

文章编号: 1671-251X(2022)05-0085-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2021110024

基于 Z 型接地变压器的配电网单相接地故障柔性消弧系统

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

(1. 国网陕西省电力有限公司 安康供电公司, 陕西 安康 725000; 2. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安西瑞控制科技股份有限公司, 陕西 西安 710077; 4. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710054; 5. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

摘要: 煤矿供配电系统通常采用中性点非有效接地方式, 该方式下的供电线路多数采用电缆线路, 井下供电系统复杂, 使用的电压等级较多, 发生单相接地故障时极易在接地点形成间歇性电弧。而现有中性点非有效接地配电网单相接地故障消弧技术存在消弧效果不佳、难以精准测量配电网对地参数等问题。我国煤矿 10 kV 变电站中变压器绕组最常用的接线方式是三角形接线, 该方式需通过专用接地变压器(大多是 Z 型接地变压器)人为引出中性点连接消弧线圈。针对上述情况, 设计了一种基于 Z 型接地变压器的配电网单相接地故障柔性消弧系统。当配电网发生接地故障初始时刻, 首先实时测量配电网的三相电源电动势和中性点电压, 当中性点电压幅值大于三相电源电动势的 15% 时, 可判断为接地故障; 对比三相电源电动势, 其中电源电动势最小相为故障相。在单相接地故障发生后, 迅速闭合故障相对应的快速投切开关, 同时投入有源逆变器和 Z 型接地变压器功率转换模块, 其中 Z 型接地变压器功率转换模块将中性点电压反相钳制接近于故障相电源电动势, 中性点电压与故障相电源电压差值的幅值和相位由有源逆变器精确补偿, 实现将故障点电压和电流抑制至零的控制目标。一定时间延时后切除快速投切开关, 若中性点电压有效降低则可判断该故障为瞬时性接地故障, 即可恢复配电网正常运行, 否则判断为永久性故障, 采取故障馈线隔离措施, 恢复配电网正常运行。仿真结果表明, 当单相接地故障过渡电阻为 500 Ω 和 3 000 Ω 时, 仅通过 Z 型接地变压器功率转换, 故障点电压和电流抑制率达 79%~83%, 不能完全达到消弧效果; 投入柔性消弧系统可有效抑制故障点电压和电流, 抑制率达 98% 以上, 实现配电网单相接地故障的可靠消弧。

关键词: Z 型接地变压器; 单相接地故障; 柔性消弧; 故障点电压; 故障点电流; 有源逆变器
中图分类号: TD611 **文献标志码:** A

Flexible arc suppression method for single-phase to ground fault in
distribution network based on Z-type grounding transformer

SI Weibin¹, MA Kexiang², LEI Zhirong³, DANG Changfu³, SONG Guobing⁴, YUN Baoji^{2,3}, LIU Bin⁵

(1. Ankang Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Ankang 725000, China;
2. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Xi'an Xirui Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 4. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 5. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The coal mine power supply and distribution system usually adopts the neutral point non-effectively grounded method. Most of the power supply lines in this method use cable lines. The underground

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-04-24; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 陕西省重点产业创新(群)项目(2019ZDLGY18-07); 国网陕西省电力有限公司科技项目(B626KY190001)。

作者简介: 司渭滨(1980—), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 博士, 研究方向为电气工程及其自动化, E-mail: newsyb@163.com。通信作者: 马柯翔(1996—), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 研究方向为电气工程及其自动化, E-mail: 29034711@qq.com。

引用格式: 司渭滨, 马柯翔, 雷智荣, 等. 基于 Z 型接地变压器的配电网单相接地故障柔性消弧系统[J]. 工矿自动化, 2022, 48(5): 85-92.

SI Weibin, MA Kexiang, LEI Zhirong, et al. Flexible arc suppression method for single-phase to ground fault in distribution network based on Z-type grounding transformer[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(5): 85-92.



扫码移动阅读

power supply system is complex and uses many voltage levels. When a single-phase to ground fault occurs, it is easy to form intermittent arcs at the grounding point. Moreover, the existing single-phase to ground fault arc suppression technology of the neutral point non-effectively grounded distribution network has the problem of poor arc suppression effect and difficulty in accurately measuring the parameters of the distribution network to the ground. The most common connection method of transformer winding in 10 kV substation of coal mine in China is delta connection. This mode needs to lead out neutral point and connect arc suppression coil artificially through special grounding transformer (mostly Z-type grounding transformer). In order to solve the above problems, a flexible arc suppression system for single-phase to ground fault of distribution network based on Z-type grounding transformer is designed. When the initial time of grounding fault occurs in the distribution network, the three-phase power supply electromotive force and the neutral point voltage of the power distribution network are firstly measured in real time. When the amplitude of the neutral point voltage is greater than 15% of the three-phase power supply electromotive force, it can be judged as a grounding fault. Compared with the three-phase power supply electromotive force, the phase with the smallest power supply electromotive force is the fault phase. After a single-phase to ground fault occurs, the fast switching switch corresponding to the fault phase is quickly closed. And the active inverter and the Z-type grounding transformer power conversion module are simultaneously put into operation. The Z-type grounding transformer power conversion module clamps the voltage of a neutral point in an opposite phase to be close to the electromotive force of the fault phase power supply. And the amplitude and the phase of the difference between the neutral voltage and the fault phase supply voltage are precisely compensated by the active inverter. Therefore, the control target of suppressing the voltage and the current at the fault point to zero is achieved. After a certain time delay, the fast switching switch is cut off. If the voltage of the neutral point is effectively reduced, it can be judged that the fault is a transient ground fault. And the normal operation of the power distribution network system can be restored. Otherwise, it is judged as a permanent fault. The measures to isolate the fault feeder are taken to restore the normal operation of the distribution network. The simulation results show that when the single-phase to ground fault transition resistance is 500 Ω and 3 000 Ω , the power conversion is only through the Z-type grounding transformer. The voltage and current suppression rate at the fault point reaches 79%-83%, which cannot fully achieve the effect of arc suppression. The flexible arc suppression system can effectively suppress the voltage and current at the fault point, with a suppression rate of more than 98%, realizing reliable arc suppression of single-phase to ground faults in the distribution network.

Key words: Z-type grounding transformer; single-phase to ground fault; flexible arc suppression; fault point voltage; fault point current; active inverter

0 引言

我国煤矿供配电系统通常采用中性点非有效接地方式,该方式在发生单相接地故障时可短暂运行^[1]。但中性点非有效接地方式下的供电线路大多采用电缆线路,导致井下供电系统复杂,电压等级较多,发生单相接地故障时对地电容大,导致接地故障过电压产生概率增大,极易在接地点形成间歇性电弧,出现弧光接地过电压,严重时会造成大面积停电,影响电气设备正常运行,危及矿井供电安全及井下工作人员人身安全^[2]。若不能快速抑制电弧,易引起超过 3 倍相电压的系统过电压,会发展为永久性单相接地故障,极易造成相间短路故障^[3-4]。当前主要通过中性点经消弧线圈接地或经电阻接地对电弧进行快速抑制。在我国煤矿 10 kV 变电站中变压器绕组

最常用的接线方式是三角形接线,该方式无中性点引出,需通过专用接地变压器人为引出中性点连接消弧线圈,而大多数变电站采用的接地变压器为 Z 型接地变压器^[5]。

影响单相接地故障产生电弧的主要因素包括接地故障电流和间歇性电弧过电压,其中间歇性电弧过电压包括故障相恢复电压的速度、恢复电压幅值和恢复时间^[6-7]。根据影响因素来确定补偿目标,将补偿目标方法(单相接地故障消弧方法)分为电压消弧法和电流消弧法。电压消弧法是指控制故障相恢复电压为零,达到故障残流为零^[8]。电流消弧法是指利用中性点接地电抗补偿接地故障残流,降低介质损伤和故障相恢复电压的上升速度,促进故障消弧^[8]。

许多学者针对煤矿配电网单相接地故障消弧方法进行了研究。文献^[9]通过控制三相级联 H 桥变

流器分相向配电网各相注入电流,以补偿接地故障电流,并抑制故障相电源电压为零,该方法弊端是需解决补偿器件耐压问题,且实现成本较高。文献[10]提出了中性点电阻接地超前相接电感、中性点电抗接地滞后相接电容的方法,该方法难以准确测量配电网对地参数,不能判别故障相,受限于实际应用,操作较复杂。文献[11]在消弧线圈与接地变压器组合的基础上,研制出三相五柱式消弧线圈,采用可控硅调节二次电感电流的方法,实现配电网对地电容电流的自动跟踪补偿,但该方法的消弧效果不佳。文献[12]在零序电压柔性控制的配电网接地故障消弧与保护新原理的基础上,提出了一种配电网三相不对称电压抑制的新原理,故障初期通过脉宽调制有源逆变器注入零序电流补偿接地故障电流,从而控制零序电压,实现瞬时故障消弧,但该方法配备的有源逆变器容量大、成本高且体积大。

针对现有中性点非有效接地配电网单相接地故障消弧方法的消弧效果不佳、难以精准测量配电网对地参数等问题,设计了一种基于Z型接地变压器的配电网单相接地故障柔性消弧系统。当配电网发生接地故障时,测量配电网电压和中性点电压,判断出故障相后迅速闭合其对应的快速投切开关,同时投入有源逆变器与Z型接地变压器功率转换模块,进而使中性点电压反相钳位至故障相电源电压,且二者幅值相等,即可达到故障点稳定消弧的目标。

1 基本原理

1.1 Z型接地变压器原理

接地补偿电流本质上是零序电流,而接地变压器由于特殊的连结方式,具有非常小的零序阻抗特点,使零序电流可正常流过接地变压器^[13]。柔性消弧系统中接地变压器Zn,yn11接线方式如图1所示,图中 X_1, X_2, X_3 分别为Z型接地变压器高压侧与

中性点非有效接地系统连接的一端, X_4, X_5, X_6 分别为Z型接地变压器高压侧与中性点接消弧线圈相连的一端,a, b, c分别为Z型接地变压器低压侧。Z型接地变压器的三相绕组按Z型连接,且各相芯柱中的2段绕组匝数相同、极性相反。当配电网发生单相接地故障时,该接地变压器对正序和负序电流产生非常大的阻抗,流过的正序、负序电流较小。同时,同一芯柱上的2段绕组流过相等的零序电流而产生相互抵消的磁通,对零序电流产生低阻抗,可使系统零序电流正常通过^[13]。Z型接地变压器可满足系统对零序阻抗小的要求,能够更好地配合消弧线圈使用,同时可使零序接地保护正确动作。

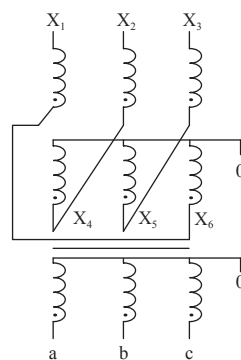


图1 接地变压器Zn,yn11接线方式

Fig. 1 Zn, yn11 wiring mode of grounding transformer

1.2 柔性消弧系统原理

柔性消弧系统原理如图2所示,其中,配电网系统主变压器为Y-Δ连接, E_A, E_B, E_C 分别为A, B, C三相线路电源电动势, R_A, R_B, R_C 分别为A, B, C三相线路对地电阻, C_A, C_B, C_C 分别为A, B, C三相线路对地电容, Z_0 为消弧线圈阻抗, Y_0 为中性点接地导纳, Y_f 为接地故障导纳。GLB为隔离变压器,ZRB为注入变压器。

假设A相发生单相接地故障,由基尔霍夫定律可得

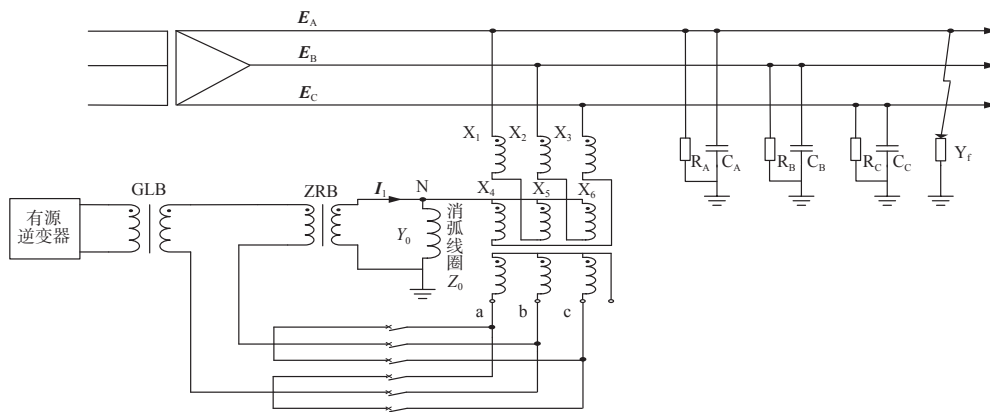


图2 柔性消弧系统原理

Fig. 2 Principle of flexible arc suppression system

$$\mathbf{I}_1 = (Y_A + Y_f)(\mathbf{E}_A + \mathbf{U}_N) + Y_B(\mathbf{E}_B + \mathbf{U}_N) + Y_C(\mathbf{E}_C + \mathbf{U}_N) + Y_0 \mathbf{U}_N \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_A = j\omega C_A + \frac{1}{R_A} \\ Y_B = j\omega C_B + \frac{1}{R_B} \\ Y_C = j\omega C_C + \frac{1}{R_C} \\ Y_f = \frac{1}{R_f} \\ Y_0 = \frac{1}{Z_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{I}_1$ 为零序电流; Y_A, Y_B, Y_C 分别为 A, B, C 三相线路总导纳; $\mathbf{U}_N$ 为中性点电压; R_f 为接地故障电阻。

假设三相电源对称, 即

$$\mathbf{E}_A + \mathbf{E}_B + \mathbf{E}_C = 0 \quad (3)$$

$$Y_A = Y_B = Y_C \quad (4)$$

则式(1)可化简为

$$\mathbf{I}_1 = (Y_A + Y_B + Y_C) \mathbf{U}_N + Y_0 \mathbf{U}_N + Y_f(\mathbf{E}_A + \mathbf{U}_N) \quad (5)$$

故障相电源电压为

$$\mathbf{U}_A = \mathbf{U}_N + \mathbf{E}_A \quad (6)$$

当 $\mathbf{I}_1 = 3Y_A \mathbf{U}_N + Y_0 \mathbf{U}_N$ 时, 可得 $\mathbf{U}_A = 0$, 即

$$\mathbf{U}_N = -\mathbf{E}_A \quad (7)$$

向中性点注入零序电流 $\mathbf{I}_1$ 即可将故障相电源电压 $\mathbf{U}_A$ 降低为零, 但该方法需精确测量配电网对地参数。考虑到系统对地参数难以精确测量, 因此采用式(7)控制目标, 达到故障点可靠消弧。

当系统发生 A 相单相接地故障时, 根据接地变压器高低压侧关系可知, Z 型接地变压器低压侧 c, a 相电压 $-\mathbf{U}_{ca}$ 相位与故障相电源电压 $\mathbf{U}_A$ 相位一致, 此时有源逆变器输出电压 $\mathbf{U} = -\mathbf{U}_{ca} + \lambda \mathbf{U}_N$, λ 为 ZRB 变比。调控有源逆变器输出电压, 使中性点电压等于故障相电源电动势的相反数, 实现故障点电压远小于熄弧电压, 达到接地故障消弧。

2 柔性消弧系统流程

柔性消弧系统流程如图 3 所示。当配电网发生接地故障时, 首先实时测量配电网的三相电源电动势和中性点电压, 当中性点电压幅值大于三相电源电动势的 15% 时, 可判断为接地故障; 对比三相电源电动势, 其中电源电动势最小相为故障相。在单相接地故障发生后, 迅速闭合故障相对应的快速投切开关, 同时投入有源逆变器和 Z 型接地变压器功率转换, 强制使中性点电压与故障相电源电动势呈等幅值反相位, 进而达到故障消弧。一定时间延时后切除快速投切开关, 若中性点电压有效降低, 则可判

断该故障为瞬时性接地故障, 即可恢复配电网正常运行, 否则判断为永久性故障, 采取故障馈线隔离措施, 恢复配电网正常运行。

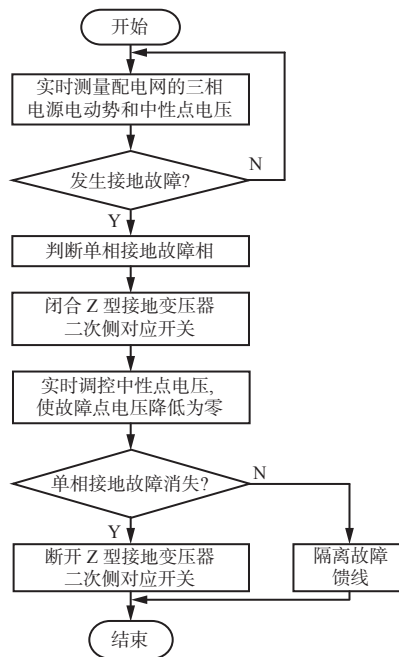


图 3 柔性消弧系统流程

Fig. 3 Flow of flexible arc suppression system

3 仿真分析

通过 Matlab/Simulink 模块搭建 10 kV 中性点非有效接地配电网单相接地故障仿真模型, 如图 4 所示, 图中 I_f 为故障点电流, U_f 为故障点电压。Z 型接地变压器高压侧一端在中性点非有效接地系统侧做 Z 型接线后引出中性点 N, 再经消弧线圈 L_p 接地。ZRB 变比 $\lambda=6\,000:400$, Z 型接地变压器高低压侧变比 $\lambda_1=10\,000:400$, GLB 变比 $\lambda_2=1\,000:200$ 。

3.1 Z 型接地变压器功率转换

Z 型接地变压器功率转换是指利用 Z 型接地变压器对故障相电源电压进行反相钳位补偿。模拟接地故障过渡电阻为 $500, 3\,000\ \Omega$ 的单相接地故障, 仿真波形如图 5—图 8 所示, 仿真结果见表 1。仿真时间为 0.4 s, 在 0.05 s 时发生 A 相接地故障, 0.1 s 时投入 Z 型接地变压器功率转换。

由图 5 可知, 当 0.05 s 发生 A 相接地故障且过渡电阻为 $500\ \Omega$ 时, 中性点电压有效值(最大值与有效值的比值为 $\sqrt{2}$)为 4 810 V, 故障相电源电压相反数有效值为 5 759 V, 二者在幅值和相位上存在一定偏差; 在 0.1 s 投入 Z 型接地变压器功率转换后, 中性点电压幅值在 0.17 s 后迅速追上故障相电源电压。

由图 6 可知, 当 0.05 s 发生故障时, 故障点电压有效值为 3 032 V, 故障点电流有效值为 6.06 A。通过 Z 型接地变压器功率转换 0.17 s 后, 故障点电压有

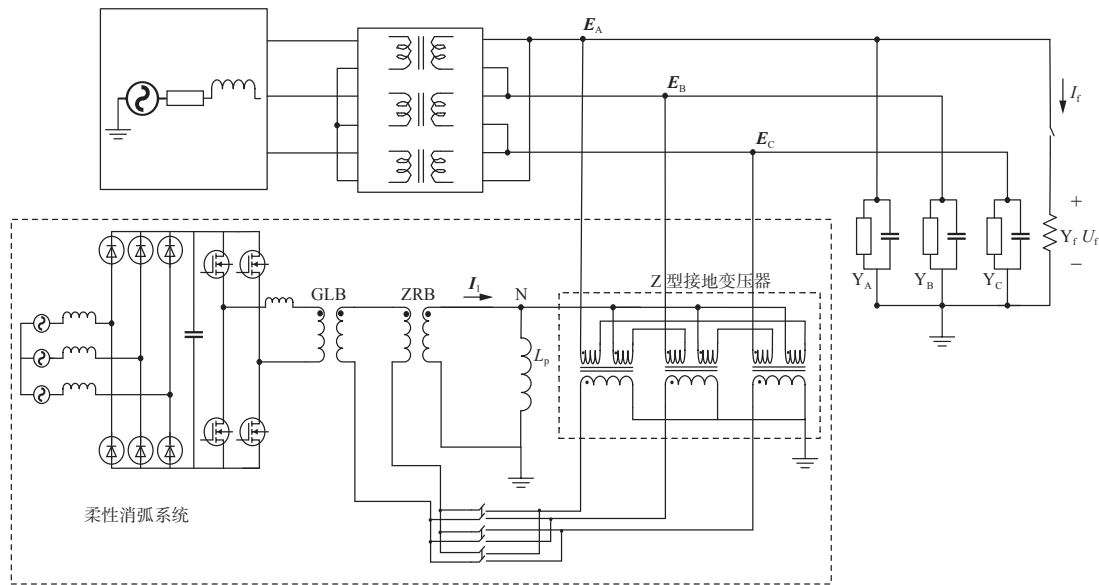


图4 中性点非有效接地配电网单相接地故障仿真模型

Fig. 4 Simulation model of single-phase to ground fault of neutral point non-effectively grounded distribution network

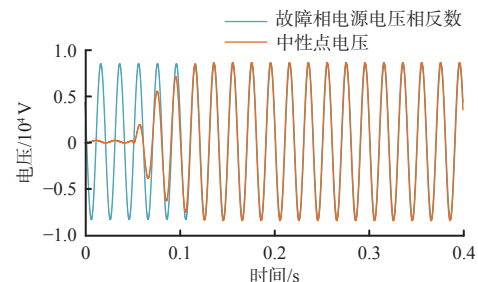


图5 故障相电源电压相反数和中性点电压仿真波形(过渡电阻 500 Ω)

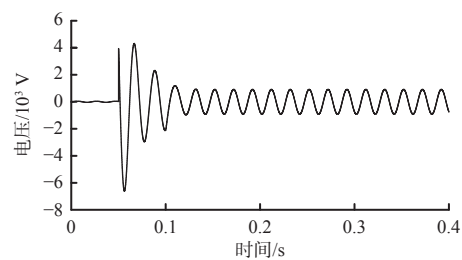
Fig. 5 Simulation waveforms of the opposite number of the fault phase power supply voltage and the neutral point voltage (transition resistance 500 Ω)

效值为 649 V, 抑制率达 79%; 故障点电流有效值为 1.3 A, 抑制率达 79%。

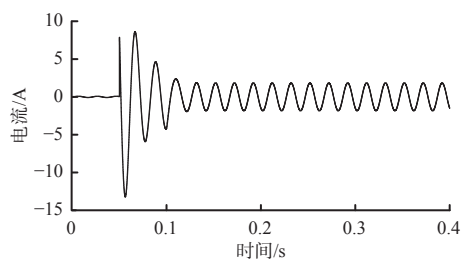
由图7可知, 当 0.05 s 发生 A 相接地故障且过渡电阻为 3 000 Ω 时, 中性点电压有效值为 1 530 V, 故障相电源电压相反数有效值为 5 759 V, 二者在幅值和相位上存在一定偏差; 在 0.1 s 投入 Z 型接地变压器功率转换后, 中性点电压幅值在 0.18 s 后迅速追上故障相电源电压。

由图8可知, 当 0.05 s 发生故障时, 故障点电压有效值为 5 169 V, 故障点电流有效值为 1.73 A。通过 Z 型接地变压器功率转换 0.18 s 后, 故障点电压有效值为 910 V, 抑制率达 82%; 故障点电流有效值为 0.30 A, 抑制率达 83%。

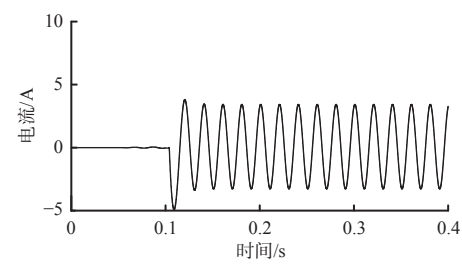
说明当系统发生单相接地故障时, 通过 Z 型接地变压器功率转换可有效降低故障点电压和故障点电流。但降低后的故障点电压仍高达 600 V 以上, 尚未完全达到消弧效果, 且易发生触电事故, 煤矿操作



(a) 故障点电压



(b) 故障点电流



(c) 消弧装置注入电流

图6 故障点电压、故障点电流和消弧装置注入电流仿真波形(过渡电阻 500 Ω)

Fig. 6 Simulation waveforms of fault point voltage, fault point current and injection current of arc suppression device (transition resistance 500 Ω)

人员仍不能实现不停电作业。

3.2 柔性消弧系统

消弧线圈只能补偿故障残流中的无功残流, 引

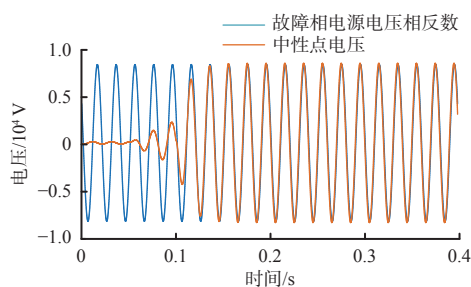
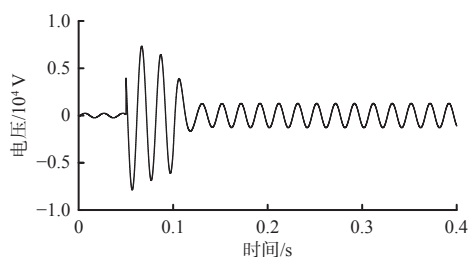
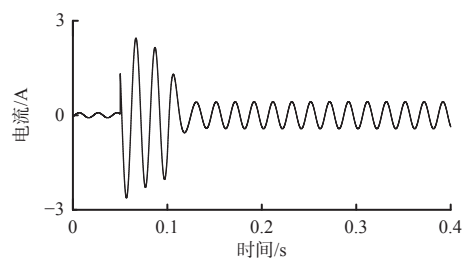


图 7 故障相电源电压相反数和中性点电压仿真波形
(过渡电阻 3 000 Ω)

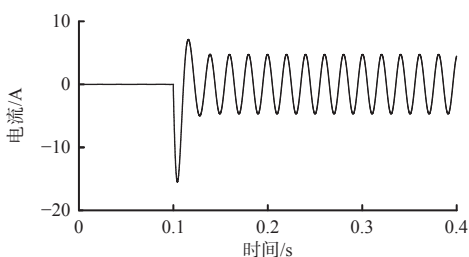
Fig. 7 Simulation waveforms of the opposite number of the fault phase power supply voltage and the neutral point voltage (transition resistance 3 000 Ω)



(a) 故障点电压



(b) 故障点电流



(c) 消弧装置注入电流

图 8 故障点电压、故障点电流和消弧装置注入电流仿真波形(过渡电阻 3 000 Ω)

Fig. 8 Simulation waveforms of fault point voltage, fault point current and injection current of arc suppression device (transition resistance 3 000 Ω)

表 1 不同过渡电阻下仿真结果

Table 1 Simulation results under different transition resistances

过渡电阻/Ω		$-E_A/V$	U_N/V	U_f/V	I_f/A	I_1/A
500	未投	5 759	4 810	3 032	6.06	无
	投入	5 759	5 854	649	1.30	2.42
3 000	未投	5 759	1 530	5 169	1.73	—
	投入	5 759	5 841	910	0.30	3.36

入有源逆变器对故障残流中的有功残流和谐波残流进行精确补偿。有源逆变器容量仅为 10 kVA, 通过 Z 型接地变压器功率转换, 将中性点电压反相钳制接近于故障相电源电压, 中性点电压与故障相电源电压差值的幅值和相位由有源逆变器补偿。模拟接地故障过渡电阻为 500, 3 000 Ω 的单相接地故障, 仿真波形如图 9—图 12 所示, 仿真结果见表 2。仿真时间为 0.4 s, 0.05 s 时发生 A 相接地故障, 0.1 s 时投入柔性消弧系统。

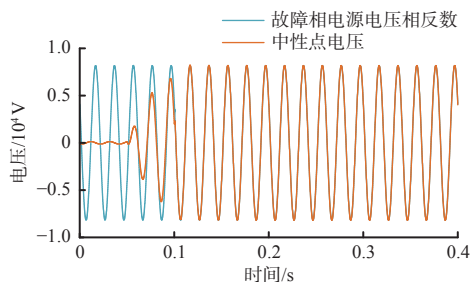


图 9 故障相电源电压相反数和中性点电压
仿真波形(过渡电阻 500 Ω)

Fig. 9 Simulation waveforms of the opposite number of the fault phase power supply voltage and the neutral point voltage (transition resistance 500 Ω)

由图 9 可知, 当 0.05 s 发生 A 相接地故障且过渡电阻为 500 Ω 时, 中性点电压有效值为 4 810 V, 故障相电源电压相反数有效值为 5 759 V, 二者在幅值和相位上存在一定偏差; 在 0.1 s 投入柔性消弧系统后, 中性点电压有效值为 5 765 V, 故障相电源电压相反数有效值为 5 759 V, 中性点电压的幅值和相位在 0.16 s 后迅速追上故障相电源电压。

由图 10 可知, 当 0.05 s 发生 A 相接地故障时, 故障点电压有效值为 3 032 V, 故障点电流有效值为 6.06 A。投入柔性消弧系统 0.16 s 后, 故障点电压有效值为 61.06 V, 抑制率达 98%; 故障点电流有效值为 0.12 A, 抑制率达 98%。

由图 11 可知, 当 0.05 s 发生 A 相接地故障且过渡电阻为 3 000 Ω 时, 中性点电压有效值为 1 530 V, 故障相电源电压相反数有效值为 5 759 V, 二者在幅值和相位上存在一定偏差; 在 0.1 s 投入柔性消弧系统后, 中性点电压有效值为 5 852 V, 故障相电源电压相反数有效值为 5 759 V, 中性点电压的幅值和相位在 0.17 s 后迅速追上故障相电源电压。

由图 12 可知, 当 0.05 s 发生 A 相接地故障时, 故障点电压有效值为 5 169 V, 故障点电流有效值为 1.73 A。投入柔性消弧系统 0.17 s 后, 故障点电压有效值为 62.79 V, 抑制率达 99%; 故障点电流有效值为 0.02 A, 抑制率达 99%。

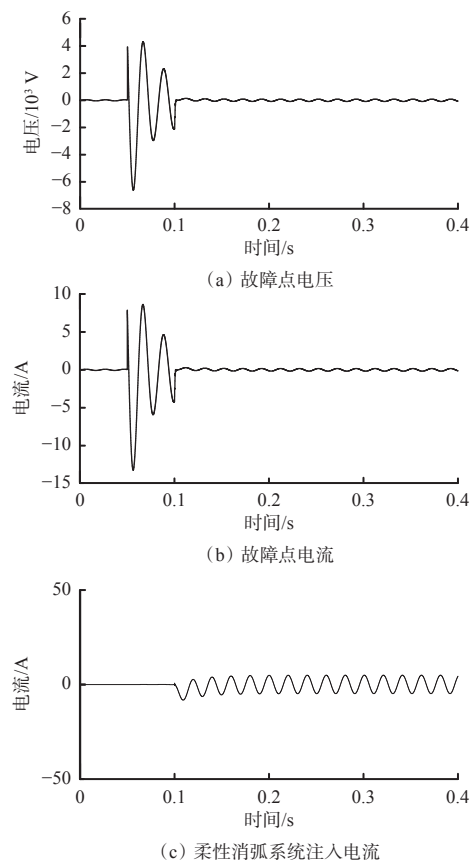


图 10 故障点电压、故障点电流和柔性消弧系统注入电流仿真波形(过渡电阻 500 Ω)

Fig. 10 Simulation waveforms of fault point voltage, fault point current and injection current of flexible arc suppression system(transition resistance 500 Ω)

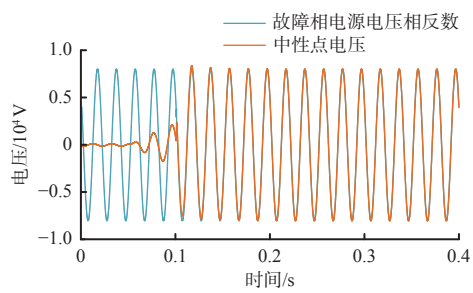


图 11 故障相电源电压相反数和中性点电压仿真波形(过渡电阻 3 000 Ω)

Fig. 11 Simulation waveforms of the opposite number of the fault phase power supply voltage and the neutral point voltage(transition resistance 3 000 Ω)

相对仅通过 Z 型接地变压器功率转换,采用柔性消弧系统可有效提高故障抑制率,消弧效果好且响应速度快。由于加入了有源逆变器对中性点电压和故障相电源电压相反数的差值进行精确补偿,使故障残流产生的有功残流和谐波残流得到充分补偿,实现了不同过渡电阻下故障消弧目标。

4 结语

针对当前中性点非有效接地配电网单相接地故

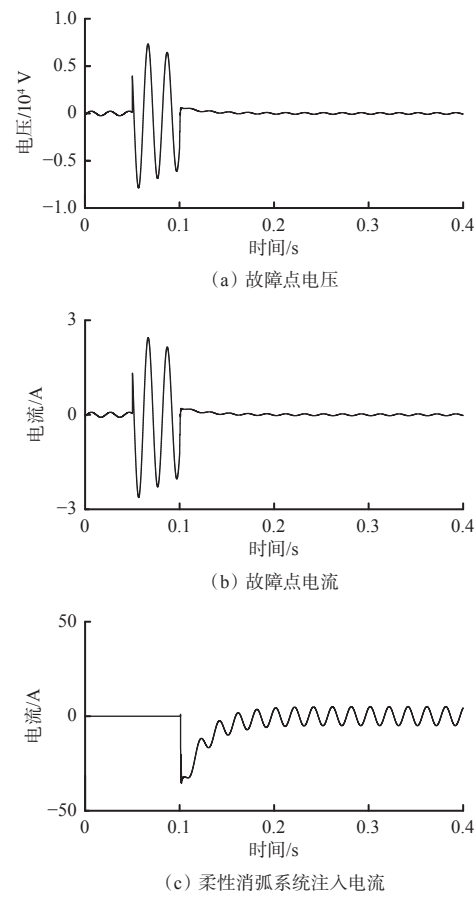


图 12 故障点电压、故障点电流和柔性消弧系统注入电流仿真波形(过渡电阻 3 000 Ω)

Fig. 12 Simulation waveforms of fault point voltage, fault point current and injection current of flexible arc suppression system (transition resistance 3 000 Ω)

表 2 不同过渡电阻下仿真结果

Table 2 Simulation results under different transition resistances						
过渡电阻/Ω		$-E_A/V$	U_N/V	U_f/V	I_f/A	I_1/A
500	未投	5 759	4 810	3 032	6.06	无
	投入	5 759	5 765	61.06	0.12	3.49
3 000	未投	5 759	1 530	5 169	1.73	无
	投入	5 759	5 852	62.79	0.02	3.55

障消弧问题,设计了基于 Z 型接地变压器的配电网单相接地故障柔性消弧系统。通过 Z 型接地变压器功率转换,将中性点电压反相钳制接近于故障相电源电压,中性点电压与故障相电源电压差值偏差电压的幅值和相位由有源逆变器补偿。仿真结果表明,单相接地故障过渡电阻为 500, 3 000 Ω 时,仅通过 Z 型接地变压器功率转换,故障点电压和电流抑制率达 79%~83%,不能完全达到消弧效果;采用柔性消弧系统可有效抑制故障点电压和电流,抑制率达 98% 以上。说明基于 Z 型接地变压器的配电网单相接地故障柔性消弧系统可实现配电网单相接地故障的可靠消弧。

参考文献(References):

- [1] 罗超, 耿蒲龙, 曲兵妮, 等. 矿井供电系统单相接地故障零模特征仿真研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(6): 57-63.
LUO Chao, GENG Pulong, QU Bingni, et al. Simulation research on zero-module characteristics of single-phase grounding fault in mine power supply system[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(6): 57-63.
- [2] 司韶文. 煤矿电网单相间歇性电弧接地故障的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
SI Shaowen. Research of single-phase intermittent arc ground failure in coal distribution network[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [3] 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.
YAO Huannian, CAO Meiyue. Resonant grounding of power system[M]. Beijing: China Power Press, 2009.
- [4] 宗伟林, 许文强, 原亚雷, 等. 矿井配电网单相接地故障选线与定位新方法[J]. 工矿自动化, 2016, 42(11): 45-50.
ZONG Weilin, XU Wenqiang, YUAN Yalei, et al. A new type of single-phase grounding fault line selection and location method for mine distribution network[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11): 45-50.
- [5] 苏展, 于绍峰, 王洋. Z型联结组别接地变低压核相异常分析[J]. 变压器, 2021, 58(10): 30-33.
SU Zhan, YU Shaofeng, WANG Yang. Analysis of abnormal low-voltage phase check situation of Z-type grounding transformer[J]. Transformer, 2021, 58(10): 30-33.
- [6] 郭谋发, 游建章, 张伟骏, 等. 基于三相级联H桥变流器的配电网接地故障分相柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 11-22.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Separate-phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three-phase cascaded H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 11-22.
- [7] 贡保记, 马柯翔, 司渭滨, 等. 配电网单相接地故障的柔性熄弧装置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 124-134.
YUN Baoji, MA Kexiang, SI Weibin, et al. Flexible arc extinguishing device for a single-phase ground fault in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 124-134.
- [8] 曾祥君, 卓超, 喻锴, 等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降压消弧与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1523-1534.
ZENG Xiangjun, ZHUO Chao, YU Kun, et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1523-1534.
- [9] 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(9): 2677-2684.
GOU 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(9): 2677-2684.
- [10] 刘宝稳, 马宏忠, 沈培锋, 等. 新型接地故障基波电流全补偿柔性控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2322-2330.
LIU Baowen, MA Hongzhong, SHEN Peifeng, et al. New flexible control system of full compensation single-phase ground fault fundamental current[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2322-2330.
- [11] 王崇林, 刘建华. 三相五柱式消弧线圈及其自动跟踪补偿原理[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(5): 57-61.
WANG Chonglin, LIU Jianhua. Arc suppression coil with three phases and five columns and its automatic compensation principle[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(5): 57-61.
- [12] 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.
- [13] 蒋仁江, 英云龙, 秦志成, 等. Z型接地变压器在PSCAD下的仿真模型构建[J]. 价值工程, 2015, 34(29): 137-138.
JIANG Renjiang, YING Yunlong, QIN Zhicheng, et al. Simulation model of zigzag grounding transformer by PSCAD[J]. Value Engineering, 2015, 34(29): 137-138.