

9-3-2020

Analysis on distribution characteristics of zero sequence current of feeders in asymmetric grid

Jiewen DENG

Hengyang Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co , Ltd , Hengyang 421001 , China

Yanxi LU

Hengyang Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co , Ltd , Hengyang 421001 , China

Jun ZHAO

Hengyang Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co , Ltd , Hengyang 421001 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

DENG, Jiewen; LU, Yanxi; and ZHAO, Jun (2020) "Analysis on distribution characteristics of zero sequence current of feeders in asymmetric grid," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 35: Iss. 2, Article 13.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.013

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/13>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

不对称电网馈线零序电流分布特征分析

邓杰文, 卢彦西, 赵 军

(国网湖南省电力有限公司衡阳供电分公司, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:小电流接地系统在正常运行时,由于线路参数不平衡的普遍存在,系统中性点将产生不平衡电压。不平衡电压在系统馈线中将产生不平衡电流,对该电流的分布特征进行研究,有助于系统故障分析。该文从理论上分析不平衡电流在系统馈线中的分布特征,从馈线的视角出发,通过戴维南定理对系统电路进行等效,得到各馈线不平衡电流表达式。以此为基础求得单相接地故障时馈线稳态零序全电流表达式,揭示其对单相接地故障下馈线零序电流幅值与相位的影响。提出通过对故障前后馈线零序电流作差消除不平衡电流的影响。最后,在 matlab 软件平台搭建仿真模型,验证该文的分析结果。

关 键 词:不对称电网; 小电流接地系统; 不平衡电流分布; 馈线零序电流差

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.013 中图分类号:TM743 文章编号:1673-9140(2020)02-0100-07

Analysis on distribution characteristics of zero sequence current of feeders in asymmetric grid

DENG Jiewen, LU Yanxi, ZHAO Jun

(Hengyang Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Hengyang 421001, China)

Abstract: During the operation of small current grounding system, unbalanced voltages would be induced in neutral points as the unbalanced parameters of transmission lines. And this unbalanced voltage produces an unbalanced current in feeder system. Therefore, studying the distribution characteristics of the unbalanced current is helpful for analyzing system faults. This article theoretically analyzed the unbalanced current in feeder systems. Starting from the feeder, the equivalent circuit of the system is obtained based on Thevenin's theorem while the expressions for unbalanced currents in feeders are also obtained. Then, under the condition of the single-phase disconnection fault, the influence of unbalanced currents on the amplitude and phase of zero sequence current on feeder lines is revealed. Finally, the simulation model is built in MATLAB to verify the analytical results.

Key words: asymmetric power system; small current grounding system; feeder; unbalanced current distribution; zero sequence current

配电网中性点常用的接地方式有不接地方式、经消弧线圈接地方式、经电阻接地方式^[1-3]。不接地、经消弧线圈接地以及高阻接地系统统称为小电

流接地系统。在配电网中,线路的不平衡是普遍存在的^[4-5]。由于系统参数的不平衡,将在系统中性点产生位移电压。该位移电压将在系统馈线中产生不

平衡电流,不平衡电流在各馈线中的分布可能会影响不完全接地故障下的零序电流故障选线准确性。目前,针对单相接地故障选线方法的研究成果有很多^[6-8]。无论是稳态选线或者是暂态选线方法,其主要是根据线路零序分量幅值或相位的差异特征^[9-11]。事实上,如果配电网中存在较大的不平衡电流,则其将影响馈线零序电流的大小和方向,从而影响选线方法的准确性。

一般认为在不接地系统中,正常运行时由于没有形成零序通路,在各馈线中没有零序电流分布。事实上由于不平衡电压的存在,在电压源和对地参数构成的闭合回路内,仍然会存在不平衡电流分布。文献[12]分析了线路分布电容不对称情况下不接地系统馈线不平衡电流的分布特征。论文在分析的过程中忽略了线路对地电导,实际上,线路在运行过程中会出现绝缘老化,且不易及时查找,由此可能对不平衡电流存在较大影响。目前配电网中存在较多的架空—电缆混合线路,不同线路其自身的不平衡度不同,因此认为馈线产生的零序电压与系统零序电压方向一致是不全面的。

该文通过建立小电流接地系统的计算模型,从馈线视角出发,对配电网进行 2 次戴维南等效,从而得到小电流接地系统不平衡电流等值计算电流。同时,分析该不平衡电流对单相接地故障下的馈线零序电流分布的影响。通过研究,建立小电流接地系统馈线稳态零序电流的完整表达式,并通过 Matlab 仿真验证该文的观点。

1 不平衡电流分布特征分析

忽略母线、线路阻抗及线间电容的影响,得到小电流接地系统等效电路,如图 1 所示, $Y_{li(A,B,C)}$ 表示第 l_i 条馈线 A、B、C 三相对地导纳, Y_N 表示中性点接地设备对地导纳。系统正常运行时由基尔霍夫第一定律可得:

$$U_N = -\frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_\Sigma + Y_N} \quad (1)$$

式中 U_N 为系统中性点电压; Y_Σ 为对地导纳和; E_A 、 E_B 、 E_C 为系统三相电源电压。以第 l_i 条馈线为分析对象,将馈线 l_i 以外的系统进行戴维南等效,等效电压源为 $U_{N(\Sigma-i)}$,系统等效阻抗为 $Z_{(\Sigma-i)}$,有

$$U_{N(\Sigma-i)} = -\frac{E_A(Y_A - Y_{liA}) + E_B(Y_B - Y_{liB}) + E_C(Y_C - Y_{liC})}{Y_\Sigma - Y_i + Y_N} + \frac{E_C(Y_C - Y_{liC})}{Y_\Sigma - Y_i + Y_N} \quad (2)$$

$$Z_{(\Sigma-i)} = \frac{1}{(Y_\Sigma - Y_i + Y_N)} \quad (3)$$

其中, Y_i 为第 l_i 条馈线对地导纳。对馈线 l_i 进行戴维南等效,等效电压源为 U_{N_i} ,等效阻抗为 Z_i ,有

$$U_{N_i} = -\frac{E_A Y_{liA} + E_B Y_{liB} + E_C Y_{liC}}{Y_{\Sigma i}} \quad (4)$$

$$Z_i = \frac{1}{(Y_{liA} + Y_{liB} + Y_{liC})} \quad (5)$$

从而得到以第 l_i 条馈线为分析对象的等效电路,如图 2 所示,可解得流经馈线 l_i 的不平衡电流为

$$I_{li} = (U_N - U_{N_i}) Y_i \quad (6)$$

由式(6)可知,当系统正常运行时,流经任意一条馈线 l_i 的不平衡电流由两部分构成:①由于系统参数不平衡引起的不平衡电压在馈线上产生的不平衡电

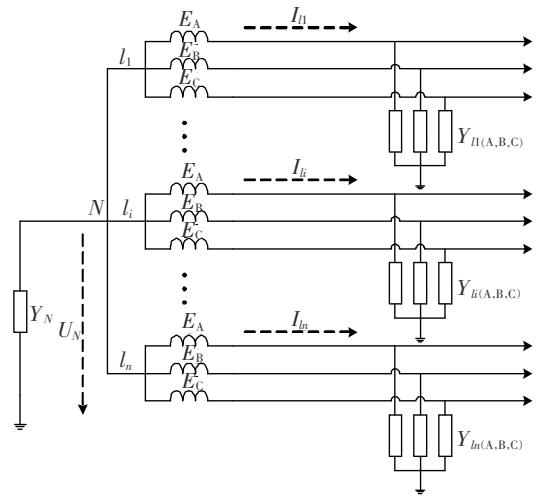


图 1 小电流接地系统等效电路

Figure 1 The equivalent circuit of a small current grounding system

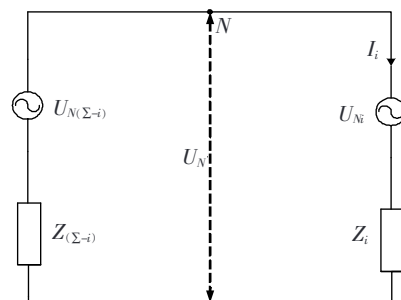


图 2 馈线视角的系统戴维南等效电路

Figure 2 Davinan equivalent circuit of the system from the perspective of feeder

流;②馈线 l_i 自身参数不平衡引起的不平衡电压在馈线上产生的不平衡电流。

对于中性点不接地系统,由于中性点没有构成回路,系统无零序电流,由基尔霍夫第一定律可知各馈线不平衡电流和为零,即

$$\begin{aligned} \sum_i^n I_{li} &= \sum_i^n (U_N - U_{Ni}) Y_i = \\ U_N Y_\Sigma - \sum_i^n (E_A Y_{liA} + E_B Y_{liB} + E_C Y_{liC}) &= \\ U_N Y_\Sigma - (E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C) &= 0 \quad (7) \end{aligned}$$

对于中性点经消弧线圈接地系统或高阻接地系统,由基尔霍夫第一定律可知各馈线不平衡电流和为流经消弧线圈上的电流,设流出节点电流方向为正,流入节点电流方向为负,即有

$$\begin{aligned} \sum_i^n I_{li} &= \sum_i^n (U_N - U_{Ni}) Y_i = \\ U_N Y_\Sigma - \sum_i^n (E_A Y_{liA} + E_B Y_{liB} + E_C Y_{liC}) &= \\ U_N Y_\Sigma - (E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C) &= -U_N Y_N \quad (8) \end{aligned}$$

2 单相接地故障下馈线零序电流分布

2.1 单相接地故障下稳态零序电流分布

假设第 l_j 条馈线 C 相发生单相接地故障,接地过渡阻抗为 Z_f ,中性点位移电压为 U_{N0} ,则对于非故障线路其等效电路如图 3 所示,左侧为除去 l_i 条馈线后系统戴维南等效电路(包含故障馈线在内),右侧为第 l_i 条馈线戴维南等效电路,此时 $U_{N0i} = U_{Ni}$ 。由图 3 解得非故障馈线零序电流为

$$I_{li} = (U_{N0} - U_{N0i}) Y_i, i \neq j \quad (9)$$

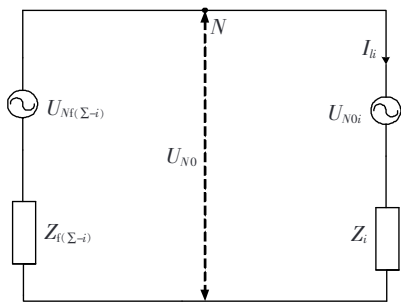


图 3 非故障馈线视角的系统戴维南等效电路

Figure 3 Davinan equivalent circuit of the system from the perspective of feeder

将式(9)与正常时馈线不平衡电流表达式保持一致,展开得:

$$\begin{aligned} I_{li} &= \frac{Y_i (Y_\Sigma + Y_N)}{Y_\Sigma + Y_N + Y_f} U_N - Y_i U_{Ni} - \\ &\frac{Y_i Y_f}{Y_\Sigma + Y_N + Y_f} E_C, i \neq j \quad (10) \end{aligned}$$

若线路发生金属性接地故障,此时 $G_f \rightarrow \infty$,馈线 l_i 上流通电流为

$$I_{li} = -Y_i U_{Ni} - Y_i E_C, i \neq j \quad (11)$$

若 $Z_f \rightarrow \infty$,此时 $Y_f \rightarrow 0$,馈线 l_i 上流通电流为

$$I_{li} = Y_i U_N - Y_i U_{Ni}, i \neq j \quad (12)$$

式(12)与式(6)保持一致。

同理,从故障馈线视角对系统进行戴维南等效,如图 4 所示。流经故障馈线零序电流为

$$I_{lj} = \frac{(U_{N0} - U_{Nlj})}{Z_{lj}} = (U_{N0} - U_{Nlj}) (Y_j + Y_f) \quad (13)$$

展开式(13)得:

$$\begin{aligned} I_{lj} &= \frac{(Y_N + Y_\Sigma) (Y_j + Y_f)}{Y_\Sigma + Y_N + Y_f} U_N - Y_j U_{Nj} + \\ &\frac{Y_f (Y_\Sigma + Y_N - Y_j)}{Y_\Sigma + Y_N + Y_f} E_C, i \neq j \quad (14) \end{aligned}$$

若线路发生金属性接地故障,此时 $Y_f \rightarrow \infty$,馈线 l_j 上流通电流为

$$I_{lj} = -Y_j U_{Nj} + (Y_\Sigma + Y_N - Y_j) E_C \quad (15)$$

若 $Z_f \rightarrow \infty$,此时 $Y_f \rightarrow 0$,馈线 l_j 上流通电流为

$$I_{lj} = Y_j U_N - Y_j U_{Nj} \quad (16)$$

所得 l_j 馈线零序电流表达式与式(7)保持一致。

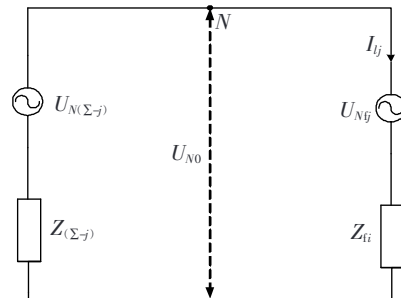


图 4 故障馈线视角的系统戴维南等效电路

Figure 4 Davinan equivalent circuit of the system from the perspective of feeder

通过对馈线零序电流分析可知,由于系统存在不平衡电流,该电流将会影响不完全接地故障下馈线的零序电流分布。在单相接地故障下,馈线零序电流由三部分构成:①由于系统参数不平衡引起的不平衡电压在馈线上产生的不平衡电流;②馈线 l_i 自身参数不平衡引起的不平衡电压在馈线上产生的不平衡电流;③由故障相电源电压在馈线上产生的零序电流。

2.2 作差法消除不平衡电流对选线影响

分析式(11)、(13)可知,不平衡电流的存在最终会影响故障时馈线零序电流。在低阻接地状态下,不平衡电流的存在零序电流选线方法影响几乎可忽略不计。随着过渡电阻的增大,不平衡电流的影响将逐渐突出。在小电流接地系统中,零序电流选线法依旧是最可靠的选线方法^[13-15],主要利用馈线零序电流幅值和相位特征区别故障线路。为分析不平衡电流对故障零序电流的影响,将故障馈线零序电流与非故障馈线零序电流作差得:

$$\Delta I = \frac{(Y_N + Y_\Sigma)(G_f + Y_j - Y_i)}{Y_\Sigma + Y_N + G_f} U_N + \frac{G_f(Y_\Sigma + Y_N + Y_i - Y_j)}{Y_\Sigma + Y_N + G_f} E_C \quad (17)$$

当过渡电阻趋向于零时,对于非谐振接地系统由于 $Y_j - Y_i \ll Y_\Sigma + Y_N$,则式(17)变为

$$\Delta I = (Y_N + Y_\Sigma) U_N + (Y_\Sigma + Y_N + Y_i - Y_j) E_C \approx (Y_N + Y_\Sigma) U_{C0} \quad (18)$$

其中, U_{C0} 为故障发生前故障相对地电压(已知故障线路)。当过渡电阻趋向于无穷大时,式(17)为

$$\Delta I = (Y_j - Y_i) U_N \quad (19)$$

此时故障线路与非故障线路零序电流的幅值和相位取决于馈线自身对地参数以及故障前不平衡电压方向。因此,在高阻接地故障下,不平衡电流可能影响单相接地故障选线准确性。为分析不平衡电流对故障选线的影响,将故障前、后的零序电流作差,并对表达式作适当变换。对于非故障线路有

$$\Delta I_{li} = \frac{-U_C Y_f}{Y_\Sigma + Y_N + Y_f} Y_i \quad (20)$$

式中 U_C 为故障前故障相电压。对于故障线路有

$$\Delta I_{lj} = \frac{-U_C Y_f (-Y_\Sigma - Y_N + Y_j)}{Y_\Sigma + Y_N + Y_f} - \left(\sum_{i \neq j}^n \Delta I_{li} + \Delta I_N \right) \quad (21)$$

比较式(20)、(21)可知,对故障前、后馈线零序电流作差后,非故障线路零序电流差方向基本保持一致。对于不接地系统,故障线路零序电流差方向与非故障线路相反,幅值为非故障线路零序电流差之和。对于谐振接地系统,故障线路零序电流差方向与非故障线路零序电流差方向与消弧线圈工作状态有关。零序电流差的变化规律与完全平衡系统馈线零序电流相同,通过作差可以消除不平衡电流对零序电流选线方法的影响。

3 仿真验证

为了验证该文所提出方法的有效性,利用 Matlab 仿真软件搭建 Simulink 仿真模型,并进行仿真验证。选用 10 kV 理想电压源,以三相 π 型等值电路模拟系统馈线,采用三相并联 RLC 负荷模型表示线路负荷。设置 4 组出线,分别为 $l_1 \sim l_4$,线路长度分别为 1、3、3、9 km。线路参数:正序、零序电阻分别为 0.11、0.34 Ω/km ,正序、零序电容分别为 0.29、0.19 $\mu\text{F}/\text{km}$,正序、零序电感分别为 0.52、1.54 mH/km。

为了模拟系统参数不对称,在线路 l_1 的 A 相串入等值 π 型电路,线路 l_1 不对称度为 2.94%。线路 l_2 参数保持平衡,线路 l_3 在 A 相串入等值 π 型电路,线路 l_2 不对称度为 5.26%。 l_4 在 A 相串入等值 π 型电路,线路 l_2 不对称度为 8.47%。系统对地总电容为 9.71 μF ,对地电容电流为 17.60 A。中性点接地方式分别为中性点不接地、经消弧线圈接地。其中消弧线圈处于过补偿 20% 状态,电感值为 0.87 H。对于消弧线圈接地系统,增加了系统阻尼,阻尼率为 3.93%。所得仿真试验数据如表 1~4 所示,其中,表 4 中的零序电流有功分量以故障前、后系统零序电压变化量为参考轴。

表 1 系统正常运行时各馈线不平衡电流

Table 1 Unbalanced currents in feeder lines during the normal operation of power system

接地方式	线路电流/A			
	l_1	l_2	l_3	l_4
不接地	$0.084\angle 46.195^\circ$	$0.174\angle 15.448^\circ$	$0.327\angle 56.440^\circ$	$0.556\angle -136.960^\circ$
消弧线圈接地	$0.330\angle -172.189^\circ$	$0.975\angle -164.693^\circ$	$1.009\angle -176.980^\circ$	$4.365\angle -161.300^\circ$

表 2 线路 l_2 A 相接地时各馈线零序电流仿真试验数据Table 2 Zero sequence current in the feeder when l_2 A phase line is grounded

接地方式	过渡电阻/ Ω	线路零序电流/A			
		l_1	l_2	l_3	l_4
不接地	5	$1.032\angle -91.354^\circ$	$15.127\angle 85.028^\circ$	$3.096\angle -91.375^\circ$	$11.011\angle -96.320^\circ$
	3 000	$0.080\angle 136.528^\circ$	$1.773\angle 3.993^\circ$	$0.311\angle 124.940^\circ$	$1.591\angle -164.200^\circ$
	8 000	$0.063\angle 76.865^\circ$	$0.772\angle 2.611^\circ$	$0.279\angle 80.636^\circ$	$0.911\angle -155.912^\circ$
消弧线圈接地	5	$1.042\angle -99.650^\circ$	$6.163\angle -76.140^\circ$	$3.098\angle -93.322^\circ$	$10.973\angle -96.145^\circ$
	3 000	$0.223\angle -60.001^\circ$	$2.124\angle -25.313^\circ$	$0.620\angle -47.918^\circ$	$2.658\angle -81.313^\circ$
	8 000	$0.113\angle 171.692^\circ$	$0.384\angle -7.013^\circ$	$0.343\angle 162.98^\circ$	$2.206\angle -154.355^\circ$

表 3 线路 l_2 A 相接地时各馈线零序电流差仿真试验数据Table 3 Zero sequence current difference in the feeder when l_2 A phase line is grounded

接地方式	过渡电阻/ Ω	线路零序电流差/A			
		l_1	l_2	l_3	l_4
不接地	5	$1.095\angle -94.321^\circ$	$15.067\angle 85.648^\circ$	$3.377\angle -94.331^\circ$	$10.595\angle -94.361^\circ$
	3 000	$0.116\angle -177.249^\circ$	$1.603\angle 2.758^\circ$	$0.359\angle -177.201^\circ$	$1.126\angle -177.265^\circ$
	8 000	$0.044\angle 179.047^\circ$	$0.604\angle -1.061^\circ$	$0.135\angle 178.819^\circ$	$0.425\angle 178.968^\circ$
消弧线圈接地	5	$1.119\angle -81.789^\circ$	$6.462\angle -67.879^\circ$	$3.421\angle -75.688^\circ$	$10.692\angle -73.659^\circ$
	3 000	$0.523\angle -31.511^\circ$	$3.018\angle -17.567^\circ$	$1.594\angle -25.334^\circ$	$4.993\angle -23.335^\circ$
	8 000	$0.232\angle -16.030^\circ$	$1.339\angle -2.121^\circ$	$0.708\angle -9.896^\circ$	$2.215\angle -7.909^\circ$

表 4 线路 l_2 A 相接地时各馈线零序电流差有功分量仿真试验数据Table 4 Active components of the zero sequence current difference in the feeder when l_2 A phase line is grounded

接地方式	过渡电阻/ Ω	零序电压变化量/V	线路电流阻性分量/A		线路电流有功分量/A	
			l_1	l_2	l_3	l_4
消弧线圈接地	5	$5\,920.672\angle -162.471^\circ$	0.181	-0.517	0.192	0.222
	3 000	$2\,762.483\angle -112.352^\circ$	0.083	-0.252	0.083	0.086
	8 000	$1\,245.924\angle -96.740^\circ$	0.037	-0.108	0.039	0.045

分析表 1 中的数据可知,对于有一定不对称度的小电流接地系统,在正常运行条件下各馈线中分布着不平衡电流,仿真结果与理论分析一致。分析表 2 中的数据可知,在中性点不接地系统中,在设置的线路不对称度条件下,当过渡电阻大于一定值时,

非故障馈线零序电流可能会大于故障线路零序电流,从而造成稳态零序选线方法失效。分析表 3 中的数据可知,对于不接地系统,通过对故障前后馈线零序电流进行作差能够消除不平衡电流的影响。分析表 3、4 中的数据可知,对于消弧线圈接地系统,对

故障前、后馈线零序电流作差后,以系统零序电压变化量为参考轴,可消除不平衡电流对零序电流有功分量选线法的影响。一系列的仿真试验结果表明,在不对称系统中,正常运行时系统馈线中存在不平衡电流,该电流的存在可能会导致选线方法失败,通过对故障前、后零序电流进行作差能够消除不平衡电流的影响,从而验证了该文的分析结果。

4 结语

该文从馈线视角出发,对小电流接地系统进行戴维南等效,由此分析了对地参数不平衡情况下馈线不平衡电流的分布特征。并以此为基础得到单相接地故障时馈线零序电流的全表达式。揭示了系统对地参数不平衡对单相接地故障下馈线零序电流分布的影响。

为了消除不平衡电流的影响,提出对故障前、后馈线零序电流作差以消除其对故障选线的影响。Matlab/Simulink 仿真结果表明,在中性点不接地系统中,对故障前、后馈线零序电流作差能够消除不平衡电流的影响。在经消弧线圈接地系统中,零序电流作差能够消除不平衡电流对馈线零序有功分量的影响,从而验证了该文分析结果的正确性。通过研究,为相关工程实践应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 余文辉,李健,陈祖勋. 配电网接地故障电压消弧新方法[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(1):64-69.
YU Wenhui, LI Jian, CHEN Zuxun. A novel voltage arc-suppression method for grounding fault in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 64-69.
- [2] 曾祥君,王媛媛,李健,等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-143.
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.
- [3] 姜博,董新洲,施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current traveling wave for distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [4] 但扬清,赵伟,朱艳伟,等. 基于 ABC-DNN 的小电流接地故障选线方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 46-52.
DAN Yangqing, ZHAO Wei, ZHU Yanwei, et al. Fault line selection in small current ground power system based on ABC-DNN[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 46-52.
- [5] 赵海龙,陈钦柱,梁亚峰,等. 一种小电流接地系统故障行波精确定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 85-93.
HAO Hailong, CHEN Qinzhu, LIANG Yafeng, et al. A fault location method of single phase earth fault in small current neutral grounding system [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 85-93.
- [6] 陈柏超,王朋,沈伟伟,等. 电磁混合式消弧线圈的全补偿故障消弧原理及其柔性控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 311-318.
CHEN Baichao, WANG Peng, SHEN Weiwei, et al. The principle of full compensation arc suppression of flexible control of electromagnet hybrid petersen coil [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 311-318.
- [7] 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.
GUO 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.
- [8] 赵军,袁雪琼,阮琦,等. 基于对地参数跟踪测量的不接

- 地系统单相接地故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 81-85.
- ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, RUAN Qi, et al. Research on single phase grounding fault phase selection based on ground parameter tracking and measurement [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 81-85.
- [9] 黄跃. 配电网接地故障辨识与消弧柜投入控制研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- [10] 李新泉, 齐郑, 杨以涵. 消弧线圈与接地故障转移装置配合使用的消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 71-75.
- LI Xinquan, QI Zheng, YANG Yihan. Arc-suppression method for coordinated using of arc-extinguish coil with grounded fault transfer device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 71-75.
- [11] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
- WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [12] 李如琦, 黄欢, 张振兴, 等. 小电流系统单相不完全接地故障分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2007, 32(4): 367-370.
- LI Ruqi, HUANG Huan, ZHANG Zhenxing, et al. Analyzing of single-phase and indirectly grounding fault in small current system[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2007, 32(04): 367-370.
- [13] 秦珣, 陈丽安. 基于改进导纳法的小电流接地系统接地故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(1): 96-102.
- QIN Xun, CHEN Li'an. Improved neutral admittance method based grounding faulted feeder detection for power system with small current earthing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(1): 96-102.
- [14] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地(第2版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [15] 方涛, 陈豪威, 王媛媛, 等. 基于主频分量相关性的谐振接地配电网故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 88-92.
- FANG Tao, CHENG Haowei, WANG Yuanyuan, et al. A novel fault location method based on the waveform correlation of main frequency component for resonant grounding distribution system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 88-92.

(上接第 60 页 Continued from page 60)

- SHENG Wanxing, YE Xueshun, LIU Keyan, et al. Optimal allocation between distributed generation sand micro-grid based on NSGA-II algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4655-4662.
- [10] 宋璇坤, 辛培哲, 李珊, 等. 考虑多重不确定性因素的分布式电源鲁棒规划方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 56-63.
- SONG Xuankun, XIN Peizhe, LI Shan, et al. Robust planning method of distributed generation considering multiple uncertainties[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 56-63.
- [11] Liu G, Huang X, Guo W, Niu Y Z, Chen G L. Multilayer obstacle-avoiding X-architecture steiner minimal tree construction based on particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(5): 1003-1016.
- [12] Wang Hu. Adaptive multi-objective particle swarm optimization based on parallel cell coordinate system[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2015, 19(1): 1-18.