

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210767

配电网单相接地故障的柔性熄弧装置

贡保记^{1,2}, 马柯翔¹, 司渭滨³, 宋国兵⁴, 雷智荣², 党长富², 曾祥君⁵

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 西安西瑞控制技术股份有限公司, 陕西 西安 710077;
3. 国网陕西省电力公司安康供电公司, 陕西 安康 725000; 4. 西安交通大学, 陕西 西安 710054;
5. 智能电网运行与控制湖南省重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410004)

摘要: 现有柔性熄弧方法仅利用有源逆变器控制故障点电压为零, 熄弧电源容量高达 50 kVA, 且体积较大。针对这一问题, 在电压熄弧的基础上, 提出了功率源转换与有源逆变器结合的柔性熄弧方法。在配电网发生单相接地故障时, 通过功率源转换将中性点电压反相钳位到接近于故障相电源电压, 偏差电压的幅值和相位通过有源逆变器进行精确补偿, 使故障点电压远小于熄弧电压, 实现快速熄弧。在利用 Matlab/Simulink 对传统消弧线圈的仿真基础上, 仿真了仅投功率源转换、功率源转换结合有源逆变器的柔性熄弧方法在各工况下的运行特性。通过 10 kV 真型配网实验场, 验证了该方法的有效性。结果表明该柔性熄弧装置可以有效降低故障点电压, 实现快速熄弧, 大大降低有源逆变器的容量。

关键词: 单相接地故障; 功率源转换; 有源逆变器; 柔性熄弧; 故障点电压

Flexible arc extinguishing device for a single-phase ground fault in a distribution network

YUN Baoji^{1,2}, MA Kexiang¹, SI Weibin³, SONG Guobing⁴, LEI Zhirong², DANG Changfu², ZENG Xiangjun⁵

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Xirui Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Ankang Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Ankang 725000, China; 4. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 5. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410004, China)

Abstract: The existing flexible arc extinguishing method uses only an active inverter to control the fault point voltage to zero. The arc extinguishing power supply has a capacity of up to 50 kVA and takes up a relatively large volume. To improve this, a flexible arc extinguishing method combining power source conversion and an active inverter is proposed. When a single-phase ground fault occurs, the neutral point voltage is clamped to be close to the power supply voltage of the fault phase through power source conversion, and the amplitude and phase of the deviation voltage are accurately compensated by the active inverter, so that the voltage at the fault point is much smaller than the arc extinguishing voltage. Based on a simulation of the traditional arc suppression coil using Matlab/Simulink, the operating characteristics of the flexible arc suppression method with only power source conversion, power source conversion combined with active inverters under various working conditions are simulated. The effectiveness of the method is verified by the 10 kV true distribution network test field. The results show that the flexible arc extinguishing device can effectively reduce the voltage at the fault point, realize rapid arc extinguishing, and greatly reduce the capacity of the active inverter.

This work is supported by the Key Industry Innovation (Mass) Project of Shaanxi Province (No. 2019ZDLGY18-07).

Key words: single-phase ground fault; power source conversion; active inverter; flexible arc extinguishing; fault point voltage

0 引言

电力系统中配电线路结构复杂, 运行多变且环

境恶劣, 易发生单相接地故障, 其中最常见的是瞬时性单相接地故障^[1], 故障相电压降低, 非故障相电压升高, 电弧故障会经常产生^[2-5], 故障相端电压降低幅值最小^[6-7]。根据现场经验, 接地残流数值越小, 接地故障点的电弧越容易熄灭^[8-9]。若接地故障

基金项目: 陕西省重点产业创新(群)项目(2019ZDLGY18-07)

电流过大, 会产生故障电弧, 且此故障电弧不容易熄灭, 从而导致瞬时性故障变化为永久性故障, 就会造成一系列的停电故障, 降低供电可靠性^[10-12]。

国内目前针对配电网单相接地故障消弧方法分为无源消弧法和有源消弧法。其中无源消弧法是利用中性点经消弧线圈接地的方式, 在消弧线圈中产生感性电流来补偿接地故障产生的容性电流, 减小介质损耗, 并抑制故障相恢复电压的上升速度^[13-15], 但是此方法不能补偿有功电流和谐波电流, 所以故障残流仍较大, 导致故障点电弧依然存在。有源消弧法是根据其注入补偿对象可以分为有源电流消弧法和有源电压消弧法^[16]。有源电流消弧法是通过计算故障残流数值大小, 注入数值相等、相位互差 180° 的电流来补偿故障残流, 从而将接地故障点残流数值补偿到零^[17-20]。但是接地残流不能直接获取, 而需进行参数计算得出, 无法满足动态电网补偿的条件, 不能准确地将残流减小到零, 并且在高阻接地故障, 消弧效果还是不太理想^[21-23]。有源电压消弧法是利用注入装置将故障相母线电压钳制为零, 进而使故障残流为零^[24-26]。除此之外, 文献^[27]提出柔性零残流消弧线圈, 实现接地故障的零残流。

文献^[28]介绍了一种调匝式消弧线圈作为主消弧线圈, 单相逆变器作为从消弧线圈构造的新型有源全补偿消弧方法, 该方法能有效熄弧, 但成本高。

本文在有源电压消弧方法的基础上, 提出了功率源转换与有源逆变器结合的柔性熄弧方法, 通过测量三相电压和中性点电压, 且判断故障相后, 闭合故障相对应站用变的开关, 使逆变器和功率源同时投入来补偿抑制故障点电压为零。通过仿真和真型试验验证, 该方法兼顾了有源消弧可实现全补偿的特性以及无源消弧的成本低、可靠性高的特点。

1 配电网单相接地故障的柔性电压熄弧原理

柔性熄弧系统原理示意图如图1所示, E_x ($X = A, B, C$) 为配电网三相电源电压, U_N 为中性点电压, 其中, Y_A, Y_B, Y_C 为配电网对地零序导纳, Y_f 为消弧线圈对地零序导纳。主变压器变比为 $N_1/N_2 = 10000/400$, 隔离变压器变比为 $N_3/N_4 = 1000/200$, 其中, N_1 为主变压器高压侧匝数, N_2 为主变压器低压侧匝数, N_3 为隔离变压器高压侧匝数, N_4 为隔离变压器低压侧匝数, 逆变器的容量为 10 kVA。

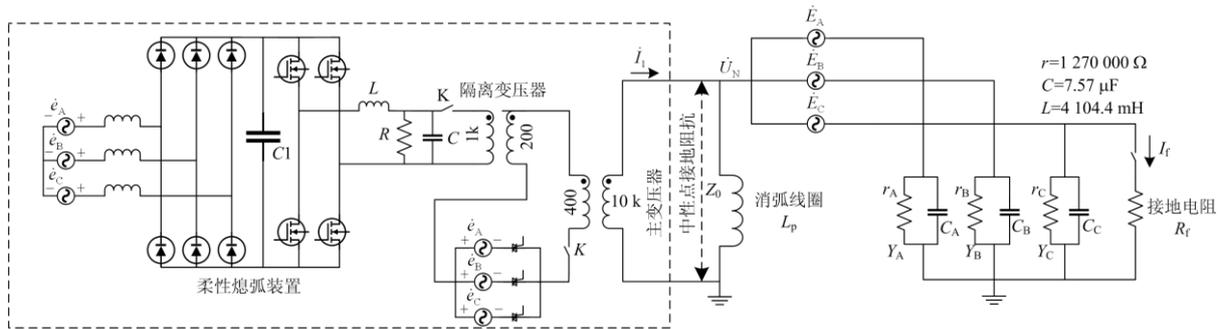


图1 柔性熄弧系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of the flexible arc extinguishing system

假设C相发生单相接地故障, 故障点过渡电阻为 R_f , 则闭合C相对应站用变电源的开关K。由基尔霍夫定律可列:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = & Y_A(\dot{E}_A + \dot{U}_N) + Y_B(\dot{E}_B + \dot{U}_N) + \\ & (Y_C + Y_f) \cdot (\dot{E}_C + \dot{U}_N) + Y_0 \dot{U}_N \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} Y_A = & j\omega C_A + \frac{1}{r_A}, \quad Y_B = j\omega C_B + \frac{1}{r_B}, \\ Y_C = & j\omega C_C + \frac{1}{r_C}, \quad Y_f = \frac{1}{R_f}, \quad Y_0 = \frac{1}{Z_0} \end{aligned}$$

假设三相电源对称, 即: $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$, 同时 $Y_A = Y_B = Y_C$, 则上式可以简化为

$$\dot{I}_1 = (Y_A + Y_B + Y_C)\dot{U}_N + Y_0\dot{U}_N + Y_f \cdot (\dot{E}_C + \dot{U}_N) \quad (2)$$

因为故障点电压 $\dot{U}_f = \dot{U}_N + \dot{E}_C$, 当注入电流值取 $\dot{I}_1 = 3Y_C \cdot \dot{U}_N + Y_0\dot{U}_N$, 可得 $\dot{U}_f = 0$, 即 $\dot{U}_N = -\dot{E}_C$ 。

因此将故障点电压降低为零, 可通过调节中性点电压的熄弧方法和通过中性点注入式(2)中所计算电流的熄弧方法来实现, 但从式(2)中可看出, 注入电流与系统的对地参数有关, 考虑到实际电网中对地参数难以精确测量, 所以采用电压熄弧方法。

现有熄弧技术仅通过有源逆变器控制故障点电压为零, 根据消弧线圈补偿的残流和工程数据可知, 主变压器高压侧注入 I_1 为 5~12 A 时, 基本可实现全补偿。假设主变压器高压侧注入电流为

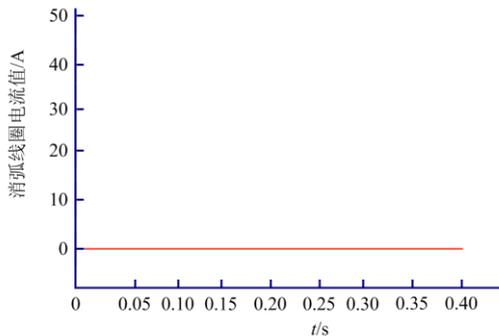
10 A, 根据匝数比计算得逆变器输出电流为 250 A, 当逆变器输出电压为 200 V 时, 逆变器容量高达 50 kVA, 这在实际中实现较难且成本较高。该熄弧装置利用有源逆变器和功率源转换, 同样假设主变压器高压侧注入电流为 10 A, 逆变器输出电压为 200 V 时, 逆变器输出电流可降为 50 A, 即有源逆变器容量可减小至 10 kVA, 大大减小了逆变器的成本和设计难度。

2 仿真分析

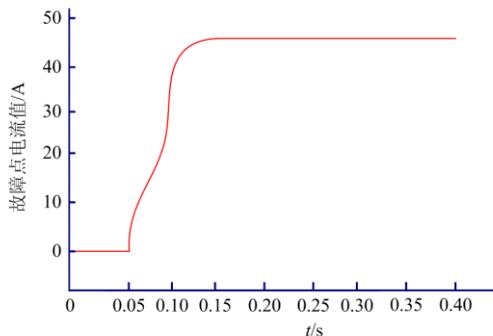
2.1 仅消弧线圈补偿

图 2、图 3 模拟了系统发生 C 相金属性接地故障, 分为消弧线圈未补偿和补偿时的情况。总仿真时间为 0.4 s, 在 0.05 s 时发生 C 相单相接地故障, 0.15 s 时投入消弧线圈。

通过图 2、图 3 分析可知, 当系统在 0.05 s 发生 C 相金属性接地故障, 0.05 s 后故障点电流有效值为 41.2 A。消弧线圈电感量设置为 410.4 mH, 投入消弧线圈后, 消弧线圈补偿电流有效值为 44.78 A, 但是此时故障电流残流为 3.638 A, 脱谐度为 8.74%。综上所述, 当系统发生单相接地故障后, 消弧线圈能够有效补偿部分接地点的故障电流。



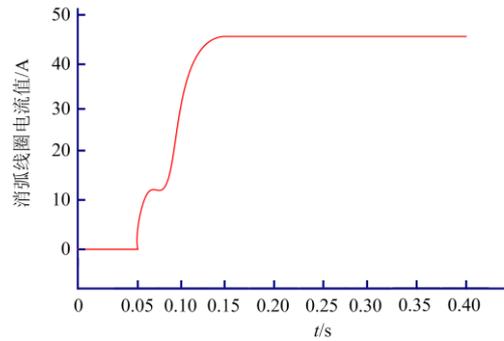
(a) 未补偿时消弧线圈电流值



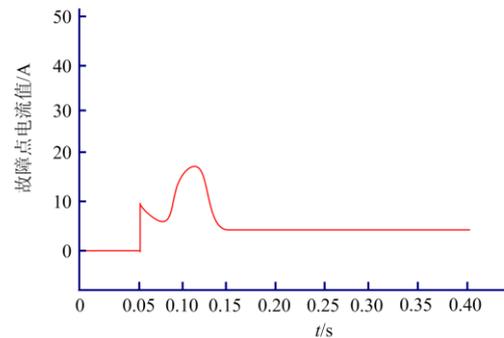
(b) 未补偿时故障点电流值

图 2 消弧线圈未补偿

Fig. 2 Arc suppression coil is not compensated



(a) 补偿时消弧线圈电流值



(b) 补偿时故障点电流值

图 3 消弧线圈补偿

Fig. 3 Arc suppression coil compensation

2.2 功率源和消弧线圈投入

功率源是指利用配电变的反相钳位进行补偿, 不含逆变器电源和隔离变压器。功率源转换的意义是减小逆变器容量, 降低消弧装置的成本和体积, 便于用户安装。分别对过渡电阻为 500 Ω、3 kΩ、6 kΩ 进行仿真分析, 仿真波形如图 4—图 9 所示。其仿真时序为: 总仿真时间为 0.4 s; 系统 0.05 s 时发生 C 相单相接地故障; 0.15 s 投入功率源。 $-E_c$ 为故障相电源反相电压, U_n 为中性点电压, U_f 为故障点电压, I_f 为故障点电流, I_{in} 为柔性熄弧中性点注入电流。

由表 1 可知, 当发生单相接地故障时, 同时投入功率源和消弧线圈, 故障点电压和故障点电流很明显降低。同时随着过渡电阻的增大, 注入电流值随之增大, 相比于上节仅投消弧线圈补偿时, 柔性熄弧系统在仅投功率源时效果好, 但是故障点电压和故障点电流的补偿效果还欠佳, 没有达到最好的效果, 尤其当系统发生高阻接地时, 故障点电压很大, 达到 920.2 V, 这将造成严重的人身事故, 不能完全实现不停电作业。

表 1 不同电阻的仿真数据

Table 1 Simulation data of different resistances

过渡电阻/ Ω		$-E_c/V$	U_n/V	U_f/V	I_f/A	I_{in}/A
500	未投	5 773	5 427	1 610	3.22	无
	投入	5 773	5 660	647.8	1.29	2.24
3 000	未投	5 773	2 537	3 796	1.27	无
	投入	5 773	5 590	886.9	0.30	3.18
6 000	未投	5 773	1 453	4 617	0.77	无
	投入	5 773	5 579	920.2	0.15	3.32

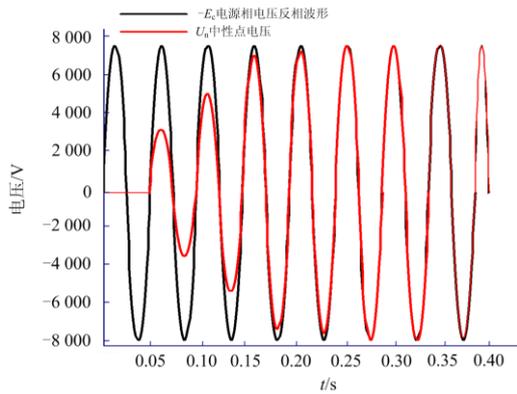
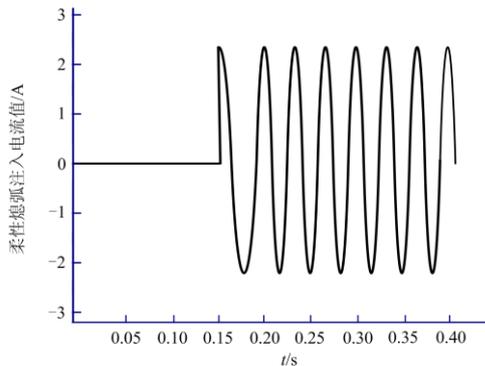
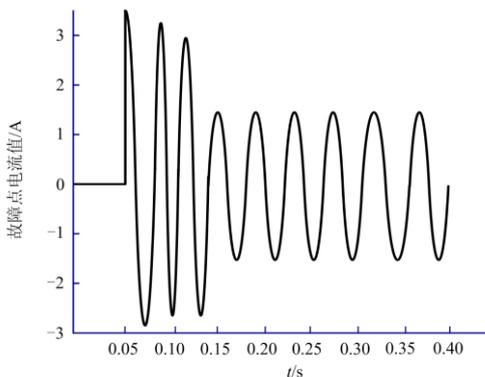


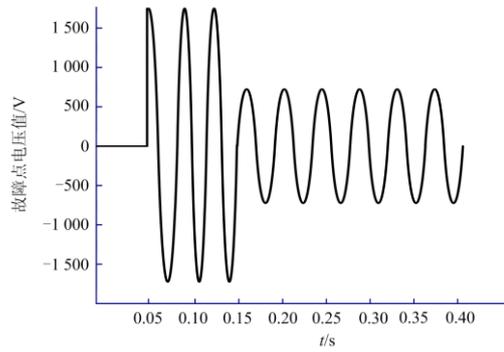
图 4 500 Ω 中性点电压和电源相电压反相波形
Fig. 4 Inverted waveform of 500 Ω neutral point voltage and power phase voltage



(a) 500 Ω 时柔性熄弧系统注入电流值



(b) 500 Ω 时故障点电流值



(c) 500 Ω 时故障点电压值

图 5 500 Ω 故障点电流和故障点电压波形
Fig. 5 Waveform of 500 Ω fault point current and fault point voltage

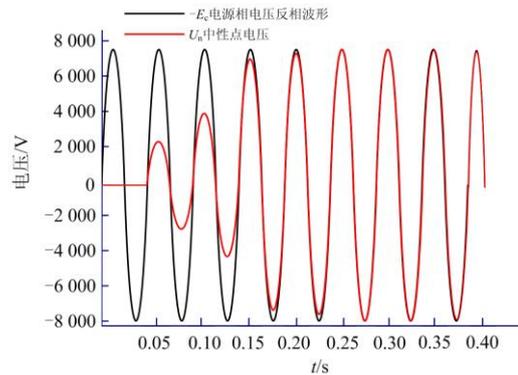
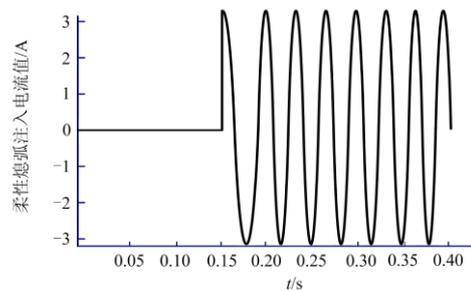
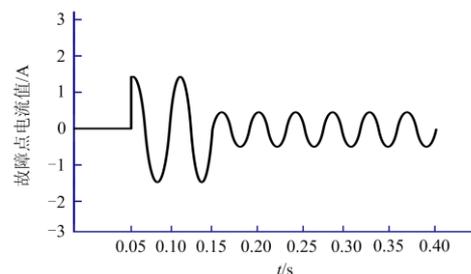


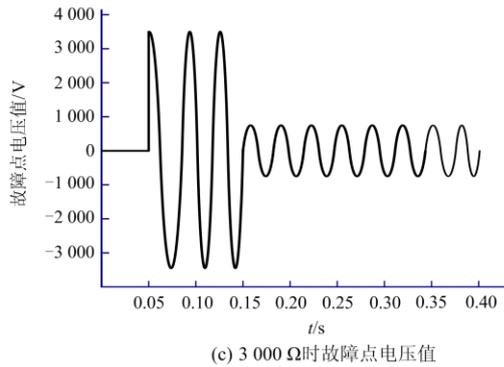
图 6 3 000 Ω 中性点电压和电源相电压反相波形
Fig. 6 Inverted waveform of 3 000 Ω neutral point voltage and power phase voltage



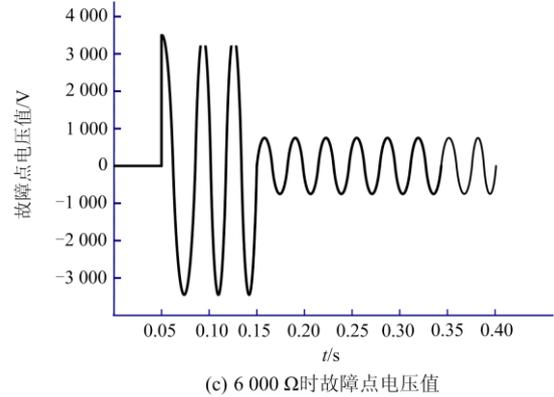
(a) 3 000 Ω 时柔性熄弧系统注入电流值



(b) 3 000 Ω 时故障点电流值



(c) 3 000 Ω 时故障点电压值
图 7 3 000 Ω 故障点电流和故障点电压波形
Fig. 7 Waveform of 3 000 Ω fault point current and fault point voltage



(c) 6 000 Ω 时故障点电压值
图 9 6 000 Ω 故障点电流和电压波形
Fig. 9 Waveform of 6000 Ω fault point current and fault point voltage

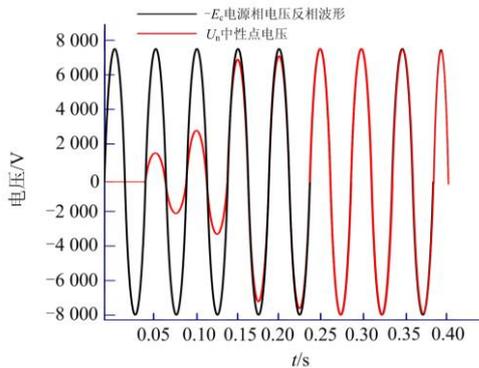
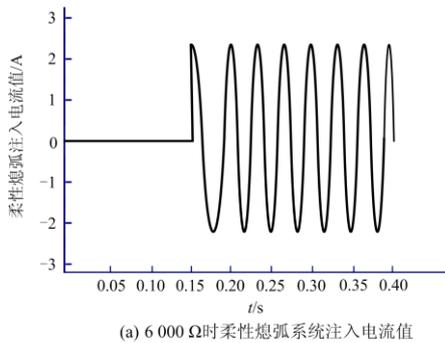
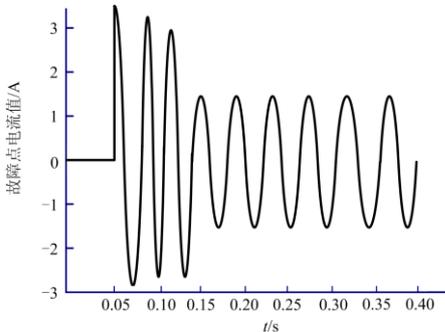


图 8 6 000 Ω 中性点电压和电源相电压反相波形
Fig. 8 Inverted waveform of 6000 Ω neutral point voltage and power phase voltage



(a) 6 000 Ω 时柔性熄弧系统注入电流值



(b) 6 000 Ω 时故障点电流值

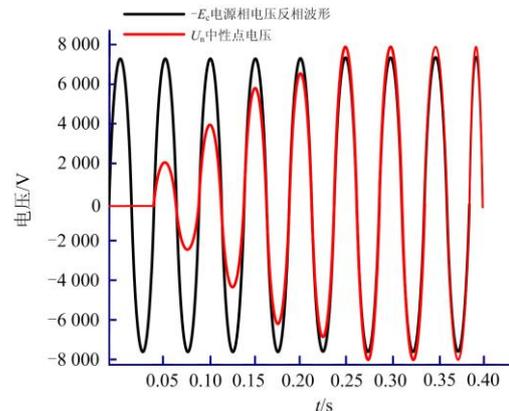
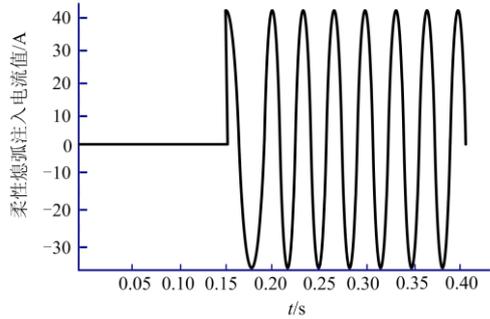


图 10 500 Ω 中性点电压和电源相电压反相波形
Fig. 10 Inverted waveform of 500 Ω neutral point voltage and power phase voltage

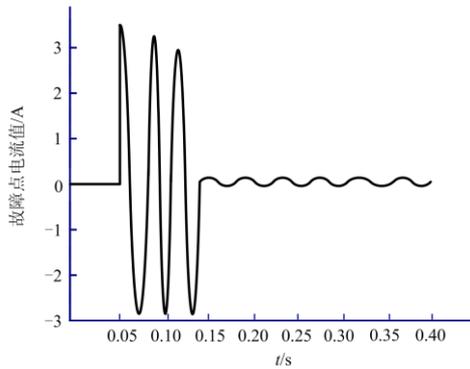
2.3 柔性熄弧系统无消弧线圈配合时

为了验证柔性熄弧系统的应用条件，本仿真在没有消弧线圈的情况下投入柔性熄弧系统，此时柔性熄弧系统包含逆变器电源、主变压器、隔离变压器。仅对过渡电阻为 500 Ω 仿真，仿真波形如图 10、图 11 所示。其仿真时序为：总仿真时间为 0.4 s；系统 0.05 s 时发生 C 相单相接地故障；0.15 s 投入柔性熄弧系统。 $-E_c$ 为故障相电源反相电压， U_n 为中性点电压， U_f 为故障点电压， I_f 为故障点电流， I_{in} 为柔性熄弧中性点注入电流。

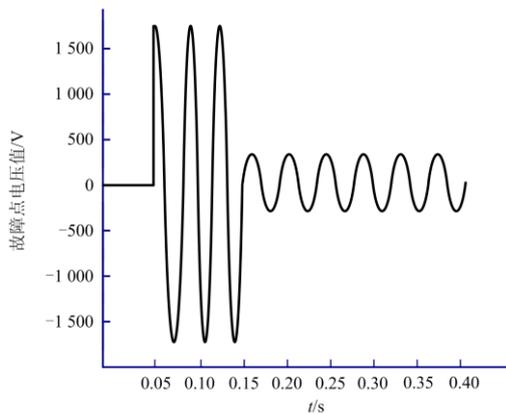
由表 2 可知，当系统没有投入消弧线圈时，该柔性熄弧系统的补偿效果会降低，究其原因原因是柔性熄弧系统的容量不足，此时故障时的容性电流补偿全部来自于柔性熄弧系统，则注入变压器的容量至少需： $41.5 \times 5 774 \text{ VA}$ ，约 240 kW，相比较现有的



(a) 500 Ω时柔性熄弧系统注入电流值



(b) 500 Ω时故障点电流值



(c) 500 Ω时故障点电压值

图 11 500 Ω 故障点电流和故障点电压波形

Fig. 11 Waveform of 500 Ω fault point current and fault point voltage

表 2 接地电阻为 500 Ω 的仿真数据

Table 2 Simulation data with a ground resistance of 500 Ω

过渡电阻/Ω	$-E_c/V$	U_n/V	U_f/V	I_f/A	I_m/A
500	未投	5 773	5 427	1 610	3.22
	投入	5 773	5 936	439	0.89

50 kW 在容量和成本上成倍增加。所以该系统的应用需要与消弧线圈配合使用, 利用消弧线圈补偿故障时的容性电流, 剩余的有功电流和谐波电流通过柔性熄弧系统来补偿。

2.4 柔性熄弧系统

柔性熄弧系统包含逆变器电源、主变压器、隔离变压器和消弧线圈, 分别对过渡电阻为 500 Ω、3 kΩ、6 kΩ 进行仿真分析, 仿真波形如图 12—图 17 所示。

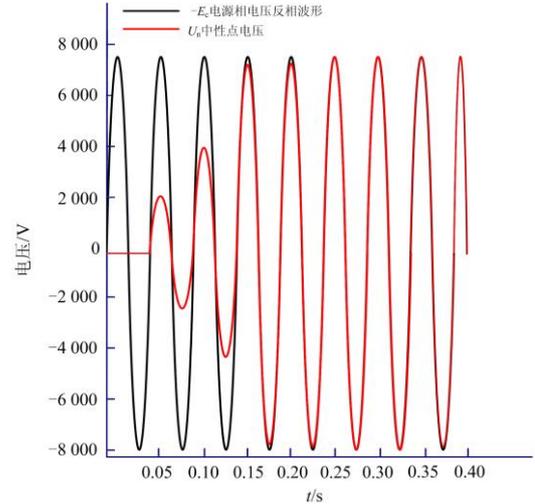
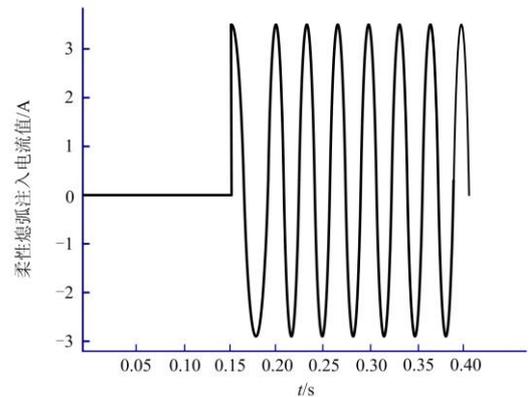
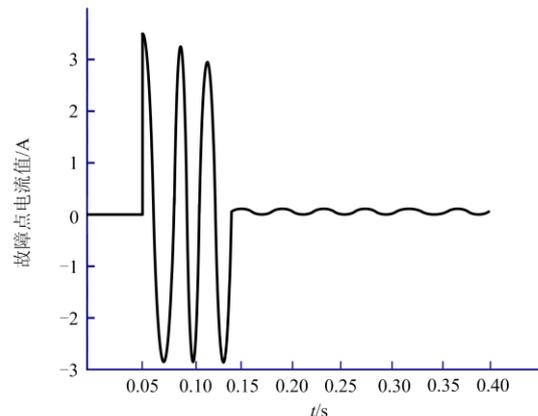


图 12 500 Ω 中性点电压和电源相电压反相波形

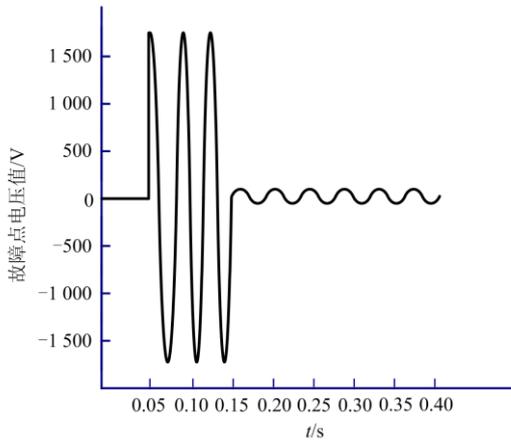
Fig. 12 Inverted waveform of 500 Ω neutral point voltage and power phase voltage



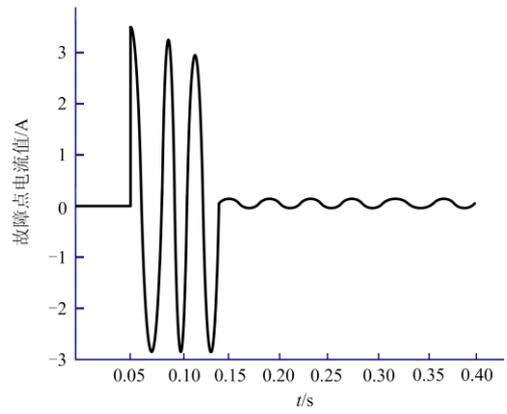
(a) 500 Ω时柔性熄弧系统注入电流值



(b) 500 Ω时故障点电流值



(c) 500 Ω时故障点电压值



(b) 3 000 Ω时故障点电流值

图 13 500 Ω 故障点电流和故障点电压波形
Fig. 13 Waveform of 500 Ω fault point current and fault point voltage

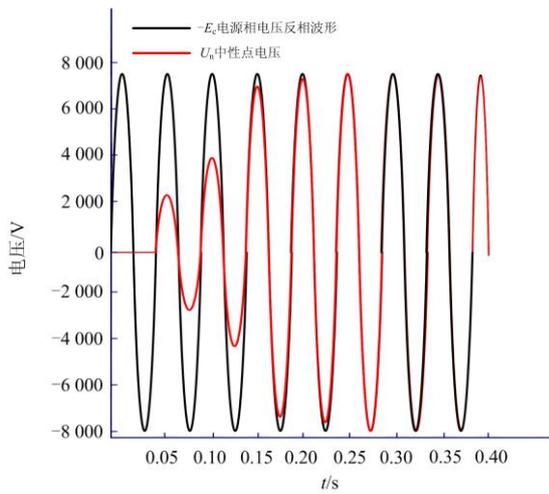
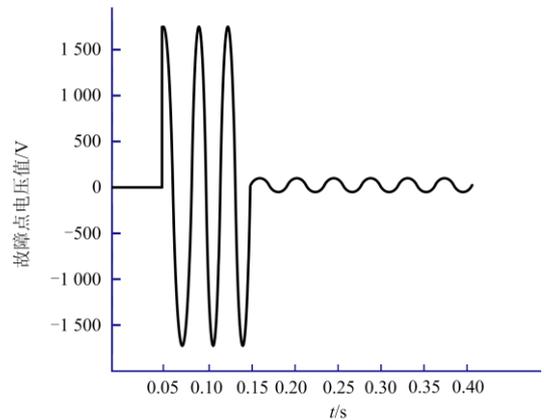
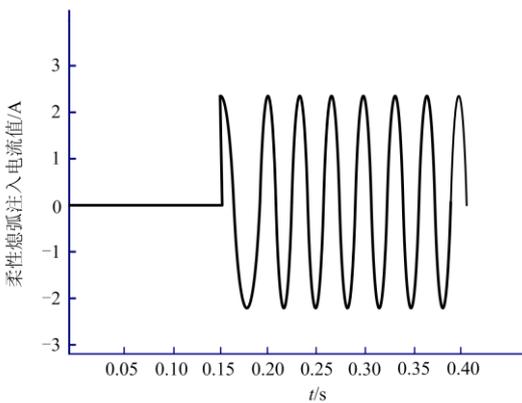


图 14 3 000 Ω 中性点电压和电源相电压反相波形
Fig. 14 Inverted waveform of 3 000 Ω neutral point voltage and power phase voltage



(c) 3 000 Ω时故障点电压值

图 15 3 000 Ω 故障点电流和故障点电压波形
Fig. 15 Waveform of 3 000 Ω fault point current and fault point voltage



(a) 3 000 Ω时柔性熄弧系统注入电流值

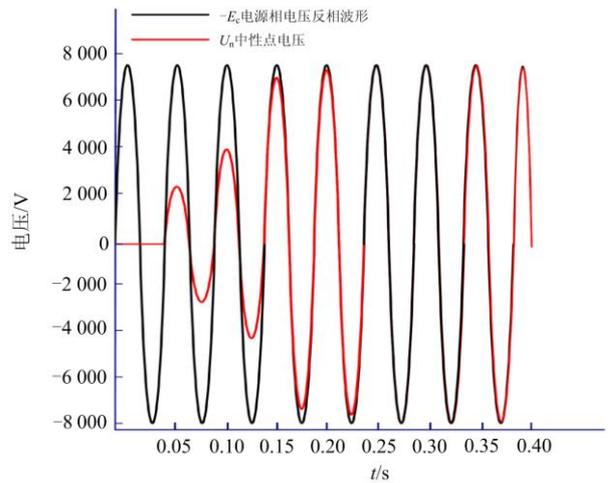
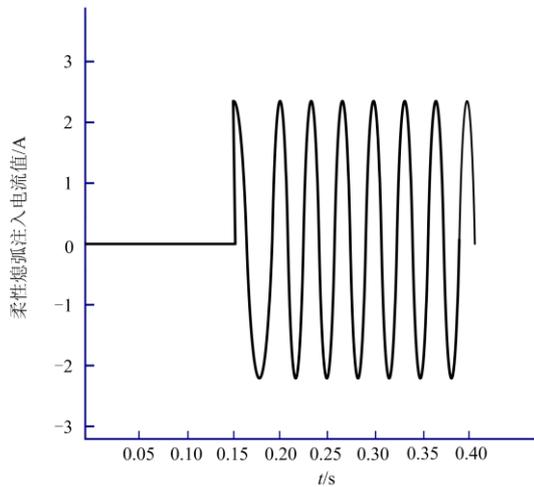
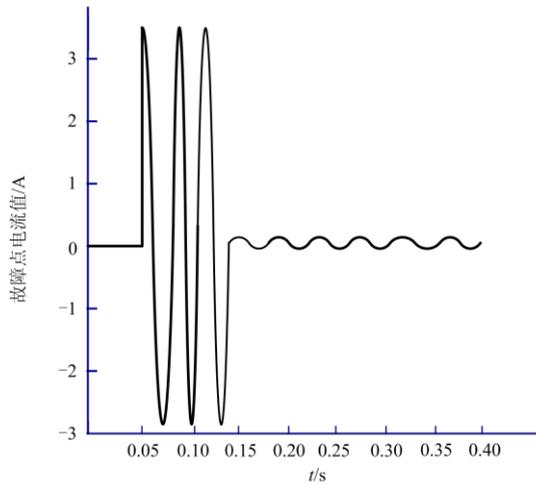


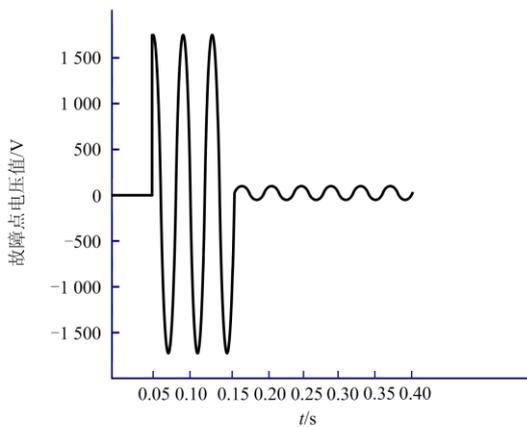
图 16 6 000 Ω 中性点电压和电源相电压反相波形
Fig. 16 Inverted waveform of 6 000 Ω neutral point voltage and power phase voltage



(a) 6 000 Ω时柔性熄弧系统注入电流值



(b) 6 000 Ω时故障点电流值



(c) 6 000 Ω时故障点电压值

图 17 6 000 Ω 故障点电流和故障点电压波形
Fig. 17 Waveform of 6 000 Ω fault point current and fault point voltage

由表 3 可知, 当系统发生故障后, 投入柔性熄弧系统可以将故障点电流和故障点电压降低, 且随着过渡电阻的增大, 熄弧系统的注入电流基本不会变化, 分析得出基于柔性熄弧系统已经将故障点电压降低很小, 所以过渡电阻的不同对故障点电流的影响甚微。

表 3 不同电阻的仿真数据

Table 2 Simulation data of different resistances

过渡电阻/Ω		$-E_c/V$	U_n/V	U_f/V	I_f/A	I_n/A
500	未投	5 773	5 427	1 610	3.22	无
	投入	5 773	5 770	18.69	0.04	3.48
3 000	未投	5 773	2 537	3 796	1.27	无
	投入	5 773	5 770	19.32	0.06	3.55
6 000	未投	5 773	1 453	4 617	0.77	无
	投入	5 773	5 769	19.66	0.002	3.68

3 配电网单相接地故障的柔性熄弧实现

柔性熄弧装置的实现流程如图 18 所示。首先需要对系统的三相电压和中性点电压进行测量, 对比

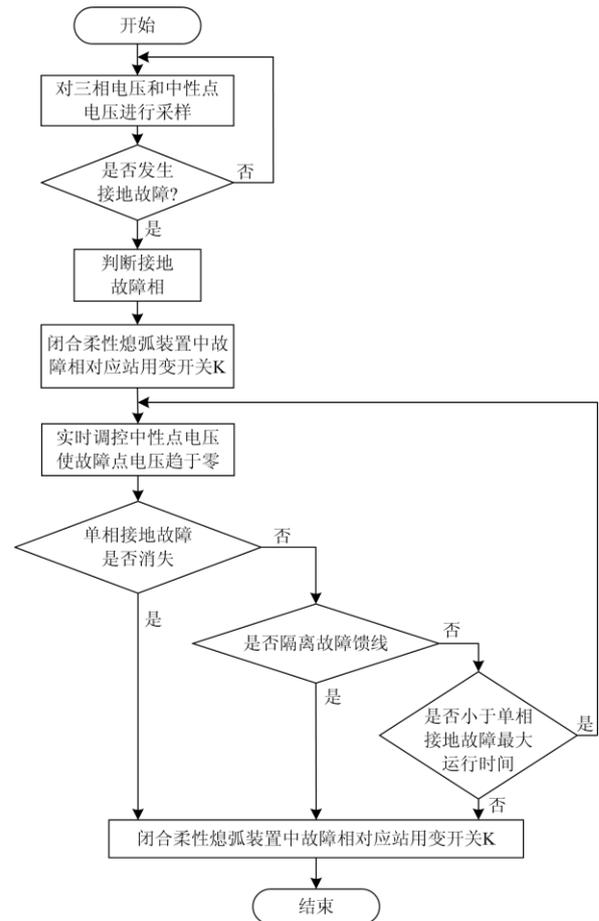


图 18 柔性熄弧装置的实现流程图

Fig. 18 Realization flow chart of flexible arc extinguishing device

三相电压和中性点电压，当中性点电压幅值大于相电压的 15%，或在时间段 ΔT 内，中性点电压的突变量 ΔU_N 大于等于中性点电压的持续突变量 ΔU_{NL} 时，即可判断出配电网出现单相接地故障，快速进行故障相选相，迅速闭合消弧装置中故障相对应站用变的开关 K ，使逆变器和站用变同时投入，通过调控中性点电压使得故障相电压降低。经过一定延时后，切除柔性熄弧系统装置，若中性点电压有效降低，则为瞬时性故障，恢复配电网正常运行；否则为永久性故障，根据用户配置的定值决定是否隔离故障馈线，若为长时间注入，再根据用户配置定值补偿时间决定柔性熄弧系统的注入和退出。

4 真型实验验证

为了验证柔性熄弧系统的实用性和可靠性，在配电网户外实验场进行实验，配电网户外实验场模型如图19所示。消弧线圈通过隔离刀闸接入中性点，通过手动投切刀闸实现中性点不接地和中性点经消弧线圈接地方式的切换。试验场配置预调式消弧线圈，额定容量 400 kVA，电流调节范围 20~66 A，通过有载分接开关等差调节。配置电压互感器、电流互感器各一个，为控制器提供二次电压、电流信号。采用录波仪进行记录数据和波形。各波形名称说明：1) 故障相电压 $-E_a$ ；2) 逆变器输出电压 U_{vsc} ；3) 故障点电压 U_{ag} ；4) 中性点电压 U_n ；5) 逆变器输出电流 I_{vsc} 。

由图 20—图 22 可知，接地故障发生，熄弧系统投入运行后：当接地电阻为 500 Ω 时，故障点电压 $U_{ag}=151$ V；当接地电阻为 3 000 Ω 时，故障点电压 $U_{ag}=153$ V；当接地电阻为 6 000 Ω 时，故障点电压 $U_{ag}=157$ V。

由上述实验分析可知，柔性熄弧系统投入运行后，随着接地电阻的增大，故障点电压均稳定在 155 V 附近。除去由于实验环境或实验系统容量不足带来的干扰引起少许数据偏差，说明该柔性熄弧

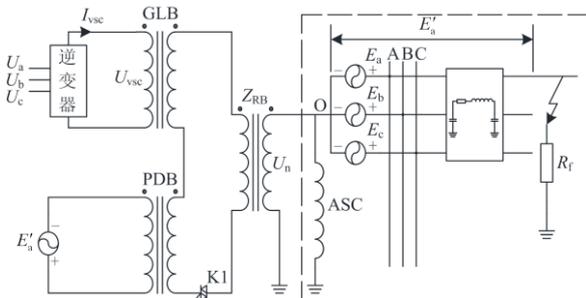


图 19 配电网户外实验场模型图

Fig. 19 Model diagram of outdoor experimental field of distribution network

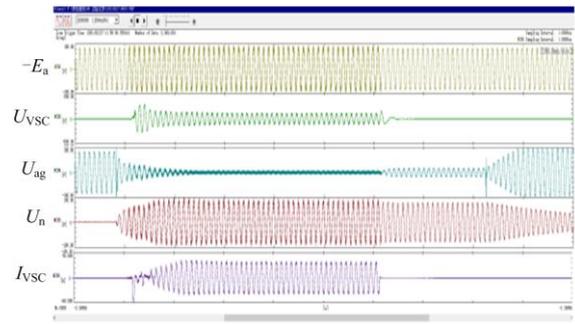


图 20 500 Ω 时实验波形图

Fig. 20 Experimental waveform diagram at 500 Ω

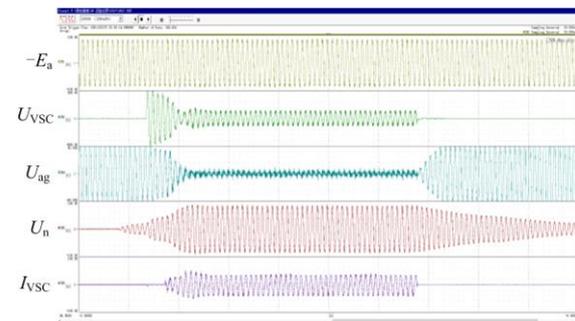


图 21 3 000 Ω 时实验波形图

Fig. 21 Experimental waveform diagram at 3 000 Ω

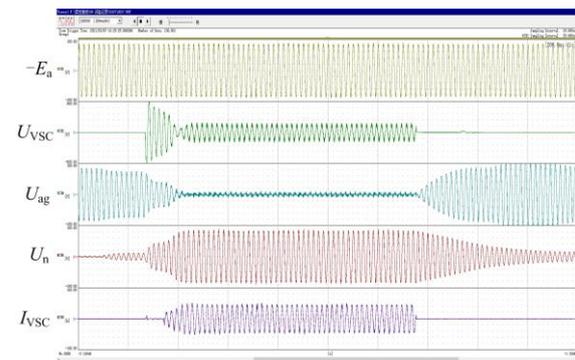


图 22 6 000 Ω 时实验波形图

Fig. 22 Experimental waveform diagram at 6 000 Ω

系统能够在不同接地电阻情况下，可以达到快速可靠熄弧的目的。

5 结论

本文在目前有源电压熄弧的基础上，提出了功率源转换与有源逆变器结合的柔性熄弧方法，通过控制中性点电压来实现接地故障点电压远小于熄弧电压，归结于消弧线圈可补偿故障时的容性电流，柔性熄弧系统补偿有功电流和谐波电流，与此同时考虑损耗和相位偏差的原因，逆变器回路承受的电

压较小, 仅需结合小容量 10 kVA 的逆变器即可实现电压全补偿, 大大降低逆变器容量, 节约成本。

参考文献

- [1] 陈锐, 周丰, 翁洪杰, 等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 128-133.
CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Active arc suppression method for single-phase ground fault in distribution network based on double closed loop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 128-133.
- [2] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [3] 赵思腾, 桂林, 张琦雪, 等. 大型发电机及其机端外接元件单相接地故障定位[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 119-125.
ZHAO Siteng, GUI Lin, ZHANG Qixue, et al. Ground fault location of large generator and external components[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 119-125.
- [4] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [5] 刘战磊, 曾祥君, 喻崧, 等. 基于不平衡过电压动态抑制的谐振接地配电网单相接地故障保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 41-49.
LIU Zhanlei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 41-49.
- [6] 马伟东, 孔圣立, 刘超, 等. 基于联合电压判据的高压并联电容器单相接地故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 142-147.
MA Weidong, KONG Shengli, LIU Chao, et al. Single-phase earth fault protection method based on combined voltage criterion in high voltage shunt capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 142-147.
- [7] XIAO Y, OUYANG J, XIONG X, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [8] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [9] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.
SU Jifeng. Research on neutral grounding mode of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 141-148.
- [10] 陈宏山, 余江, 姜淼, 等. 基于 GOOSE 通信的分布式接地选线应用[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 192-199.
CHEN Hongshan, YU Jiang, JIANG Miao, et al. Application study of distributed grounding line selection method based on GOOSE communication[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 192-199.
- [11] 艾振珂. 三频法电容电流检测技术与有源消弧装置的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
AI Zhenke. Research on three-frequency capacitance current detection technology and active arc suppression device[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015.
- [12] 胡茂亮. 有源消弧技术在谐振接地系统中的应用研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.
HU Maoliang. Application research of active arc suppression technology in resonant grounding system[D]. Hefei: Anhui University, 2016.
- [13] 孙玉伟, 刘亚东, 方健, 等. 分布式光伏接入对配电网线路故障定位的影响分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 102-107.
SUN Yuwei, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Influence of distributed photovoltaic access on fault location in distribution network lines[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 102-107.
- [14] 邢雅萍. 有源全补偿消弧线圈的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2018.
XING Yaping. Research on active full compensation arc suppression coil[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2018.
- [15] 王鹏, 张贺军, 徐凯, 等. 主动干预型消弧装置的附加电阻故障选相方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 180-186.
WANG Peng, ZHANG Hejun, XU Kai, et al. Additional resistance based fault phase identification method suitable for active interference arc suppression device[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 180-186.
- [16] 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.

[17] 王一飞, 董新伟, 杨飞, 等. 基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 126-133.

WANG Yifei, DONG Xinwei, YANG Fei, et al. Optimal configuration of distributed energy storage system based on voltage quality of distribution network[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 126-133.

[18] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 142-149.

PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A method of active voltage arc suppression for ground faults in distribution networks based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 142-149.

[19] 陈蕾, 咸日常, 郑春旭, 等. 系统单相接地故障下接地变压器的运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 56-64.

CHEN Lei, XIAN Richang, ZHENG Chunxu, et al. Analysis of the operational characteristics of a grounding transformer when there is a single-phase grounding fault of the system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 56-64.

[20] 吴玉硕, 杨志华, 贺得王君, 等. 中性点不接地系统单相接地电容电流的工程计算方法[J]. 电气技术, 2014(9): 108-111, 118.

WU Yushuo, ZHANG Zhihua, HEDE Wangjun, et al. Engineering calculation method of single-phase grounding capacitance current in ungrounded neutral system[J]. Electrical Engineering, 2014(9): 108-111, 118.

[21] 赵军, 邓杰文, 胡晨旺, 等. 不对称电网单相接地故障中性点位移电压轨迹分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 159-173.

ZHAO Jun, DENG Jiewen, HU Chenwang, et al. Analysis and application of trajectory of neutral point displacement voltage during single-phase grounding fault in asymmetrical power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 159-173.

[22] 王振浩, 佟林, 李赫, 等. 66 kV 中压配电网中性点位移电压产生机理及有源抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 11-21.

WANG Zhenhao, TONG Lin, LI He, et al. 66 kV medium voltage distribution network neutral displacement voltage generating mechanism and active suppression method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 11-21.

[23] 翟羽佳, 张凯, 朱永利, 等. 基于分段阻抗匹配的风电场集电线路单相接地故障测距方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 26-32.

ZHAI Yujia, ZHANG Kai, ZHU Yongli, et al. Single-line-to-ground fault location method for wind farm collection line based on segmented impedance matching[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 26-32.

[24] 丛伟, 孙允, 刘国强, 等. 基于恒频注入信号计算配电网分布电容的方案与应用[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2938-2944.

CONG Wei, SUN Yun, LIU Guoqiang, et al. Scheme and application of calculating distribution network distributed capacitance based on constant frequency injection signal[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2938-2944.

[25] WANG W, ZENG X, YAN L. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4561-4570.

[26] 陈忠仁, 张波, 黄健. 配电网单相接地故障的识别与智能补偿控制[J]. 电瓷避雷器, 2014(2): 66-70, 76.

CHEN Zhongren, ZHANG Bo, HUANG Jian. Identification and intelligent compensation control of single-phase grounding fault in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(2): 66-70, 76.

[27] 李晓波. 柔性零残流消弧线圈的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.

LI Xiaobo. Research on flexible zero residual current arc suppression coil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.

[28] 姬大潜. 有源全补偿消弧线圈试验装置的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.

Ji Daqian. Research on the active full compensation arc suppression coil test device[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2021-07-26

作者简介:

贡保记(1966—), 男, 硕士生导师, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制技术; E-mail: yunbaoji@vip.163.com

马柯翔(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制技术; E-mail: 29034711@qq.com

司渭滨(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电气工程及其自动化。E-mail: newsvb@163.com

(编辑 张爱琴)