DOI：10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181057

基于零序功率变化量的配电网单相高阻接地保护

龙 毅[1] 欧阳金鑫[1] 熊小伏[1] 马格土[1] 杨明波[2]

（1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室（重庆大学） 重庆 400030
2. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局 贵阳 550004）

摘要 针对中性点经小电阻接地系统面临单相高阻接地故障难以有效切除而存在较大安全隐患的问题，提出一种基于零序功率变化量的小电阻接地系统单相高阻接地保护方法。首先分析了中性点经小电阻接地配电网正常运行和单相高阻接地故障下的零序电流分布特征，在此基础上，构造了馈线零序功率作为配电网单相接地故障判别的特征量；然后利用非故障馈线零序功率变化量小而故障馈线零序功率变化量反映过渡电阻有功功率的特点，提出基于零序功率变化量的配电网单相接地保护原理及其整定方法。理论和仿真分析表明，该保护原理仅利用单端信息即可准确反映较高过渡电阻，受线路对地参数及电容电流的影响小，具有较高的可靠性和适应性。

关键词：配电网 小电阻接地系统 单相高阻接地故障 零序功率变化量

中图分类号：TM771

Protection Principle of Single-Phase High Resistance Fault for Distribution Network Based on Zero-Sequence Power Variation

Long Yi[1] *Ouyang Jinxin*[1] *Xiong Xiaofu*[1] *Ma Getu*[1] *Yang Mingbo*[2]

（1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology Chongqing University Chongqing 400030 China
2. Guizhou Power Grid Co. Ltd Guiyang Power Supply Bureau Guiyang 550004 China）

Abstract Since the single-phase high resistance fault is difficult to be effectively removed from the low-resistance grounding system, which has a large potential safety hazard. A single-phase high resistance fault protection method based on zero-sequence power variation is proposed in this paper. Firstly, the zero-sequence current distribution characteristic in the normal operation and single-phase high resistance fault are analyzed theoretically. On this basis, the zero-sequence power of the feeder is constructed as the characteristic of the single-phase fault identification of the distribution network. Then, utilizing the characteristic that the zero-sequence power variation of the non-fault feeder is small while the zero-sequence power variation of the fault feeder reflects the active power of transition resistance, the principle of single-phase fault protection based on zero-sequence power variation for the distribution network and its setting method are proposed. Theoretical and simulation analysis shows that the protection principle can accurately reflect the higher transition resistance with only single terminal information, and is less affected by the line-to-ground parameters and capacitance current, and has higher reliability and adaptability.

Keywords：Distribution network, low-resistance grounding system, single-phase high resistance fault, zero-sequence power variation

国家重点研发计划（2016YFB0900600）和贵州电网有限责任公司科技项目（GZKJXM20170166）资助。
收稿日期 2018-06-19 改稿日期 2018-08-30

0 引言

随着电缆在城市配电网中的广泛使用，系统对地电容电流不断增大，单相接地故障电流增大，电弧不易熄灭，容易产生间歇性弧光接地过电压。不接地方式和消弧线圈接地方式已不能很地好解决以上问题[1]。小电阻接地方式因具有单相接地故障过电压水平低、保护简单等特点[2]，成为了以电缆为主的城市配电网主要中性点接地方式[3-6]。

单相接地故障是电网的主要故障形式[7-8]。当中性点经小电阻接地的配电网发生单相高阻接地故障时，其故障特征量很小且易受线路电容电流以及对地参数不平衡的影响。目前主要采用零序过电流保护和零序功率方向保护来识别配电网单相接地故障[9-10]。零序过电流保护定值需可靠躲过区外线路发生金属性接地故障时流过区内线路的对地电容电流，定值较高，且馈线中电缆的广泛使用进一步提高了保护定值，削弱了零序过电流保护对高阻接地故障的灵敏度。零序功率方向保护具备较好的反映过渡电阻能力，但由于零序电压、电流的极性校验困难，且高阻接地故障时用于判断功率方向的零序电压幅值较小，存在保护死区。配电网单相高阻接地的可靠性识别和切除一直是电网安全运行的难题[11-13]。

针对该问题，国内外研究学者开展了大量研究。文献[10]引入了零序电压作为制动量，根据制动量自适应调整零序保护定值。文献[14]根据正常馈线复功率相位和幅值接近于 0，而故障馈线复功率相位接近于π且幅值较大的特点辨识单相高阻接地故障。但是，上述方法未考虑对地参数的不平衡影响。文献[15]提出采用高灵敏度零序过电流保护和零序电流群体比较法提高高阻故障保护灵敏度，但是该方法需配置高精度的零序电流互感器。文献[16-17]提出利用已有配电自动化终端设备计量电流、电压、电能质量、信号异常、谐波等参数，构建相应的识别判据，实现高阻故障检测，但是对配电网自动化水平提出了较高要求。文献[18-20]根据故障电流存在非线性畸变，利用短时傅里叶变换、离散小波变换、神经网络算法等提取高阻接地故障的谐波特征量，但是适用范围有限[21-22]。

本文提出了一种基于零序功率变化量的中性点经小电阻接地配电网单相高阻接地故障的保护方法。首先，结合线路对地参数不对称度，推导了小电阻接地系统零序电流在故障前后沿馈线的分布特征。在此基础上，构造了馈线零序功率表达式，利用非故障馈线的零序功率变化量较小而故障馈线零序功率变化量反映过渡电阻有功功率的特点，提出了保护判据和整定原则。最后仿真结果表明，该保护方法具有良好的内部单相高阻接地故障灵敏性和外部故障可靠性，相比零序过电流保护对高阻识别能力更强。

1 小电阻接地配电网零序电流分布

1.1 正常运行下零序电流

配电网线路普遍存在对地参数不平衡的特点[23]。图 1 为中性点经小电阻接地的配电系统。图中，$C_{i\mathrm{A}}$、$C_{i\mathrm{B}}$、$C_{i\mathrm{C}}$ 表示第 i 条馈线三相对地电容，$\dot{E}_{\mathrm{A}}$、$\dot{E}_{\mathrm{B}}$、$\dot{E}_{\mathrm{C}}$ 为三相对称的变压器感应电动势，$\dot{U}_{\mathrm{An}}$、$\dot{U}_{\mathrm{Bn}}$、$\dot{U}_{\mathrm{Cn}}$ 为正常情况下馈线出口处三相电压，$\dot{U}_{0\mathrm{n}}$ 为正常情况下中性点电压，$\dot{I}_{0\mathrm{n}}$ 为正常情况下流经中性点的电流，r_0 为中性点电阻。忽略三相对地分布电导和线路压降，利用集中参数模型，电网正常运行情况下流经中性点的电流满足[24-25]

$$\dot{I}_{0\mathrm{n}}+\mathrm{j}\omega(\dot{U}_{\mathrm{An}}C_{\mathrm{SA}}+\dot{U}_{\mathrm{Bn}}C_{\mathrm{SB}}+\dot{U}_{\mathrm{Cn}}C_{\mathrm{SC}})=0 \tag{1}$$

式中，C_{SA}、C_{SB}、C_{SC} 为三相线路对地电容。

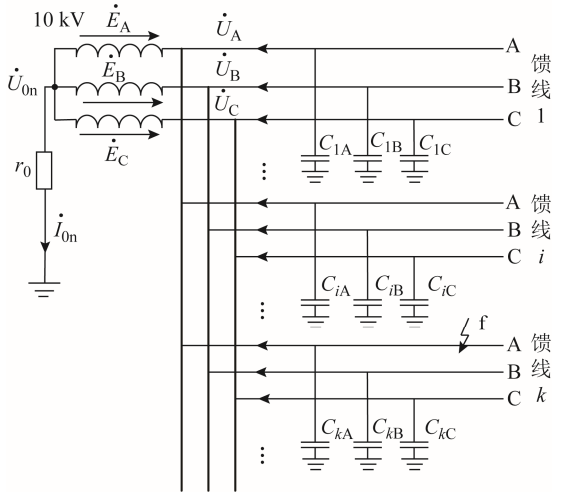


图 1 中性点经小电阻接地配电系统

Fig.1 Low-resistance grounding distribution system

将 $\dot{U}_{\mathrm{An}}=\dot{E}_{\mathrm{A}}+\dot{U}_{0\mathrm{n}}$、$\dot{U}_{\mathrm{B}}=\dot{E}_{\mathrm{B}}+\dot{U}_{0\mathrm{n}}$、$\dot{U}_{\mathrm{Cn}}=\dot{E}_{\mathrm{C}}+\dot{U}_{0\mathrm{n}}$ 代入式（1）可得

$$\dot{I}_{0\mathrm{n}}=-\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{S}}(\dot{U}_{0\mathrm{n}}+\dot{\rho}\dot{E}_{\mathrm{A}}) \tag{2}$$

式中，C_{S} 为系统总对地电容，即 C_{SA}、C_{SB}、C_{SC} 之和；$\dot{\rho}$ 为系统对地电容的不对称度。

$$\dot{\rho}=\frac{C_{\mathrm{SA}}+\alpha^2C_{\mathrm{SB}}+\alpha C_{\mathrm{SC}}}{C_{\mathrm{SA}}+C_{\mathrm{SB}}+C_{\mathrm{SC}}} \tag{3}$$

式中，$\alpha=\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}$。

令 $\dot{I}_{0n_i}$ 为正常情况下馈线 i 的零序电流，方向为线路流向母线，其中 $i=1,2,\cdots,m$，m 为馈线数量，所以 $\dot{I}_{0n_i}$ 满足

$$\dot{I}_{0n_i}+\mathrm{j}\omega(\dot{U}_{An}C_{iA}+\dot{U}_{Bn}C_{iB}+\dot{U}_{Cn}C_{iC})=0 \quad (4)$$

式中，C_{iA}、C_{iB}、C_{iC} 为馈线 i 三相对地电容。

将式（4）化简可得

$$\dot{I}_{0n_i}=-\mathrm{j}\omega C_i(\dot{U}_{0n}+\dot{\rho}_i\dot{E}_A) \quad (5)$$

式中，C_i 为馈线 i 总对地电容，即 C_{iA}、C_{iB}、C_{iC} 之和；$\dot{\rho}_i$ 为馈线 i 对地电容的不对称度。

$$\dot{\rho}_i=\frac{C_{iA}+\alpha^2C_{iB}+\alpha C_{iC}}{C_{iA}+C_{iB}+C_{iC}} \quad (6)$$

1.2　单相接地故障下零序电流

若馈线 k 的 f 点处发生 A 相单相高阻接地故障，故障过渡电导为 G_f。此时，流经中性点的电流 $\dot{I}_{0f}$ 满足

$$\dot{I}_{0f}+\mathrm{j}\omega(\dot{U}_{Af}C_{SA}+\dot{U}_{Bf}C_{SB}+\dot{U}_{Cf}C_{SC})+G_f\dot{U}_{Af}=0 \quad (7)$$

式中，$\dot{U}_{Af}$、$\dot{U}_{Bf}$、$\dot{U}_{Cf}$ 为故障下馈线出口三相电压。

将式（3）以及 $\dot{U}_{Af}=\dot{E}_A+\dot{U}_{0f}$，$\dot{U}_{Bf}=\dot{E}_B+\dot{U}_{0f}$，$\dot{U}_{Cf}=\dot{E}_C+\dot{U}_{0f}$ 代入式（7）可得

$$\dot{I}_{0f}=-G_f(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)-\mathrm{j}\omega C_S(\dot{U}_{0f}+\dot{\rho}\dot{E}_A) \quad (8)$$

式中，$\dot{U}_{0f}$ 为故障下的中性点电压。

对于故障馈线 k，其零序电流 $\dot{I}_{0f_k}$ 满足

$$\dot{I}_{0f_k}=-G_f(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)-\mathrm{j}\omega C_k(\dot{U}_{0f}+\dot{\rho}_k\dot{E}_A) \quad (9)$$

对于非故障馈线 j，其中 $j=1,2,\cdots,m$ 且 $j\neq k$，其零序电流为

$$\dot{I}_{0f_j}=-\mathrm{j}\omega C_j(\dot{U}_{0f}+\dot{\rho}_j\dot{E}_A) \quad (10)$$

从上述推导中可见，当馈线 k 发生单相高阻接地故障时，经过馈线 k 的零序电流包含两部分：与过渡电阻相关的零序电流分量 $-G_f(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)$ 以及与对地电容支路相关的零序电流分量 $-\mathrm{j}\omega C_k(\dot{U}_{0f}+\dot{\rho}_k\dot{E}_A)$。非故障线路仅包含与对地电容支路相关的零序电流分量 $-\mathrm{j}\omega C_j(\dot{U}_{0f}+\dot{\rho}_j\dot{E}_A)$。

2　单相高阻接地故障保护原理

2.1　保护特征量的构造

根据故障前后的馈线零序电流特点，构造故障前后各馈线的零序功率为

$$\begin{cases}P_{in}=\mathrm{Re}\left[(\dot{I}_{0n_i})(-\dot{U}_{An})^*\right]=\mathrm{Re}\left[-\dot{I}_{0n_i}(\dot{U}_{0n}+\dot{E}_A)^*\right]\\ P_{if}=\mathrm{Re}\left[(\dot{I}_{0f_i})(-\dot{U}_{Af})^*\right]=\mathrm{Re}\left[-\dot{I}_{0f_i}(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)^*\right]\end{cases} \quad (11)$$

式中，P_{in} 为正常情况下各馈线零序功率；P_{if} 为系统发生单相接地故障下各馈线的零序功率。则系统发生单相接地故障下各馈线输出零序功率变化量 ΔP_i 为

$$\Delta P_i=P_{if}-P_{in} \quad (12)$$

由于仅故障馈线零序电流含有与过渡电阻相关的零序电流分量 $-G_f(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)$，因此零序功率变化量 ΔP_i 能有效反映故障馈线过渡电阻消耗的有功功率，突出馈线的故障特征。由式（5）、式（9）~式（12）可得故障和非故障馈线零序功率的变化量 ΔP_k 和 ΔP_j 分别为

$$\begin{cases}\Delta P_k=P_R+\Delta P_{Ck}\\ \Delta P_j=\Delta P_{Cj}\end{cases} \quad (13)$$

式中，P_R 为故障过渡电阻消耗的有功功率；ΔP_{Ck} 和 ΔP_{Cj} 分别为故障和非故障馈线与对地电容支路相关的零序功率变化量。

$$P_R=\mathrm{Re}\left[G_f(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)^*\right] \quad (14)$$

$$\Delta P_{Ck}=P_{Cf_k}-P_{Cn_k} \quad (15)$$

$$\Delta P_{Cj}=P_{Cf_j}-P_{Cn_j} \quad (16)$$

式中，P_{Cn_k} 和 P_{Cf_k} 分别为故障馈线 k 在故障前、后的对地电容零序功率；P_{Cn_j} 和 P_{Cf_j} 分别为非故障馈线 j 在故障前、后的对地电容零序功率。

$$P_{Cn_k}=\mathrm{Re}\left[\mathrm{j}\omega C_k(\dot{U}_{0n}+\dot{\rho}_k\dot{E}_A)(\dot{U}_{0n}+\dot{E}_A)^*\right] \quad (17)$$

$$P_{Cf_k}=\mathrm{Re}\left[\mathrm{j}\omega C_k(\dot{U}_{0f}+\dot{\rho}_k\dot{E}_A)(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)^*\right] \quad (18)$$

$$P_{Cn_j}=\mathrm{Re}\left[\mathrm{j}\omega C_j(\dot{U}_{0n}+\dot{\rho}_j\dot{E}_A)(\dot{U}_{0n}+\dot{E}_A)^*\right] \quad (19)$$

$$P_{Cf_j}=\mathrm{Re}\left[\mathrm{j}\omega C_j(\dot{U}_{0f}+\dot{\rho}_j\dot{E}_A)(\dot{U}_{0f}+\dot{E}_A)^*\right] \quad (20)$$

根据式（13）~式（20），并结合式（2）、式（8）和 $\dot{U}_{0f}=\dot{I}_{0f}r_0$、$\dot{U}_{0n}=\dot{I}_{0n}r_0$，故障和非故障馈线的零序功率变化量之差为

$$\Delta P_{kj}=\mathrm{Re}\left[G_f\dot{E}_A(\dot{E}_A)^*\dot{H}(\dot{H})^*\right]+\mathrm{Re}\left[\mathrm{j}\omega\Delta\dot{C}_{kj}\dot{E}_A(\dot{E}_A\dot{I}^*)^*\right] \quad (21)$$

$$\begin{cases}\dot{H}=1-\dfrac{G_{\mathrm{f}}+\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{S}}\dot{\rho}}{G_{\mathrm{f}}+\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{S}}+\dfrac{1}{r_0}}\\ \Delta\dot{C}_{kj}=C_k\left(\dot{\rho}_k-1\right)-C_j\left(\dot{\rho}_j-1\right)\\ \dot{\Gamma}=\dfrac{\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{S}}\dot{\rho}}{\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{S}}+\dfrac{1}{r_0}}-\dfrac{G_{\mathrm{f}}+\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{S}}\dot{\rho}}{G_{\mathrm{f}}+\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{S}}+\dfrac{1}{r_0}}\end{cases} \tag{22}$$

式中，$\dot{\Gamma}$ 为关于 G_{f} 的连续函数。当 $G_{\mathrm{f}}\leqslant 1/(10r_0)$ 时，$\mathrm{Re}\left[\mathrm{j}\omega\Delta\dot{C}_{kj}\dot{E}_{\mathrm{A}}(\dot{E}_{\mathrm{A}}\dot{\Gamma})^*\right]=0$，则 $\Delta P_{kj}>0$，故障馈线的零序功率大于非故障线路零序功率，利用此特征即可形成单相接地故障的判据。

2.2 保护判据及整定原则

当 $G_{\mathrm{f}}\leqslant 1/(10r_0)$ 时，故障馈线零序功率变化量大于非故障馈线零序功率变化量。因此，可以设置基于零序功率变化量的单相接地保护判据为

$$\Delta P_{\mathrm{set}}\geqslant K_{\mathrm{rel}}\max(\Delta P_{Cj}) \tag{23}$$

式中，ΔP_{set} 为保护动作门槛值；K_{rel} 为可靠系数，计及噪声、量测误差等因素对保护判据的影响；$\max(\Delta P_{Cj})$ 为非故障馈线出现的最大零序功率变化量。

由式（19）~式（22），ΔP_{Cj} 可以简化为

$$\begin{aligned}\Delta P_{Cj}&=\mathrm{Re}\left[-\mathrm{j}\omega C_j(1-\dot{\rho}_j)\dot{E}_{\mathrm{A}}(\dot{E}_{\mathrm{A}}\dot{\Gamma})^*\right]\\&=\frac{\omega C_j A_\rho A_\Gamma (E_{\mathrm{Am}})^2}{2}\sin(\theta_\rho-\theta_\Gamma)\end{aligned} \tag{24}$$

式中，A_ρ 为 $1-\dot{\rho}_j$ 的幅值；θ_ρ 为 $1-\dot{\rho}_j$ 的相位；E_{Am} 为 $\dot{E}_{\mathrm{A}}$ 的幅值；A_Γ 为 $\dot{\Gamma}$ 的幅值；θ_Γ 为实轴负半轴与 $\dot{\Gamma}$ 的相位差。A_Γ、θ_Γ 均与 G_{f} 相关。

由于 $\left|\dot{\rho}_j\right|\leqslant 5\%$ [23,26-28]，则 $A_\rho\approx 1$，θ_ρ 的取值范围为 $[-2.86°,2.86°]$，相关推导见附录。当 $G_{\mathrm{f}}\to+\infty$，即发生单相金属性短路故障，A_Γ 取得最大值，θ_Γ 取得最小值，此时 $A_\Gamma\approx 1$，$\min(\theta_\Gamma)$ 为

$$\min(\theta_\Gamma)=-\arctan\left\{\frac{5\%\times\left[\omega C_{\mathrm{S}}/r_0+(\omega C_{\mathrm{S}})^2\right]}{(1/r_0)^2+(1-5\%)(\omega C_{\mathrm{S}})^2-5\%\omega C_{\mathrm{S}}/r_0}\right\} \tag{25}$$

式（25）的详细推导见附录。ωC_{S} 可以用 $\sqrt{2}I_C/E_{\mathrm{Am}}$ 表征，I_C 表示系统电容电流，则 ΔP_{set} 为

$$\Delta P_{\mathrm{set}}=K_{\mathrm{rel}}\max\left(\frac{\omega C_j E_{\mathrm{Am}}}{\sqrt{2}}\right)\frac{E_{\mathrm{Am}}\sin\left(2.86°-\min(\theta_\Gamma)\right)}{\sqrt{2}} \tag{26}$$

式中，$\max(\omega C_j E_{\mathrm{Am}}/\sqrt{2})$ 为馈线最大电容电流。

选取不对称度最大值为 5%，$\min(\theta_\Gamma)$ 随中性点电阻值和系统电容电流变化的计算结果见表 1。

表 1 $\min(\theta_\Gamma)$ 取值

Tab.1 Value of $\min(\theta_\Gamma)$

（单位：°）

中性点小电阻	系统电容电流/A				
阻值/Ω	100	150	200	250	300
10	−0.57	−0.89	−1.21	−1.54	−1.84
15	−0.89	−1.38	−1.84	−2.24	−2.58
20	−1.22	−1.84	−2.36	−2.77	−3.07
25	−1.54	−2.24	−2.77	−3.13	−3.37
30	−1.84	−2.58	−3.07	−3.37	−3.53

3 单相高阻接地保护的适应性

零序过电流保护是目前中性点经小电阻接地系统应对接地故障的主要保护原理。其中，零序Ⅱ段的整定值一般设置较低以保证具有一定的识别过渡电阻的能力。根据小电阻接地系统馈线零序Ⅱ段整定值需可靠躲过馈线电容电流[29]，即

$$I_{\mathrm{set}}\geqslant K_{0\mathrm{II}}\max(\omega C_j E_{\mathrm{Am}}/\sqrt{2}) \tag{27}$$

式中，$K_{0\mathrm{II}}$ 为可靠系数。

结合式（26）和式（27），ΔP_{set} 可以表示为

$$\Delta P_{\mathrm{set}}=I_{\mathrm{set}}E_{\mathrm{Am}}\sin(2.86°-\min(\theta_\Gamma))/\sqrt{2} \tag{28}$$

当小电阻接地系统馈线零序Ⅱ段整定值为 I_{set} 时，忽略线路阻抗和电容支路的影响，其能够识别的过渡电阻的最大值为 R_{l}（$R_{\mathrm{l}}=E_{\mathrm{Am}}/\sqrt{2}I_{\mathrm{set}}$）。而按照式（26）的整定原则，识别过渡电阻的最大值为 $R_2=E_{\mathrm{Am}}^2/(2\Delta P_{\mathrm{set}})$。结合式（28），二者相差的倍数为 $R_2/R_{\mathrm{l}}=1/\sin(2.86°-\min(\theta_\Gamma))$。二者反映过渡电阻识别能力如图 2 所示，利用馈线零序功率变化量可以大幅提高辨识单相高阻接地故障能力。

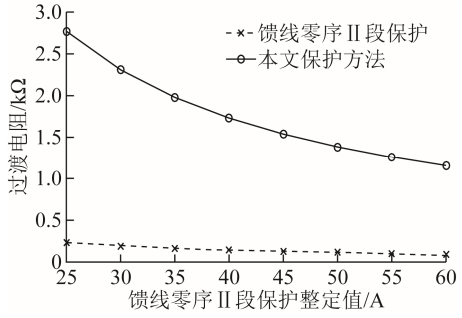


图 2 过渡电阻识别能力对比

Fig.2 Comparison of transition resistance identification capabilities

4　仿真分析

本文利用 PSCAD/EMTDC 对图 1 所示的 10 kV 小电阻接地系统进行验证。其中，馈线数 $n=7$，各馈线负荷对称，线路参数和负荷参数见表 2 和表 3。系统中性点电阻阻值为 10 Ω，电容电流为 91.1 A，总不对称度为$(-3.7+j6.5)\times10^{-3}$，零序Ⅱ段整定值为 20 A，根据式（26）、式（28），单相高阻接地保护整定值为 6.91 kW。

表 2　线路参数

Tab.2　Line parameters

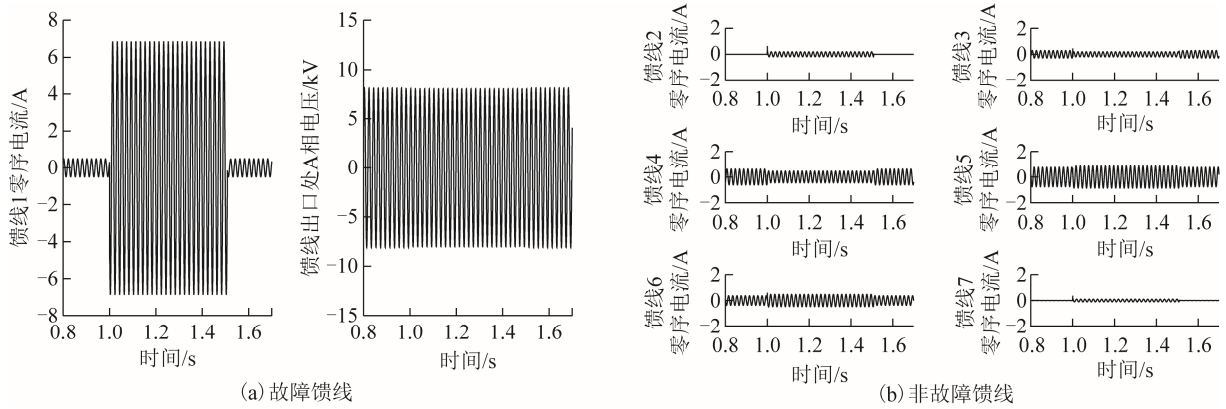
馈线编号	线路长度/km	正/负序阻抗/（Ω/km）	零序阻抗/（Ω/km）	对地电容/（μF/km）			不对称度/10^{-3}
				A 相	B 相	C 相	
1	6	0.27+j0.08	2.7+j0.35	0.33	0.32	0.36	−4.95+j0.034
2	8	0.3+ j0.05	3.0+j0.30	0.35	0.35	0.35	0
3	7	0.3+ j0.05	3.0+j0.30	0.33	0.31	0.32	15.6+j9.02
4	10	0.25+j0.04	2.4+j0.4	0.30	0.27	0.28	29+j10
5	9	0.27+j0.08	2.7+j0.35	0.24	0.28	0.25	−0.33−j0.34
6	8	0.28+j0.08	2.0+j0.42	0.36	0.38	0.4	−13+j15
7	5	0.24+j0.04	2.7+j0.38	0.30	0.30	0.30	0

表 3　负载参数

Tab.3　Load parameters

馈线编号	等效负荷/Ω	馈线编号	等效负荷/ Ω
1	20+j6.6	5	30+j10
2	25+j10	6	24+j11
3	28+j15	7	34+j16
4	25+j12		

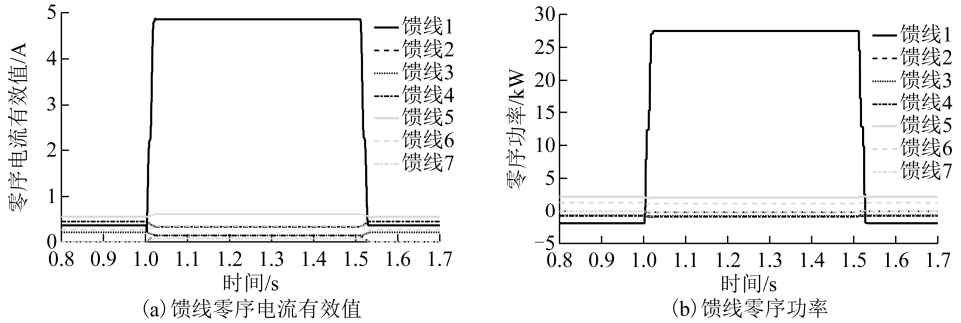
当馈线 1 末端 A 相发生经过渡电阻 1 000 Ω的单相接地故障时，馈线 1 零序电流及馈线出口故障相电压如图 3a 所示，非故障馈线零序电流波形如图 3b 所示；各馈线零序电流基波有效值如图 4a 所示，各馈线零序功率如图 4b 所示。图 4a 中，馈线 1 的零序电流达到 4.8 A，其余馈线在 0.8 A 以内，相差达到 6 倍；图 4b 中，馈线 1 的零序功率变化量为



(a) 故障馈线　　(b) 非故障馈线

图 3　馈线零序电流及故障相电压

Fig.3　Zero-sequence current of each feeder and fault phase voltage waveforms



(a) 馈线零序电流有效值　　(b) 馈线零序功率

图 4　零序电流和零序功率变化特征

Fig.4　Variation characteristic of zero-sequence current and zero-sequence power

29.08 kW，其余馈线零序功率变化量为负，即零序功率变化量显著放大了馈线 1 的故障特征。

改变故障过渡电阻，可得各馈线零序功率变化量见表 4。随着过渡电阻的增大，非故障馈线的零序功率变化量逐渐趋于零，馈线 1 的零序功率变化量明显大于其他非故障馈线的零序功率变化量。除了故障馈线零序功率变化量大于整定值 6.91 kW 外，非故障馈线的零序功率变化量均显著小于保护整定值，即保护能够可靠动作。

表 4 馈线零序功率变化量随过渡电阻的变化情况

Tab.4 Zero-sequence power variation of each feeder varies with the transition resistance

过渡	各馈线零序功率变化量/ kW						
电阻/Ω	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔP_4	ΔP_5	ΔP_6	ΔP_7
0.1	824	−5.8	−4.15	−5.1	−6.2	−5.7	−3.0
10	756	−4.0	−3.0	−3.5	−4.2	−4.0	−2.2
100	240	−1.1	−0.8	−1.0	−1.1	−1.2	−0.57
500	57.6	−0.25	−0.2	−0.22	−0.25	−0.25	−0.12
1 000	29.08	−0.17	−0.12	−0.12	−0.15	−0.1	−0.06
1 500	19.8	−0.08	−0.06	−0.06	−0.1	−0.08	−0.04

表 4 给出的算例还表明基于零序功率变化量的单相高阻接地保护范围远大于 $G_f \leqslant 1/(10r_0)$：当过渡电阻较小时，馈线阻抗不能忽略，馈线出口处故障相电压不为零，零序电流较大，此时故障馈线零序功率变化量远大于保护整定值 ΔP_{set}，保护依然能够可靠动作。

进一步改变非故障馈线 7 的不对称度，当馈线 1 末端 A 相发生单相接地故障且过渡电阻为 100 Ω时，各馈线零序功率变化量见表 5。其中，馈线 7 零序功率变化量始终小于 6.91 kW，而其他馈线不受馈线 7 不对称度变化的影响。改变馈线数量，当馈线 1 末端 A 相发生单相接地故障且过渡电阻为 100 Ω时，各馈线零序功率变化情况见表 6。故障馈线的零序功率变化量不受馈线数量的影响，非故障馈线零序功率变化量均小于保护整定值 6.91 kW，保护可以可靠动作。

表 5 馈线零序功率变化量随馈线 7 不对称度变化情况

Tab.5 Zero-sequence power variation of each feeder varies with asymmetry of feeder 7

不对称度	各馈线零序功率变化量/ kW						
	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔP_4	ΔP_5	ΔP_6	ΔP_7
0.044	240	−1.0	−0.8	−1.0	−1.1	−1.2	−0.6
−0.04−j0.01	240	−1.1	−0.8	−0.9	−1.1	−1.3	−0.6
−0.04+j0.03	240	−1.0	−0.7	−1.0	−1.1	−1.2	−0.5

表 6 馈线零序功率变化量随馈线数量变化情况

Tab.6 Zero-sequence power variation of each feeder varies with the number of feeders

馈线	各馈线零序功率变化量/ kW						
数量	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔP_4	ΔP_5	ΔP_6	ΔP_7
1	244	—	—	—	—	—	—
2	243	−0.4	—	—	—	—	—
3	242	−0.5	−0.3	—	—	—	—
4	242	−0.7	−0.5	−0.6	—	—	—
5	242	−0.8	−0.6	−0.8	−0.8	—	—
6	240	−1.0	−0.7	−0.9	−1.0	−1.1	—
7	240	−1.1	−0.8	−1.0	−1.1	−1.2	−0.57

当馈线 1 末端 A 相发生单相接地故障且过渡电阻取 100 Ω 时，对各馈线测量叠加基波、3 次谐波、5 次谐波和 7 次谐波以模拟噪声、测量误差对保护判据的影响。仿真条件设置为：①基波、3、5、7 次谐波幅值相同，各叠加波形初相位均为 0°。改变各叠加波形幅值为对应测量的 2%、5%、10%、15%，馈线零序功率变化量的变化情况见表 7。②基波、3、5、7 次谐波幅值相同且为对应测量的 15%，各叠加波形初相位相同。改变各叠加波形初相位，馈线零序功率变化量的变化情况见表 8。

表 7 馈线零序功率变化量随叠加波形幅值占比变化情况

Tab.7 Zero-sequence power variation of each feeder varies with the proportion of the amplitude of the superimposed waveform

叠加波形幅值占比(%)	各馈线零序功率变化量/ kW						
	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔP_4	ΔP_5	ΔP_6	ΔP_7
2	240	−1.1	−0.8	−1.0	−1.1	−1.3	−0.6
5	239	−1.3	−1.0	−1.0	−1.2	−1.4	−0.7
10	233	−1.5	−1.0	−1.1	−1.4	−1.6	−0.8
15	228	−1.8	−1.3	−1.3	−1.6	−1.8	−1.0

表 8 馈线零序功率变化量随叠加波形初相位变化情况

Tab.8 Zero-sequence power variation of each feeder varies with the initial phase of the superimposed waveform

初相位/	各馈线零序功率变化量/kW						
(°)	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔP_4	ΔP_5	ΔP_6	ΔP_7
0	228	−1.8	−1.3	−1.3	−1.6	−1.8	−1.0
60	223	−3.0	−2.0	−2.0	−2.5	−3.2	−1.6
120	227	−2.4	−1.7	−2.0	−1.3	−2.6	−1.3
180	231	−0.8	−0.7	−1.0	−0.9	−1.0	−0.4
240	224	0	−0.1	−0.2	−0.3	−0.2	0
300	228	−0.4	−0.2	−0.2	−0.6	−0.5	−0.4

表 7 和表 8 的仿真结果表明：在噪声及测量误差影响下，除故障馈线外，非故障馈线零序功率变化量均小于保护整定值 6.91 kW，本文所提单相高阻接地保护方案可以正确动作，具备较高的可靠性。

5　结论

本文提出了一种基于零序功率变化量的小电阻接地系统单相高阻接地故障保护方法。保护原理建立在非故障馈线的零序功率变化量较小而故障馈线零序功率变化量反映过渡电阻有功功率的基础上。本文提出的保护原理简单，所需电气量仅为故障前后的各馈线零序电流和故障相电压信息，易于在小电阻接地系统中实现。保护判据和整定方法对区内外故障的划分界限明显，受线路电容电流和参数不对称度的影响小，具有较高的灵敏度和可靠性。

附　录

1　θ_ρ取值范围推导

θ_ρ 表示 $1-\dot{\rho}_j$ 的相位，令 $\dot{\rho}_j=\rho_{j1}+\mathrm{j}\rho_{j2}$，$\theta_\rho$ 取值范围等价于 $\rho_{j2}/(1-\rho_{j1})$ 的取值范围。令 $y=\rho_{j2}/(1-\rho_{j1})$，由于 $|\dot{\rho}_j|\leqslant 5\%$，显然满足 $1-\rho_{j1}>0$；则 θ_ρ 位于一、四象限，令 $(\rho_{j1})^2+(\rho_{j2})^2=x^2(x\geqslant 0)$ 且 $\rho_{j1}\geqslant 0$，其中 $x\leqslant 5\%$，则有

$$y=\frac{\rho_{j2}}{1-\sqrt{x^2-(\rho_{j2})^2}} \tag{A1}$$

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}\rho_{j2}}=\frac{1-\sqrt{x^2-(\rho_{j2})^2}-\dfrac{(\rho_{j2})^2}{\sqrt{x^2-(\rho_{j2})^2}}}{\left[1-\sqrt{x^2-(\rho_{j2})^2}\right]^2}=\frac{1-\dfrac{x^2}{\sqrt{x^2-(\rho_{j2})^2}}}{\left[1-\sqrt{x^2-(\rho_{j2})^2}\right]^2} \tag{A2}$$

显然当 $\rho_{j2}=\pm 5\%$ 时，$|y|$ 取得最大值，故 θ_ρ 的取值范围为 $[-\arctan 5\%,\arctan 5\%]$ 即 $[-2.86°, 2.86°]$。

2　min(θ_Γ)取值推导

当 $G_\mathrm{f}\to\infty$，即发生单相金属性短路故障，则有

$$-\dot{\Gamma}=1-\frac{\mathrm{j}\omega C_\mathrm{S}\dot{\rho}}{\mathrm{j}\omega C_\mathrm{S}+\dfrac{1}{r_0}}=\frac{\left(\dfrac{1}{r_0}\right)^2+(\omega C_\mathrm{S})^2(1-\rho_1)+\dfrac{1}{r_0}\omega C_\mathrm{S}\rho_2}{(\omega C_\mathrm{S})^2+\left(\dfrac{1}{r_0}\right)^2}-\mathrm{j}\frac{(\omega C_\mathrm{S})^2\rho_2+\dfrac{1}{r_0}\omega C_\mathrm{S}\rho_1}{(\omega C_\mathrm{S})^2+\left(\dfrac{1}{r_0}\right)^2} \tag{A3}$$

$$\theta_\Gamma=\arctan\left[\frac{(\omega C_\mathrm{S})^2\rho_2+\dfrac{1}{r_0}\omega C_\mathrm{S}\rho_1}{\left(\dfrac{1}{r_0}\right)^2+(\omega C_\mathrm{S})^2(1-\rho_1)+\dfrac{1}{r_0}\omega C_\mathrm{S}\rho_2}\right] \tag{A4}$$

式中，$\dot{\rho}=\rho_1+\mathrm{j}\rho_2$。由于 $|\rho_1|\leqslant 5\%$ 且 $|\rho_2|\leqslant 5\%$，θ_Γ 的理论最小值为

$$\min(\theta_\Gamma)=-\arctan\left\{\frac{5\%\times\left[(\omega C_\mathrm{S})^2+\dfrac{1}{r_0}\omega C_\mathrm{S}\right]}{\left(\dfrac{1}{r_0}\right)^2+(\omega C_\mathrm{S})^2(1-5\%)-\dfrac{1}{r_0}\omega C_\mathrm{S}(5\%)}\right\} \tag{A5}$$

参考文献

[1] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.
Su Jifeng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Protection & Control, 2013, 41(8): 141-148.

[2] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
Liu Mingyan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-89.

[3] 刘育权, 蔡燕春, 邓国豪, 等. 小电阻接地方式配电系统的运行与保护[J]. 供用电, 2015(6): 30-35.
Liu Yuquan, Cai Yanchun, Deng Guohao, et al. Operation and protection in distribution system with small resistance grounding mode[J]. Distribution & Utilization, 2015(6): 30-35.

[4] 华煌圣, 刘育权, 张君泉, 等. 基于配电管理系统的“花瓣”型配电网供电恢复控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 102-107.
Hua Huangsheng, Liu Yuquan, Zhang Junquan, et al. Recovery control scheme for petal-shape distribution network based on distribution management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 102-107.

[5] 薛永端, 郭丽伟, 张林利, 等. 有源配电网中性点接地方式的选择问题[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 129-136.
Xue Yongrui, Guo Liwei, Zhang Linli, et al. Selection problems of neutral grounding mode in active distribution networks[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2015, 39(13): 129-136.

[6] 董振亚. 城市配电网中性点接地方式的发展和改进[J]. 中国电力, 1998(8): 38-41.
Dong Zhenya. Urban distribution network neutral grounding development and improvement[J]. Electric Power, 1998(8): 38-41.

[7] 康忠健, 田爱娜, 冯艳艳, 等. 基于零序阻抗模型故障特征的含分布式电源配电网故障区间定位方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 214-221.
Kang Zhongjian, Tian Aina, Feng Yanyan, et al. Fault section locating method based on zero sequence impedance model fault feature in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 214-221.

[8] 何连杰, 史常凯, 闫卓, 等. 基于广义 S 变换能量相对熵的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 274-280.
He Lianjie, Shi Changkai, Yan Zhuo, et al. A fault section location method for small current neutral grounding system based on energy relative entropy of generalized S-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 274-280.

[9] 许庆强, 许扬, 周栋骥, 等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 91-94, 115.
Xu Qingqiang, Xu Yang, Zhou Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-94, 115.

[10] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117.
Xue Yongduan, Liu Shan, Wang Yansong, et al. Grounding fault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.

[11] 赵化时, 姚李孝, 柯丽芳, 等. 配电网选线和测距新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 6-10.
Zhao Huashi, Yao Lixiao, Ke Lifang, et al. A novel method for fault line selection and location in distribution system[J]. Power System Protection & Control, 2010, 38(16): 6-10.

[12] 于立涛. 35kV 配电网中性点经小电阻接地的改造方案分析[J]. 电力系统保护与控制, 2004, 32(16): 57-59.
Yu Litao. Analysis of improving scheme for neutral grounding via low resistance in 35 kV distribution network[J]. Power System Protection & Control, 2004, 32(16): 57-59.

[13] 詹启帆, 李天友, 蔡金锭. 配电网高阻接地故障检测技术综述[J]. 电气技术, 2017, 18(12): 1-7.
Zhan Qifan, Li Tianyou, Cai Jinding. The review of high impedance fault detecting technology of distribution network[J]. Electrical Engineering, 2017, 18(12): 1-7.

[14] Tang Tao, Huang Chun, Leng Hua, et al. Single-phase high impedance fault protection for low resistance grounded distribution network[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(10): 2462-2470.

[15] 李天友, 徐丙垠, 薛永端. 配电网高阻接地故障保护技术及其发展[J]. 供用电, 2018, 35(5): 2-6, 24.
Li Tianyou, Xu Bingyin, Xue Yongduan. High-impedence fault protection of distribution networks and its development[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 2-6, 24.

[16] Zanjani M G M, Kargar H K, Zanjani M G M. High impedance fault detection of distribution network by phasor measurement units[J]. Smart Grid & Renewable Energy, 2012, 4(3): 297-305.

[17] Chakraborty S, Das S. Application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, DOI: 10.1109/TSG.2018.2828414.

[18] Lima X M, Brito N S D, Souza B A D, et al. Analysis of the influence of the window used in the short-time Fourier transform for high impedance fault detection[C]//IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, Belo Horizonte, Brazil, 2016, DOI: 10.1109/ICHQP. 2016.7783465.

[19] Hubana T, Saric M, Avdaković S. Approach for identification and classification of HIFs in medium voltage distribution networks[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(5): 1145-1152.

[20] 童宁, 余梦琪, 林湘宁, 等. 基于相电流高频特征识别的配电网故障指示器原理[J]. 电工技术学报,

2015, 30(12): 465-471.
Tong Ning, Yu Mengqi, Lin Xiangning, et al. Study for fault indicator based on the faulty phase current feature recognition for the distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 465-471.

[21] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
Xiao Xiangning, Liao Kunyu, Tang Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.

[22] 张雨潇, 戴珂, 陈新文, 等. 检测电流包含电容电流的 SAPF 谐波抑制和谐振阻尼新方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 58-67.
Zhang Yuxiao, Dai Ke, Chen Xinwen, et al. An improved method of sapf for harmonic compensation and resonance damping with detected current including power capacitor and load current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 58-67.

[23] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[24] 刘宝稳, 马宏忠. 零序电压产生机理及过渡电阻测量和选相方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1444-1449.
Liu Baowen, Ma Hongzhong. Transition resistance measurement and fault phase selection under single-phase ground fault based on producing mechanism of zero-sequence voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1444-1449.

[25] 刘宝稳, 王崇林, 李晓波. 不对称电网不完全接地故障零序电压轨迹及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4959-4967.
Liu Baowen, Wang Chonglin, Li Xiaobo. Analysis and application of zero-sequence voltage of single-phase ground fault asymmetrical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4959-4967.

[26] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.
Xu Bo, Zhang Jianwen, Cai Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.

[27] 张宇, 陈乔夫, 程路, 等. 检测配电网电容电流及辨识高阻接地的新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 83-87, 101.
Zhang Yu, Chen Qiaofu, Cheng Lu, et al. Novel method for measuring capacitive current and distinguishing high-resistance grounding of distributing network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 83-87, 101.

[28] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.
Zeng Xiangjun, Huang Mingwei, Wang Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 61-69.

[29] 中华人民共和国电力工业部. DL/T584 3 kV～110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介

龙　毅　男，1994 年生，硕士，研究方向为配电网接地方式及保护。

E-mail：yi_long_ly@163.com

欧阳金鑫　男，1984 年生，博士，副教授，研究方向为电力系统保护与控制。

E-mail：jinxinoy@163.com（通信作者）

（编辑　赫蕾）