电机铁心的安全,保障电力系统的供电可靠性,针对发电机定子接地故障的柔性(有源)消弧方法应运而生。

针对接地故障的柔性消弧方法,在配电网的应用中有较多的研究成果^[6-15],其原理为使用变流器取代消弧线圈或与消弧线圈配合,根据电流消弧法或电压消弧法的原理控制变流器,实现接地故障电流的全补偿。文献[7]根据电流消弧法的原理,提出一种基于PI算法的变流器控制策略,理论上可以无差地跟踪注入电流的给定信号。文献[8]实现了故障消弧和无功补偿的功能集成。文献[9-10]提出计及配电网线路阻抗的柔性电压消弧方法。文献[11]提出一种适应配电网线路结构动态变化的柔性消弧方法。文献[12]提出一种接地故障暂稳态协同调控的运行方法,优化了消弧装置的暂态响应。文献[13]针对低阻接地时电压消弧可能使故障电流增大的问题,提出改进柔性电压消弧法。文献[14]将柔性电流消弧和柔性电压消弧结合,提出一种适应参数和负荷变化的自适应柔性融合消弧方法。文献[15]的实验结果表明,使用级联H桥变流器的柔性消弧装置在不同接地故障过渡电阻的情况下,均能够快速有效地抑制接地故障电流。然而,配电网柔性消弧的实验结果表明,电流消弧方法在高阻接地情况下消弧效果不佳,电压消弧方法在低阻接地情况下消弧效果较差^[6],因此,若仅使用电流或电压消弧方法中的一种,则消弧效果受接地故障过渡电阻的影响大,亟需一种改良消弧方法或综合控制策略以保障接地故障的可靠消弧。

目前,发电机定子接地故障的柔性消弧研究处于起步阶段,未充分吸收配电网柔性消弧研究总结的经验。文献[16]提出一种基于在发电机中性点接入基波和三次谐波双频电压源的柔性电压消弧方法。文献[17]提出一种大型水轮发电机定子接地故障的柔性电流消弧方法。由前文可知,现有的发电机定子接地故障柔性消弧研究仅使用电流或电压消弧方法的一种,其消弧效果受接地故障过渡电阻

的影响大。并且,现有消弧方法在计算变流器控制目标给定值时未考虑发电机的定子阻抗和定子并联分支数,给定值存在理论误差,不利于在高阻或低阻情况下的消弧。

发电机定子接地故障的故障位置已能够实现精确的在线测量,为发电机的故障检修和柔性消弧研究提供了技术支持。文献[18]提出一种基于注入式保护的测量数据实现故障定位的方法。文献[19]提出一种基于基波电势随故障位置和过渡电阻变化的圆弧轨迹进行故障定位的方法,定位误差不超过1匝,在0.2s内可以完成故障的在线定位。

本文结合柔性电压和电流消弧方法,提出一种基于级联H桥变流器的大型发电机定子接地故障柔性融合消弧方法,以故障点到中性点电压的负值作为电压给定值、发电机定子对地电容电流和外接设备对地电容电流之和(以下统称为发电机定子对地电容电流之和)作为电流给定值,并行控制中性点电压和变流器注入电流,在低阻和高阻情况下均有良好的消弧效果;提出一种发电机柔性电流和电压消弧方法中变流器控制目标给定值的计算机求解算法,在模型和算法中考虑了发电机定子并联分支数和定子阻抗,可适用于不同发电机;仿真结果表明,所提消弧方法的控制目标给定值计算结果较为精确,具有较强的鲁棒性和良好的适用性。

1 发电机定子单相接地故障的数学模型

1.1 发电机参数及其绕组连接方式

以某水电厂的一台700MW波绕组大型发电机为例,该发电机出口设有断路器(generator outlet circuit breaker, GCB),经升压变压器接入输电网,升压变压器的低压侧采用三角形接线方式,发电机的主要参数如表1所示。

表1 某波绕组水轮机主要参数
Tab.1 Main parameters of a wave winding hydro-generator

参数	值
定子槽数	840
极对数	40
定子并联分支数	8
每分支线圈数	35
槽距角/°	17.14
额定功率/MW	700
额定电压/kV	20
定子每相对地电容/ μF	4.07
定子每相绕组电阻/ $\text{m}\Omega$	3
外接设备每相对地电容/ μF	0.4

该发电机定子绕组同相8个分支的连接方式相同,以A相第一个分支为例,顺转向排号,按照线

圈上层边槽号（线圈下层边槽号）的格式编号，正号表示先到上层边再到下层边，负号表示先到下层边再到上层边，该分支绕组的连接方式如图 1 所示。

1 (11)	22 (32)	43 (53)	64 (74)	85 (95)
-96 (-106)	-75 (-85)	-54 (-64)	-33 (-43)	-12 (-22)
2 (12)	23 (33)	44 (54)	65 (75)	86 (96)
-97 (-107)	-76 (-86)	-55 (-65)	-34 (-44)	-13 (-23)
3 (13)	24 (34)	45 (55)	66 (76)	87 (97)
-98 (-108)	-77 (-87)	-56 (-66)	-35 (-45)	-14 (-24)
4 (14)	25 (35)	46 (56)	67 (77)	88 (98)

图 1 发电机定子 A 相第一个分支绕组的连接方式

Fig.1 Connection method of the first branch winding of phase A of the generator stator

由该发电机定子每相的第一个分支绕组构成的整体，即发电机定子的前五个单元，由 105 个线圈组成，每相占 35 个线圈，根据线圈的上层边槽号为线圈命名，以 1 号线圈作为 0° 相量基准，对其绘制槽电势星型图，如图 2 所示。

由图 2 递推可得发电机定子其他单元的相带分布，由图 1 可以看出每一行 5 个线圈的电势相同，构成一个线圈组，波绕组的第一节距和第二节距分别为 10 和 11，进而可得其他分支绕组的连接方式。

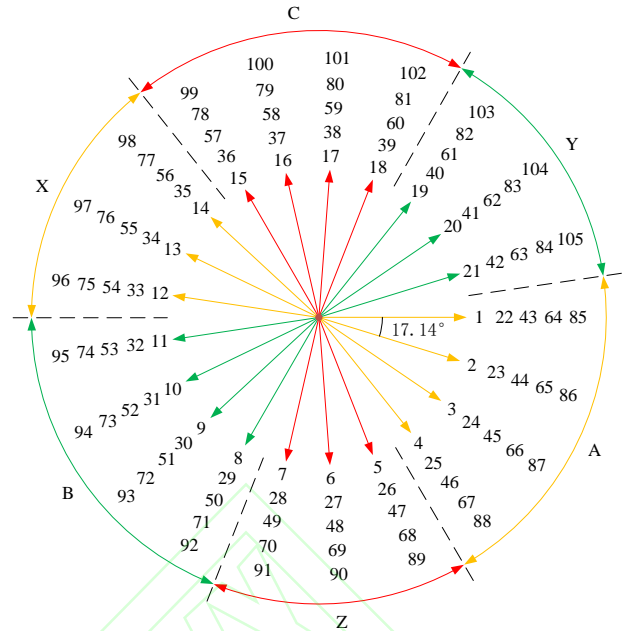


图 2 发电机定子前五个单元的槽电势星型图

Fig.2 Slot potential star diagram of the first five units of the generator stator

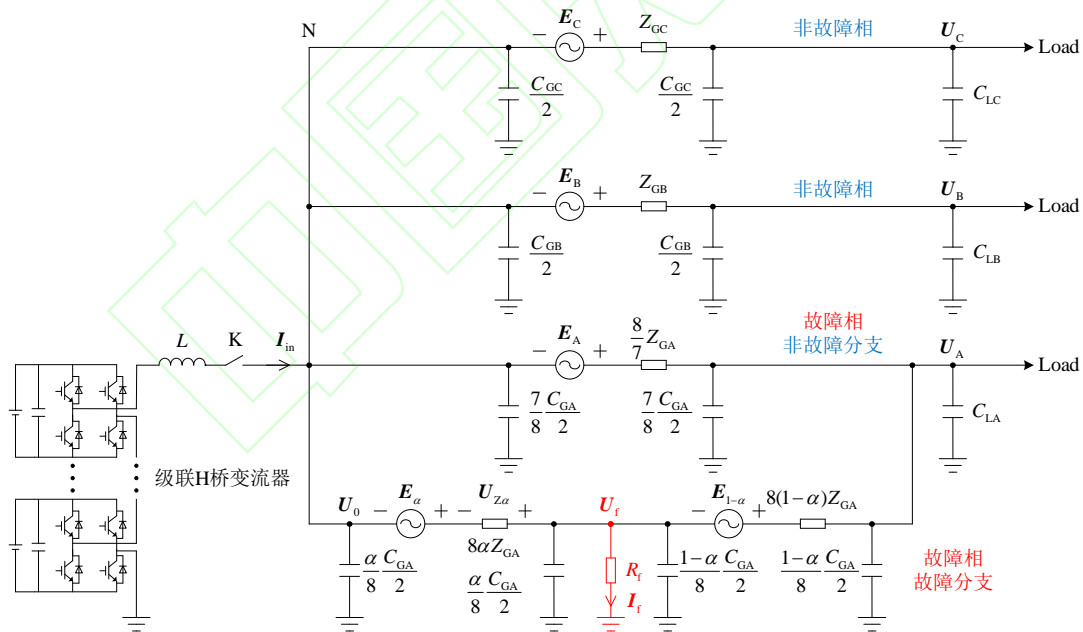


图 3 发电机定子发生 A 相单相接地故障时的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of phase A single-phase grounding fault in generator stator

1.2 发电机定子单相接地故障的等效电路

以表 1 所述发电机的定子 A 相第一分支发生接地故障为例，发电机定子采用 Π 型等效电路，级联 H 桥变流器经连接电感和单相高压开关接入发电机中性点，可得故障等效电路如图 3 所示。其中，变流器连接电感作为一阶低通滤波器，用于滤除级联 H 桥变流器产生的高次谐波，其取值应远离全补偿

消弧线圈的电感值，以规避抑制故障电流过程中可能出现谐振的问题^[6]；变流器直流侧电源的获取方式为：在发电厂厂用电源母线处取源，通过升压变压器、三相不可控整流器和多通道隔离型 DC/DC 变换器获得多路相互独立的直流电源给各级 H 桥变流器的直流侧供电；变流器投入工作时，可使用文献[20]提出的多桥臂 DC/DC 变换器稳压方法以

保证各级 H 桥变流器直流侧电压的稳定控制。

图 3 中, E_A 、 E_B 、 E_C 分别为发电机空载时的 A、B、C 三相电源电压, U_A 、 U_B 、 U_C 分别为发电机机端三相对地电压, Z_{GA} 、 Z_{GB} 、 Z_{GC} 分别为发电机三相定子绕组等效阻抗, C_{GA} 、 C_{GB} 、 C_{GC} 分别为发电机三相定子绕组对地电容, C_{LA} 、 C_{LB} 、 C_{LC} 分别为发电机外接设备三相对地电容, U_f 为故障点对地电压, R_f 为接地故障过渡电阻, I_f 为故障电流, α 为故障匝比, 即故障点到发电机中性点的线圈匝数与该相的总串联线圈匝数的比值, U_0 为发电机中性点电压, E_α 为故障点到发电机中性点的空载电压, $E_{1-\alpha}$ 为发电机故障相机端到故障点的空载电压, $U_{Z\alpha}$ 为定子电流在故障点到中性点的等效阻抗 $8\alpha Z_{GA}$ 上产生的损耗电压, I_{in} 为级联 H 桥变流器向发电机中性点注入的补偿电流, K 为单相高压开关, L 为变流器的连接电感, N 为中性点。

图 3 也适用于其他发电机发生定子单相接地故障的建模与计算, 只需要根据定子并联分支数修改故障相参数的系数, 再代入发电机相关参数即可。以一台每相 2 分支的汽轮发电机发生定子 A 相接地故障为例, 修改图 3 中 Z_{GA} 、 C_{GA} 的系数, 可得修改后的故障相定子分支等效电路如图 4 所示。

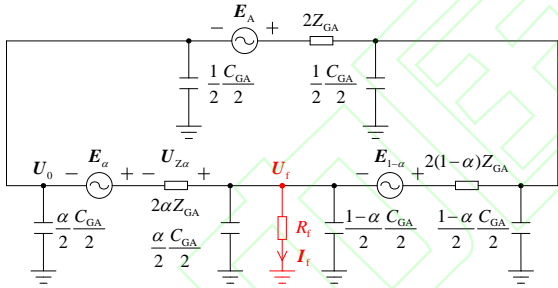


图 4 汽轮发电机故障相定子分支等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of stator branch in faulty phase of turbine generator

2 柔性融合消弧方法

2.1 柔性电压消弧原理

由图 3 可以看出, 以发电机定子发生 A 相接地故障为例, 故障点到中性点的电压 E_f 由空载电压 E_α 和损耗电压 $U_{Z\alpha}$ 两部分组成, 由于大型发电机定子绕组的阻抗实际上很小, 为毫欧级, 远小于接地故障过渡电阻和定子对地容抗, 并且, 定子上流通的负荷电流远大于故障电流, 因此可近似认为损耗电压 $U_{Z\alpha}$ 与等效阻抗 $8\alpha Z_{GA}$ 呈正比, 根据基尔霍夫电压定律可得

$$U_{Z\alpha} = \alpha(U_A - U_0 - E_A) \quad (1)$$

同时, 故障点对地电压满足以下方程

$$U_f = I_f R_f = E_f + U_0 = E_\alpha + U_{Z\alpha} + U_0 \quad (2)$$

由式(2)可知, 只要通过级联 H 桥变流器控制中性点电压 $U_0 = -E_f$, 便能使故障点电压 $U_f = 0$, 从而使故障电流 $I_f = 0$, 实现定子接地故障柔性电压消弧, 将式(1)代入式(2), 可得级联 H 桥变流器控制中性点电压的给定值表达式为

$$U_{ref} = -(E_\alpha + U_{Z\alpha}) = -[E_\alpha + \alpha(U_A - U_0 - E_A)] \quad (3)$$

式中, α 可以由文献[16]提出的发电机定子接地故障在线定位方法求得, 则有

$$E_\alpha = \sum_{i=1}^{[\alpha]} E_i + (\alpha - [\alpha]) E_{[\alpha]+1} \quad (4)$$

式中, $[\alpha]$ 表示 α 向下取整, E_i 表示故障分支第 i 个线圈两端的电压 (参考方向与 E_α 相同)。将最靠近中性点的线圈定义为第 1 个线圈, 最靠近机端的线圈定义为第 35 个线圈, 以此类推, 则有

$$E_A = \sum_{i=1}^{35} E_i = \sum_{i=1}^{35} E_i \angle \theta_i = \sum_{i=1}^{35} E_i (\cos \theta_i + j \sin \theta_i) \quad (5)$$

式中, E_i 为第 i 个线圈两端电压的有效值, $E_i \angle \theta_i$ 为相量形式, $E_i (\cos \theta_i + j \sin \theta_i)$ 为用于计算机求解的表达式, 由于 E_i 主要由基波分量和三次谐波分量构成^[2,5], 由式(5)可得求解各线圈空载电压的基波分量 E_{i1} 和三次谐波分量 E_{i3} 的方程

$$\begin{cases} E_{A1} = \sum_{i=1}^{35} E_{i1} (\cos \theta_{i1} + j \sin \theta_{i1}) \\ E_{A3} = \sum_{i=1}^{35} E_{i3} (\cos \theta_{i3} + j \sin \theta_{i3}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, E_{A1} 和 E_{A3} 为发电机 A 相空载电压的基波和三次谐波分量, E_{i1} 和 E_{i3} 为线圈空载电压基波分量和三次谐波分量有效值, 为待求量, θ_{i1} 和 θ_{i3} 可由图 1 和图 2 得到, 为已知量, 求解时仅需测量 E_{A1} 和 E_{A3} 的有效值 E_{A1} 和 E_{A3} , 则式(6)可化为

$$\begin{cases} E_{i1} = \frac{E_{A1}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{35} \cos \theta_{i1}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{35} \sin \theta_{i1}\right)^2}} \\ E_{i3} = \frac{E_{A3}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{35} \cos \theta_{i3}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{35} \sin \theta_{i3}\right)^2}} \end{cases} \quad (7)$$

表 2 A 相第一分支各线圈空载电压

Tab.2 No-load voltage of each coil of the first branch of phase A

参数名称	基波分量/V	三次谐波分量/V
E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5	345.15 \angle 51.43°	25.7 \angle 154.29°
E_6 、 E_7 、 E_8 、 E_9 、 E_{10}	345.15 \angle 42.86°	25.7 \angle 128.58°
E_{11} 、 E_{12} 、 E_{13} 、 E_{14} 、 E_{15}	345.15 \angle 34.29°	25.7 \angle 102.87°
E_{16} 、 E_{17} 、 E_{18} 、 E_{19} 、 E_{20}	345.15 \angle 25.71°	25.7 \angle 77.13°
E_{21} 、 E_{22} 、 E_{23} 、 E_{24} 、 E_{25}	345.15 \angle 17.14°	25.7 \angle 51.42°

$E_{26}、E_{27}、E_{28}、E_{29}、E_{30}$	$345.15\angle 8.57^\circ$	$25.7\angle 25.71^\circ$
$E_{31}、E_{32}、E_{33}、E_{34}、E_{35}$	$345.15\angle 0^\circ$	$25.7\angle 0^\circ$

设发电机机端电压中三次谐波与基波的比例为 1/20, 根据式(7), 可求得 A 相第一分支各个线圈的空载电压, 如表 2 所示, 其余分支同理可求。

进而, 所提算法同样也适用于定子串联线圈数为 n 的发电机, 即通过以下方程求解 E_i 后, 代入式(4)得到 E_α , 再代入式(3)得到 U_{ref} 。

$$E_A = \sum_{i=1}^n E_i (\cos \theta_i + j \sin \theta_i) \quad (8)$$

此外, 发电机会通过自动励磁调节使得机端电压在不同负载的场合下保持稳定, 但自动励磁调节只会改变 E_A 、 E_B 、 E_C 的幅值, 而不会改变相位, 因此 E_α 可以通过在线计算得到。

2.2 柔性电流消弧原理

由前文可知发电机定子接地故障电流主要由基波和三次谐波分量组成, 因此级联 H 桥变流器仅补偿基波和三次谐波。

图 3 中, 令 $I_f = 0$, 则 $U_f = 0$, 根据基尔霍夫电流定律可知, 级联 H 桥变流器注入电流的基波分量表达式为

$$\begin{aligned} I_{in1} = & U_{C1} j \omega \left(\frac{C_{GC}}{2} + C_{LC} \right) \\ & + U_{B1} j \omega \left(\frac{C_{GB}}{2} + C_{LB} \right) \\ & + U_{A1} j \omega \left(\frac{8-\alpha}{16} C_{GA} + C_{LA} \right) \\ & + U_{01} j \omega \left(\frac{C_{GC}}{2} + \frac{C_{GB}}{2} + \frac{7+\alpha}{16} C_{GA} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, U_{A1} 、 U_{B1} 、 U_{C1} 、 U_{01} 分别为发电机机端三相对地电压和中性点电压的基波分量, 由于发电机的机端和中性点处均装有电压互感器, 故可以通过互感器采样, 再通过快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)和锁相环(phase locked loop, PLL)提取得到, ω 为电网角频率, 发电机定子对地电容和外部设备等效对地电容可以使用文献[21]提出的从电压互感器开口三角形侧注入信号的方法测得。

同理, 级联 H 桥变流器注入电流的三次谐波分量表达式为

$$\begin{aligned} I_{in3} = & U_{C3} j 3 \omega \left(\frac{C_{GC}}{2} + C_{LC} \right) \\ & + U_{B3} j 3 \omega \left(\frac{C_{GB}}{2} + C_{LB} \right) \\ & + U_{A3} j 3 \omega \left(\frac{8-\alpha}{16} C_{GA} + C_{LA} \right) \\ & + U_{03} j 3 \omega \left(\frac{C_{GC}}{2} + \frac{C_{GB}}{2} + \frac{7+\alpha}{16} C_{GA} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, U_{A3} 、 U_{B3} 、 U_{C3} 、 U_{03} 分别为发电机机端三相对地电压和中性点电压的三次谐波分量, 也可通过 FFT 和 PLL 得到。设发电机三相参数对称, 则 $C_{GA} = C_{GB} = C_{GC} = C_G$ 、 $C_{LA} = C_{LB} = C_{LC} = C_L$, 根据式(9)和式(10), 可得级联 H 桥变流器注入电流的表达式为

$$\begin{aligned} I_{in} = & I_{in1} + I_{in3} \\ = & U_{C1} j \omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) + U_{C3} j 3 \omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) \\ & + U_{B1} j \omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) + U_{B3} j 3 \omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) \\ & + U_{A1} j \omega \left(\frac{8-\alpha}{16} C_G + C_L \right) \\ & + U_{A3} j 3 \omega \left(\frac{8-\alpha}{16} C_G + C_L \right) \\ & + U_{01} j \omega \left(\frac{C_G}{2} + \frac{C_G}{2} + \frac{7+\alpha}{16} C_G \right) \\ & + U_{03} j 3 \omega \left(\frac{C_G}{2} + \frac{C_G}{2} + \frac{7+\alpha}{16} C_G \right) \end{aligned} \quad (11)$$

对式(11)进行化简, 可得级联 H 桥变流器注入电流的给定值表达式为

$$\begin{aligned} I_{ref} = & (U_{A1} + 3U_{A3}) j \omega \left(\frac{8-\alpha}{16} C_G + C_L \right) \\ & + (U_{B1} + 3U_{B3}) j \omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) \\ & + (U_{C1} + 3U_{C3}) j \omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) \\ & + (U_{01} + 3U_{03}) j \omega \frac{23+\alpha}{16} C_G \end{aligned} \quad (12)$$

进而, 对于定子并联分支数为 m 的发电机, 级联 H 桥变流器注入电流的给定值表达式为

$$\begin{aligned}
I_{\text{refm}} = & (U_{A1} + 3U_{A3})j\omega \left(\frac{m-\alpha}{2m} C_G + C_L \right) \\
& + (U_{B1} + 3U_{B3})j\omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) \\
& + (U_{C1} + 3U_{C3})j\omega \left(\frac{C_G}{2} + C_L \right) \\
& + (U_{01} + 3U_{03})j\omega \frac{3m-1+\alpha}{2m} C_G
\end{aligned} \quad (13)$$

由上述内容可知，只要控制变流器的注入电流 $I_{\text{in}} = I_{\text{ref}}$ ，便能使故障电流 $I_f = 0$ ，实现定子接地故障柔性电流消弧。

2.3 柔性融合消弧控制策略

工程中，由于互感器存在测量误差、锁相环存在跟踪误差，导致发电机机端和中性点电压的基波和三次谐波分量与发电机定子对地参数存在测量误差，因此柔性电流消弧方法中注入电流给定值的计算存在不可避免的误差，该误差在接地故障过渡电阻值较大时会导致故障点电压大于电弧重燃电压，因此柔性电流消弧方法在高阻接地情况下消弧效果不佳；同理，柔性电压消弧方法中故障点存在不可避免的残压，该残压在接地故障过渡电阻值较小时会导致故障电流大于安全接地电流，因此柔性电压消弧方法在低阻接地情况下消弧效果较差。

综上所述，提出一种柔性融合消弧方法，分别以故障点到中性点电压的负值和发电机定子对地电容电流之和作为电压给定值和电流给定值，并行控制中性点电压和变流器注入电流，所提方法的消弧效果受过渡电阻的影响小，控制系统的结构和具体的工作流程如图 5 和图 6 所示。

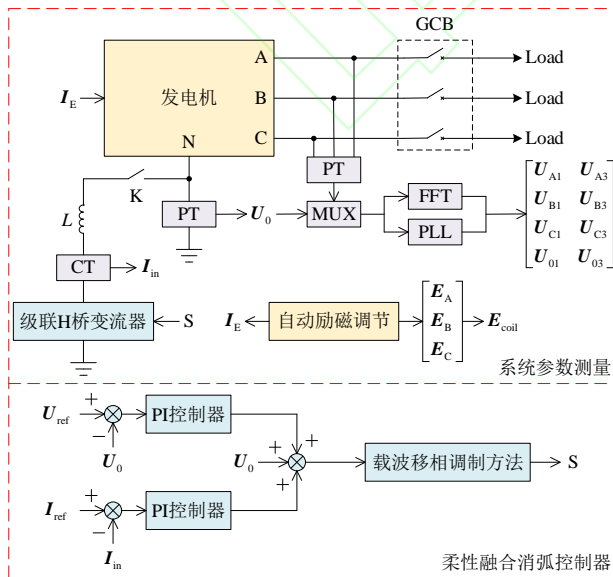


图 5 柔性融合消弧控制系统结构图

Fig.5 Structure diagram of flexible fusion arc suppression control system

图 5 中，S 为级联 H 桥变流器的控制信号， I_E 为发电机转子的励磁电流，由发电机自动励磁调节装置控制， E_{coil} 为发电机各个线圈两端的空载电压基波分量和三次谐波分量构成的相量组，可以结合励磁电流的值、发电机励磁电流和定子空载电压的关系以及式(6)进行求解。由图 5 可以看出，柔性融合消弧控制器由电压闭环的柔性电压消弧控制器和电流闭环的柔性电流消弧控制器组成，二者并行工作，柔性电压消弧控制器将中性点电压控制为电压给定值，即故障点到中性点电压的负值，柔性电流消弧控制器将变流器注入电流控制为电流给定值，即接地故障全补偿电流。由于电压给定值和电流给定值均是根据图 3 列方程求得，因此二者的控制目标是等价的，柔性融合消弧控制器的最终控制目标为控制故障电流 $I_f = 0$ 。

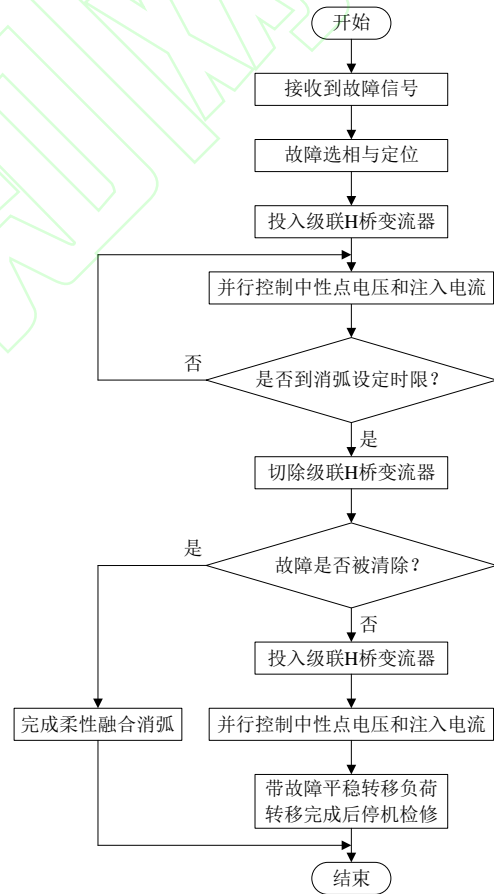


图 6 柔性融合消弧工作流程图

Fig.6 Workflow chart of flexible fusion arc suppression

变流器未投入时，若发生发电机定子接地故障，现有的 100% 发电机定子绕组接地保护可以检测到故障并动作于信号，该信号可以作为图 5 所示的柔性融合消弧工作流程中需要的故障信号，收到故障信号后，可以使用文献[19]提出的方法进行故障选相和定位，再根据式(3)和式(12)计算变流器控制目标给定值；变流器投入并到达设定时限后，需

要切除变流器以完成暂时性故障的消弧,若发生永久性故障,则需要重新投入变流器以抑制故障电流在安全接地电流范围内,该时限可以与传统无源消弧方法中继电保护带时限动作于跳闸的时限一致,工程中通常取 0.3-0.5s,本文取 0.5s,即原先大型发电机发生定子永久性接地故障时需带时限动作于跳闸,使用柔性融合消弧方法后,优化为带接地故障平稳转移负荷,提高了发电的可靠性。

3 仿真验证

3.1 仿真建模

使用 Matlab/Simulink 搭建发电机定子接地故障柔性融合消弧的仿真模型,如图 7 所示,其中定子线圈的等效电路使用准分布参数电路^[17], E_{coil1} 为线圈的基波电压, E_{coil3} 为线圈的三次谐波电压,二者的相角和线圈的连接顺序可以结合图 1 和图 2 得出, R_{coil} 为线圈的等效电阻, C_{coil} 为线圈的对地电容;发电机出口接有 700MW 的负载,负载的功率因数为 0.9。

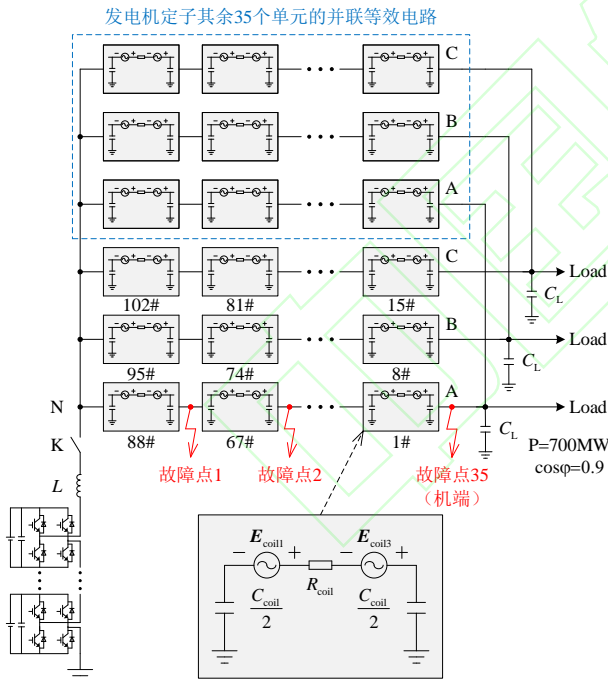


图 7 发电机柔性融合消弧仿真模型简图

Fig.7 Schematic diagram of generator flexible fusion arc suppression simulation model

表 3 仿真模型主要参数

Tab.3 The main parameters of the simulation model

参数	值
线圈基波电压有效值/V	345.15
线圈三次谐波电压有效值/V	25.696
线圈对地电容/nF	7.268
线圈等效电阻/mΩ	0.1
外接设备每相对地电容/μF	0.4

信号采样频率/MHz	1
变流器连接电感/H	0.1
变流器开关频率/kHz	10
变流器直流侧电压/V	1800
变流器额定电流/A	80
变流器级联数	10

由于发电机定子绕组任意点发生单相接地故障时,其绕组感抗远小于容抗,可以忽略不计^[2],因此在仿真中使用等效电阻代替线圈阻抗。由前文可知,发电机的相电动势中含有一定百分比的三次谐波分量,仿真中取机端三次谐波电压有效值和基波电压有效值的比例为 1/20^[2,5]。仿真的主要参数如表 3 所示。

仿真模型中,对发电机定子不包含故障分支的 35 个单元进行并联简化,在故障分支上设置 35 个故障点,其中第 35 个故障点发生接地故障等价于机端发生接地故障,该模型在保证电路对称性的前提下,能够极大地减少仿真求解的节点数量。

3.2 算法对比

在仿真模型中验证本文提出的变流器控制目标给定值计算方法,并与现有方法比较,将开关 K 断开,则 $I_{\text{in}} = 0$,由图 3 和式(12)可知故障电流的开环跟踪计算式为

$$\begin{aligned}
 I_{\text{fol}} = & -(U_{A1} + 3U_{A3})j\omega\left(\frac{8-\alpha}{16}C_G + C_L\right) \\
 & -(U_{B1} + 3U_{B3})j\omega\left(\frac{C_G}{2} + C_L\right) \\
 & -(U_{C1} + 3U_{C3})j\omega\left(\frac{C_G}{2} + C_L\right) \\
 & -(U_{01} + 3U_{03})j\omega\frac{23+\alpha}{16}C_G \\
 & -(U_{f1} + 3U_{f3})j\omega\frac{C_G}{16}
 \end{aligned} \quad (14)$$

式中, U_{f1} 和 U_{f3} 分别为故障点对地电压的基波分量和三次谐波分量。现有电流消弧方法未考虑定子并联分支数,则故障电流的开环跟踪计算式为

$$\begin{aligned}
 I'_{\text{fol}} = & -(U_{A1} + 3U_{A3})j\omega\left(\frac{1-\alpha}{2}C_G + C_L\right) \\
 & -(U_{B1} + 3U_{B3})j\omega\left(\frac{C_G}{2} + C_L\right) \\
 & -(U_{C1} + 3U_{C3})j\omega\left(\frac{C_G}{2} + C_L\right) \\
 & -(U_{01} + 3U_{03})j\omega\frac{2+\alpha}{2}C_G \\
 & -(U_{f1} + 3U_{f3})j\omega\frac{C_G}{2}
 \end{aligned} \quad (15)$$

同理, 由图 3 和式(3)可知故障点到中性点电压的开环跟踪计算式为

$$\mathbf{E}_{\text{fol}} = \mathbf{E}_\alpha + \mathbf{U}_{Z\alpha} = \mathbf{E}_\alpha + \alpha(\mathbf{U}_A - \mathbf{U}_0 - \mathbf{E}_A) \quad (16)$$

现有电压消弧方法未考虑定子阻抗, 使用发电机带负载时的电压求解各线圈电压 \mathbf{E}'_i , 方程为

$$\mathbf{U}_A - \mathbf{U}_0 = \sum_{i=1}^{35} \mathbf{E}'_i (\cos \theta_i + j \sin \theta_i) \quad (17)$$

式中, \mathbf{E}'_i 为各线圈电压的有效值。

则故障点到中性点电压的开环跟踪计算式为

$$\mathbf{E}'_{\text{fol}} = \sum_{i=1}^{[\alpha]} \mathbf{E}'_i + (\alpha - [\alpha]) \mathbf{E}'_{[\alpha]+1} \quad (18)$$

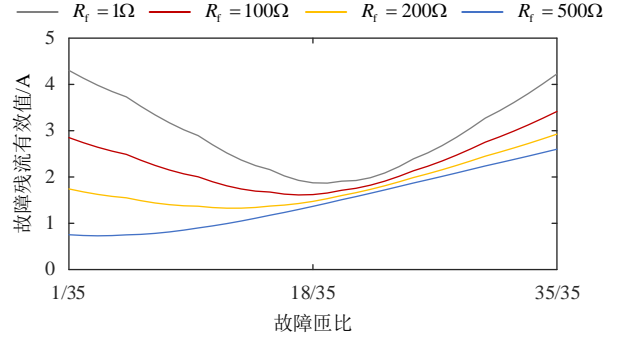
分别在 $\alpha = 1/35$ 处、 $\alpha = 18/35$ 处和 $\alpha = 35/35$ 处设置过渡电阻为 1Ω 和 500Ω 的接地故障, 比较故障电流和故障点到中性点电压的开环跟踪计算值与实际值之间的差值 (有效值), 如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 除发电机机端 (外部) 发生接地故障外, 在不同故障匝比、不同过渡电阻的情况下, 所提方法的开环跟踪误差相较于现有方法均更小, 因此本文提出的计及定子阻抗和定子并联分支数的变流器控制目标给定值算法更加精确。

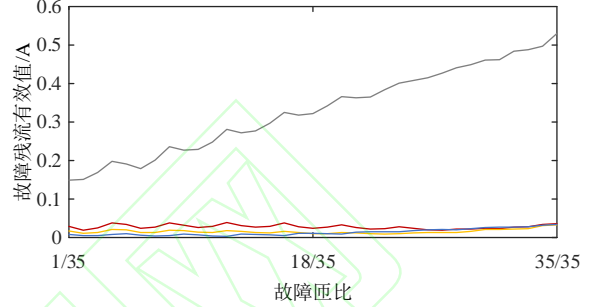
表 4 消弧方法给定值开环跟踪误差对比

Tab.4 Comparison of reference value open-loop tracking error of arc suppression method

故障匝比	过渡电阻	电流跟踪误差/A		电压跟踪误差/V	
		现有方法	所提方法	现有方法	所提方法
1/35	1Ω	0.657	0.082	0.130	0.004
	500Ω	0.656	0.081	0.129	0.001
18/35	1Ω	0.978	0.108	0.304	0.225
	500Ω	0.980	0.112	0.303	0.097
35/35	1Ω	0.080	0.080	0	0
	500Ω	0.082	0.082	0	0



(a)传统无源消弧



(b)柔性融合消弧

图 8 传统无源消弧与柔性融合消弧故障残流有效值对比
Fig.8 Comparison of fault residual current effective value between traditional passive arc suppression and flexible fusion arc suppression

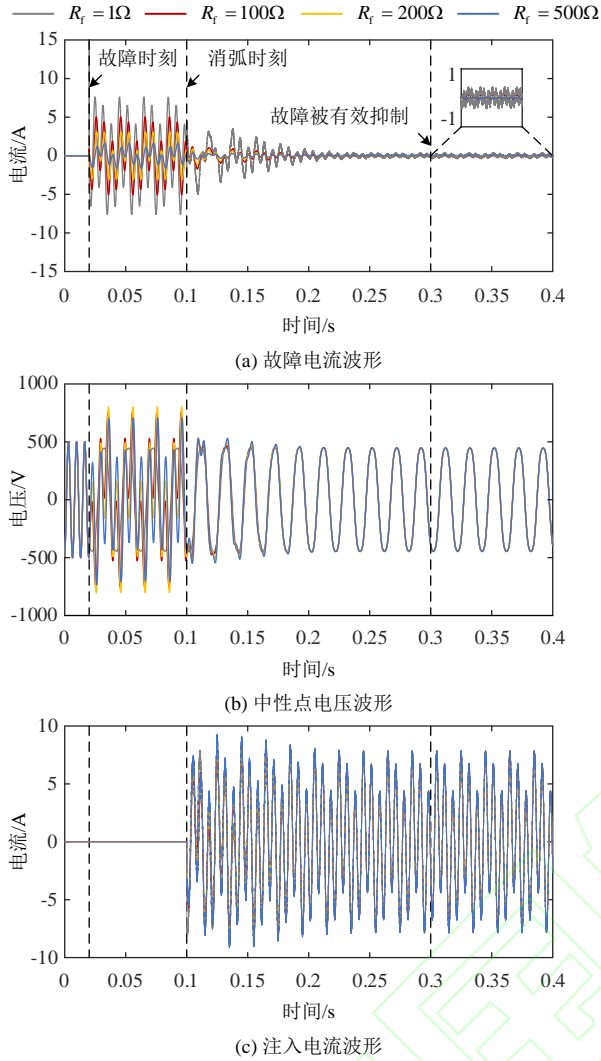
3.3 接地故障消弧

本文研究的大型发电机使用传统无源消弧方法时, 消弧线圈工作在欠补偿方式^[2], 取脱谐度 $\lambda = -5\%$, 根据

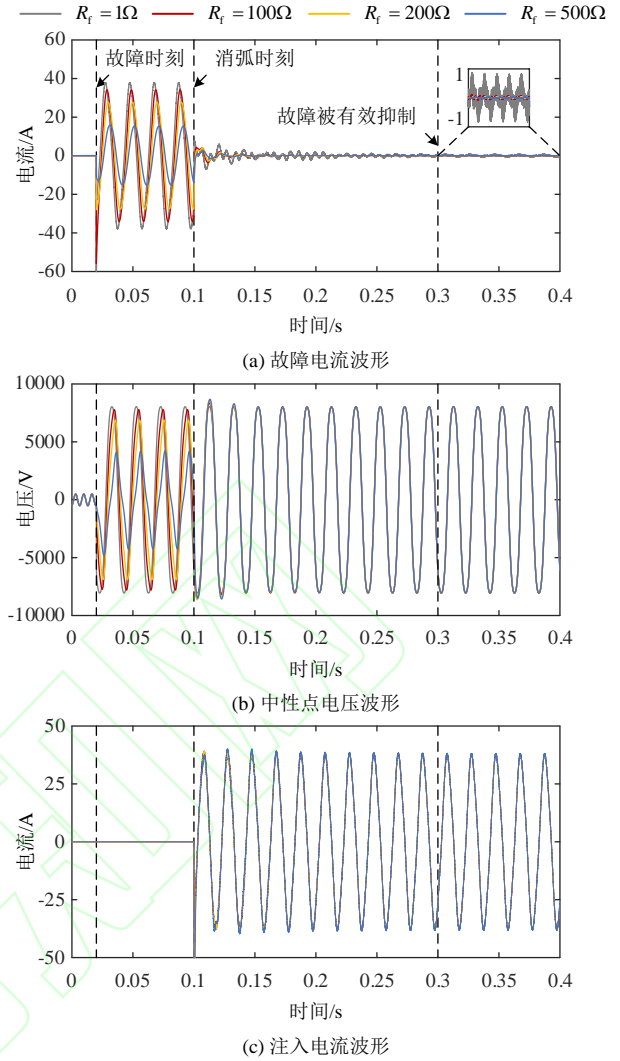
$$L_{\text{ASC}} = \frac{1}{(1 + \lambda)\omega^2 C_{\text{SUM}}} \quad (19)$$

可以求得消弧线圈的电感值 $L_{\text{ASC}} = 796\text{mH}$, 式中 C_{SUM} 为发电机定子与外部设备对地电容之和, 仿真中 $C_{\text{SUM}} = 3C_G + 3C_T$ 。

在 $\alpha = 1/35$ 至 $\alpha = 35/35$ 总共 35 个故障点处, 分别设置过渡电阻为 1Ω 、 100Ω 、 200Ω 和 500Ω 的接地故障, 记录使用传统无源消弧方法 (消弧线圈) 和本文提出的柔性融合消弧方法的故障残流有效值, 绘制折线图进行比较, 如图 8 所示。由图可见, 本文提出的柔性融合消弧方法在不同过渡电阻和不同故障位置的情况下, 消弧效果均显著优于传统无源消弧方法, 并且故障残流有效值均在规程规定的发电机定子的安全接地电流 (1A) 范围内。

图9 $\alpha=1/35$ 处发生接地故障时的消弧效果Fig.9 Arc suppression effect when a ground fault occurs at $\alpha=1/35$

进而,对本文提出的柔性融合消弧方法抑制故障电流的快速性进行验证,分别在 $\alpha=1/35$ 处、 $\alpha=18/35$ 处和 $\alpha=35/35$ 处设置过渡电阻为 1Ω 、 100Ω 、 200Ω 和 500Ω 的接地故障,记录故障电流、中性点电压和变流器注入电流的波形,如图9至图11所示。其中,0.02s时刻发生定子单相接地故障,0.1s时刻投入变流器,由图可见,在不同过渡电阻和不同故障位置的情况下,故障电流在0.3s时刻之后都不会超出安全接地电流范围,中性点电压和变流器注入电流均能被控制为给定值,并且,文献[19]提出的故障定位方法用时在0.2s内,因此本文提出的柔性融合消弧方法能够在0.5s内完成故障的有效抑制和可靠消弧,从而防止故障进一步发展。

图10 $\alpha=18/35$ 处发生接地故障时的消弧效果Fig.10 Arc suppression effect when a ground fault occurs at $\alpha=18/35$

4 结论

针对现有发电机定子接地故障柔性消弧方法受过渡电阻影响大的问题,提出一种电压电流并行控制的柔性融合消弧方法。得出如下结论:

(1) 提出计及定子阻抗和定子并联分支数的柔性电压消弧方法和柔性电流消弧方法,将中性点电压控制为故障点到中性点电压的负值,或将变流器注入电流控制为发电机定子对地电容电流之和,进而控制故障电流为零。相比于现有柔性消弧方法,所提方法的给定值计算更加精确。

(2) 提出柔性融合消弧方法,将所提柔性电压消弧方法和柔性电流消弧方法结合,分别以故障点到中性点电压的负值和发电机定子对地电容电流之和作为电压给定值和电流给定值,并行控制中性点电压和变流器注入电流,能够将故障电流快速抑制在安全接地电流范围内,受过渡电阻影响小。相比于传统无源消弧方法,发生永久性接地故障

时, 所提方法能够让发电机带故障平稳转移负荷, 提高了发电的可靠性。

下一步将研制发电机定子接地故障的实验平台, 对本文所提柔性融合消弧方法进行验证。

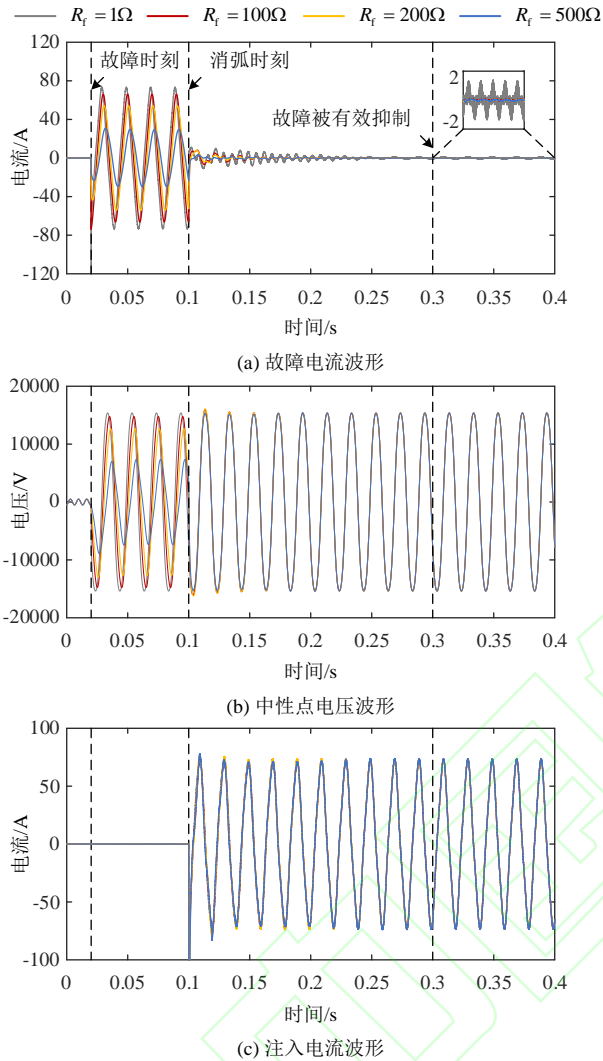


图 11 $\alpha=35/35$ 处发生接地故障时的消弧效果

Fig.11 Arc suppression effect when a ground fault occurs at $\alpha=35/35$

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 184-203.
YAO Huannian, CAO Meiyue. Power System Resonance Grounding[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000: 184-203(in Chinese).
- [2] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 290-295.
HE Jiali, LI Yongli, DONG Xinzhou, et al. Principles of Power System Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 290-295(in Chinese).
- [3] 王维俭, 桂林, 王祥珩, 等. 大型发电机中性点接地方式的反思与忧虑[J]. 电力设备, 2007(11): 1-4.
WANG Weijian, GUI Lin, WANG Xiangheng, et al. Reconsideration and Anxiety of Neutral Grounding Mode for Large Generator[J]. Electrical Equipment, 2007(11): 1-4(in Chinese).
- [4] 中华人民共和国国家标准化委员会. GB/T 14285-2006 继电保护和自动装置技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
National Standardization Committee of the People's Republic of China. GB/T 14285-2006 Technical Regulations for Relay Protection and Safety Automatic Devices[S]. Beijing: China Standard Press, 2006(in Chinese).
- [5] 党晓强, 邵能灵, 刘俊勇, 等. 绝缘状况原理在大型水轮发电机 3 次谐波量接地保护中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 129-134+19.
DANG Xiaoliang, TAI Nengling, LIU Junyong, et al. Application of Ground Insulation State to Improve Ground Fault Protection Using Third Harmonic Voltage for Huge Hydraulic Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 129(in Chinese).
- [6] 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/OL]. 高电压技术: 1-13.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHENG Zeyin. Survey of Flexible Arc Suppression Technology for Single-Phase-to-Ground Fault in Distribution Networks[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-13(in Chinese).
- [7] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联 H 桥变流器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. 电网技术, 2015, 39(09): 2677-2684.
GUO Moufa, CHEN Jingjie, ZHANG Weijun, et al. A Novel Approach for Fault Arc Extinguishing and Feeder Selection in Distribution Networks Based on Single-Phase Cascade H-Bridge Converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(09): 2677-2684(in Chinese).
- [8] 涂春鸣, 黄泽钧, 郭祺, 等. 一种具备单相接地故障调控与无功补偿能力的多功能并网型变流器[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4286-4295.
TU Chunming, HUANG Zejun, GUO Qi, et al. Multifunctional Grid-connected Converter With Capabilities of Single-phase Grounding Fault Regulation and Reactive Power Compensation[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4286-4295(in Chinese).
- [9] 郭谋发, 蔡文强, 郑泽胤, 等. 计及线路阻抗及负荷影响的配电网柔性电压消弧法[J]. 电网技术, 2022, 46(03): 1117-1126.
GUO Moufa, CAI Wenqiang, ZHENG Zeyin, et al. Flexible Voltage Arc-suppression Method for Distribution Networks Considering the Influence of Line Impedance and Load[J]. Power System Technology, 2022, 46(03): 1117-1126(in Chinese).
- [10] 涂春鸣, 侯玉超, 郭祺, 等. 计及配电网线路阻抗影响的自适应接地故障消弧控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(08): 163-171.
TU Chunming, HOU Yuchao, GUO Qi, et al. Adaptive Arc Suppression Control Strategy for Grounding Fault Considering Influence of Line Impedance in Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(08): 163-171(in Chinese).
- [11] 刘维功, 薛永端, 徐丙垠, 等. 可适应线路结构动态变化的有源消弧算法[J]. 电网技术, 2014, 38(07): 2008-2013.
LIU Weigong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An Active Arc-Suppression Algorithm Adaptable to Dynamic Structure Variation of Transmission Line[J]. Power System Technology, 2014, 38(07): 2008-2013(in Chinese).
- [12] 涂春鸣, 贾文慧, 郭祺, 等. 面向配电网接地故障暂稳态协同调控的 UPQC 优化运行方法[J]. 电网技术, 2022, 46(05): 1810-1819.
TU Chunming, JIA Wenhui, GUO Qi, et al. UPQC Optimal Operation for Transient-and Steady-state Coordinated Regulation of Grounding Fault in Distribution Network[J]. Power System Technology, 2022, 46(05): 1810-1819(in Chinese).
- [13] 张毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 低阻接地故障有源电压消弧算法性能分析和改进[J]. 电网技术, 2017, 41(01): 314-321.
ZHANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamiao, et al. Performance

- Analysis and Improvement of Active Voltage Arc-Suppression Algorithm About Low Resistance Grounding Fault[J]. Power System Technology, 2017, 41(01): 314-321(in Chinese).
- [14] 游建章, 郭谋发, 郑泽胤, 等. 配电网接地故障自适应融合抑制方法[J/OL]. 电网技术: 1-10.
YOU Jianzhang, GUO Moufa, ZHENG Zeyin, et al. Adaptive fusion suppression method for ground faults in distribution networks[J/OL]. Power System Technology: 1-10(in Chinese).
- [15] ZHENG Zeyin, GUO Moufa, YANG Nienche, et al. Single-phase flexible arc suppression device based on BSC-SOGI-PLL method for distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106100.
- [16] 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): 5356-5365.
- [17] TAN Liming, WANG Yikai, YIN Xianggen, et al. Injected current regulation based stator ground fault arc suppression method for large hydro-generators[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS, 2022, 143: 108513.
- [18] Safari Shad, Nader Franklin, Russ Negahdari, et al. Adaptive 100% Injection-Based Generator Stator Ground Fault Protection With Real-Time Fault Location Capability[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2018, 33(5): 2364-2372.
- [19] 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(07): 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(07): 141-146(in Chinese).
- [20] 朱朋. 基于隔离型四有源桥 DC/DC 的级联型变换器拓扑与控制研究[D]. 中国矿业大学, 2022.
ZHU Peng. Research on Topology and Control of Cascaded Converter Based on Isolated Quad-Active-Bridge DC/DC Converter, China University of Mining & Technology, 2022(in Chinese).
- [21] 黄路明, 熊锋, 巫晓云, 等. 基于注入信号的发电机定子对地电容测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(02): 83-88.
HUANG Luming, XIONG Feng, WU Xiaoyun, et al. Real-time measurement scheme of large-scale generator stator winding to ground capacitance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(02): 83-88(in Chinese).



黄俊杰

收稿日期: 2023-10-16。

作者简介:

黄俊杰(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化, 1260267910@qq.com;

郭谋发(1973), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网单相接地故障信息处理、保护控制及柔性消弧等, gmf@fzu.edu.cn;

张彬隆(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网自动化, belongz@foxmail.com;

(责任编辑 李健一)