

中性点不接地系统单相漏电故障特征及选线判据

郝 强, 王耀辉, 刘霁强, 车新兴

(华能煤炭技术研究有限公司, 北京 100070)

摘要: 从研究中性点不接地系统单相漏电故障机理分析入手, 采用戴维南定理进行稳态分析, 得到了发生故障时故障线路与非故障线路零序电压和零序电流之间的关系。基于零序功率方向原理计算出发生故障时的各支路之间的关系, 最终得到选线判据。为了对理论分析结果的正确性进行验证, 最后进行了极端情况下的分析, 验证了等效电路和理论分析的正确性, 并且验证了故障选线判据的选线准确性和普适性。
关键词: 故障选线; 中性点不接地; 漏电保护; 单相漏电

Characteristics and line selection criteria of single-phase leakage fault in neutral ungrounded system

HAO Qiang, WANG Yaohui, LIU Jiqiang, CHE Xinxing

(Huaneng Coal Technology Research Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: It starts with the analysis of single-phase leakage fault of neutral ungrounded system, and uses the Venin theorem for steady-state analysis, and obtains the relationship between zero sequence voltage and zero sequence current of fault line and non-fault line when fault occurs. Based on the principle of zero sequence power direction, the relationship between the branches when the fault occurs is calculated and the line selection criterion is finally obtained. In order to verify the correctness of the theoretical analysis results, the analysis in extreme cases was carried out in the end to verify the correctness of the equivalent circuit and the theoretical analysis, as well as the accuracy and universality of the fault line selection criteria.

Key words: fault line selection; neutral point is not grounded; leakage protection; single-phase leakage

0 引言

我国3~10 kV供电系统一般采用中性点不接地方式。理论分析与实践均表明, 这种方式下发生单相接地故障时的接地电流远远小于变压器中性点直接接地系统发生单相接地故障时的短路电流。经典的继电保护技术大多采用电气故障的稳态基波分量作为判据, 其原因有三: 一是囿于电路分析的能力; 二是对稳态基波分量比较容易提

取; 三是稳态分量持续时间长, 可以多次与整定值进行比较, 动作可靠性高。因此, 应首先考虑采用稳态分量作为故障选线判据。

对于变压器中性点不接地系统, 基于零序功率方向原理的故障选线方法是有效、可靠的方法。零序功率方向原理: 对于变压器中性点不接地系统, 当发生单相接地故障时, 全系统都会出现零序电压; 非故障线路的零序电流数值等于本

受华能集团科技项目“HNKJ21-H56-08 技术研究”资助

身对地分布电容和绝缘电阻的电流，其方向由母线流向线路，或者说其相位超前零序电压将近 90° ；故障线路的零序电流数值等于除了自身对地分布电容和绝缘电阻的电流外，其他所有非故障线路的零序电流之和，其方向由线路流向母线，或者说其相位滞后零序电压将近 90° 。由于该判据包括零序电压、零序电流和相位，故称为零序功率（电压与电流的乘积）方向原理。

另一方面，对于变压器中性点不接地系统，发生单相接地故障时，系统的线电压依然是对称的，三相负载设备没有受到影响，因此依然可以照常运行，这是该接地方式的重大优点。按照《电气运行规程》规定，中性点不接地系统发生单相接地故障时，允许暂时带故障运行1~2 h，为故障选线和更换线路留出充分的时间。但是，对于危险场所，例如煤矿高压供电系统，一旦发生单相接地故障，必须立即跳闸，以确保防爆安全。

随着电缆长度的不断增加，分布电容越来越大，变压器中性点不接地系统的单相接地故障电流随之增大，在接地故障点容易发生电弧；又因为高压电网的对地绝缘电阻一般较高，零序电流的充放电过程断断续续，出现电弧周期性熄灭与重燃，以致引起间接性弧光接地过电压，严重威胁系统的绝缘，甚至造成短路故障。为了消除接地故障电弧，应尽量减小接地电流。为此，《煤矿安全规程》第453条规定：“矿井6 000 V及以上高压电网，必须采取措施限制单相接地电容电流的数值，生产矿井不超过20 A，新建矿井不超过10 A”。

类似地，石化企业（如炼油厂）10 kV高压供电系统同样需要限制单相接地故障电流的数值。

为了消除电容电流形成的接地故障电流，可在变压器中性点或者通过接地变压器形成的人为中性点与大地之间接入电感线圈。由于电感电流与电容电流方向相反，相互抵消，故接地点的电流会减小，发生弧光接地过电压的几率大幅度降低。因此，该线圈被称为消弧线圈。变压器中性点不接地方式与经消弧线圈接地方式以及经高阻

接地方式统称为中性点非有效接地方式。

一般来说，采用消弧线圈接地方式的供电系统难以采用稳态分量进行单相接地故障选线的判别，而必须采用暂态分量进行判断；中性点不接地系统的单相接地故障选线虽然符合零序功率方向原理，但是对于高阻值漏电故障，其零序电流、零序电压以及相位差的动作整定值的选取依然十分困难。本文从中性点不接地系统发生单相漏电故障的机理分析出发，提出漏电保护的整定方法，为电力系统可靠运行提供一定的理论依据。

1 中性点不接地系统单相接地故障机理

中性点不接地系统发生单相接地故障时的电气原理如图1所示。这是一个三相不对称电路，可以采用节点电压法求解，也可以采用戴维南等效电路求解。为了便于接续单相接地故障的暂态研究，本文采用戴维南等效电路进行稳态电路分析。

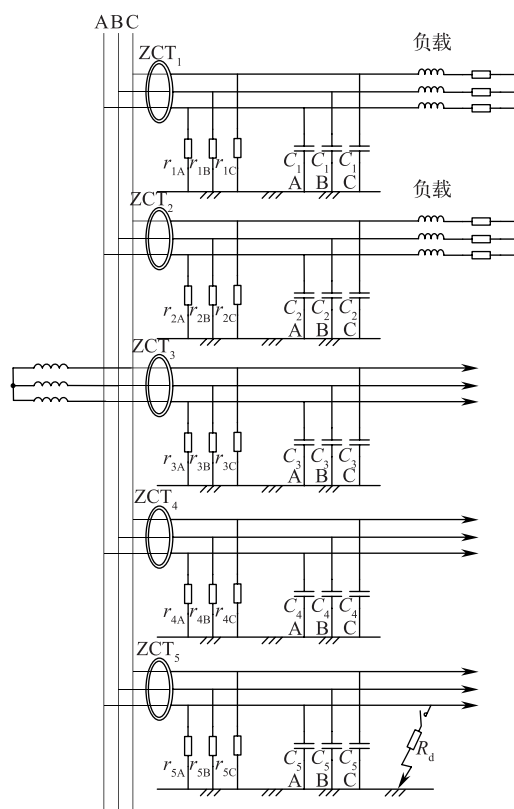


图1 不接地系统单相漏电故障电气原理

Fig. 1 Electrical principle of single-phase leakage fault in ungrounded system

图2是图1的等效电路。从发生接地故障的电阻两端向里看，其开路电压为故障瞬时该相的对地电压。假设发生故障时三相电路对称，即 $U_a + U_b + U_c = 0$ ，变压器中性点与大地等电位，则A相对地电压即为A相的相电压；将所有电源短路，所形成的阻抗即为等效电源的内阻抗。

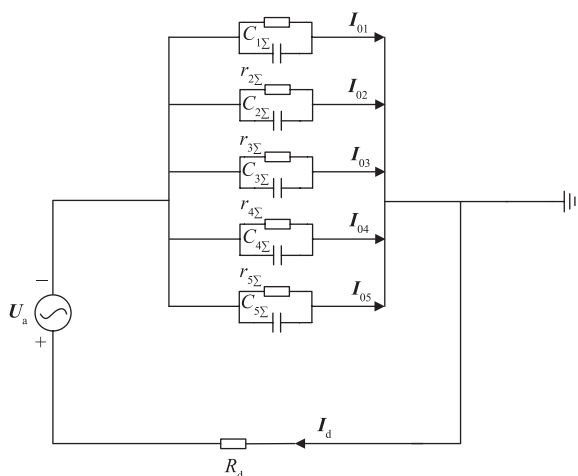


图2 中性点不接地系统单相接地故障等效电路1

Fig. 2 Equivalent circuit of single-phase grounding fault in neutral ungrounded system 1

为了求取接地故障电流，将图2进一步等效为如图3所示。

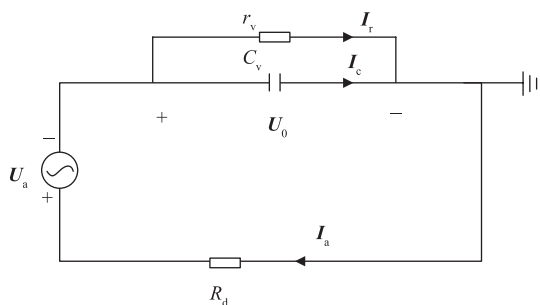


图3 中性点不接地系统单相接地故障等效电路2

Fig. 3 Equivalent circuit of single-phase grounding fault in neutral ungrounded system 2

设 $U_a = U_a \angle \Psi$ ，由图3可以直接求得

$$U_0 = \frac{-U_a Z_0}{Z_0 + R_d} = \frac{-U_a}{1 + Y_0 R_d} \quad (1)$$

零序电压的有效值为

$$U_0 = \frac{U_a}{|1 + Y_0 R_d|} \quad (2)$$

其相位为

$$\varphi_0 = \pi + \Psi - \tan^{-1} \frac{\omega C}{1 + g R_d} \quad (3)$$

式中， Z_0 为零序阻抗， $Z_0 = \frac{1}{Y_0} = \frac{1}{j\omega C + g}$ ，单位为 Ω ； Y_0 为零序导纳， $Y_0 = j\omega C + g$ 。

流过接地故障电阻上的电流为

$$I_d = \frac{-U_a}{Z_0 + R_d} = \frac{-U_a}{1/Y_0 + R_d} \quad (4)$$

其有效值为

$$I_d = \frac{U_a}{|1/Y_0 + R_d|} \quad (5)$$

相位角为

$$\varphi_d = \Psi - \tan^{-1} \frac{-\omega C}{g + g^2 R_d + R_d (\omega C)^2} \quad (6)$$

流过非故障线路1的电流为

$$I_{01} = (j\omega C_1 + g_1)U_0 \quad (7)$$

其模为

$$I_{01} = U_0 \sqrt{\omega^2 C_1^2 + g_1^2} \quad (8)$$

超前零序电压的相位差为

$$\varphi_{01} = \tan^{-1} \left(\frac{\omega C_1}{g_1} \right) = \tan^{-1} (\omega C_1 r_1) \quad (9)$$

由图1和图2可以看出，本线路分布电容电流自母线流向大地，而接地故障电流自故障点通过零序电流互感器ZCT5一次侧流向母线；因此，ZCT5收集的电流，即故障线路零序电流表达式为

$$\begin{aligned} I_{gz} &= I_{05} - I_d = (j\omega C_5 + g_5)U_0 - \frac{-U_a}{1/Y_0 + R_d} \\ &= (j\omega C_5 + g_5) \frac{-U_a}{1 + Y_0 R_d} + \frac{U_a}{1/Y_0 + R_d} \\ &= \frac{-U_a [(j\omega C_5 + g_5) - \omega C - g]}{1 + Y_0 R_d} = \frac{(j\omega C_\Delta + g_\Delta)U_a}{1 + Y_0 R_d} \\ &= \frac{(j\omega C_\Delta + g_\Delta)U_a}{1 + g R_d + j\omega C R_d} \end{aligned} \quad (10)$$

式中， $C_\Delta = C - C_5$ ； $g_\Delta = g - g_5$ 。

为了与非故障线路零序电流和零序电压对比，式(10)整理为

$$I_{gz} = I_{05} - I_d = (j\omega C_5 + g_5)U_0 - (j\omega C + g)U_0 = -(j\omega C_\Delta + g_\Delta)U_0 \quad (11)$$

其模为

$$I_{gz} = U_0 \sqrt{\omega^2 C_\Delta^2 + g_\Delta^2} \quad (12)$$

与零序电压的相位差为

$$\varphi_{0gz} = -\tan^{-1} \frac{(\omega C_{\Delta})}{g_{\Delta}} = -\tan^{-1} (\omega C_{\Delta} R_{\Delta}) \quad (13)$$

比较式(8)和式(12)可以看出,在同样的零序电压作用下,忽略对地电导,非故障线路1的零序电流的大小与本线路总分布电容成正比;故障线路5的零序电流与不包括自身分布电容的剩余分布电容的总和成正比;对比式(9)和式(13)可以看出,非故障线路1零序电流超前零序电压 φ_{01} ,故障线路5的零序电流滞后零序电压 φ_{0gz} 。

2 故障线路与非故障线路零序电流之间的关系

以某煤矿实际供电系统的参数(每条线路每相对地绝缘电阻为1 M Ω)为例,设线路5发生单相接地故障,计算出各电气量见表1。

表1 零序电压与每条线路的零序电流

Tab. 1 Zero sequence voltage and zero sequence current of each line

线路编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
分布电容/ μF	24	1.5	1.5	1.5	1.5
相电压/V	5 773	5 773	5 773	5 773	5 773
相电压初始角($^{\circ}$)	0	0	0	0	0
零序电压 U_0/V	5 747	5 747	5 747	5 747	5 747
零序电压相位($^{\circ}$)	180.25	180.25	180.25	180.25	180.25
零序电流 I_0/A	43.331 5	2.708 3	2.708 3	2.708 3	51.456 1
相位差($^{\circ}$)	89.977 2	89.635 2	89.635 2	89.635 2	-89.923 2
接地电流/A	54.164 4	54.164 4	54.164 4	54.164 4	54.164 4

由表1可以看出,任意一条线路发生单相接地故障时,变压器中性点发生偏移,稳态有效值介于0和相电压有效值之间,相位与相电压相位相差将近180 $^{\circ}$,也就是说,零序电压与相电压方向基本相反;所有非故障线路的零序电流有效值均与零序电压有效值成正比,但各条非故障线路的零序电流有效值还与各自线路对地分布电容的总等效电容成正比;所有非故障线路的零序电

流与零序电压的相位差基本接近90 $^{\circ}$,零序电流超前零序电压;故障线路的零序电流有效值等于所有非故障线路的零序电流有效值的总和;故障线路的零序电流与零序电压的相位差也基本接近90 $^{\circ}$,但零序电流滞后零序电压。

接地故障电流高达54.16 A。另一方面,如果忽略对地绝缘电阻,即认为线路每相对地绝缘电阻为无穷大,则总接地电流的有效值为:

$$I_d = \omega C U_0 \approx \omega C U_a = 314.159 \times 30 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3 \div 1.732 = 54.41 \text{ A}, \text{ 可见误差很小。}$$

3 零序电压、零序电流与接地电阻之间的关系

由式(8)、式(12)和式(13)可以看出零序电压、零序电流与接地电阻的定性关系,以下仍以上述表1的参数为例,分别计算不同接地电阻时的各电气量,结果见表2。

表2 零序电压、零序电流与接地电阻的关系

Tab. 2 Relationship between zero sequence voltage, zero sequence current, and grounding resistance

接地电阻/ Ω	1	10	100	500	1 000	10 000	20 000
零序电压 U_0/V	5 773	5 747	4 198	1 198	609	61.25	30.63
零序电压相位($^{\circ}$)	180.5	180.5	180.5	180.5	180.5	180.5	180.41
I_{01}/A	43.53	43.33	31.65	9.03	4.59	0.46	0.231
$\theta_{01}/(^{\circ})$	89.98	89.98	89.98	89.98	89.98	89.98	89.98
I_{02}/A	2.72	2.71	1.98	0.56	0.29	0.029	0.014 4
$\theta_{02}/(^{\circ})$	89.64	89.64	89.64	89.64	89.64	89.64	89.64
I_{0gz}/A	51.69	51.46	37.59	10.73	5.45	0.55	0.274 2
$\theta_{0gz}/(^{\circ})$	-89.92	-89.92	-89.92	-89.92	-89.92	-89.92	-89.92
接地电流/A	54.41	54.16	39.57	11.29	5.74	0.577	0.288 7
$\theta_{0gz}/(^{\circ})$	89.91	89.91	89.91	89.91	89.91	89.90	89.86

由表2可以看出,接地故障电流有效值随着接地故障电阻的增大而减小,但不是线性关系,接地电阻从1 Ω 增大到10 Ω ,接地电流仅仅减小了0.28 A,相当于99.54%;接地电阻从10 Ω 增大到100 Ω ,接地电流从54.16 A减小到了39.57 A,

相当于73.1%；接地电阻从100 Ω 增大到1 000 Ω ，接地电流从39.57 A减小到了5.74 A，相当于14.5%；接地电阻从1 000 Ω 增大到10 000 Ω ，接地电流从5.74 A减小到了0.577 A，相当于10%。由此可见，当接地电阻较小时，接地故障电流主要取决于零序阻抗 Z_0 ；当接地电阻较大时，接地故障电流主要取决于漏电电阻 R_d 。零序电压、零序电流、接地故障电流与接地电阻之间的关系曲线如图4所示。

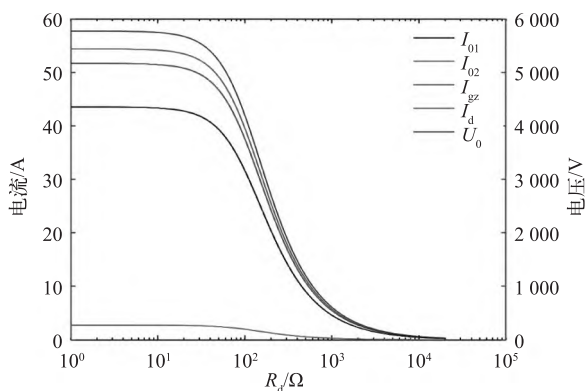


图4 零序电压、电流与接地电阻的关系

Fig. 4 Relation between zero sequence voltage, current and ground resistance

由表2还可以看出，非故障线路零序电流与零序电压的相位差几乎不随接地电阻的变化而变化，始终保持将近 90° 的相位差；而故障线路零序电流与零序电压的相位差也几乎不随接地电阻的变化而变化，始终保持将近 -90° 的相位差；非故障线路零序电流的有效值随着接地电阻的增大而减小，同样不是线性关系，其变化趋势与接地电流相同；故障线路零序电流的有效值随着接地电阻的增大而减小。

4 基于零序功率的故障选线判据

如果定义

$$Q_0 = U_0 I_0 \sin \theta_0 \quad (14)$$

零序功率与接地电阻的关系见表3。

3#线路和4#线路的参数与2#线路完全相同，计算数据也相同，故不再列出。

由表3可以看出，在单相接地故障电阻不大于20 k Ω 的情况下，故障线路的零序功率的数值均大于非故障线路的零序功率数值，且符号相反；非故障线路之间的零序功率的数值与线路长度即分布电容正相关，符号相同。

表3 零序功率与接地电阻的关系

Tab. 3 Relationship between zero sequence power and grounding resistance

接地电阻 / Ω	1	10	100	500	1 000	10 000	20 000
1# 线路 Q_{01}	226 867	224 807	119 949	9 766	2 523	25.4	6.38
2# 线路 Q_{02}	15 616	15 489	8 266	667	175	1.76	0.438
5# 线路 Q_{0gz}	-276 606	-274 135	-146 274	-11 915	-3 076	-31.2	-7.785
Q_{0gz} / Q_{01}	-1.219	-1.219	-1.219	-1.220	-1.219	-1.228	-1.220
Q_{0gz} / Q_{02}	-17.71	-17.698	-17.695	-17.86	-17.58	-17.73	-17.77
Q_{01} / Q_{02}	14.528	14.513	14.511	14.641	14.417	14.432	14.566

据此可以得到变压器中性点不接地系统发生单相接地故障或单相漏电故障时的选线方法：同步采集母线零序电压和每条线路的零序电流，得到同步相量；计算每条线路的零序功率，再将每个零序功率相比，如果比值为正，则这两条线路均为非故障线路；如果比值为负，则这两条线路中一定有一条线路是故障线路，而且零序功率为负的那条线路一定是故障线路。

5 只有两条线路的零序功率方向原理故障选线

只有两条线路的供电系统如图5所示。当线路5发生单相接地故障时，零序电流互感器ZCT3取得的零序电流可按式(8)计算，即

$$I_{03} = (j\omega C_3 + g_3)U_0 \quad (15)$$

而故障线路即线路5的零序电流互感器取得

的电流可按式(9)计算,即

$$I_{gz} = -(j\omega C_{\Delta} + g_{\Delta})U_0 \quad (16)$$

式中, $C_{\Delta}=C_3$; $g_{\Delta}=g_3$ 。

所以

$$I_{gz} = -I_{03} \quad (17)$$

式(17)说明,当只有两条线路时,故障线路与非故障线路的零序电流有效值相同,相位相反。因此,在这种情况下,零序电流有效值相同,仅靠动作整定值区分确实比较困难;但是由于相位相反,基于零序功率方向原理的选线判据依然有效。

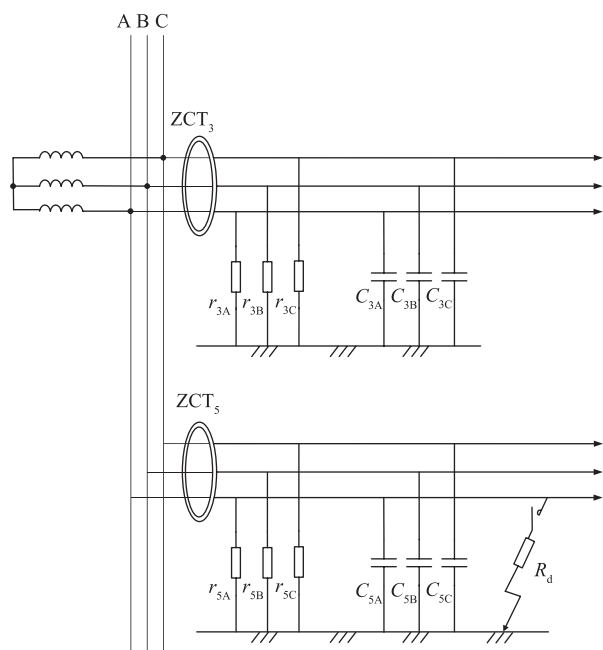


图5 只有两条线路的供电系统

Fig. 5 Power supply system diagram with only 2 lines

6 结束语

综上所述,对于变压器中性点不接地方式,发生单相接地故障时,如果线路数目大于3,则故障线路零序电流的大小等于所有非故障线路零序电流的和,大于任意一条非故障线路的零序电流,其相位滞后零序电压将近 90° ;非故障线路的零序电流大小与自身线路长度即分布电容成正比,其相位超前零序电压将近 90° 。采用零序电压、零序电流与其相位差的正弦乘积的零序功率值可以作为故障选线的判据,即故障线路的零序

功率的模值大于非故障线路的零序功率模值,零序功率的正负号相反;但其与接地电阻之间的关系不是简单的线性关系。对于只有两条馈出线路的变压器中性点不接地系统,当发生单相漏电故障时,故障线路的零序功率的模值等于非故障线路的零序功率模值,正负号依然相反,在具体应用中应引起注意。

参考文献

- [1] 王伟东,李少杰,韩九曦.世界主要煤炭资源国煤炭供需形势分析及行业发展展望[J].中国矿业,2015(2):5-9.
- [2] 刘金朋.基于资源与环境约束的中国能源供需格局发展研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [3] 陈娟,赵耀江.近十年来我国煤矿事故统计分析及启示[J].煤炭工程,2012(3):145-147.
- [4] 王彦文.煤矿供电技术[M].北京:中国矿业大学出版社,2013.
- [5] 王彦文.快速断电安全技术[M].北京:煤炭工业出版社,1996.
- [6] 刘宏业,郑丕谔.中美煤矿事故概况及其分析方法对比研究[J].工业工程,2005(1):41-44,48.
- [7] 卢丹.基于WAMS的矿井高压电网单相接地故障选线及定位方法研究[D].北京:中国矿业大学,2015.
- [8] 王彦文,卢丹,王寅生.基于广域同步测量技术的煤矿高压电网故障区段定位算法[J].煤炭学报,2015,40(S1):285-293.
- [9] 徐海瑞,王力,赵广立,等.小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J].河南电力,2012(4):53-55,66.
- [10] 赵蕾.基于信息融合的小电流接地故障综合选线方法研究[D].北京:北方工业大学,2018.
- [11] 张林利,张毅,薛永端,等.考虑系统不对称的小电流接地故障相识别[J].电力自动化设备,2019,39(4):24-29.
- [12] 袁于程,黄健,谢晨旻.基于深度学习的电能质量扰动分类辨识[J].自动化仪表,2023,44(3):68-73.

- [13] 向国杰, 曾祥君, 喻锴, 等. 基于相位差的不对称配电网接地故障选相方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 70-76, 83.
- [14] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004(16): 86-89.
- [15] 陆国庆, 姜新宇, 江健武, 等. 110 kV及220 kV系统变压器中性点经小电抗接地方式的研究及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 70-74.
- [16] 赵冉, 谭伟璞, 杨以涵. 配电网中性点接地方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(4): 22-26.
- [17] 王银杰. 中压配电网小电流接地系统单相接地故障智能选线研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [18] 范斌. 配电网小电流接地系统单相接地故障定位方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [19] 马静, 王希, 王增平. 一种基于电流突变量的故障选相新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 117-124, 194.
- [20] NOVAK T. Analysis of very-high-resistance grounding in high-voltage longwall power systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 104-111.

作者简介

郝强（1993—），男，硕士，工程师，主要研究方向为煤矿信息化技术应用。

（收稿日期：2023-04-12）