

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181157

# 10 kV 配网中性点小电阻接地系统的研究与设计

张健, 马伟, 朱亚奇, 闵浩

(国网马鞍山供电公司, 安徽 马鞍山 243011)

**摘要:** 配网的中性点接地方法是一个多因素的技术问题, 一直是国内和国际研究的热点。传统小电阻接地系统在高阻接地或间歇接地故障时接地电流非常小, 不满足零序电流保护要求, 这种现象长时间会烧毁电阻器。针对这种现象, 提出一种新型小电阻接地系统。在分析 10 kV 配网中性点小电阻接地技术的结构和特点的基础上, 用 Matlab 对新型小电阻接地系统进行仿真。仿真证明, 新型小电阻接地系统比传统的小电阻接地系统更加安全可靠, 对我国配网自动化的发展可以提供参考和借鉴。

**关键词:** 配网; 中性点; 小电阻接地; Matlab

## Research and design of neutral grounding resistance system for 10 kV distribution network

ZHANG Jian, MA Wei, ZHU Yaqi, MIN Hao

(State Grid Ma'anshan Power Supply Company, Ma'anshan 243011, China)

**Abstract:** The neutral grounding method of distribution network is a multi-factor technical problem, which has been a hot spot of domestic and international research. The grounding current of traditional small resistance grounding system is very small when high resistance grounding or intermittent grounding fault occurs, which can not meet the requirement of zero sequence current protection. This phenomenon will burn resistors for a long time. In view of this phenomenon, a new type of small resistance grounding system is proposed. Based on the analysis of the structure and characteristics of the neutral grounding technology for 10 kV distribution network, a new type of small resistance grounding system is simulated with Matlab. It is proved that the new type of small resistance grounding system is safer and more reliable than the traditional small resistance grounding system, hoping to supply some reference and guidance for the development of distribution network automation in China.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5212B018001V).

**Key words:** distribution network; neutral point; small resistance grounding; Matlab

## 0 引言

电能广泛应用于各行各业, 与人们的生活密切相关, 电力安全性和稳定性越来越受到人们的关注。在我国的电力系统中, 10 kV 中压配电网在配电中起着非常重要的作用。它的供电可靠性以及质量对国民经济和人民群众的日常生活有着直接的影响。正确选择中性点接地是提高配电网可靠性和安全性最直接有效的方法。中性点接地是电力系统安全和经济运行的基本问题之一。目前, 我国的配电网接地方法有三种: 不接地、经消弧线圈接地、经小电阻接地。

随着电网容量和电缆线路规模的增加, 中性点不接地和经消弧线圈接地在电网运行中过电压水平高, 选线和消弧线圈容量调节困难。小电阻接地对故障线路的确定非常快速, 过电压也很低, 但跳闸率高, 供电质量差。现在的电流接地电阻器是一个恒定的线性电阻器。在非金属接地或间歇接地故障时, 故障电流通常为数十至数百安培。在达到零序电流保护要求前, 发生故障的线路不会被切断, 接地电阻时间长可能被烧毁。这已经成为限制小电阻接地系统的主要因素。

## 1 小电阻接地系统组成

中性点小电阻接地系统由接地变和小电阻组成。如果通过小电阻接地, 只需将小电阻连接到变

电站 10 kV 母线的中性点即可。在正常操作期间，小电阻不起作用。当在配电网系统中发生单相接地故障时，中性点处的小电阻在线路和接地点之间形成回路，并且连接位置流过足够大的零序电流，10 kV 配电网线路的零序保护切除故障线路。电路图如图 1 所示。

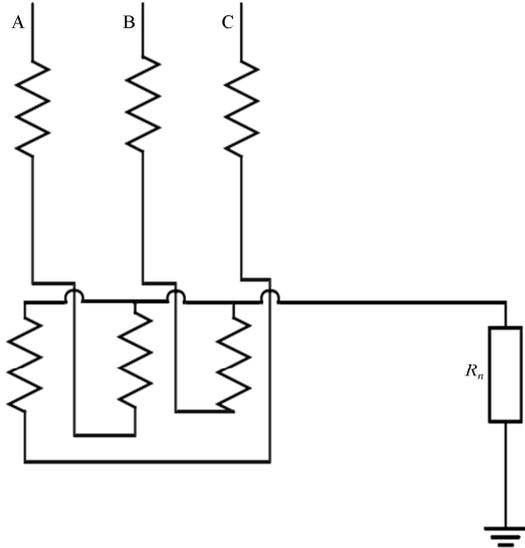


图 1 小电阻接地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of small resistance grounding

接地变通常采用 Z 型接地变。即将三相铁芯柱每个芯柱上的绕组平均分为两部分，三相绕组根据 Z 型连接成星型接线，特点在于：1) 正序和负序电流表现出高阻抗(相当于励磁阻抗)，并且只有很小的励磁电流流过绕组。2) 由于在每个铁芯柱上的两个绕组缠绕为相反方向，当同一铁芯柱上的两个绕组流过相同的零序电流，两个绕组产生相互抵消的磁通。因此，零序电流呈现低阻抗(等效漏抗)。绕组上的零序电流电压降很小。变电站中性点接地电阻系统由接地变、接地电阻、零序互感器(部分配有电阻器监视装置)等组成。

由于现代城市电网供电能力的不断提高和断路器连续运行能力不断增强，小电阻中性点接地方式才开始被采用。如果系统发生单相接地故障，则故障电流通常为 100~1 000 A。基于检测到的故障电流，保护装置可以快速切除配电系统的接地线。因此，故障点难以发展为多点接地故障，有利于快速恢复故障线路。在发生接地故障时，无故障相的电压小于线电压。此外，它能够把操作设施和城市通讯系统的影响降到最低。中性点设备的投资成本不高，对整个系统的安全运行作用显著。对于一些架空电力线，可以采用自动重合闸装置提高用户供电

的可靠性。城网中  $R_n$  通常选用 5.5~16  $\Omega$ 。

## 2 新型小电阻接地系统

### 2.1 新型接地电阻器

为了解决小电阻接地系统接地电阻由于长期积热导致的烧毁问题，提出了新型接地电阻的概念。图 2 是新型电阻器简图。

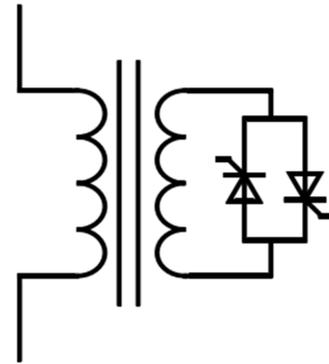


图 2 新型电阻器简图

Fig. 2 Schematic diagram of new resistor

根据变压器的原理，当晶闸管关闭和导通时，新的接地电阻可以等效为如图 3 (a)和(b)所示。在图中， $R_1$  表示变压器一次侧的电阻； $R'_2$  表示二次侧的电阻值折算到一次侧的电阻； $X_{1\sigma}$  表示变压器一次侧的漏电抗； $X'_{2\sigma}$  表示一次侧折算到二次侧漏电抗； $R_m$  表示励磁电阻； $X_m$  表示励磁电抗；变压器绕组采用铁丝制成(高阻材料)，但为了满足小电阻接地条件，一些低压绕组采用反绕。因此，当晶闸管导通时，新的接地电阻将为 12  $\Omega$ 。当晶闸管断开时，新的接地电阻相当于较大的阻抗。

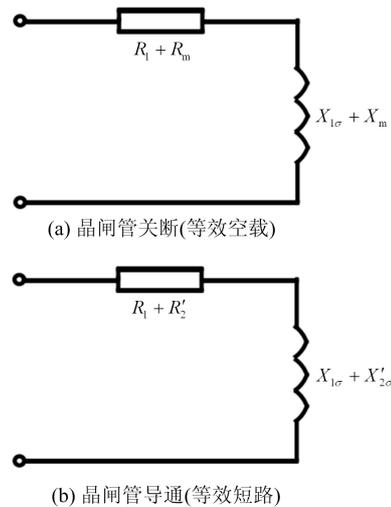


图 3 接地电阻器的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of earthing resistor

当中性点电压低于阈值电压  $U_G$  时,晶闸管断开,新的接地电阻在地线处具有较高的阻抗,并且在电阻中流过较小的电流,电阻器不会出现长时间发热烧坏问题,配电网络可以继续安全运行。当中性电压高于阈值电压  $U_G$  时,晶闸管接通,新的接地电阻将为  $12\ \Omega$ 。此时,接地电流大,故障线路的故障特性变得较为明显,过流保护可立即切除故障线路。

一般小电阻接地系统对过电流保护值进行设置来保证电力系统安全运行。新型小电阻接地系统主要对阈值电压  $U_G$  进行调整,如果中性电压低于阈值电压,则配电网络以高阻状态运行。中性点电压高于阈值电压,晶闸管导通,则配电网络以小电阻状态运行。

## 2.2 新型小电阻接地系统设计

新型小电阻接地系统如图 4 所示。10 kV 中压配电网具有两种运行状态。

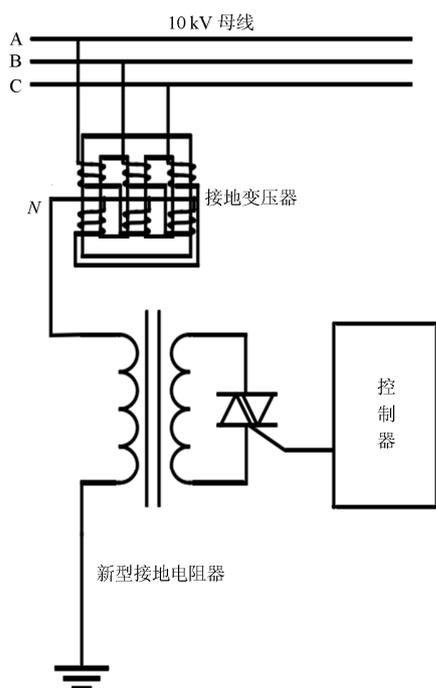


图 4 小电阻接地系统结构简图

Fig. 4 Schematic diagram of small resistance grounding system

(1) 配电网运行正常。中性点的位移电压  $0.5\%$  到  $1.5\%U_{ph}$  之间。只要偏差在  $5\%$  范围内,对系统影响可忽略,设备和负荷可安全运行。因此,新型小电阻接地系统对电压阈值  $U_G$  的选择应根据变电站的实际情况。因此,配电网正常运行期间,晶闸管关闭,系统工作在大阻抗状态,流过的电流非常小。

(2) 配电网发生接地故障。根据过渡电阻的不同,有两种类型:1) 在金属接地故障或接地过渡电

阻很小时,  $U_o > U_G$ , 晶闸管接通,新的接地电阻为  $12\ \Omega$ 。故障线路电流非常高,过流保护把故障线路切除;2) 存在较大的过渡电阻,  $U_o < U_G$ , 高阻接地状态。相比于普通小电阻接地系统,新型小电阻接地系统呈现成高阻抗,流过的电流非常小,不会损坏电阻,该系统可以持续安全运行。如图 5 所示为新型小电阻接地系统工作流程。

## 3 新型小电阻接地系统

在一个实际的电力系统中,10 kV 总线上有多个支路,但是这些线路的长度、参数、负载等可能不同。在不影响分析结果的情况下,多分支系统就简化为只有三个分支的配电网。发生单相短路接地故障(A相接地)在第三条支路,这条支路就是故障线路,其他两个分支是非故障线路。使用 Matlab 建立仿真模型。

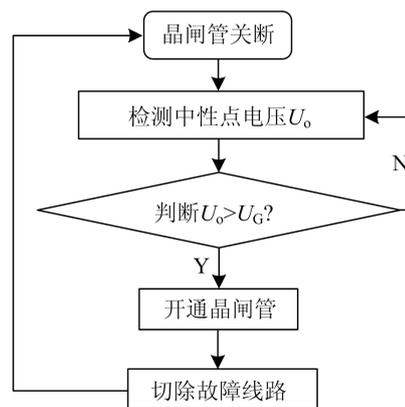


图 5 运行流程图

Fig. 5 Operation flow chart

系统供电参数如下:110 kV 三相供电,经过 110/10 kV 的 Y/Δ接线变压器后,系统母线电压降至 10 kV。将接地变压器连接到 10 kV 母线,并在中性点和地之间连接一个新型电阻器。三条电线都是电缆线,电力电缆参数如下。

零序参数:  $R_0 = 0.234\ \Omega/\text{km}$ ,  $L_0 = 0.335\ \text{mH}/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.265\ \mu\text{F}/\text{km}$

正序参数:  $R_1 = 0.031\ \Omega/\text{km}$ ,  $L_1 = 0.096\ \text{mH}/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.338\ \mu\text{F}/\text{km}$

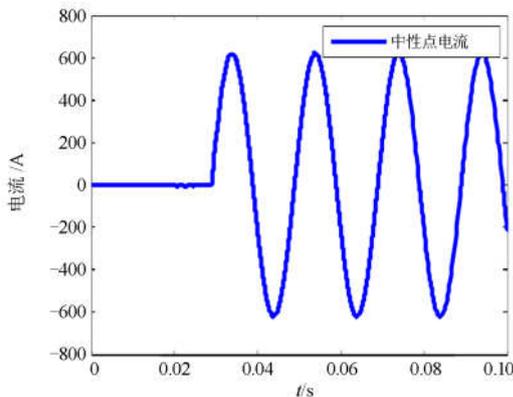
在仿真变电站的实际情况下,1 号线总长度为 15 km,2 号线总长度为 17 km,3 号线配有短路接地模块,全长 15 km(上端 10 km,下端 5 km)。在将电流和电压模块放置在每条线路上之后,在线路的末端施加三相负载。由于我国低压配电网的中性点直接接地,高压侧不接地,低压侧负载平衡对中

压配电网没有影响。在分析零序故障特征分量时，可以将其视为空载，并在仿真模型中设置小负载功率，这样负载阻抗就非常大，线路可看成空载状态。

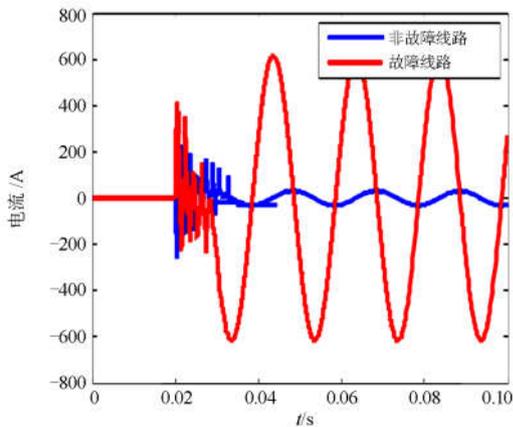
通过分析可知，电阻大小对系统的运行和故障特征影响很大。下面对接地电阻分别为  $0\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$  和  $500\ \Omega$  情况进行仿真。均在 A 相  $t = 0.02\ \text{s}$  时发生接地故障。

### 3.1 接地电阻为 $0\ \Omega$ 仿真分析

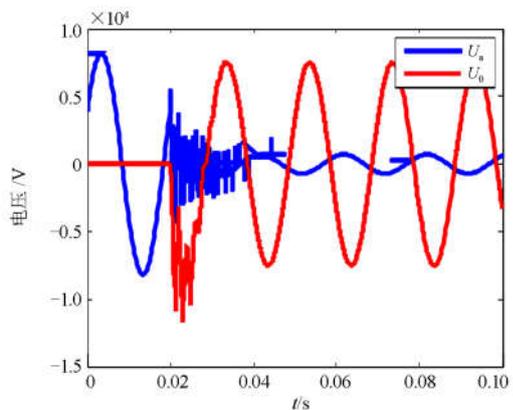
如图 6 所示，当系统正常工作时，中性线对地



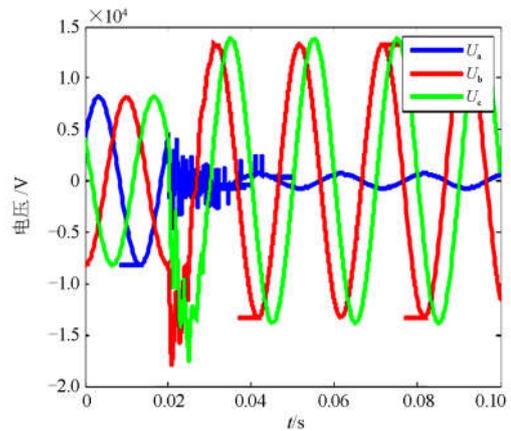
(a) 中性点电流



(b) 零序电流 (非故障 2 和故障 3)



(c) 中性点和故障电压



(d) 三相对地电压

图 6 接地电阻为  $0\ \Omega$  时的故障特征

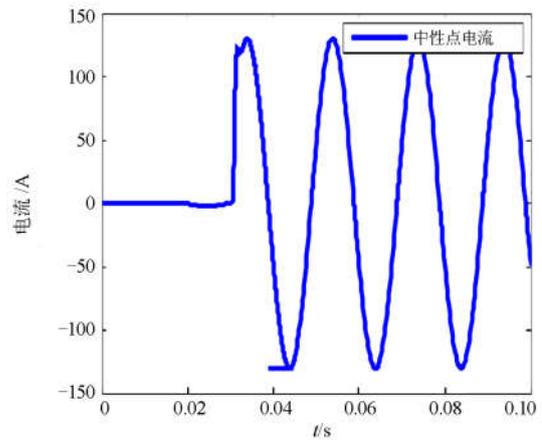
Fig. 6 Fault characteristics when grounding resistance is  $0\ \Omega$

电压低于  $1\ \text{kV}$  系统阈值电压，晶闸管处于关断状态，系统工作在高阻状态。

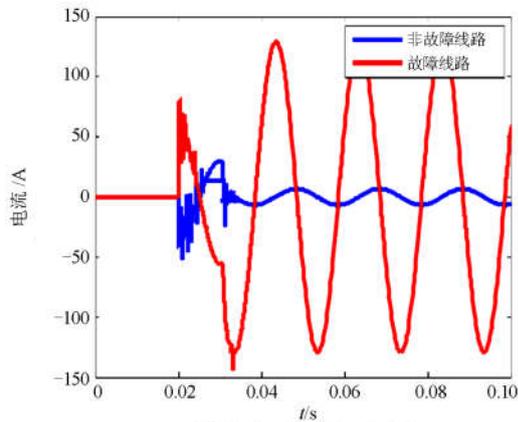
发生 A 相接地故障后，故障相电压降至  $500\ \text{V}$ ，中性点电压升至  $5\ 300\ \text{V}$ ，大于  $1\ 000\ \text{V}$  阈值电压。当中性点电压超过阈值电压时，晶闸管导通，系统呈现小电阻状态。流过电阻的电流为  $438\ \text{A}$ ，非故障线路 2 的零序电流为  $22\ \text{A}$ ，故障线路 3 的零序电流为  $435\ \text{A}$ ，电流较为明显，过电流保护执行，切除故障线路 3。

### 3.2 接地电阻为 $50\ \Omega$ 仿真分析

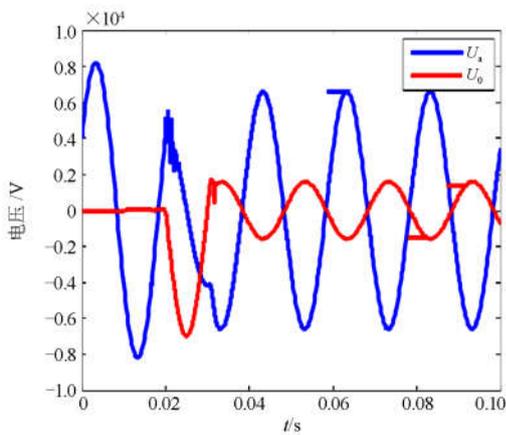
如图 7 所示，当接地电阻为  $50\ \Omega$ ，则故障相电压将升至  $4\ 653\ \text{V}$ ，中性点电压将降至  $1\ 110\ \text{V}$  (金属性接地)，这与理论分析的结果相同。当中性电压超过阈值电压时，晶闸管导通，流过接地电阻的电流  $92\ \text{A}$ ，非故障线路 2 的零序电流为  $4.7\ \text{A}$ ，故障线 3



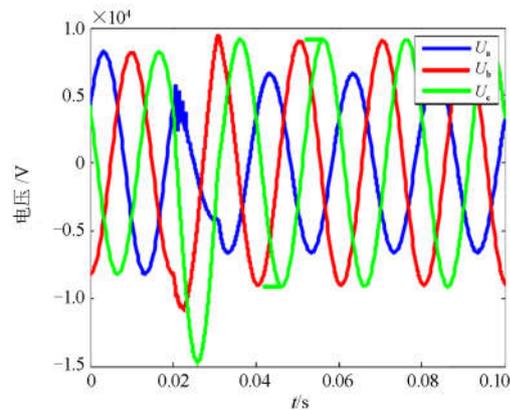
(a) 中性点电流



(b) 零序电流 (非故障 2 和故障 3)



(c) 中性点和故障电压



(d) 三相对地电压

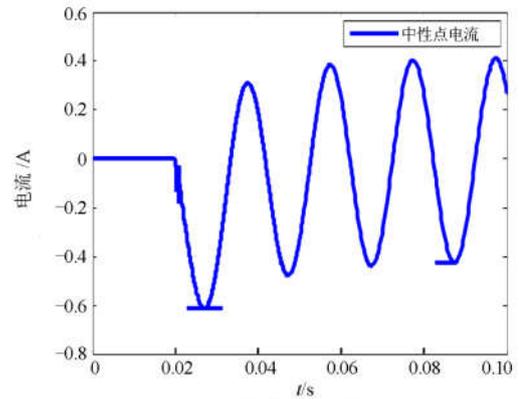
图 7 接地电阻为  $50 \Omega$  时的故障特征Fig. 7 Fault characteristics when grounding resistance is  $50 \Omega$ 

的零序电流为  $91 \text{ A}$ , 电流变化明显, 执行过电流保护并切除故障线 3。

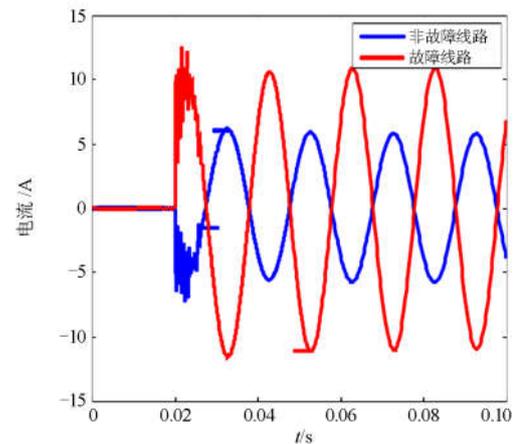
### 3.3 接地电阻为 $500 \Omega$ 仿真分析

当接地电阻为  $500 \Omega$  时, 故障相的电压是  $5657 \text{ V}$ , 这已接近系统的正常运行。中性点电压为  $955 \text{ V}$ , 由于中性点电压低于  $1 \text{ kV}$  阈值电压, 晶闸

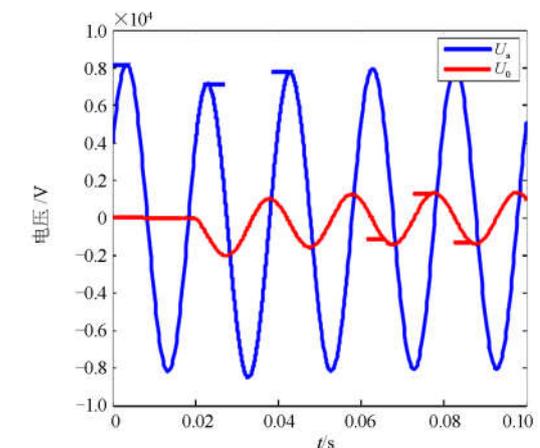
管保持截止, 系统呈大阻抗状态。线路 2 零相电流  $4.1 \text{ A}$ , 线路 3 的零相电流  $7.8 \text{ A}$ , 相位差为  $180^\circ$ , 这与理论分析相同。此时, 过电流保护不动作, 小电阻接地系统的接地电阻大多在这种情况下由于长期蓄热而烧坏。然而, 新型小电阻接地系统成大阻抗状态, 电阻流过电流仅为  $0.29 \text{ A}$ , 电阻器不会烧坏, 新型小电阻接地系统接地方式安全可靠。



(a) 中性点电流



(b) 零序电流 (非故障 2 和故障 3)



(c) 中性点和故障电压

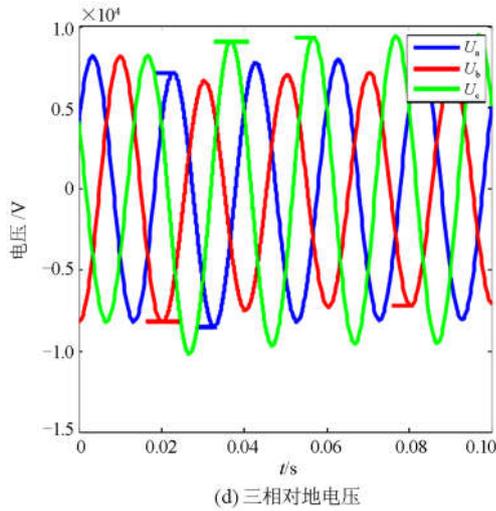


图 8 接地电阻为 500 Ω时的故障特征

Fig. 8 Fault characteristics when grounding resistance is 500 Ω

### 4 结论

小电阻接地系统在我国城市电网中应用广泛。然而，在小电阻接地系统运行中，有一定数量的电阻燃烧事故发生，这极大地限制了小电阻系统的应用。针对这一问题，根据接地电阻的阻抗特性，提出新型的小电阻接地系统。如果中性点电压低于阈值电压，系统呈现高阻状态。如果中性点电压高于阈值电压，系统呈现小电阻状态。新型小电阻接地系统是确保电力设备正常运行的有效保证，是电力系统发展的关键。该系统尚未进入实践阶段，还有很多工作需要去完成，新型接地电阻器由大阻抗向小电阻状态转换过程对电网的影响还需要进一步研究和分析。

### 参考文献

[1] 丁爱佳, 鲍炫羽, 季玲玲, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线方法研究[J]. 浙江电力, 2017, 21(5): 158-160.  
DING Aijia, BAO Xuanyu, JI Lingling, et al. Study on single-phase-to-ground fault line selection method for small current grounding system[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 21(5): 158-160.

[2] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.  
HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Traveling wave propagation characteristics of HVDC transmission line faults and its influence on traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.

20-25.

[3] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.  
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method for HVDC transmission lines based on traveling wave instantaneous frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.

[4] 宋国兵, 李德坤, 靳东晖, 等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 83-88.  
SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. Single-terminal fault location of flexible HVDC transmission lines using traveling wave voltage distribution characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 83-88.

[5] 刘文军, 仇彦军, 孙立臣. 500 kV 输电线路杆塔接地网不同环境下优化降阻方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 41(13): 88-106.  
LIU Wenjun, QIU Yanjun, SUN Lichen. 500 kV transmission line tower grounding grid optimal resistance reduction scheme under different environment[J]. Power System Protection and Control, 2018, 41(13): 88-106.

[6] 侯小虎, 封孝松, 闫海峰, 等. 注入式定子接地保护补偿参数测定新方法[J]. 水电与新能源, 2018, 42(6): 251-253.  
HOU Xiaohu, FENG Xiaosong, YAN Haifeng, et al. A new method for determining compensation parameters of injected stator grounding protection[J]. Hydropower and New Energy Sources, 2018, 42(6): 251-253.

[7] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 41(13): 120-125.  
ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. A method for locating small-current grounding faults based on the similarity of zero-sequence current amplitude distribution[J]. Power System Protection and Control, 2018, 41(13): 120-125.

[8] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 41(13): 41-47.  
XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Reliability evaluation under single-phase-to-ground fault of cable distribution network with different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 41(13): 41-47.

[9] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电

- 保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
- SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Summary of HVDC line relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [10] 杨建, 唐忠. 高压电缆在线行波故障测距算法的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 48-54.
- YANG Jian, TANG Zhong. Design of on line traveling wave fault location algorithm for high voltage cables[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 48-54.
- [11] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [12] 黄建业, 陈敏维, 张功林, 等. 基于突变逻辑阵的配网小电流接地故障判定方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 45-50.
- HUANG Jianye, CHEN Minwei, ZHANG Gonglin, et al. A method for determining small current grounding fault in distribution network based on catastrophic logic array[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 45-50.
- [13] ABAEI M M, ARZAGHI E, ABBASSI R, et al. Dynamic reliability assessment of ship grounding using Bayesian Inference[J]. Ocean Engineering, 2018, 28(6): 159-161.
- [14] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [15] 秦如意, 刘宗良, 陈洲, 等. 某地区配电线路防雷现状分析及防雷装置研究[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 39-44.
- QIN Ruyi, LIU Zongliang, CHEN Zhou, et al. Analysis of lightning protection status of distribution lines in a certain area and study of lightning protection devices[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 39-44.
- [16] LIU B, PEDERSEN P T, ZHU L, et al. Review of experiments and calculation procedures for ship collision and grounding damage[J]. Marine Structures, 2018, 46(3): 59-66.
- [17] YOUSSEF S A M, PAIK J K. Hazard identification and scenario selection of ship grounding accidents[J]. Ocean Engineering, 2018, 46(4): 153-159.
- [18] DATSIOS Z G, MIKROPOULOS P N. Safety performance evaluation of typical grounding configurations of MV/LV distribution substations[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 26(15): 150-156.
- [19] 孙昕. 中国电力建设技术进展及发展趋势-(上)电网部分[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 1-8.
- SUN Xin. Technological progress and development trend of China's electric power construction-(1) power grid part [J]. Electric Power, 2017, 50(3): 1-8.
- [20] 刘专, 郭泉辉, 刘娟, 等. 基于统计数据的配网故障修复时长分析[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 84-87.
- LIU Zhuan, GUO Quanhui, LIU Juan, et al. Distribution network fault repair time analysis based on statistical data[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 84-87.

收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2018-11-04

作者简介:

张 健(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: dgffgrgevd65465@163.com

马 伟(1982—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为继电保护;

朱亚奇(1964—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 张爱琴)