

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210596

基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法

曾祥君¹, 黄慧¹, 喻锐¹, 张程麒², 刘战磊¹, 陈柏宇¹, 庞钦¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力有限公司检修公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为提高配电网故障选相的精确性与灵敏度, 针对高阻接地故障及单相断线故障, 提出利用测算的偏转角进行故障选相的方法。首先, 分析了高阻接地和断线故障选相失败的原因。然后, 根据测量的对地参数来判别发生了高阻故障还是断线故障。最后, 提出了基于柔性调控零序电压的选相方法, 即: 向配电网中性点注入零序电流, 调控零序电压相角分别为配电网三相相电压相角, 通过注入零序电流及返回零序电压测算故障偏转角, 结合判据即可实现故障选相。PSCAD 仿真结果表明, 该方法可快速准确地选出 20 kΩ 的单相高阻接地故障相及线路末端断线故障相, 且不受故障位置、故障类型、配电网中性点接地方式等因素的影响。

关键词: 配电网; 故障选相; 零序电流; 高阻故障; 断线故障; 偏转角

Voltage phase selection method for high resistance grounding and a single-phase disconnection fault of a distribution network based on flexible control of zero-sequence voltage

ZENG Xiangjun¹, HUANG Hui¹, YU Kun¹, ZHANG Chengqi², LIU Zhanlei¹, CHEN Boyu¹, PANG Qin¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Maintenance Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: To improve the accuracy and sensitivity of distribution network fault phase selection, a method based on the calculated deflection angle is proposed for a high resistance ground fault and a single phase line fault. First, the reasons for phase selection failure for high resistance grounding and a disconnection fault are analyzed. Then, from the measured parameters to the ground the occurrence of a high resistance or line fault is determined. Finally, a phase selection method based on flexible zero sequence voltage regulation is proposed, that is, zero sequence current is injected into the neutral point of the distribution network, the phase angle of zero sequence voltage is adjusted to be the phase angle of three-phase voltage of the distribution network, and the fault deflection angle is calculated by injecting zero sequence current and zero sequence voltage return. The fault phase selection can be realized by combining the criteria. PSCAD simulation results show that this method can quickly and accurately select 20 kΩ single-phase high-resistance grounding fault phase and line end disconnection fault phase without being affected by fault location, fault type and neutral grounding mode of the distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51737002 and No. 52037001).

Key words: distribution network; fault phase selection; zero sequence current; high resistance fault; broken line fault; deflection angle

0 引言

配电网结构复杂, 深入用户终端, 运行环境恶

劣, 易发生各类故障^[1-4]。据统计, 在小电流接地系统中, 发生单相接地故障的概率达到了 80%^[5]。而其中有相当一部分的故障是由于线路与树枝、地面或周围建筑物发生接触而短路的, 这种情况下的过渡电阻很大, 故障电气量微弱, 难以有效地检测和保护^[6-8]。如果配电网发生高阻故障之后不能及时处理, 可能会带来人身触电以及火灾等安全隐患。配

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51737002, 52037001); 中国南方电网项目资助(0562002020030304PD 00007)

电网中同高阻故障后信号微弱一样的还有断线故障。尤其是配电线路末端发生断线故障时，引起的母线相电压、相电流变化不明显，故障特征量难以提取及检测，且在 110 kV 及以下电压等级的线路保护在整定计算时不考虑断线故障的影响，系统容易长时间带故障运行^[9-10]，而故障点周围存在危险的接触电压和跨步电压，容易发生各类触电事故，同时由于配电网运行维护工作人员在实际工作中的相关经验不足，无法准确判断导致事故处理延误，不利于配网的安全稳定运行^[11-12]。因此，有必要对配电线路高阻接地故障及单相断线灵敏感知及选相方法进行深入研究，实现可靠实时监测。

小电流接地系统发生单相接地故障后，传统的选相判据主要通过暂态信号提出，进而判断出故障相。但由于发生的故障类型多变、线路参数不一致、运行方式不同等因素影响，使得故障条件一旦改变，该方法就不再适用^[13-14]。文献[15-16]通过在线测量对地参数，在中性点短暂投入适当阻值电阻，实现中性点不接地系统单相接地故障时的选相。但是此方法在投入电阻时若阻值选取不当会造成较大测量误差导致选项不准确；文献[17]基于小波变换提出了一种线路故障的选相原理，仿真结果表明该方法可以快速有效地完成故障选相。然而，其性能的好坏取决于母波的合理选择，具有很大的局限性，且实用化困难；关于断线故障，文献[18-19]提出了基于零序电压幅值差的断线故障识别方法，并给出了基于配电网自动化系统的智能分布式和集中式两种故障处理方法，但在应用中需要改变电压互感器的配置，较为复杂；文献[20]分析了中性点偏移电压、断线前后的相电压以及线电压的变化规律，提出了基于相电压和线电压的断线定位方法，但仅适用于不接地系统；文献[21-22]提出了基于相电流的断线判别和区段定位方法，但是负序电流特征和相电流特征在线路轻载或者空载时均有可能失效。

本文提出了基于零序电压柔性控制的配电网故障选相方法，可实现高阻接地故障选相，同时可拓展应用于配电线路末端的断线故障选相，并在选相之前对这两种故障进行了区分。通过 PSCAD 对不同配电网参数、不同故障类型、不同故障过渡电阻及故障位置进行了大量仿真，验证了所提选相方法的可行性与准确性。并且所研究的柔性调控零序电压快速安全处置成套装置已在浙江、湖南、云南、四川、河南等 9 个省份得到了规模化应用，为实现现场推广奠定了一定的基础^[23]。

1 柔性调控零序电压高阻选相原理

1.1 高阻接地故障机理分析

图 1 为 10 kV 配电网发生单相接地故障时的等效模型，其中， R_n 为中性点小电阻，大小一般为 10Ω ， L_p 为消弧线圈， R_0 为配电网对地泄漏电阻， C_0 为配电网对地电容， R_f 为接地故障过渡电阻。利用叠加原理，简化电路图如图 2 所示，其中， U_{eq} 是零序等效电源电压，当配电网三相对地电容基本平衡时 $U_{eq} = -E$ ，即系统的相电压， C_Σ 为全系统线路对地等效电容， R_Σ 为全系统线路对地等效电阻， Z_N 为中性点的对地阻抗。

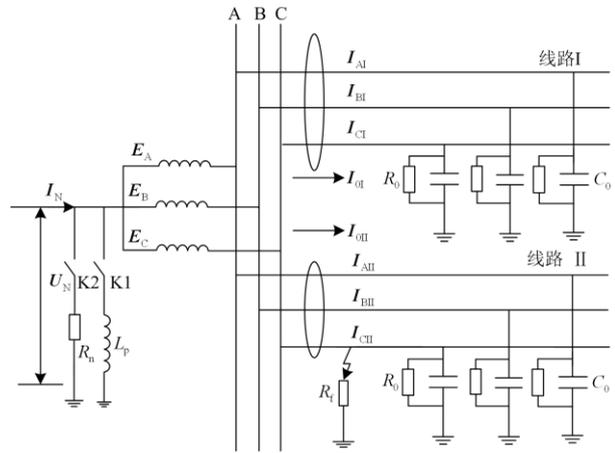


图 1 单相接地故障时配电网等效模型

Fig. 1 Equivalent model of distribution network under single-phase earth fault

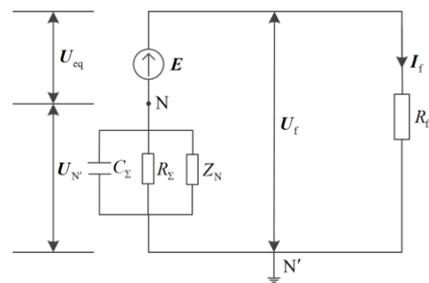


图 2 单相接地故障等效简化图

Fig. 2 Equivalent simplified diagram of single-phase ground fault

其中， Z_N 为中性点的对地阻抗，不同中性点接地方式对应不同的值，具体可表示为

$$Z_N = \begin{cases} \infty, & \text{不接地系统} \\ j\omega L_p, & \text{经消弧线圈接地系统} \\ R_N, & \text{经小电阻接地系统} \end{cases} \quad (1)$$

根据图 2 可求得接地电流 I_f 为

$$I_f = \frac{-3E}{R_f + Z_N + R_\Sigma + \frac{1}{j\omega C_\Sigma}} \quad (2)$$

等效电源电压 U_{eq} 与中性点位移电压 $U_{N'}$ 和接地点电压 U_f 的关系为

$$U_{eq} = U_{N'} + I_f R_f = U_{N'} + U_f \quad (3)$$

现以 C 相发生单相接地故障为例, 可得

$$U_{eq} = -U_C = U_{N'} + U'_C \quad (4)$$

由式(4)画出以 U_C 为直径的半圆, 半圆的轨迹则为 $U_{N'}$ 末端轨迹, 如图 3 所示。图 3 中(a)、(b)、(c)分别为过渡电阻 R_f 从小到大不同阻值时的电压向量图, 通过分析可知:

1) 图 3(a) 所示为过渡电阻值较小时,

$$U_{N'} > \frac{1}{2} U'_C, \text{ 即 } U'_B > U'_C。$$

2) 图 3(c) 所示为过渡电阻值较大时,

$$U_{N'} < \frac{1}{2} U'_C, \text{ 即 } U'_B < U'_C。$$

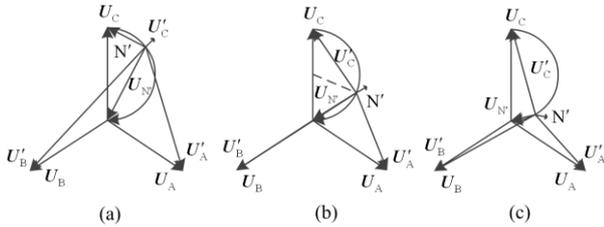


图 3 单相接地故障向量图

Fig. 3 Single phase earth fault vector diagram

由上述分析可知, 当发生单相接地故障时, 不能简单地认为电压最低相为故障相, 不同过渡电阻会有不同的电压数值。当过渡电阻值较小时, 该判据是有效的, 但是当发生高阻接地故障时, 会出现故障相滞后相为电压最低相, 此时会产生误判, 不能正确地选相。而本文提出的注入法选相则同样适用于高阻接地故障, 且准确率高, 不会产生误判。

1.2 高阻接地故障选相原理

不论配电网处于哪种接地方式下均可通过往中性点注入一零序电流 I_N , 进而柔性调控中性点零序电压, 计算各相的偏转角。以配电网谐振接地方式为例, 假定配电网中 C 相发生单相接地故障。

配电网单相对地绝缘参数导纳 Y_0 为

$$Y_0 = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 \quad (5)$$

由图 1 可知注入零序电流 I_N 与中性点零序电

压 U_N 的关系为

$$\begin{aligned} (E_A + U_N)Y_0 + (E_B + U_N)Y_0 + \\ (E_C + U_N)\left(Y_0 + \frac{1}{R_f}\right) = I_N - \frac{U_N}{j\omega L_p} \end{aligned} \quad (6)$$

取三相电源对称: $E_A + E_B + E_C = 0$, 则

$$I_N = U_N \left(3Y_0 + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{j\omega L_p} \right) + \frac{E_C}{R_f} \quad (7)$$

故障相电压为 $U_C = U_N + E_C$, 即有

$$I_N = U_C \left(3Y_0 + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{j\omega L_p} \right) - E_C \left(3Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right) \quad (8)$$

如果注入的电流取值为

$$I_N = -E_C \left(3Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right) \quad (9)$$

则相应的调控中性点零序电压为 $U_N = -E_C$, 则根据所测得的配电网对地参数可得偏转角 θ 为

$$\theta = \arg \left[\frac{I_N}{U_N} - \left(3Y_0 + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{j\omega L_p} \right) \right] \quad (10)$$

将式(7)代入式(10), 可得

$$\theta = \arg \left(\frac{E_C}{R_f U_N} \right) = \arg \left(-\frac{1}{R_f} \right) = 0^\circ \quad (11)$$

考虑一定的测量裕度, 当计算的偏转角满足 $-15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 时, 则 C 相为故障相, 否则重新假定另外两相为故障相, 相对应的改变注入电流, 再计算对应的偏转角。

2 柔性调控零序电压断线选相原理

2.1 单相断线故障机理分析

单相断线不接地故障, 故障相线断开但并不会实际接地, 可以等效理解为断线相上下游两边分别与大地之间有无穷大的过渡电阻, 由于是并联关系, 故障相断点两侧对地电阻仅取决于线路本身的对地电阻^[24-25]。值得注意的是, 故障相断点下游仍然有电压, 其对地阻抗并没有因为断线而损失, 实际上仍接入在零序回路中。

单相断线故障时的谐振接地配电网等效模型如图 4 所示, 在 C 相断线后, 由于 C' 侧的电容会产生电容电流, 这将使得 C' 侧中性点产生偏移电压。设其偏移电压为 $U_{0C'}$, 则 C' 侧的各相电压为

$$\begin{cases} U_{AC'} = E_A + U_{0C'} \\ U_{BC'} = E_B + U_{0C'} \\ U_{CC'} = E_C + U_{0C'} \end{cases} \quad (12)$$

由此得出其故障点两侧电压相量图如图 5 所示, 并且单相断线故障后各相电压与断线故障点位置有关, 在图中用虚线来表示两侧中性点电压的变化轨迹。

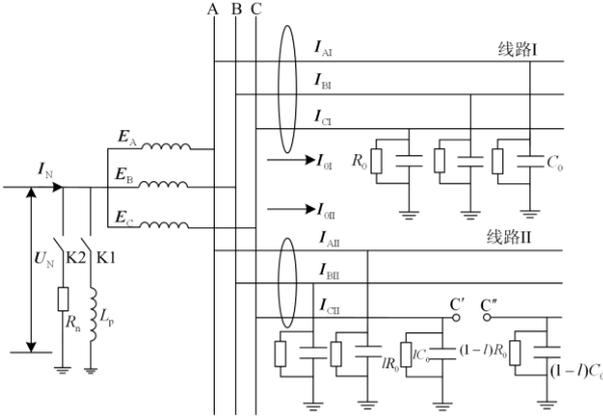


图 4 单相断线故障时配电网等效模型

Fig. 4 Equivalent model of the distribution network when the single phase break line fails

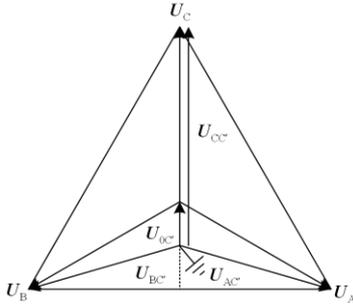


图 5 断线故障后各相电压向量图

Fig. 5 Voltage vector diagram of each phase after disconnection fault

断点位置越靠后, 零序电压和零序电流变化越小, 感知的难度也会提高很多, 常规零序电压阈值越限的检测原理面临极大的挑战。

2.2 单相断线故障选相原理

如图 4 所示, 当 C 相某一处发生单相断线故障时, 根据断线故障点的不同, C 相对地参数也随之改变, 为此可设一故障系数 $l \in (0, 1)$, 用于表征断线点位置。由图 4 可知, 断线故障下注入电流 I_N 与零序电压 U_N 的关系为

$$\begin{aligned} & (E_A + U_N)Y_0 + (E_B + U_N)Y_0 + \\ & l(E_C + U_N)Y_0 = I_N - \frac{U_N}{j\omega L_p} \end{aligned} \quad (13)$$

取三相电源对称: $E_A + E_B + E_C = 0$, 化简得到

$$I_N = U_N \left[(2+l)Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right] + (l-1)Y_0 E_C \quad (14)$$

故障相电压为 $U_C = U_N + E_C$, 即有

$$I_N = U_C \left[(2+l)Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right] - E_C \left(3Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right) \quad (15)$$

如果注入的电流取值为

$$I_N = -E_C \left(3Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right) \quad (16)$$

当改变中性点零序电压相角, 此时故障偏转角 θ 为

$$\theta = \arg \left\{ \frac{I_N}{U_N} - \left[(2+l)Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right] \right\} \quad (17)$$

将式(15)代入则有

$$\theta = \arg \left[(l-1)Y_0 \frac{E_C}{U_N} \right] = \arg(Y_0) = \alpha \quad (18)$$

综上, 可以先调控中性点零序电压分别与三相电压相角相同: $U_N = -E_A$ 、 $U_N = -E_B$ 、 $U_N = -E_C$, 此时对应的配电网导纳值分别为

$$\frac{I_N}{kE_A} = \left[(2+l)Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right] + (1-l)Y_0 e^{j120^\circ} \quad (19)$$

$$\frac{I_N}{kE_B} = \left[(2+l)Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right] + (1-l)Y_0 e^{-j120^\circ} \quad (20)$$

$$\frac{I_N}{kE_C} = \left[(2+l)Y_0 + \frac{1}{j\omega L_p} \right] + (1-l)Y_0 \quad (21)$$

再根据式(18)分别测算三种情况下对应的故障偏转角 θ , 考虑测量误差, 当偏转角满足 $\alpha - 15^\circ \leq \theta \leq \alpha + 15^\circ$ 时, 即可实现谐振接地配电网单相断线故障精准选相。

2.3 断线故障系数的确定

当配电网系统正常运行时, 向中性点注入电流 I_{in0} , 可得

$$I_{in0} = E_A(Y_0 + a^2 Y_0 + a Y_0) + U_{N0} \left(3Y_0 + \frac{1}{Z_N} \right) \quad (22)$$

式中, U_{N0} 为对应的中性点电压。而当配电网系统发生单相断线故障时, 向中性点注入电流 I_{in1} , 则有

$$I_{in1} = E_A(Y_0 + a^2 Y_0 + a Y_0 + a^i l) + U_{N1} \left(3Y_0 + \frac{1}{Z_N} \right) \quad (23)$$

式中: U_{N1} 为故障后注入电流对应的中性点电压; l 为上述提及的断线系数; $i = 0, 1, 2$ 分别表示 A、C、B 相发生断线故障。两式相减得

$$I_{in1} - I_{in0} = l(a^i E_A + 3YU_{N1}) + (U_{N1} - U_{N0}) \frac{1}{Z_N} - 3YU_{N0} \quad (24)$$

则故障系数 l 可确定为

$$l = \frac{I_{in1} - I_{in0} + 3YU_{N0} - (U_{N1} - U_{N0}) \frac{1}{Z_N}}{a^i E_A + 3YU_{N1}} \quad (25)$$

3 故障类型的辨识及选相实现流程

目前配电网对于高阻接地故障及单相断线故障尚无具体区分方法, 由上述两类故障选相原理可知, 在进行针对性注入电流之前, 可先根据测量到的配电网对地参数判别发生何种故障^[26-27]。由于发生高阻接地故障时系统电容不变, 而电网的对地电导会一定程度地增大; 而断线故障发生后电网对地电导和电纳均不变。因为与电网电导相关的绝缘参数是不平衡度和阻尼率, 两种故障都会导致系统的不平衡度变大, 而当阻尼率变大时则判定为高阻接地故障, 当阻尼率无变化时则判定为单相断线故障。

判别故障类型之后, 再进行故障选相。注入电流大小为一固定计算公式, 即式(9)和式(16), 在这种电流取值情况下的故障相电压 $U_c = 0$, 即故障相恢复电压恒为 0。并且注入的电流大小 I_N 与故障电阻、故障类型无关, 只需根据配电网中性点接地阻抗 Z_0 、故障相电源电动势 E_c 和配电网单相对地导纳 Y_0 来计算。

谐振接地配电网发生故障选相方法流程如图 6 所示。首先采集所需要的配电网参数, 获取调控零序电压的注入零序电流, 然后测量返回的零序电压值, 通过测算故障偏转角 θ 即可实现配电网的故障选相。

不同接地方式下的高阻接地故障和断线故障选相原理和上述原理一样, 仅系统的中性点对地阻抗不同, 即式(1)中的 Z_N , 将影响上述式子中对应的中性点支路电流值。例如当中性点不接地时, 等式(6)和等式(13)右边有关消弧线圈的因子项置为零, 当中性点经小电阻接地时, 将消弧线圈对应的电流值变为小电阻支路的电流值, 其余公式中的注入电流和偏转角公式相应变化即可。

4 现场试验和仿真验证

4.1 现场试验

为了进一步验证配电网发生高阻接地故障和单相断线故障时故障特征量微弱导致选相错误, 在 1:1 真型配电网实验室中进行了不同阻值的高阻接地故

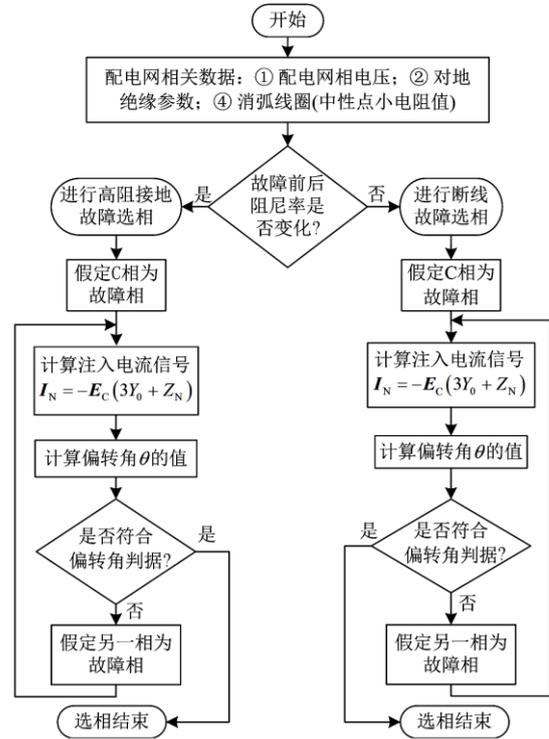


图 6 原理流程图

Fig. 6 Principle flow chart

障和不同位置的单相断线故障实验, 现场的试验接线如图 7 所示, 其中 QF1 断开, QF2-QF6 闭合。接地综合保护装置安装在 1 号母线上, 单相故障点选在 10 kV#5 电容线 307 的 C 相处, 然后通过图 7 中的 QF1 操作到不同的相别上。接地点的过渡电阻阻值大小依次通过金属接地、水阻接地、碎石接地、草地接地来表示。单相断线故障的断线位置则通过设置不同大小的线路电容来表示。然后记录系统的三相电压和零序电压。

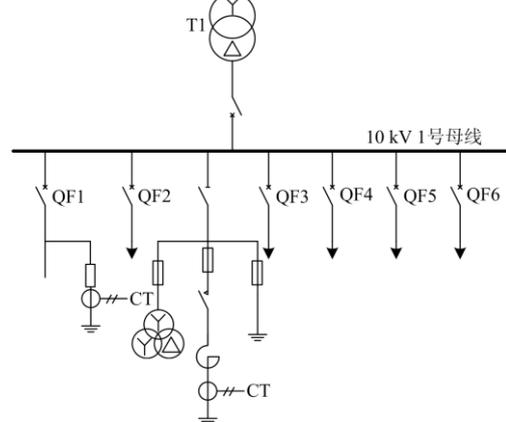


图 7 试验接线图

Fig. 7 Test wiring diagram

表 1 列出了不同接地故障时系统的三相电压值、零序电压值和接地点电流值。

表 1 不同接地情况试验结果

Table 1 Test results of different grounding conditions

接地情况	U_A/V	U_B/V	U_C/V	零序电压/V	接地电流/A
金属接地	10 299	10 204	102.4	6 021.2	18.2
水阻接地	7 716	10 600	3 122	5 133.8	14.6
草地接地①	6 037	9 725	4 324	3 881.5	10.9
草地接地②	4 942	8 686	5 277	2 899.5	10.1
碎石接地	7 831	10 655	3 063	5 235.4	15.0

从表 1 结果可以看出，当系统发生阻值较低的金属接地故障时，故障相 C 相电压最低。而当系统发生水阻、草地以及碎石接地时，零序电压变化范围较广，最低的为 2.9 kV，接地故障相电压也会相应地变化；在发生一般的低阻故障时，故障相的电压比非故障相电压低，但是在草地接地②的情况下，出现了 C 相电压比非故障相电压 A、B 相电压高的情况，由此验证了现有的选相方法并不适用于高阻接地故障，尽管可以常规地通过零序电压判断出接地故障，但要进一步进行选相判断还是存在一定难度的。

表 2 为 C 相发生单相断线故障后，在三种不同中性点接地方式下线路不同位置断线的零序电压变

表 2 不同位置断线零序电压占比结果

Table 2 Results of zero sequence voltage ratio of disconnection at different positions

断线位置	小电阻接地	不接地	消弧线圈接地
0	0.823%	4.845%	75.717%
0.05	0.780%	4.595%	71.805%
0.1	0.738%	4.345%	67.895%
0.15	0.695%	4.095%	63.986%
0.2	0.653%	3.845%	60.080%
0.25	0.610%	3.595%	56.175%
0.3	0.568%	3.345%	52.273%
0.35	0.526%	3.096%	48.374%
0.4	0.483%	2.846%	44.480%
0.45	0.441%	2.597%	40.591%
0.5	0.399%	2.349%	36.708%
0.55	0.357%	2.101%	32.836%
0.6	0.315%	1.854%	28.977%
0.65	0.273%	1.609%	25.137%
0.7	0.232%	1.365%	21.328%
0.75	0.191%	1.124%	17.568%
0.8	0.151%	0.889%	13.899%
0.85	0.113%	0.667%	10.416%
0.9	0.080%	0.473%	7.387%
0.95	0.061%	0.359%	5.604%
0.999 9	0.068%	0.400%	6.247%

化结果。零序电压占比为故障后零序电压与故障前零序电压的比值，图 8 为零序电压占比随断线位置变化图。

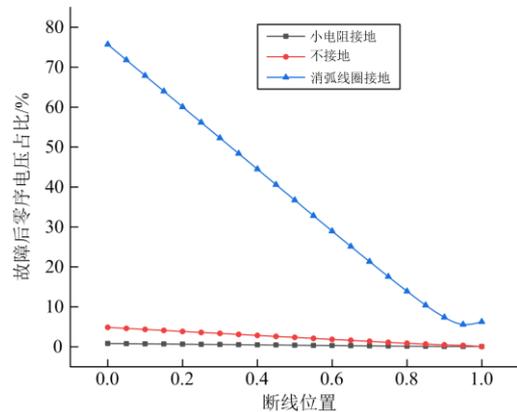


图 8 零序电压占比随断线位置变化图

Fig. 8 Proportion of zero sequence voltage changing with the position of break line

从表 2 和图 8 的结果可以看出，不管中性点接地方式为哪种，随着断线位置逐渐远离电源侧，零序电压逐渐降低，当末端断线时，零序电压与正常运行时无异，这就给断线故障的选相带来了巨大的挑战。并且当中性点经小电阻接地和不接地时，无论断点位置在首端还是末端，零序电压均较小，与电网正常运行时的零序电压相差无几。在这些情况下，当配电网发生单相断线故障时，以零序电压或零序电流越限告警故障的方法将告失效。

4.2 仿真验证

在 PSCAD 中搭建 10 kV 配电网模型，拓扑图如图 9 所示。接地变压器 Z 型接线，模型中性点可实现中性点经消弧线圈接地、小电阻接地、中性点不接地方式；模型共含 4 条出线，包括 2 条架空线路(单相对地电容 0.005 $\mu\text{F}/\text{km}$)、1 条电缆线路(单相对地电容 0.3 $\mu\text{F}/\text{km}$)、1 条混合线路。各线路对地参数如表 3 所示。

在不同接地方式下，设置不同的馈线对地参数，不同的接地系统对应不同的电容电流：中性点不接地系统的电容电流为 40 A；中性点经消弧线圈接地系统电容电流设置为 150 A，消弧线圈设为过补偿 -5%，消弧线圈等效电感为 0.122 6 H；经小电阻接地系统电容电流为 190 A，小电阻阻值为 10 Ω 。

设系统中性点接地方式为经消弧线圈接地，线路 L4 的 C 相在 0.1 s 时发生接地故障，过渡电阻值设置为 0~20 k Ω ，仿真结果如表 4 所示。限于篇幅，选取最高阻值 20 k Ω 各相偏转角进行仿真分析，偏转角波形图如图 10 所示。

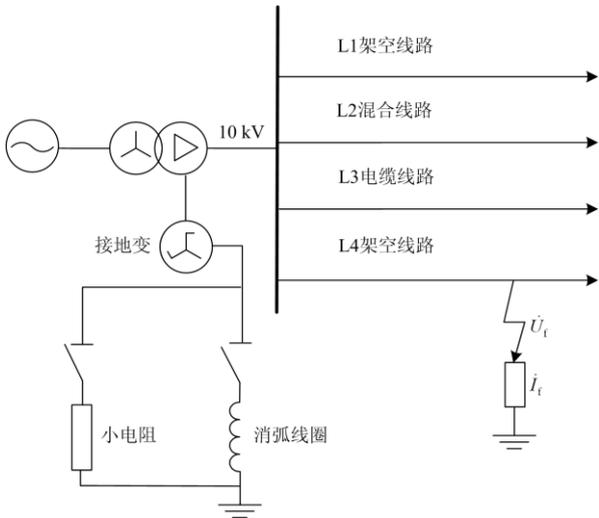


图9 仿真拓扑图

Fig. 9 Simulation topology

表3 馈线参数表

Table 3 Feeder parameters table

名称	性质	长度/ km	等效电 容/ μF	等效 电阻/ Ω	阻尼率
L1	架空线路	30	0.15	0.5×10^6	4%
L2	混合线路	100	9.35	0.0085×10^6	4%
L3	电缆线路	30	9	0.012×10^6	3%
L4	架空线路	20	0.1	0.8×10^6	4%

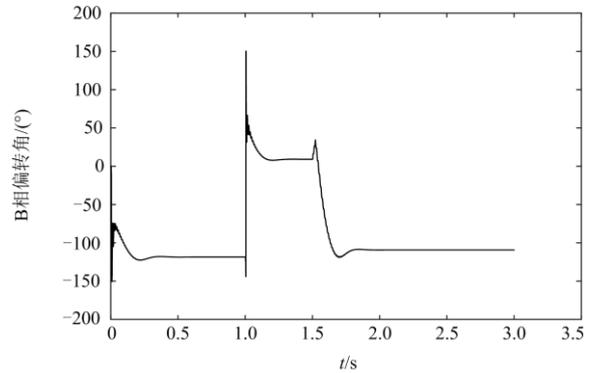
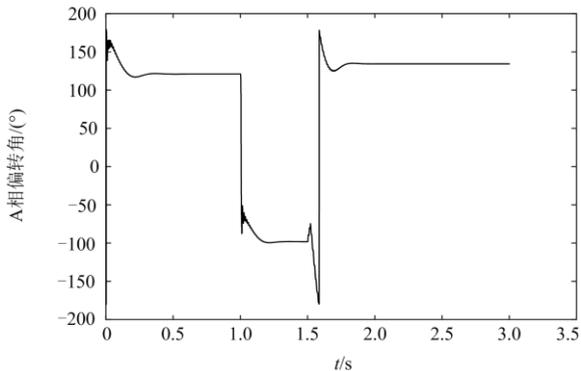
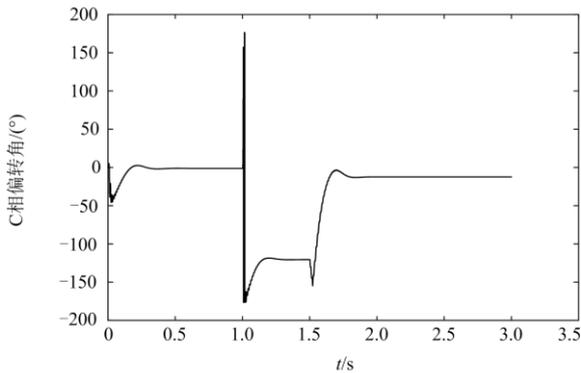
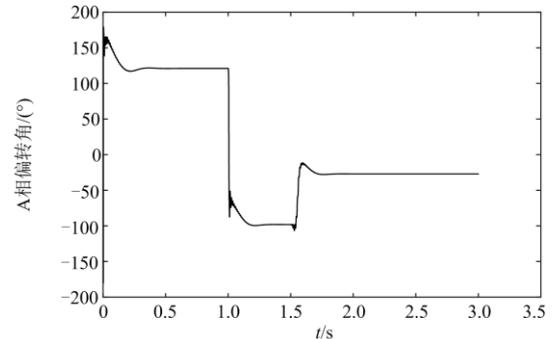
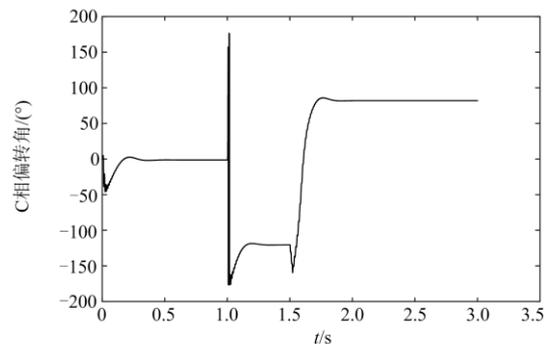


图10 过渡电阻为 20 k Ω 时各相偏转角波形

Fig. 10 Deflection angle waveform of each phase when transition resistance is 20 k Ω

从表4和图10可以看出,随着故障电阻的增大,故障相电压与中性点电压的偏转角也会随之增大,但是当过渡电阻为 20 k Ω 时偏转角仍在判据误差范围内。而非故障相电压的偏转角会相应的变化,因其与故障相的偏转角差值较大,故可实现精准的故障选相。

对于断线故障来说,由表3可知此时系统对地绝缘参数导纳相角为 88 $^\circ$;此时故障相偏转角应为 $73^\circ \leq \theta \leq 103^\circ$ 。设系统中性点接地方式为经消弧线圈接地,线路L4的C相在0.1s时发生接地故障,断线系数从0.3跨度到0.9,仿真结果如表5所示。限于篇幅,选取最末端短线即断线系数为0.9时各相偏转角进行仿真分析,偏转角波形图如图11所示。



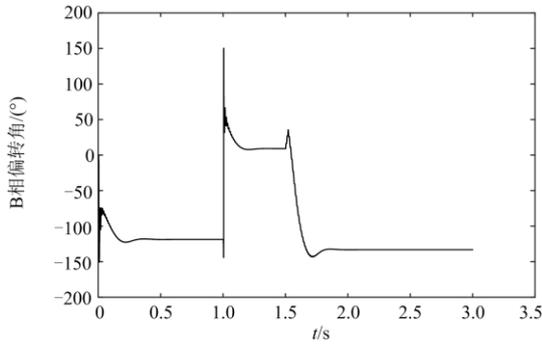


图 11 断线系数为 0.9 时各相偏转角波形

Fig. 11 Deflection angle waveform of each phase when line break coefficient is 0.9

从表 5 和图 11 可以看出,当发生末端断线故障即断线系数为 0.9 时,故障相的偏转角也在允许误差范围内,也能实现正确的故障选相。

综上,大量的 PSCAD/EMTDC 仿真结果表明,该方法可快速准确地选出 20 kΩ 故障电阻的单相高阻接地故障相及线路末端断线故障相,当配电网在不同位置发生故障、对地参数和故障类型不同以及中性点接地方式不同的情况下,不管发生高阻故障还是末端断线故障,均能使得故障相的偏转角在考虑了一定的测量误差判据范围内,成功实现故障选相。

表 4 高阻接地故障时对应的注入电流及偏转角

Table 4 Injected current and deflection angle corresponding to high resistance grounding fault

故障类型	过渡电阻/kΩ	各相返回零序电压			注入零序电流	偏转角			选相结果
		A 相	B 相	C 相		A 相	B 相	C 相	
高阻接地故障	0.2	0.991 2∠	0.988 9∠	0.989 6∠	30.109 6∠	120.010 6°	-120.000 9°	2.909 9×10 ⁻⁵	C 相
		-19.918 3°	-139.580 7°	-267.446 1°	117.650 6°				
	0.5	0.991 2∠	0.988 9∠	0.989 6∠	25.574 5∠	119.852 9°	-120.788 7°	-0.526 0°	C 相
		-18.129 6°	-138.462 6°	-266.168 3°	118.686 3°				
	1	0.991 2∠	0.988 9∠	0.989 6∠	17.342 1∠	122.725 3°	-118.854 6°	-2.268 1°	C 相
		-17.337 5°	-136.332 6°	-264.599 7°	121.357 7°				
	5	0.991 2∠	0.988 9∠	0.989 6∠	11.238 5∠	127.002 8°	-115.025 0°	-6.613 3°	C 相
		-10.688 9°	-129.354 2°	-253.305 4°	130.254 3°				
	10	0.991 2∠	0.988 9∠	0.989 6∠	5.257 7∠	129.769 4°	-113.031 2°	-8.680 3	C 相
		-1.150 6°	-120.027 4°	-242.362 2°	136.988 6°				
	15	0.991 2∠	0.988 9∠	0.989 6∠	1.889 5∠	131.000 7°	-110.976 4°	-11.002 5	C 相
		6.400 8°	-112.528 8°	-234.332 4°	145.048 9°				
20	0.991 2∠	0.988 9∠	0.989 6∠	1.111 6∠	134.137 6°	-108.649 7°	-13.985 6	C 相	
	12.085 7°	-106.866 4°	-228.406 2°	150.825 1°					

表 5 断线故障时对应的注入电流及偏转角

Table 5 Injected current and deflection angle corresponding to line break fault

故障类型	断线系数	各相返回零序电压			注入零序电流	偏转角			选相结果
		A 相	B 相	C 相		A 相	B 相	C 相	
断线故障	0.3	0.606 5∠	0.605 8∠	0.606 2∠	9.914 4∠	-18.869 9°	-142.897 9°	89.704 5°	C 相
		-0.011 8°	240.000 5°	119.977 2°	29.916 8°				
	0.5	0.606 5∠	0.605 7∠	0.606 2∠	6.004 6∠	-20.031 2°	-139.782 2°	86.567 4°	C 相
		-0.235 2°	240.563 2°	119.982 9°	56.095 9°				
	0.7	0.612 7∠	0.606 1∠	0.606 3∠	3.145 8∠	-23.129 9°	-138.124 5°	84.461 1°	C 相
		-0.328 6°	240.903 6°	120.005 8°	96.756 8°				
	0.9	0.615 2∠	0.606 3∠	0.606 5∠	2.152 2∠	-27.451 8°	-136.465 8°	81.989 5°	C 相
		-0.436 8°	241.236 5°	-120.368 6°	142.011 3°				

5 结论

为解决配电网单相高阻接地故障与线路末端断线故障的选相难题,本文提出了一种基于调控零序电压的配电网故障选相方法,感知配电网发生了单

相接地故障或单相断线故障时,根据测量到的对地参数来判别发生的是高阻接地故障还是断线故障。然后根据相关计算向配电网中性点注入零序电流,调控零序电压相角分别为配电网三相相电压相角,

利用注入零序电流及返回零序电压测算故障偏转角, 结合故障选相判据即可实现配电网故障选相。大量的 PSCAD/EMTDC 仿真结果表明该方法可快速准确地选出 20 k Ω 故障电阻的单相高阻接地故障相及线路末端断线故障相, 当配电网在不同位置发生故障、对地参数和故障类型不同以及中性点接地方式不同的情况下, 本文所提的方法均可准确选出故障相。为验证本文方法选相的精度和速度, 后续将在 10 kV 真型配电网实验室中进行实验, 尽快实现现场应用推广。

参考文献

- [1] 刘健, 张志华, 王毅钊. 基于电压信息的配电网断线故障定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 123-131.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, WANG Yizhao. Voltage information based line-broken fault location for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 123-131.
- [2] 黄鸣宇, 祁升龙, 芦翔, 等. 面向配网保护的集分联合馈线自动化控制方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 49-54.
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. Combined centralized and distributed control method for distribution network protection[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2020, 48(5): 49-54.
- [3] 金鑫, 薛永端, 彭振华, 等. 仅利用零序电流的谐振接地系统接地故障方向算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 164-170.
JIN Xin, XUE Yongduan, PENG Zhenhua, et al. Grounding fault direction algorithm using zero-sequence current in resonant grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 164-170.
- [4] 王玲, 邓志, 马明, 等. 基于改进视在阻抗的配电网故障定位方法及其应用[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 84-93.
WANG Ling, DENG Zhi, MA Ming, et al. Distribution network fault location method and its application based on improved apparent impedance[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 84-93.
- [5] 季涛. 中性点非有效接地系统行波故障测距技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [6] 徐志强. 基于瞬时功率的输电线路高阻接地故障选相[J]. 山西电力, 2020, 6(2): 1-5.
XU Zhiqiang. Phase selection of transmission line high resistance ground fault based on instantaneous power[J]. Shanxi Electric Power, 2020, 6(2): 1-5.
- [7] 管延龙, 薛永端, 徐丙垠. 基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 48(23): 74-81.
GUAN Yanlong, XUE Yongduan, XU Bingyin. High resistance fault direction detection method for resonant grounding system based on fault phase voltage polarization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 48(23): 74-81.
- [8] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 配电网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3815-3823.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics of high resistance ground fault in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3815-3823.
- [9] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [10] 屈刚, 李长凯. 配电网架空线路断线故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 35-39.
QU Gang, LI Changkai. Fault location of overhead line breakdown in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 35-39.
- [11] 王斐, 华煌圣, 商国东, 等. 单相断线故障对城市输电网的影响[J]. 广东电力, 2011, 24(7): 25-31.
WANG Fei, HUA Huangsheng, SHANG Guodong, et al. Influence of single-phase disconnection fault on urban transmission and distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(7): 25-31.
- [12] 杜雪, 欧阳金鑫, 龙晓轩, 等. 基于分布式电源电流变化率的主动配电网单相断线保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 48(22): 41-48.
DU Xue, OUYANG Jinxin, LONG Xiaoxuan, et al. Single-phase disconnection protection method for active distribution network based on current change rate of distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2021, 48(22): 41-48.
- [13] 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.
ZENG Xiangjun, HU Jingying, WANG Yuanyuan, et al. Restraining method of three-phase unbalanced overvoltage in distribution network based on flexible earthing technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 678-684.
- [14] 叶远波, 蔡翔, 谢民, 等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 96-103.
YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Study on fast phase selection method for single-phase grounding fault

- in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 96-103.
- [15] 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 phase selection of single-phase grounding fault of ungrounded system based on tracking measurement of ground parameters[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 81-85.
- [16] 王鹏, 张贺军, 徐凯, 等. 主动干预型消弧装置的附加电阻故障选相方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 180-186.
WANG Peng, ZHANG Hejun, XU Kai, et al. Phase selection method of additional resistance fault for active intervention arc extacker[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 180-186.
- [17] CHEN W, MALIK O P, YIN X G, et al. Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1134-1139.
- [18] 常仲学, 宋国兵, 王晓卫. 基于零序电压幅值差的配电网断线识别与隔离[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 135-139.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, WANG Xiaowei. Distribution network disconnection identification and isolation based on zero-sequence voltage amplitude difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 135-139.
- [19] XIAO Y, OUYANG J, XIONG X, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123.
- [20] 张林利, 曹丽丽, 李立生, 等. 不接地系统单相断线故障分析及区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 1-7.
ZHANG Linli, CAO Lili, LI Lisheng, et al. Fault analysis and section location of single-phase disconnection in ungrounded system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 1-7.
- [21] KANG Qibao, WEI Cong, WANG Mengxia, et al. Analyses and judgment methods of single-phase broken-line fault for loaded distribution line[C] // 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), October 25-28, 2016, Xi'an, China: 482-486.
- [22] MELÉNDEZ J, QUIROGA O, HERRAIZ S. Analysis of sequences of events for the characterisation of faults in power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 87: 22-30.
- [23] 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): 137-145.
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. New principle of fault arc elimination and feeding line protection based on flexible earthing control in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-145.
- [24] 曾祥君, 易文韬, 刘张磊, 等. 注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 77-80.
ZENG Xiangjun, YI Wentao, LIU Zhanglei, et al. A new technique for measuring distribution network capacitance current by precise resonance of injected signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [25] 薛永端, 陈梦琦, 曹丽丽, 等. 不接地系统单相断线故障电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1322-1333.
XUE Yongduan, CHEN Mengqi, CAO Lili, et al. Fault voltage analysis of single-phase disconnection in ungrounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1322-1333.
- [26] XU Y, LIU J, FU Y. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276.
- [27] GONZALEZ C, TANT J, GERMAIN J, et al. Directional, high-impedance fault detection in isolated neutral distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2474-2483.

收稿日期: 2021-05-19; 修回日期: 2021-07-20

作者简介:

曾祥君(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统微机保护与控制; E-mail: eexjzeng@qq.com

黄慧(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统微机保护与控制; E-mail: 747104883@qq.com

喻锐(1989—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统微机保护与控制。E-mail: 1393009168@qq.com

(编辑 魏小丽)