

郭馨慧,唐秀明,周少武. 工业 10 kV 电网中性点经小电阻接地方法研究及应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3):58-64. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.009

GUO X H, TANG X M, ZHOU S W. Research and Application of Neutral Point Grounding Method for Industrial 10kV Power Network[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3):58-64. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.009

# 工业 10 kV 电网中性点经小电阻接地方法 研究及应用

郭馨慧,唐秀明,周少武\*

(湖南科技大学 信息与电气工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**某炼钢公司 10 kV 电网全部由电缆线路组成,当前采用中性点经消弧线圈接地的运行方式,当单相接地故障发生时不能准确选线,难以迅速切除故障电缆,给生产带来安全隐患.综合分析炼钢公司的多种运行方式并结合中性点经小电阻接地技术原理,提出 10 kV 电网中性点经小电阻接地的解决方法.经资料收集和理论分析,分别建立了炼钢公司 10 kV 侧电网中性点经小电阻接地和经消弧线圈接地系统仿真模型,仿真计算结果表明:采用的接地方法,能有效降低单相接地故障发生时的瞬时过电压,并有较大的故障电流,可使保护装置准确选线、降低线路故障对公司造成的损失.针对工业 10 kV 电网这类电网系统,中性点经小电阻接地方式比经消弧线圈接地方式更具优越性.中性点经小电阻接地方法对生产持续性要求高的电缆电网安全稳定运行、可靠供电有着非常重要的意义.

**关键词:**工业 10 kV 电网;中性点经小电阻接地;单相接地

**中图分类号:**F416.61      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2021)03-0058-07

## Research and Application of Neutral Point Grounding Method for Industrial 10 kV Power Network

GUO Xinhui, TANG Xiuming, ZHOU Shaowu

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** A 10 kV power grid of a steelmaking company consisting entirely of cable lines, the current neutral point is grounded by the arc suppression coil. But the line cannot be accurately selected because of the small faulty current, it is difficult to remove the faulty cable quickly, which brings safety hazards to production. The various operating conditions of the steelmaking company were analyzed, and the neutral point with the principle of small resistance grounding technology was combined to propose a 10 kV grid neutral point grounded via small resistance method. After reasonable calculation to determine the resistance value, the model of the 10 kV side grid of the steelmaking company through the small resistance grounding and the arc suppression coil grounding system was established and simulated. The simulation results show that the grounding method reduce the transient over-voltage when single-phase ground fault occurs, and have a large fault current, which make the protection device accurately select the line, and reduce the loss caused by the line fault to the steelmaking company. This

收稿日期:2019-10-22

基金项目:湖南省自然科学基金青年基金资助项目(2018JJ3188)

\*通信作者, E-mail: 81252540@qq.com

grounding method is very important for the safe and stable operation of the cable grid with high production continuity and reliable power supply.

**Keywords:** industrial 10 kV power grid; the neutral point grounded via small resistor; single phase grounded

10 kV 电力系统多采用中性点不接地、中性点经消弧线圈接地等接地方式<sup>[1-2]</sup>。中性点不接地方式和中性点经消弧线圈接地方式属于小电流接地方式,小电流接地系统中的单相接地故障的故障电流较小,同时系统线电压保持对称,因此允许系统带故障运行 1~2 h;且因为补偿后的故障电流较小,电弧易在电流过零时自然熄灭,可以减少用户停电次数,提高电网运行稳定性<sup>[3-4]</sup>。随着社会的持续发展、电网规模的不断扩大,电网中电缆线路比重不断增加,接地电容电流大幅增加,采用中性点不接地方式和中性点经消弧线圈接地方式出现了新的问题。文献[5]指出,由电缆线路组成的电网发生的单相接地故障多为永久性故障,为防止单相接地故障发展为相间故障,要求保护装置准确切除故障线路。而小电流接地系统单相接地电流较小,导致其选线能力较差,保护难以准确迅速切除故障线路<sup>[6]</sup>。中性点经消弧线圈接地方式不能有效抑制单相接地时的瞬时过电压,较大的过电压容易击穿系统绝缘,导致单相接地故障发展为相间故障。同时,中性点经消弧线圈接地系统零序阻抗较大,若其三相参数不对称,会产生中性点位移电压,较大的位移电压将导致虚幻接地,引起保护误动作,从而影响电网的正常运行<sup>[7]</sup>。中性点经小电阻接地方式属于大电流接地方式,大电流接地系统中单相接地故障的故障电流较大,因此,具有良好的接地选线功能,可准确切除故障线路。同时,中性点经小电阻接地系统可有效抑制单相接地时的过电压水平,从而降低单相接地故障发展为相间故障的概率<sup>[8]</sup>。因此,近年来城市电网 10 kV 电力系统中性点经小电阻接地方式的使用比例逐渐增加。

某炼钢公司 10 kV 侧电网均为电缆线路,中性点经消弧线圈接地,运行于过补偿方式。当系统发生单相接地故障时,接地电流小,难以准确选线,有时需要使用人工拉路的方法寻找故障线路,影响了非故障线路的生产。单相接地的瞬时过电压,也给系统安全带来隐患。针对上述问题,论文提出 10 kV 电网采用中性点经小电阻接地的解决方法。经理论分析计算确定接地电阻值,通过 PSASP (Power System Analysis Synthesis Program, 电力系统分析综合程序)对炼钢公司供电系统进行仿真表明,采用中性点经小电阻接地方法能有效降低单相接地故障发生时的瞬时过电压;并有较大的故障电流,使保护装置能够准确选线、切除故障,避免故障扩大、从而保障公司生产平稳运行。

工业 10 kV 侧电网普遍采用电缆线路,当系统发生单相接地故障后,为保证人员人身安全、公司财产安全以及快速恢复生产,要求保护具有降低瞬时过电压以及快速、准确进行接地选线的功能。与中性点经消弧线圈接地方法相比,中性点经小电阻接地方法更加满足工业 10 kV 侧电网的保护要求,经小电阻接地方法对生产持续性要求高的电缆电网运行具有较好的指导意义。

## 1 某炼钢厂电网分析

### 1.1 某炼钢厂 10 kV 电网运行分析

炼钢公司 10 kV 侧电网中性点经消弧线圈接地,10 kV 出线均采用电缆线路,电网电容电流较大:东区 10 kV I 段母线电容电流约为 41.90 A,10 kV II 段约为 46.80 A;南区 10 kV I 段母线电容电流约为 62.30 A,10 kV II 段约为 10.30 A;主区 10 kV 母线电容电流约为 91.00 A,如表 1。当生产状况变化时电容电流改变,难以保证与消弧线圈容量的配合,发生单相接地故障时可能产生弧光过电压,且难以准确进行故障选线。

表 1 各母线对地电容电流

变电站名称	母线名称	对地电容电流/A
东区	10 kV I 段	41.90
	10 kV II 段	46.80
主区	10 kV	91.00
南区	10 kV I 段	62.30
	10 kV II 段	10.30

该炼钢公司共有8组自备发电机组.不同季节,自备发电机组投运及母线运行方式会进行调整,影响短路电流的大小,因此,需考虑自备机组投运及母线运行方式对短路电流的影响.

## 1.2 现阶段中性接地方式的局限性分析

根据1.1节中对电网的分析可知,炼钢公司电网要求中性点接地方式对电网电容电流的变化不甚敏感并能实现准确的接地选线.针对以上2个要求,分析该炼钢公司使用中性点经消弧线圈接地存在的局限性,同时分析采用中性点经小电阻接地的优越性.

### 1.2.1 接地方式对电容电流变化的敏感程度

为避免线路故障后发生串联谐振,一般要求消弧线圈工作在过补偿状态,补偿度在5%~10%之间,故消弧线圈的阻值大小必须根据电容电流的大小进行调节.由于生产需要,炼钢公司生产线路的连入与断开状态的变化较为频繁,导致电容电流常有变化,消弧线圈难以及时调节到要求阻值,以进行过补偿.与经消弧线圈接地方式相比,经小电阻接地方式对系统电容电流的变化并不敏感.中性点经小电阻接地方式在电容电流较大的变化范围内均可正常发挥作用,保护电网.

### 1.2.2 供电可靠性

中性点经消弧线圈接地方式属于小电流接地方式,零序电流经消弧线圈补偿后很小.零序电流过小加大了保护装置准确判断故障线路位置的难度.中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障后,一般采用试拉手段确定故障点.通过试拉手段确定故障点需要较长时间.数值较大的故障电流的长时间存在,加大了单相接地故障发展为相间故障的概率,且试拉过程中会产生操作过电压,对设备的绝缘造成损害,将严重危害电网的安全稳定运行.中性点经小电阻接地方式属于大电流接地方式,当系统发生故障时,故障电流较大,系统保护装置可以准确动作,及时切除故障电路,保护电网,减少故障带来的损失.

## 2 10 kV 侧电网中性点经小电阻接地方法

### 2.1 接地系统构成

中性点经小电阻接地系统由接地变压器和小电阻构成,如图1.接地变压器一般采用ZnYn联结,10 kV侧为Z型接线,其接线图如图2所示.Z型变压器因其接线方式,对正序、负序电流呈现高阻抗,对零序电流呈现低阻抗.故系统正常工作时,中性点接地装置损耗较小;当系统发生故障时,能使零序电流近似无损耗的通过变压器绕组到达小电阻处<sup>[9]</sup>.

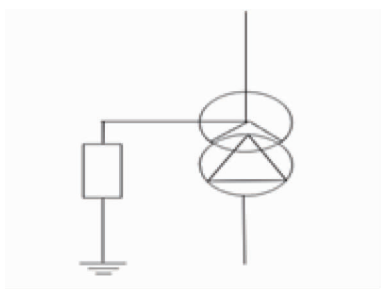


图1 中性点经小电阻接地系统

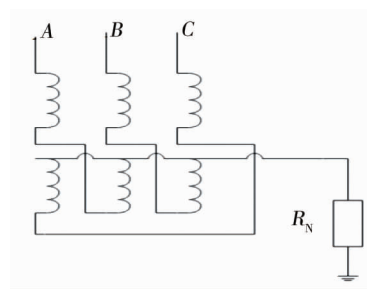


图2 Z型接地变压器10 kV侧接线

### 2.2 接地装置的数量

炼钢公司的西北区变电站为公司员工的生活区供电,电网对地电容电流较小,电容电流数值变化较小,故可不使用中性点经小电阻接地技术.该炼钢公司应用中性点经小电阻接地技术的范围为东区、南区、主区变电站10 kV侧电网.

东区、南区、主区变电站电网10 kV侧均为单母分段接线.工厂正常运行时,东区、南区变电站10 kV侧母线分列运行,主区变电站10 kV侧母线并列运行.根据规程,一段母线上只允许设置一个接地点,故东区、南区变电站各需两套接地装置,主区变电站需一套接地装置.考虑到若主区变电站的1#变压器重新投入运行,主区10 kV侧母线分列运行,因此主区变电站也装设2台接地装置,现阶段主区仅一台接地装置投入运行.

## 2.3 电阻阻值的选择与计算

工业电网中选择小电阻阻值需要考虑多方因素,经过分析,主要有3点.

### 2.3.1 电网安全运行要求

从电网安全运行方面需要考虑小电阻阻值对降低电网过电压水平、保护整定、通信、人身安全以及故障电流等方面的影响.

小电阻阻值对降低电网过电压水平的影响.当  $I_R > 2I_C$  时,弧光接地过电压水平可降到 2.2 p.u 以下;当  $I_R \geq 4I_C$  时,弧光过电压水平降到 2.0 p.u 以下; $I_R > 4I_C$  后,降低过电压水平的效果没有明显的提高,且经济投入相对较高<sup>[10]</sup>.因此,从降低电网过电压方面考虑,流经小电阻电流值范围为  $2I_C \sim 4I_C$ .其中,  $I_R$  为流过小电阻的电流,  $I_C$  为系统电容电流,  $I_C$  由实际测量得到.

小电阻阻值对保护整定、通信、人身安全以及故障电流等方面的影响.从保护整定及电缆允许运行故障电流考虑,流经小电阻的电流大于 100 A 时,单相接地故障电流大于每条母线的对地电容电流,可满足保护的灵敏度要求.考虑对通信及短路点周围人身的安全的影响,短路电流应小于 1 000 A<sup>[11]</sup>.

### 2.3.2 实际装置参数

中性点接地装置分为4种型号,4种型号的小电阻阻值分别为 10, 15, 30 和 60  $\Omega$ .该炼钢厂使用的接地装置中电阻的阻值需从以上4个值中选择.

### 2.3.3 经济性

接地装置中电阻的阻值越小,发生单相接地故障时流经电阻的电流越大,接地装置中变压器所需的容量越大,导致经济投入加大.所以,在满足电网运行要求和产品数值要求的基础上,选择阻值较大的电阻.

接地装置的小电阻阻值由式(1)得

$$R_N = \frac{U}{I_R}. \quad (1)$$

式中:  $R_N$  为接地装置中小电阻阻值;  $U$  为相电压,取 5.77 kV;  $I_R$  为流经小电阻的电流.

从电网安全运行与实际装置参数考虑,经过计算,可得出各变电站接地装置中小电阻的电阻值范围如表2所示.

表2 各变电站小电阻取值范围表

变电站名称	10 kV 母线运行状态	母线名称	电阻值范围/ $\Omega$	产品电阻值/ $\Omega$
东区	分列运行	I 段	30~58	30
		II 段		
主区	并列运行	10 kV	16~32	30
南区	分列运行	I 段	16~58	30
		II 段		
南区	分列运行	I 段	16~46	30
		II 段		

根据小电阻阻值选择的第3个考虑因素,即经济性,6套接地装置中电阻的阻值均选择 30  $\Omega$ .

## 2.4 接地变压器容量的计算

当系统发生金属性单相接地故障时,中性点电压升至系统相电压.

$$I_d = \frac{U_{\text{相}}}{R_N}. \quad (2)$$

式中:  $U_{\text{相}}$  为系统相电压,取 5.77 kV;  $R_N$  为中性点接地装置中的小电阻阻值.

中性点经小电阻接地方式下,系统发生接地故障时,保护系统将在小于 1~2 s 的时间内动作跳闸,IEEE-C62.92.3 标准规定变压器 10 s 的允许过载系数为变压器额定容量的 10.5 倍,故接地变压器的容量选择为电阻容量的  $1/10.5$ <sup>[12]</sup>.小电阻接地装置中接地变压器容量  $S$  为

$$S_{\text{短时}} = 3 \times \frac{U}{\sqrt{3}} \times \frac{I_d}{3}; \quad (3)$$

$$S = \frac{S_{\text{短时}}}{10.5} \tag{4}$$

式中: $S_{\text{短时}}$ 为短路时电阻容量; $U$ 为线电压,取10 kV; $I_a$ 为流过电阻的短路电流,由式(2)计算得出。

经过计算,得 $I_a$ 为192.3 A.将数据带入式(4),得接地变容量为105.7 kVA.

炼钢公司采用小电阻接地方式的具体方案及装置参数:变压器容量为105.7 kVA,电阻阻值为30 Ω,装置数量为6套,东区I、II段,南区I、II段,主区I、II段各装一套。

### 3 仿真计算及分析

建立了炼钢公司10 kV侧电网中性点经消弧线圈接地和经小电阻接地系统模型,通过PSASP对2种模型进行仿真,比较系统中性点经消弧线圈接地与经小电阻接地2种接地方式下发生单相接地故障后流经接地装置的短路电流,验证中性点经小电阻接地方式的可行性及优越性。

#### 3.1 正常运行方式

炼钢厂正常运行时,东区、南区变电站10 kV侧母线分列运行,南区变电站电网部分建模图如图3所示,东区变电站电网结构与之类似;主区变电站10 kV侧母线并列运行,主区变电站电网部分建模图如图4所示。

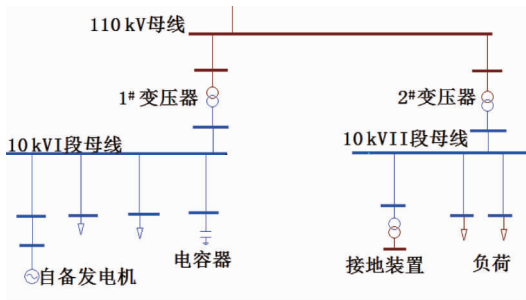


图3 南区变电站10 kV电网的部分建模

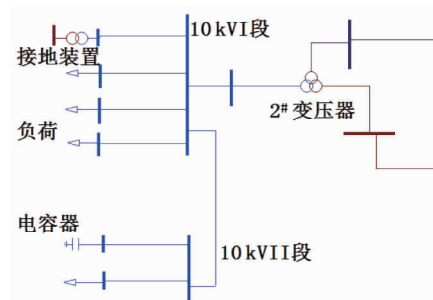


图4 主区变电站10 kV电网的部分建模

PSASP软件中没有接地变压器模型,需通过设置双绕组变压器的参数模拟中性点接地装置.模拟接地装置的变压器参数如图5和图6.图5为模拟经小电阻接地装置的变压器参数,变压器I侧接变电站10 kV母线并经30 Ω小电阻接地.图6为模拟经消弧线圈接地装置的变压器参数,变压器I侧接变电站10 kV母线并经一定阻值的消弧线圈接地.假设消弧线圈过补偿度为10%,则各变电站消弧线圈阻值如表3所示。

表4和表5为正常运行时,电网分别在经消弧线圈接地与经小电阻接地方式下发生单相接地故障后流经接地装置的电流。

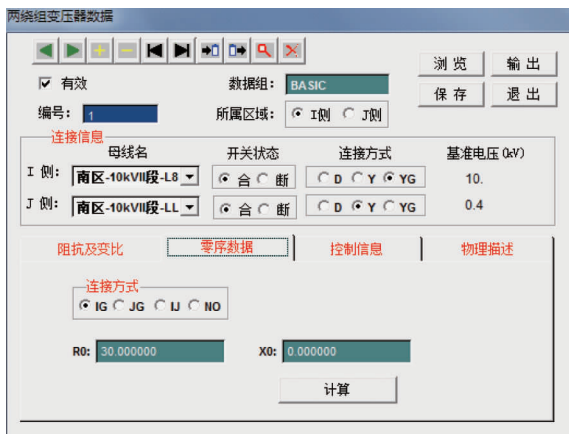


图5 中性点经小电阻接地装置的变压器参数

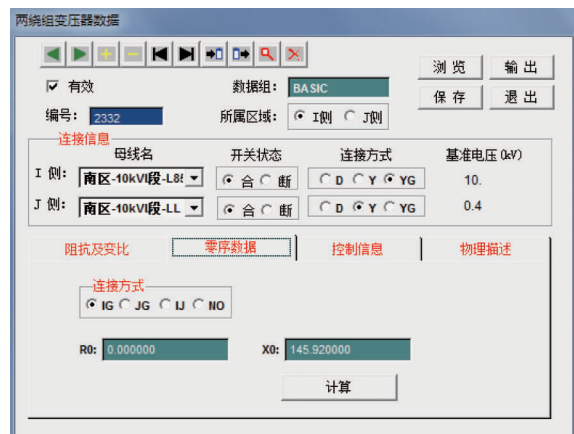


图6 中性点经消弧线圈接地装置的变压器参数

表3 各变电站消弧线圈阻值

变电站名称	母线名称	消弧线圈阻值/ $\Omega$
东区	10 kV I 段	213.22
	10 kV II 段	194.25
主区	10 kV	99.90
南区	10 kV I 段	145.92
	10 kV II 段	882.61

表4 流经接地装置的电流(经消弧线圈)

变电站名称	母线名称	最大电流/kA	最小电流/kA
南区	I 段	0.037	0.036
	II 段	0.036	0.036
主区	10 kV	0.023	0.023
东区	I 段	0.010	0.010
	II 段	0.010	0.010

注:变电站在自备发电机组正常运行、全开机运行、全关机运行方式下故障电流相差较小,仅为几安培,故不在表格中区分

表5 流经接地装置的电流(经小电阻)

变电站名称	母线名称	最大电流/kA	最小电流/kA
南区	I 段	0.200	0.150
	II 段	0.200	0.180
主区	10 kV	0.200	0.170
东区	I 段	0.210	0.160
	II 段	0.210	0.170

注:变电站在自备发电机组正常运行、全开机运行、全关机运行方式下故障电流相差较小,故不在表格中区分

由表 5 和表 6 可知,变电站 10 kV 侧电网在中性点经消弧线圈接地方式下发生单相接地故障时流经接地装置的电流远小于 100 A,不利于接地选线;电网在中性点经小电阻接地方式下发生单相接地故障时流经接地装置的电流较大,最大为 200 A,最小为 150 A,大于 2 倍电容电流,并在 100~1 000 A 的范围内,满足接地选线及降低电网过电压水平的要求,且不会对通信造成影响、不会威胁人身安全。

### 3.2 母线并列运行方式

根据炼钢公司的生产需要,会将东区、南区变电站的 10 kV 母线切换为并列运行。系统发生单相接地故障后,接地电容电流为两段母线电容电流之和,即东区变电站、南区变电站的接地电容电流分别为 98.69, 72.60 A。当 10 kV 两段母线并列运行时,南区变电站与东区变电站各投入一套中性点接地装置。南区变电站电网部分建模图如图 7 所示,东区变电站电网结构与之类似。为确定小电阻接地方案的可行性,需计算东区变电站、南区变电站 10 kV 母线并列运行时的单相接地故障电流,结果如表 6 所示。

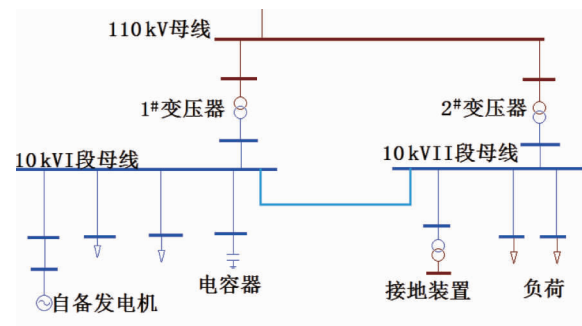


图7 南区变电站 10 kV 电网的部分建模

表6 流经接地装置的电流

变电站名称	母线名称	最大电流/kA	最小电流/kA
南区	10 kV 母线	0.212	0.190
东区	10 kV 母线	0.223	0.171

注:变电站在自备发电机组正常运行、全开机运行、全关机运行方式下故障电流相差较小,故不在表格中区分

由表 7 可知,母线并列运行方式下,电网在中性点经小电阻接地方式下发生单相接地故障时流经接地装置的电流最大为 223 A,最小为 171 A,大于 2 倍电容电流,并在 100~1 000 A 的范围内,满足接地选线及降低电网过电压水平的要求,且不会对通信造成影响、不会威胁人身安全。

## 4 普适性分析

对于工业 10 kV 电网,与中性点经消弧线圈相比,中性点经小电阻接地方式更加适用。这一结论具有普适性,从以下 2 个方面进行普适性分析。



#### 4.1 工业 10 kV 侧电网特点

电力电缆具有运行故障率较低、运行维护费用较低以及适应各种恶劣气象条件等优点,因此,工业 10 kV 侧电网普遍采用电缆线路.而由电缆线路组成的电网发生单相接地故障多为永久性故障<sup>[5]</sup>,为保证人身安全、公司财产安全以及快速恢复生产,要求工业 10 kV 侧电网的中性点接地方式具有降低故障发生时的瞬时过电压以及快速、准确进行接地选线的功能.

#### 4.2 经消弧线圈接地与经小电阻接地方式特点

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障后,故障电流较小,电弧易在电流过零时自然熄灭,且系统线电压保持对称.因此,对可带故障运行的电网,中性点经消弧线圈接地方式可提高其运行稳定性.而工业 10 kV 电网发生单相接地故障后,不要求电网带故障运行,且为保证生产安全,要求故障可以迅速被切除.在实际应用中,中性点经消弧线圈接地系统通常使用试拉方法找寻故障点,此方法所需时间较长且会使系统产生较大的操作过电压.故中性点经消弧线圈接地方式在工业 10 kV 电网中的应用存在局限性.中性点经小电阻接地系统发生单相接地故障后,故障电流较大,可使保护装置迅速找到故障点并切除故障线路.同时,中性点经小电阻接地方式可降低系统发生单相接地故障时的瞬时过电压,保证工业 10 kV 电网中线路及设备的安全.

综上所述,针对工业 10 kV 电网这类电网系统,中性点经小电阻接地方式比经消弧线圈接地方式更具优越性.

### 5 结论

1) 对于由电缆组成的 10 kV 电网,中性点采用经小电阻接地方式与经消弧线圈接地方式相比,具有良好的接地选线及降低电网过电压水平功能,不会对通信造成影响、不会威胁人身安全,故中性点经小电阻接地方式对工业 10 kV 电网的安全稳定运行更具优越性.中性点经小电阻接地方法对生产持续性要求高的电缆电网运行具有较好的指导意义.

2) 使用 PSASP 仿真,忽略了线路三相参数的不平衡性,并认为电源为理想电源,故结果不可避免地存在一定的误差.线路三相参数的不平衡性对 10 kV 电网中性点采用经小电阻接地方式影响需要进一步的研究.

#### 参考文献:

- [1] 齐郑,庄舒仪,刘自发,等.基于并联电阻扰动信号的配电网故障定位方法分析[J].电力系统自动化,2018(9):1000-1026.
- [2] 张利,李萍,张芳.中性点不接地系统单相接地故障定位研究[J].北京信息科技大学学报(自然科学版),2017,32(4):45-48.
- [3] 杨帆,李广,沈煜,等.中压配电网单相接地故障熄弧后的电气特征分析[J].电力系统自动化,2019,43(10):205-214.
- [4] 乔占俊.35kV 城网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式下弧光接地过电压研究[J].华北科技学院学报,2014,11(5):47-52.
- [5] 刘渝根,王建南,米宏伟,等.10 kV 配电网中性点接地方式的优化研究[J].高压技术,2015,41(10):3355-3362.
- [6] 薛永端,李娟,陈筱霁,等.谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J].中国电机工程学报,2017,37(17):5037-5048.
- [7] 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.
- [8] 高亚栋,杜斌,赵峰,等.中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究[J].高压电器,2004(5):345-348.
- [9] Shen M, Ingratta L, Roberts G. Grounding transformer application, modeling, and simulation[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE, 2008: 20-24.
- [10] Nelson J P. High-resistance grounding of low-voltage systems: a standard for the petroleum and chemical industry[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(11): 941-948.
- [11] 付晓奇,徐粮珍,赵宝丽.10 kV 配网中性点小电阻接地技术与应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(23):227-230.
- [12] 朱晓露,曹飞翔.接地变压器容量的计算与选择[J].变压器,2012,49(8):28-30.