

直流发生器输出电流自适应调节方法

张慧芬,张恩平

(济南大学 自动化与电气工程学院,山东 济南 250022)

摘要: 为了使得基于直流注入原理的小电流接地故障选线定位保护的注入直流电流不影响供电系统运行,提出根据中性点对地电压的变化自适应调节限流电阻的阻值,将直流发生器注入故障系统的直流电流限制在规定范围内。白炽灯的灯丝电阻具有正特性,其阻值随着端电压的升高而增大,因此将一定数量的白炽灯和固定阻值电阻串联作为自适应可调限流电阻以调节注入直流电流。对自适应可调电阻的工作原理进行了分析,给出了白炽灯型号和数量的选择原则。现场实验结果证明了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 小电流接地系统; 直流注入; 直流发生器; 限流电阻; 自适应调节; 故障定位

中图分类号: TM 774; TM 13

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.024

0 引言

小电流接地故障选线定位问题是一直没有得到彻底解决的技术难题。在已提出的多种选线定位原理^[1-11]中,外加诊断信号法^[11]是目前现场应用较为理想的一类选线定位方法。文献^[12-13]提出的直流注入式选线定位原理,从小电流接地系统的中性点处注入较大的半波直流电流,以半波直流电流的幅值作为选线定位判据,由于注入的半波直流电流较大而有很高的抗过渡电阻能力,可从本质上解决小电流接地系统高过渡电阻故障时选线定位准确率低的问题,现场运行证明了其有效性。

基于直流注入原理的小电流接地故障选线定位保护由直流发生器、选线主机、选线探测器、定位探测器和主站构成。直流发生器由整流元件和限流电阻串联构成,接在小电流接地系统的中性点和大地之间。发生单相接地故障时,直流发生器短时向故障系统注入半波直流电流(判据信号)。中性点对地电压因故障过渡电阻不同而变化,即加在直流发生器上的电压随过渡电阻的变化而变化。为使注入的直流电流不影响供电系统的运行,应将注入的直流电流限制在一定范围内,因此,必须随中性点电压的变化实时调节限流电阻的阻值。

调节限流电阻阻值的方法主要有 2 类。

a. 传统方法。若干个固定阻值的高压电阻串联构成限流电阻,由专门的控制器控制高压电阻的投切。实时监测中性点对地电压,根据中性点对地电

压的大小确定高压电阻的投入数量,来调节限流电阻的阻值。该类方法不能连续调节直流发生器的输出电流,且所需的控制器结构复杂,成本较高。

b. 自适应调节方法。根据直流发生器输出电流幅值的要求和中性点对地电压的变化规律,自适应调节限流电阻的阻值。该方法不需测量中性点对地电压,也不需要专门的控制器。文献^[14]提出了一种基于正温度系数 PTC(Positive Temperature Coefficient)的正特性自适应调整限流电阻的实现方法,以 PTC 元件并联常值电阻组成正特性自调整电阻网络元,若干网络元串联构成正特性自适应可调限流电阻,实现了随中性点对地电压的变化自适应调节直流发生器输出电流的功能。但 PTC 元件多用于低压控制系统中,如文献^[15]、^[16]、^[17]均利用 PTC 元件的电阻具有正特性,分别实现了蓄电池组恒流放电、限制整流滤波器的启动冲击电流和自适应精确控温。将 PTC 元件应用于高压电力系统中需要考虑耐压问题,文献^[14]中用到的 PTC 元件需要定制,使限流电阻的实施受到一定的限制。文献^[18]提及 35 kV 及以下电压等级的电压互感器,国内许多单位采用在开口三角接线绕组处长期接入普通照明用白炽灯泡,利用其钨丝冷热态电阻变化大的特点来阻尼铁磁谐振。目前尚未见到其他有关高压供电系统中自适应连续可调限流电阻实现方法的报道。为此,本文提出一种电流连续可调的自适应可调限流电阻的实现方法,该方法易于实现和应用于电力系统中,其已获得专利授权^[19],并成功应用于配电网中。

1 问题的提出

直流注入选线定位原理如图 1 所示^[12-13]。直流发生器由高压硅堆 V_D 、限流电阻 R_d 和投切开关 K_d 构成,接于接地变一次侧中性点,配电网中性点电压

收稿日期:2014-01-14;修回日期:2014-10-11

专利:中华人民共和国实用新型专利(ZL2009200227467)

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2012EEL19);临沂市科技发展计划资助项目(201312018)

Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2012EEL19) and the Science and Technology Development Program of Linyi City(201312018)

即为其工作电压。配电网正常运行时,开关 K_d 断开,不投入直流发生器。发生单相接地故障时,闭合开关 K_d ,投入直流发生器,半波直流电流注入到故障配电系统;选线定位结束后,断开开关 K_d ,将直流发生器切除。发生接地故障时,中性点对地电压不为 0,直流发生器投入后,产生半波直流电流,其流通情况如图 1 中虚线所示,对半波直流电流寻踪即可实现故障选线和定位。

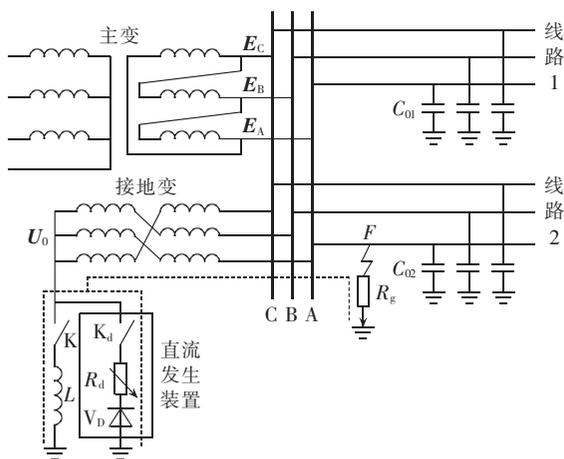


图 1 直流注入式选线定位原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of faulty line selection and fault location based on DC injection

发生小电流接地故障(以 A 相接地为例)时,中性点对地电压 U_0 随过渡电阻的增大按半圆轨迹减小,如图 2 所示^[10]。图 2 中, E_A 为故障相电势; I_{A0} 为故障零序电流; X_{C0} 为系统每相对地总分布电容电抗; R_g 为接地过渡电阻; φ 为接地阻抗角; X'_L 为消弧线圈补偿后系统每相对地等效电抗。金属性接地时 U_0 的幅值达最大,其值为系统相电压,直流发生器的工作电压也具有同样的变化规律。对基于直流注入原理的选线定位保护,一方面,应避免注入的直流电流对配电网造成不利影响,发生低过渡电阻故障时,中性点对地电压较高,需增大直流发生器限流电阻的阻值,以限制注入直流电流的大小;另一方面,

高过渡电阻故障时,中性点对地电压较低,应减小限流电阻阻值,以增强注入的直流电流,来保证该故障情形下直流电流的可靠检测,从而保证高过渡电阻故障时选线定位的准确性。可见,直流发生器的限流电阻 R_d 应按正特性调节阻值。

因此,欲使直流发生器的输出电流随中性点对地电压的变化自适应调节,需采用正特性自适应可调限流电阻,从而使注入的直流电流自适应地限制在规定的范围内。

2 自适应可调限流电阻的设计

2.1 白炽灯灯丝的电阻特性

在温度不变时,导体的电阻 R 与其长度 l 成正比,与其截面积 S 成反比。这是电阻定律,可表示为:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

其中, ρ 为导体的电阻率,它不仅与导体的材料有关,还和导体的温度有关。有些材料的电阻率随温度的升高而增大(如金属),有些材料的电阻率随温度的升高而减小(如半导体和绝缘体),有些材料的电阻率几乎不受温度的影响(如锰铜和康铜)。在温度变化不大的范围内,几乎所有金属的电阻率随温度作线性变化,即:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (2)$$

其中, ρ_t, ρ_0 分别为温度 $t^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}$ 下的电阻率; α 为电阻率温度系数($^\circ\text{C}^{-1}$)。

白炽灯灯丝由钨丝制成,其电阻率随温度的升高而增大。对一成品白炽灯,灯丝的长度和截面积一定,根据电阻定律,由式(1)和(2)知,灯丝的电阻随灯丝温度的升高而增大。白炽灯在不同电压下工作时,灯丝的温度不同,灯丝的电阻也就不同。用如图 3 所示电路测得 220 V/500 W 普通照明白炽灯的电阻与电压关系如图 4 所示。图 4 中, R 为灯丝电阻;

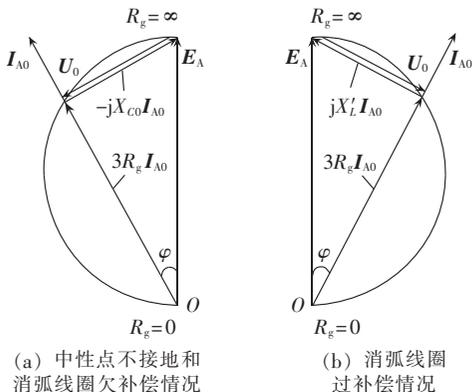


图 2 中性点对地电压变化轨迹

Fig.2 Trajectory of neutral-point voltage

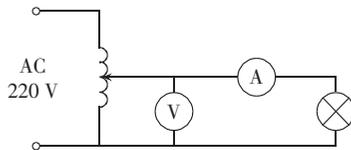


图 3 实验电路

Fig.3 Experimental circuit

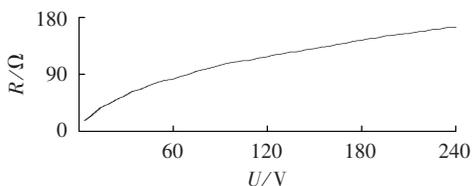


图 4 220 V/500 W 白炽灯电阻与电压关系特性

Fig.4 Curve of filament resistance vs. voltage of 220 V/500 W incandescent lamp

U 为白炽灯两端的电压。

由图 4 可见,白炽灯灯丝的电阻随着灯泡两端电压的变化呈非线性关系,且具有正特性。在电压较低(55 V 以下)时,随着电压的升高,阻值增大较快,这与文献[20-22]所述 220 V/100 W 白炽灯灯丝的电阻特性一致。可见,白炽灯灯丝电阻所具有的这种正特性变化特征符合本文所述直流发生器对其限流电阻的要求。

2.2 自适应可调限流电阻

根据 2.1 节所述白炽灯电阻具有的正特性和直流发生器限流电阻应按正特性变化的技术要求,将一定数量的白炽灯和固定阻值的高压电阻串联构成正特性自适应可调限流电阻,如图 5 所示。自适应可调限流电阻 R_d 阻值为:

$$R_d = R_0 + \sum_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

其中, R_0 为高压电阻的阻值; R_i 为第 i 只白炽灯的电阻值; n 为白炽灯的数量。

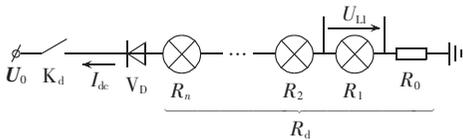


图 5 自适应可调限流电阻的构成

Fig.5 Composition of adaptive current-limiting resistor

由图 2 所示中性点对地电压幅值 U_0 的变化规律,有 $U_0 \in [0, U_p]$, 其中 U_p 为供电系统相电压。金属性接地故障($R_g=0$)时, $U_0=U_p$, 加在白炽灯上的电压最大, 此时白炽灯的灯丝呈现较大的电阻, 限流电阻 R_d 亦较大; 随着 R_g 的增加, U_0 减小, 加在白炽灯上的电压也减小, 灯丝的电阻也减小, 限流电阻 R_d 亦减小; 过渡电阻 $R_g=\infty$ 时, $U_0=0$, 加在串联白炽灯上的电压也为 0, 灯丝的电阻为较小的冷态电阻。可见, 图 5 所示的限流电阻能够随着中性点电压的升高而增大, 随着中性点电压的降低而减小, 具有正特性变化的特征, 该限流电阻能够随单相接地故障情形自动调节阻值大小。

2.3 限流电阻各组成元件的选择

限流电阻中固定阻值的高压电阻用于测量直流发生器的输出电流, 可选择 1 或 2 只满足安装处电压和电流要求的高压电阻, 其阻值按满足直流电流检测要求选择。

图 5 中, 白炽灯是构成直流发生器限流电阻的主要元件, 我国普通照明白炽灯额定电压为 AC 220 V, 不同功率的白炽灯, 其额定电流不同。白炽灯的额定电压用 U_{LN} 表示, 额定功率用 P_{LN} 表示, 则其额定电流为:

$$I_{LN} = \frac{P_{LN}}{U_{LN}} \quad (4)$$

对于本文所述直流发生器的应用场合, 限流电阻应用于配电网的一次系统中, 构成限流电阻的白炽灯为普通照明白炽灯, 为保证直流发生器的工作可靠性, 图 5 中白炽灯型号的选择及其数量的确定应按如下原则进行。

a. 每只白炽灯应在不超过其额定条件下工作, 保证其可靠性。

$$\begin{cases} U_{Li} < U_{LNi} \\ I_{Li} < I_{LNi} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中, U_{Li} 、 I_{Li} 分别为第 i 只白炽灯两端的电压和流过白炽灯的电流; U_{LNi} 、 I_{LNi} 分别为第 i 只白炽灯的额定电压和额定电流。若选用同一型号的白炽灯, 则式(5)变为:

$$\begin{cases} U_{Li} < U_{LN} \\ I_{Li} < I_{LN} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

b. 在满足白炽灯可靠工作的前提下, 限流电阻中白炽灯的数量 n 应为:

$$n \geq \frac{0.707U_p}{U_{Li}} \quad (7)$$

其中, $0.707U_p$ 为加在直流发生器上最高电压的有效值。

c. 若注入的半波直流电流上限为 I_{dcz} , 则白炽灯的额定电流应满足:

$$I_{LN} > I_{dcz} \quad (8)$$

同时满足上述 3 个条件, 可以确定每只白炽灯的功率和限流电阻中所需白炽灯的数量。

如现有白炽灯的额定电流不能满足式(8)的要求, 可以采用灯泡并联的方式构成限流电阻, 但同样的电阻调节效果, 需用的灯泡数量成倍增加, 会使装置的体积增大。根据文献[13]的分析, 在注入故障系统的半波直流电流的大小满足半波直流电流检测精度的前提下, 应尽量减小注入直流电流的量值, I_{dcz} 一般不超过 2 A, 220 V/500 W 灯泡能满足要求。另外, 本文中的白炽灯用作限流电阻, 不使用其发光功能。为使灯泡的使用寿命尽量长, 可适当增加限流电阻中白炽灯的数量, 使灯泡在较低于其额定电压的环境下工作。

3 限流电阻在配电网中的现场实验

利用某采油厂 6 kV 中性点不接地系统进行现场实验。系统接线图如图 6 所示, 系统参数为: 8 条架空出线采用 LGJ-70 型导线, 水平排列, 线间距离 45 cm; 无架空地线。

II 段母线加装接地变, 直流发生器接在接地变一次侧中性点处, 并分别采用传统的限流电阻和自

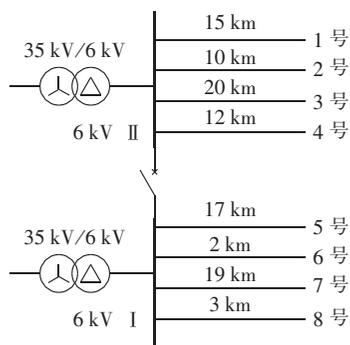


图6 6 kV中性点不接地系统图

Fig.6 Diagram of 6 kV isolated neutral system

适应限流电阻。自适应限流电阻由2只100 Ω/1000 W的高压电阻和10只220 V/100 W的普通白炽灯串联而成;传统的限流电阻由6只高压电阻串联而成。

在3号出线距离变电站5 km处设置人工接地点。对上述2种限流电阻分别进行了金属性接地($R_g=0$)和高阻接地($R_g=2400\ \Omega$)现场实验。用UT203钳形电流表直流档测得直流发生器输出直流电流如表1所示。

表1 现场实验数据

Table 1 Data of field experiment

过渡电阻 R_g/Ω	直流发生器输出直流电流/mA	
	采用传统限流电阻	采用自适应限流电阻
0	280	300
2400	83	90

由实验数据可以看出,采用传统限流电阻和自适应可调限流电阻均能限制直流发生器的输出电流,而白炽灯达到了自适应调节限流电阻阻值的目的,克服了传统限流电阻结构复杂、需专门的控制电路调节阻值,且电流不能连续可调的缺点。

4 结论

为方便调节直流注入式小电流接地故障选线定位保护中直流发生器的输出电流,本文提出一种随着中性点对地电压的变化自适应调节限流电阻阻值的方法。对自适应可调限流电阻的实现方法进行了理论分析和实验验证,得出如下结论。

a. 利用白炽灯灯丝电阻具有非线性、正特性的特点,由一定数量的普通照明白炽灯和固定阻值的高压电阻串联构成自适应可调限流电阻。该限流电阻具有正特性且可自动调节阻值,它随着中性点对地电压的升高而增大,随着中性点对地电压的降低而减小。

b. 根据直流发生器输出电流范围的要求和自适应可调限流电阻应用于配电网一次系统的情况,分析确定了白炽灯型号和数量的确定原则。

c. 现场实验验证了该自适应可调限流电阻的有效性,并将其成功应用于直流注入式小电流接地故

障选线定位保护中。该选线定位保护已在6 kV和10 kV小电流接地系统运行超过3 a。

参考文献:

- [1] 郭清滔,吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(2):146-152.
GUO Qingtao,WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system [J]. Power System Protection and Control,2010,38(2):146-152.
- [2] 唐金锐,尹项根,张哲,等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):7-13.
TANG Jinrui,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Survey of fault location technology for distribution networks [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):7-13.
- [3] WELFONDER T,LEITLOFF V. Location strategies and evaluation of detection algorithms for earth faults in compensated MV distribution systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2000,15(4):1121-1128.
- [4] 薛永端. 基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究 [D]. 西安:西安交通大学,2003.
XUE Yongduan. Study of single-phase earth fault detection based on transient characteristics in distribution network [D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2003.
- [5] 束洪春,朱梦梦,黄文珍,等. 基于暂态零序电流时频特征量的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):1-6.
SHU Hongchun,ZHU Mengmeng,HUANG Wenzhen,et al. Faulty line selection based on time-frequency characteristics of transient zero-sequence current [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):1-6.
- [6] 郭谋发,郑新桃,杨耿杰,等. 利用暂态波形伸缩变换的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):33-40.
GUO Moufa,ZHENG Xintao,YANG Gengjie,et al. Faulty line detection based on transient waveform stretching transformation for resonance-grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):33-40.
- [7] 束洪春,高利,段锐敏,等. 利用零序电流全量 Hough 变换的配电网故障选线方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(9):110-116.
SHU Hongchun,GAO Li,DUAN Ruimin,et al. Fault line selection in distribution networks using total zero-sequence current [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(9):110-116.
- [8] 于盛南,鲍海,杨以涵. 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(28):86-90.
YU Shengnan,BAO Hai,YANG Yihan. Practicalization of fault location in distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(28):86-90.
- [9] 严凤,杨奇逊,齐郑,等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):37-43.
YAN Feng,YANG Qixun,QI Zheng,et al. Study on fault location scheme for distribution network based on traveling wave theory [J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):37-43.
- [10] 束洪春,董俊,段锐敏,等. 基于自然频率的辐射状配电网分层分布式 ANN 故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(5):83-89.
SHU Hongchun,DONG Jun,DUAN Ruimin,et al. Fault location method for radial distribution networks with layered and distributed ANN based on natural frequency [J]. Automation of

- Electric Power Systems,2014,38(5):83-89.
- [11] 张慧芬. 配电网单相接地故障检测技术研究[D]. 济南:山东大学,2006.
- ZHANG Huifen. Study on earth fault detection in distribution network[D]. Ji'nan;Shandong University,2006.
- [12] 胜利油田分公司临盘采油厂,济南大学. 直流注入式选线定位系统及其方法;中国,0014996.6[P]. 2011-01-12.
- [13] 高志鹏,张慧芬,孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(13):139-145.
- GAO Zhipeng,ZHANG Huifen,SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control,2013,41(13):139-145.
- [14] 山东电力集团公司德州供电公司,济南大学. 一种正特性自适应可调限流电阻;中国,0449291.4[P]. 2012-07-25.
- [15] 宋东升,闫利伟,刘冀. 基于 PTC 陶瓷电阻的大容量蓄电池组恒流放电[J]. 蓄电池,2009(3):137-139,144.
- SONG Dongsheng,YAN Liwei,LIU Ji. Constant current discharge of high capacity batteries based on PTC ceramic resistance[J]. Chinese Labat Man,2009(3):137-139,144.
- [16] 林周布. 用 PTC 电阻限制启动冲击电流的新技术[J]. 低压电器,2005(1):17-20.
- LIN Zhoubu. A new technology of inrush current limited with PTC resistor[J]. Low Voltage Apparatus,2005(1):17-20.
- [17] 程文龙,宋嘉梁,吴万范. 应用 PTC 电阻精确控温的实验研究[J]. 航天器工程,2012,21(6):131-135.
- CHENG Wenlong,SONG Jialiang,WU Wanfan. Experiment study of accurate temperature control using PTC resistance[J]. Spacecraft Engineering,2012,21(6):131-135.
- [18] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利电力出版社,1993:81-83.
- [19] 济南大学,胜利油田分公司临盘采油厂. 一种采用自适应可调电阻的直流注入式选线定位装置;中国,0022746.7[P]. 2009-12-09.
- [20] 秦爱社. 白炽灯灯丝电阻的非线性[J]. 延安教育学院学报,2001(2):71-73.
- QIN Aishe. Non-linear response of resistance of filament lamp [J]. Journal of Yanan College of Education,2001(2):71-73.
- [21] 冯喜忠. 关于白炽灯灯丝电阻的非线性研究[J]. 漯河职业技术学院学报:综合版,2005,4(1):5-7.
- FENG Xizhong. Study on non-linear response of resistance of filament lamp[J]. Journal of Luohe Vocational Technology College:Comprehensive Edition,2005,4(1):5-7.
- [22] 赵德申. 电气照明[M]. 北京:高等教育出版社,2006:26-30.

作者简介:



张慧芬

张慧芬(1970—),女,山东鱼台人,教授,博士,主要研究方向为配电网故障检测、配电网自动化(E-mail:cse_zhf@ujn.edu.cn);
张恩平(1958—),女,江苏高邮人,副教授,主要研究方向为检测与仪表。

Adaptive output current adjustment of direct current generator

ZHANG Huifen,ZHANG Enping

(School of Electrical Engineering,University of Jinan, Ji'nan 250022,China)

Abstract: Since the injecting DC of the protection for faulty line selection and fault location may influence the proper operation of distribution system,it is proposed to keep the output current of its DC generator within a prescriptive range by adjusting its current-limiting resistance adaptively according to the voltage of neutral point. As the filament resistance of incandescent lamp has positive characteristics that its resistance increases along with the increase of the terminal voltage,a certain number of incandescent lamps and a fixed resistor,in series connection,can be used as the adaptive current-limiting resistor for adjusting the injecting DC. The operating principle of current-limiting resistor is analyzed and the selection principles of incandescent lamp type and number are given. The effectiveness and practicality of the proposed method are verified by the field experimental results.

Key words: small current grounding system; direct current injection; DC generator; current-limiting resistor; adaptive adjustment; electric fault location