

DOI: 10.7667/PSPC180674

配电线路单相断线故障保护方法

康奇豹¹, 丛伟², 盛亚如², 王玥婷³

(1. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司, 河北 雄安 071700; 2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 3. 国网山东省电力公司烟台供电公司, 山东 烟台 264000)

摘要: 为了减小单相断线故障对供电质量造成的不良影响, 针对配电线路单相断线故障, 提出了一套系统的保护方法。利用电路原理和中性点电压偏移理论, 对简单断线故障和伴随接地的复杂故障情况下线路首末两端电压和流经线路的电流特征进行了分析, 总结了各电气量的变化规律, 提出了一组由电流判据和电压判据组成的单相断线故障判断和保护方法。研究了基于电压判据的断线故障类型及故障区段的判断方法, 进一步分析了不对称运行、互感器断线等异常情况对所提判据的影响和相应的改进方案。利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行了算例仿真, 结果验证了理论分析结果的正确性和断线故障保护方法的有效性。

关键词: 配电线路; 断线故障; 故障诊断; 断线保护

Protection methods of single-phase broken-line fault for distribution line

KANG Qibao¹, CONG Wei², SHENG Yaru², WANG Yueting³

(1. State Grid Xiongan New Area Power Supply Company, Xiongan 071700, China; 2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. State Grid Yantai Power Supply Company, Yantai 264000, China)

Abstract: In order to reduce the adverse effect caused by single-phase broken-line fault to the power supply quality, a systematic protection method is proposed for the single-phase broken-line fault of the distribution line. Using circuit principle and neutral point voltage shift theory, this paper analyses and summarizes the features of the voltages at both ends of the fault line and the current flowing through the fault line when single-phase broken-line fault with or without a grounding fault occurs. The judgement and protection method that consists of the current criterion and the voltage criterions for single-phase broken-line fault is proposed. The methods for judging the fault type and the fault location are studied based on the voltage criterions. The influences of abnormal operating status like asymmetry operation and transformer disconnection on the criterion and the corresponding protection methods are analyzed. Simulation is carried out in PSCAD/EMTDC, which ensures the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the protection methods.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877126).

Key words: distribution line; broken-line fault; fault diagnosis; fault protection

0 引言

配电线路位于电力系统的末端, 担负着为用户供电的重要责任。近年来, 由于气象灾害、导线过载和外力破坏等原因, 断线故障呈多发态势^[1]。断线故障会导致负荷侧三相电压、电流不再对称, 出现的负序、零序分量会对各类负荷特别是旋转设备

造成严重损害^[2]。此外断线故障常伴随接地故障形成复杂故障, 易导致火灾和人畜触电危害, 甚至发展为相间短路故障, 扩大停电范围。

配电线路断线故障的频发已经逐渐引起了人们的重视。文献[3-6]对于配电线路断线故障导致的电气量变化、尤其是各序分量的变化特征进行了分析, 但没有涉及断线故障判定方法; 文献[7-9]提出基于负序分量进行断线故障选线和定位, 但负序分量在配电网中的获取具有较大局限性; 文献[10-11]提出

基于小波变换的断线故障选线和定位方法,对数据采样和计算处理有较高要求;文献[12]利用梯形模糊数估计配变负荷变化,通过计算节点电流进行断线故障定位,对负荷功率有一定要求。现有断线故障判断方法在电气量的获取及处理方面存在较多限制,同时对不同运行情况的考虑不足。

断线故障类型较多,两相以上的断线故障均会造成线路三相电流缺失,对系统对称性影响较小,故障特征较明显。本文重点研究单相断线故障,包括单相断线简单故障和伴随接地的复杂故障,对线路两端的相电压和流经线路的相电流变化规律进行分析,提出了基于相电气量的单相断线故障保护方法,并利用 PSCAD/EMTDC 软件仿真验证理论分析的正确性及保护判据的可靠性。

1 配电线路单相断线故障电气量分析

由于中性点接地方式不同,配电线路发生断线故障后的电气量特征与输电线路相比会有所不同^[13-14]。图 1 为配电网简化结构图,AC 为系统电源, T 为变压器, L1 为故障馈线, L2 为其他非故障线路的等效线路, A 为断路器, B、C、D 为分段开关, 1~8 为分支开关。断线故障分析的等效电路如图 2 所示。

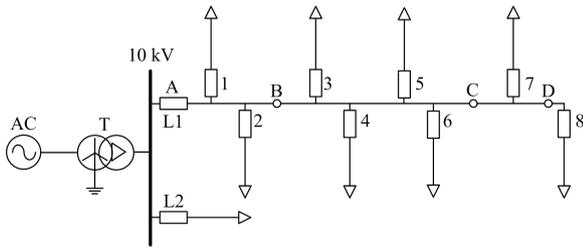


图 1 配电网简化结构图

Fig. 1 Simplified diagram of distribution network

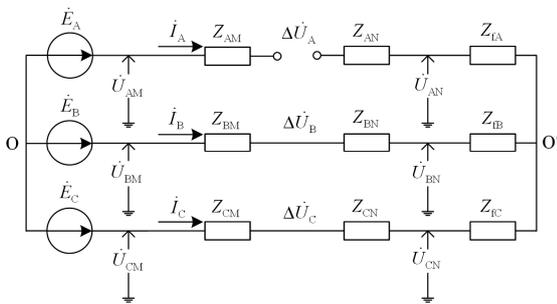


图 2 故障线路的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of fault line

图 2 中 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为系统电源电势,记电源侧为 M 侧,负荷侧为 N 侧,故障前相电压分别记为

U_M 、 U_N 。 \dot{U}_{AM} 、 \dot{U}_{BM} 、 \dot{U}_{CM} 为 M 侧母线处各相电压, \dot{U}_{AN} 、 \dot{U}_{BN} 、 \dot{U}_{CN} 为 N 侧各相电压, \dot{i}_A 、 \dot{i}_B 、 \dot{i}_C 为各相电流, Z_{AM} 、 Z_{BM} 、 Z_{CM} 为断点至 M 侧母线各相等效阻抗, Z_{AN} 、 Z_{BN} 、 Z_{CN} 为断点至 N 侧负荷各相等效阻抗, Z_{FA} 、 Z_{FB} 、 Z_{FC} 为 10 kV 侧等效负荷阻抗, O、O' 分别为 M 侧和 N 侧中性点,其对地电压分别为 \dot{U}_{OM} 和 \dot{U}_{ON} 。

1.1 电流变化特征分析

以 A 相断线为例,理想情况下其各相电流及各序电流为^[15]

$$\begin{cases} \dot{i}_A = 0, & \dot{i}_B = -\dot{i}_C \\ \dot{i}_{A0} = 0, & \dot{i}_{A1} = -\dot{i}_{A2} \end{cases} \quad (1)$$

理想情况下故障相电流变为 0,两非故障相电流大小相等,方向相反,无零序电流。

如果考虑故障点和测量点之间存在负荷分支,则故障相的电流降低但不会降至 0,两非故障相电流大小相等,相位差小于 180° 但大于 120°,越靠近故障点,故障电流特征越明显。

当系统的分布电容较大,发生 A 相断线同时一点接地的复杂故障时,接地侧的 A 相电流为系统非故障相电容电流之和,但此电流一般不大于 20 A,且表现为无功电流,与负荷电流有较大差别。对于正常相,电容电流对相电流相位的影响是一致的,而分布电容电流远小于负荷电流,可以认为相电流变化规律基本不受接地的影响。

1.2 电压变化特征分析

文献[15]对于三相对称非空载线路单相断线故障后电压的变化特征进行了分析,本文对一般系统发生单相断线故障后各相电压特性进行分析。

中性点不接地系统中没有固定的零电位参考点,本文从中性点偏移电压入手来分析线路两端各相电压的变化。M 侧中性点偏移电压 \dot{U}_{OM} 为

$$\dot{U}_{OM} = -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (2)$$

式中, Y_A 、 Y_B 、 Y_C 为 M 侧三相戴维南等效导纳。

N 侧中性点电压为

$$\dot{U}_{ON} = \dot{U}_{OM} - \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_A \quad (3)$$

不伴随接地故障时,实际的地电位总是偏向于对地导纳小的一相^[16-17],考虑负荷阻抗后,随着故障位置由电源侧出口处向线路末端移动,实际地电位沿虚线由上而下移动,电压相量图如图 3、图 4 所示。

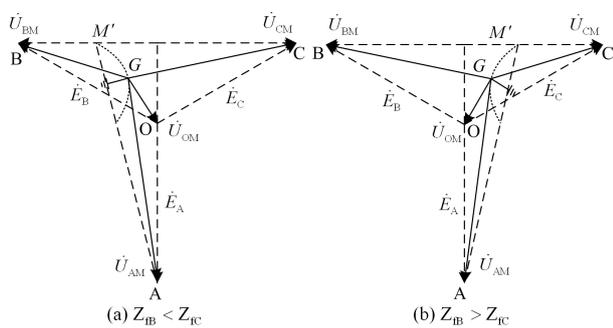


图 3 M 侧电压相量图

Fig. 3 Voltage phasor diagrams on M side

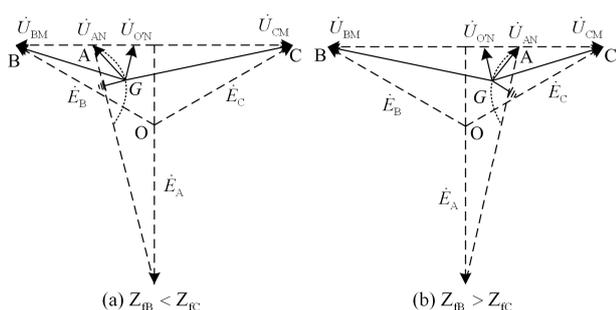


图 4 N 侧电压相量图

Fig. 4 Voltage phasor diagrams on N side

单相断线简单故障各相电压变化规律为：电源侧故障相电压升高，其相位略有偏移，非故障相中至少有一相电压降低，两非故障相电压的相位差增大，但不超过 180° ，出现零序电压；负荷侧故障相电压降低，最小降至 0，相位偏移大于 90° ，两非故障相电压同电源侧，出现零序电压；线路两端各相电压幅值与故障位置有关。

限于篇幅，下文仅以 $Z_{IB} < Z_{IC}$ 为例进行分析。

当发生 A 相断线且 M 侧接地的复杂故障时，金属性接地时 $\dot{U}_{OM} = -\dot{E}_A$ ，线路两侧电压相量图如图 5 所示。

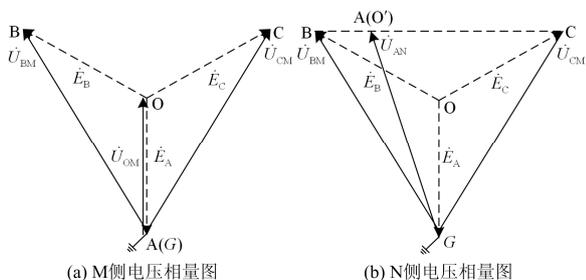


图 5 故障线路两端电压相量图

Fig. 5 Voltage phasor diagrams at both ends of the fault line

伴随电源侧单相接地后电压变化特征为：电源侧各相电压变化规律同单相接地故障；负荷侧故障

相电压幅值升高，一般大于 $1.5U_N$ ，非故障相电压同电源侧，出现零序电压；由于接地点的存在，故障位置不再影响电压的幅值。

单相断线且电源侧经过渡电阻接地时，电源侧故障特征同单相经过渡电阻接地故障，过渡电阻对三相电压的影响同线路对地电容大小有关，只有过渡电阻大到一定水平，才会造成三相电压不满足上述特征，但负荷侧电压依然会有较明显的变化，特别是故障相电压的相位变化超过 90° 。

当发生 A 相断线且 N 侧接地的复杂故障时，金属性接地时 $\dot{U}_{AN} = 0$ ，两侧电压相量图如图 6 所示。

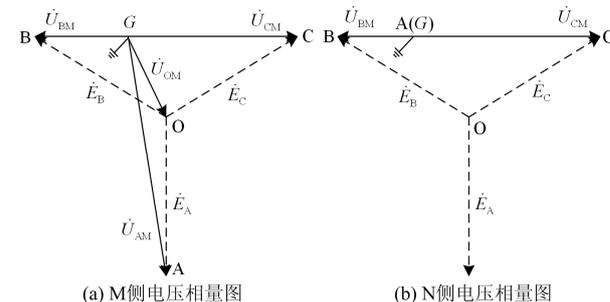


图 6 故障线路两端电压相量图

Fig. 6 Voltage phasor diagrams at both ends of the fault line

伴随负荷侧单相接地后电压变化特征为：电源侧故障相电压幅值升高，一般不小于 $1.5U_M$ ，两非故障相电压至少一相电压降低，且相位差增大至 180° ，出现零序电压；负荷侧故障相电压降至 0，两非故障相电压同电源侧电压；由于接地点的存在，故障位置不再影响电压的幅值。

单相断线且负荷侧经过渡电阻接地时，由文献 [3] 中的结论可知，过渡电阻只改变电压的幅值和相位差大小的变化，但不改变故障电压变化特征，即：电源侧故障相电压幅值升高，两非故障相电压至少一相电压降低，且相位差增大，出现零序电压；负荷侧故障相电压降低。

由图 3—图 6 可以发现，无论发生何种类型的单相断线故障，电源侧线电压均保持不变，不影响非故障线路上负荷的正常工作，但会出现幅值不等的零序电压，对系统绝缘有不利影响；负荷侧线电压不再对称，包含故障相的线电压幅值会降低，且两线电压相位差降低至 0，不包含故障相的线电压幅值不变，负荷无法正常工作，需要快速隔离故障。

2 单相断线故障判断与保护方法

考虑到配电网互感器的配置现状，基于序分量的保护判据存在较多应用限制，为了提高断线故障判据的适用性，同时简化电气测量及数据处理流程，

本文设计了基于相电压和相电流的单相断线故障判据与保护方法。

2.1 单相断线故障保护的启动

一般而言断线故障时电流特征变化明显, 可用构成启动判据, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta i_\varphi = i_\varphi(n) - i_\varphi(n-N) < 0 \\ \sum_1^k |\Delta i_\varphi| \geq k_{\text{set}} I_N \end{cases} \quad (4)$$

式中: Δi_φ 为各相电流采样值的变化量; $i_\varphi(n)$ 和 $i_\varphi(n-N)$ 为当前时刻及 1 个工频周期以前时刻的电流采样值; $\sum_1^k |\Delta i_\varphi|$ 为对连续 k 个 $|\Delta i_\varphi|$ 求和, $1 < k \leq N/2$; I_N 为线路额定电流; k_{set} 为整定门槛值系数, 可取 0.5。

式(4)中第一个条件是反应电流降低, 第二个条件要求电流降低的幅值要达到一定要求, 同时满足这两个条件才启动断线保护。同时可以通过上式判定 $\sum_1^k |\Delta i_\varphi|$ 最大的一相为断线相。

对于电流互感器不完全星形接线方式, 虽只能直接采集两相电流量, 但仍可近似推导另一相电流, 并且线路发生断线后, 一般至少两相电流降低, 不完全接线方式下电流启动判据仍可使用。

对于轻空载线路(负荷电流小于 20 A), 采用电流启动判据可能存在可靠性不足的问题。此时可选取零序电压为启动量, 启动判据为

$$3U_0 \geq U_{0,\text{set}} \quad (5)$$

式中, $U_{0,\text{set}}$ 为零序过电压门槛值, 可参照普通的零序过电压保护取定值。

此时应将系统中电压不一致的一相确定为断线相。

2.2 单相断线故障的检测

断线保护启动后, 需对是否发生断线故障以及断线故障位置做出判断, 本文选择易获取的相电流和相电压构成断线故障判据。其中电流判据为主判据, 用来判断是否发生断线故障; 电压判据为辅助判据, 主要用来确定是否接地和故障位置。当系统处于轻空载运行状态时, 直接采用电压判据作为断线故障的主判据。

以 A 相断线为例, 电流判据为

$$\begin{cases} \Delta I_A < 0 \\ |\Delta I_A| \geq I_{\text{set}} \\ \varphi_{\text{h.set}} < \arg \frac{\dot{I}_B}{\dot{I}_C} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ΔI_A 为断线相电流有效值的变化量; I_{set} 为有效值变化量门槛值; $\varphi_{\text{h.set}}$ 为过相位差整定门槛值, $120^\circ < \varphi_{\text{h.set}} < 180^\circ$, 下文同。

一般情况下, 根据式(6)就能够判断单相断线故障, 但在某些特殊情况下会存在误判或灵敏度不足的问题, 包括:

(1) 切除单相负荷致使电流降低超过整定值会导致误判。

(2) 对于轻空载运行的线路, 由于电流幅值较小, 灵敏度不足和误判的可能均存在。

式(6)只能判断是否发生单相断线故障, 无法进一步区分复杂断线故障类型并确定故障区段, 为此本文提出了基于相电压的辅助判据, 与式(6)所示的相电流主判据配合工作。

由于断点两侧电压变化规律不同, 因此需要考虑上述因素提出不同类型的电压判据。

A 相断线简单故障时电源侧电压满足式(7)。

$$\begin{cases} U_A \geq U_{\text{h.set}} \\ \min(U_B, U_C) \leq U_{\text{l.set}} \\ \varphi_{\text{h.set}} < \arg \frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_C} \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_A 、 U_B 、 U_C 为三相电压有效值; $U_{\text{h.set}}$ 、 $U_{\text{l.set}}$ 分别为过电压和低电压门槛值, 可根据实际系统故障情况进行调整, 下文同。各辅助判据中的电压门槛值需根据系统故障电压水平来确定, 可以整定统一的门槛值, 也可以根据不同故障类型和保护安装位置分别整定。

A 相断线简单故障时负荷侧电压满足式(8)。

$$\begin{cases} U_A \leq U_{\text{l.set}} \\ \min(U_B, U_C) \leq U_{\text{l.set}} \\ \varphi_{\text{h.set}} < \arg \frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_C} \end{cases} \quad (8)$$

A 相断线且电源侧接地的复杂故障, 电源侧电压变化同单相接地短路故障电压变化一致。

$$\begin{cases} U_A \leq U_{\text{l.set}} \\ \min(U_B, U_C) \geq U_{\text{h.set}} \\ \arg \frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_C} < \varphi_{\text{l.set}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\varphi_{\text{l.set}}$ 为低相位差门槛值, $60^\circ < \varphi_{\text{l.set}} < 120^\circ$, 可根据实际故障情况调整, 下同。

A 相断线且电源侧接地的复杂故障, 负荷侧电压满足式(10)。

$$\begin{cases} \min(U_A, U_B, U_C) \geq U_{h.set} \\ \arg \frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_C} < \varphi_{1.set} \end{cases} \quad (10)$$

对于 A 相断线且负荷侧接地的复杂故障, 电源侧电压及负荷侧电压的变化规律均与 A 相断线简单故障相同, 可以采用式(7)和式(8)来判断。对于这两种故障类型, 在某些情况下电压判据有重叠部分, 无法可靠区分故障类型, 但不影响最终的保护决策。

上述判据是以 A 相断线为例得出的, B 相或 C 相断线故障的判据形式类似, 不再赘述。

配电网中会出现一些特殊运行情况, 如负荷不对称、轻空载运行等, 需要考虑一些常见运行状态对以上保护判据的影响。

1) 互感器断线: 互感器断线时二次侧的电气量变化特征与线路断线故障有相似之处, 但也存在明显的区别。互感器断线故障相电气量明显减小, 但正常相幅值和相位差不变^[18-19], 单纯的互感器断线不会使断线保护误判。此外, 发生线路断线故障时一般会导致多个测点的电流同时发生相似的变化, 互感器断线只会导致某点的电气量发生变化, 据此能够对不完全接线方式的互感器断线和线路断线故障做进一步区分。

2) 非全相运行: 在配电网中, 除断线故障外线路的非全相运行大多是由开关操作导致的。配电网的开关基本都是三相操作, 一般不会出现长时间的非全相运行状态。如果由于开关故障等原因导致线路长时间非全相运行, 可视为断线故障。对于短时间非全相运行状态, 可设置适当的动作延时以躲过短时非全相运行可能造成的断线保护误动。

3) 负荷不对称: 负荷不对称多是由于单相用电造成的^[20], 容易出现在负荷分支线路上。当三相负荷不对称达到一定程度时, 三相电流会出现与断线故障相似的电流特征^[21], 但正常运行情况下不会出现电流大幅度的波动, 一般不会造成断线保护的误启动, 同时系统三相电压仍然基本对称, 不会满足本文的电压辅助判据, 所以负荷不对称运行不会对断线故障检测产生不利影响。

4) 轻空载运行: 若线路判定为轻空载运行状态, 不再采用电流启动和保护判据, 改采用式(5)作为启动判据, 式(7)一式(10)作为断线保护判据。虽然电压判据的灵敏度与故障位置有关, 但电源侧和负荷侧的电压判据灵敏度能够形成互补关系, 能够确保对断线故障的可靠判断。

2.3 单相断线故障的隔离

配电网结构复杂, 断线故障可能位于主馈线上, 也可能位于某个分支上, 在可靠判断故障的前提下还要做出合理的隔离策略。

2.3.1 分支线发生故障

若某分支线路发生单相断线故障, 分支出口处的测量点可以检测到明显的断线故障特征电气量, 如果分支出口开关为断路器, 应由分支断路器动作切除故障。此时变电站母线和故障分支间主馈线上的各测点也会感受到电气量的变化, 也可能会满足各自的启动定值。为了保证选择性, 主馈线上断线保护的动作时限 t_A 应比分支线上断线保护动作最大时限 t_{max} 高出一个时间阶梯 Δt , 即

$$t_A = t_{max} + \Delta t \quad (11)$$

如果分支配备的是负荷开关, 无需进行延时配合, 先由馈线出口的保护动作以最小延时切除整条馈线, 然后借助自动化系统通过比较分支与馈线各测量点处的电流特征判断故障是否位于分支。

2.3.2 主馈线故障

故障发生在主馈线上, 母线至故障点沿线各测量点都会感受到断线故障特征, 若存在分支负荷电流, 则越靠近故障点感受到的断线故障特征越明显, 而故障点下游所有测点感受到的故障特征相同。

若分段开关采用断路器, 为确保选择性, 可采取阶梯时限配合原则来确定不同位置处断线保护的動作时限, 越靠近电源, 動作时限越大。若只有馈线出口开关是断路器, 其他分段开关是隔离开关, 则馈线出口开关可设置最小動作延时, 然后依靠自动化系统根据电压变化确定故障所在区段并隔离故障, 然后恢复对非故障区域的供电。

2.3.3 基于相电压的断线故障区段判断

在判断出断线故障线路后, 需要对故障区段做进一步判断。故障点两侧相电压幅值变化如表 1 所示。

表 1 故障点两侧电压幅值变化特点

Table 1 Characteristics of voltage amplitude on both sides of fault point

故障类型	M 侧		N 侧	
	故障相	非故障相	故障相	非故障相
单相断线简单故障	升高	至少一相降低	降低	至少一相降低
单相断线且电源侧接地故障	降低	升高	升高	升高
单相断线且负荷侧接地故障	升高	至少一相降低	降低	至少一相降低

本文用以下逻辑公式来判断测量点相对故障点的位置, 以 A 相断线为例。

$$L = L_A \oplus (L_B \& L_C) \quad (12)$$

式中： L_ϕ 为电压幅值变化的判断逻辑，定义电压升高 $L_\phi=1$ ，电压降低 $L_\phi=0$ ； L 为三相电压总判断逻辑， $L=1$ 为电源侧， $L=0$ 为负荷侧。

结合网络拓扑结构，借助自动化系统对各测点的电压变化逻辑进行比较，逻辑值不同的两点为故障区段。

2.3.4 考虑 PT 不完全配置的断线故障区段判断

配电网中很多测量点无法得到序电压和完整的各相电压，常见的 PT 不完全接线方式有两种：(1) 一台电压互感器 I/I 形接线，可获得一路线电压如 U_{AC} ；(2) 两台电压互感器 V/V 形接线，可获得两路线电压如 U_{AB} 和 U_{BC} 。根据本文对电压变化规律的分析，可以采用线电压确定断线故障位置。

无论发生何种类型的断线故障，故障点上游电源侧的线电压不发生变化，而下游负荷侧的线电压会发生变化，包含故障相的两路线电压均会降低，不包含故障相的线电压不变。据此可以得到适用于 PT 不完全接线配置下的电压判据。

$$U_{f,\phi\phi} \leq kU_{N,\phi\phi} \quad (13)$$

式中： $U_{f,\phi\phi}$ 表示包含故障相的线电压； $U_{N,\phi\phi}$ 为额定线电压； k 为低电压整定系数，一般可取 0.8。

满足上式的测量点逻辑值判定为 0，不满足上式的测量点逻辑值为 1。同样逻辑值不同的两个测量点之间为故障区段。若只能测量到 U_{AC} ，则除了 B 相断线故障外均可通过上式确定故障区段；若能测量到 U_{AB} 和 U_{BC} ，任一相发生断线均能够可靠判断故障区段。但无法判断断线故障是否伴随接地。

3 算例仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建结构如图 1 所示的 10 kV 系统仿真模型，线路采用 π 模型，具体参数参见文献[10]，故障发生时间设置在 1 s 处。

本文针对不同位置、不同类型的断线故障，同时考虑了各种不正常运行状态进行了多种仿真，限于篇幅，将数据整合后进行展示分析。

图 7 所示为主馈线发生 A 相断线后各相电流的变化曲线。可见 A 相断线后，三相电流均减小，其中故障相变化最明显，变化幅度达 71.42%，两非故障相电流相位差增大至 163.00° 。

图 8、图 9 所示为主馈线 L1 上节点 4、5 之间发生 A 相断线简单故障、断线加接地复杂故障前后，M 侧 A 点与 N 侧 C 点两处的各相电压变化曲线图。

图 8 所示为 A 相断线简单故障前后，故障点两侧三相电压的变化曲线图。故障后 M 侧故障相电压

升高至 $1.23U_M$ ，两非故障相电压降低至 $0.91U_M$ ，相位差增大至 143.51° ，而 N 侧故障相电压降至 $0.28U_M$ 。

发生 A 相断线且负荷侧接地故障前后，故障点两侧各相电压变化趋势和图 8 中所示的趋势相同，但是变化幅度更大，M 侧故障相电压升至 $1.52U_M$ ，两非故障相电压降至 $0.86U_M$ ，相位差增大至 179.91° ，接近反向。N 侧故障相电压接近于 0。

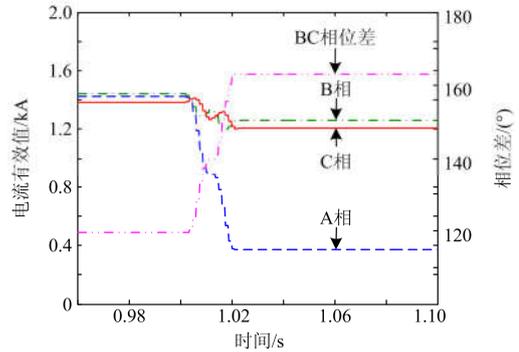
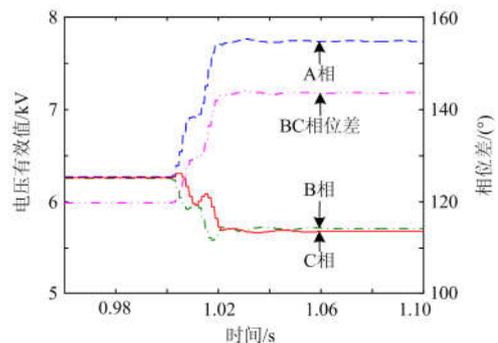
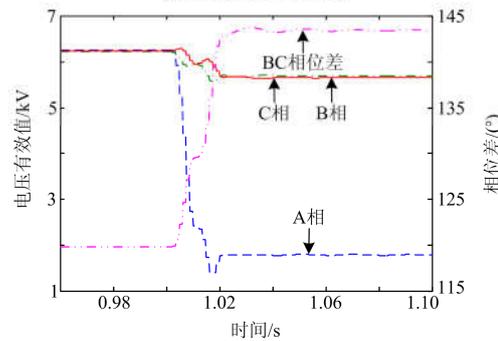


图 7 主馈线单相断线故障前后 A 处电流

Fig. 7 Current of A before and after single phase broken-line fault occurred on the main feeder



(a) A 处电压变化曲线



(b) C 处电压变化曲线

图 8 A 相断线简单故障前后 A、C 两处电压

Fig. 8 Voltage of A and C before and after phase-A broken-line fault

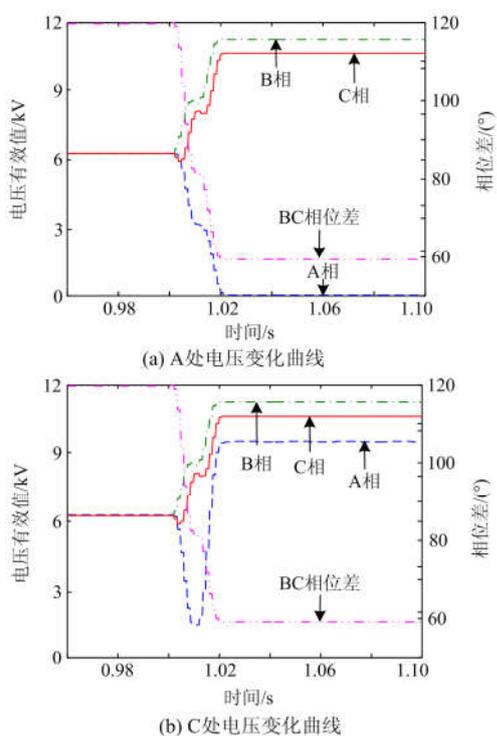


图 9 A 相断线且电源侧接地故障前后 A、C 两处电压
Fig. 9 Voltage of A and C before and after phase-A broken-line fault with source side on ground fault

图 9 所示为 A 相断线且电源侧接地故障, M、N 两侧相电压变化曲线, M 侧故障相电压降低接近于 0, 两非故障相电压分别升至 $1.79U_M$ 和 $1.69U_M$; N 侧故障相电压升至 $1.57U_N$ 。

图 10、图 11 所示为负荷不对称的分支线发生 A 相断线后的电流变化曲线和电压变化曲线。线路正常运行三相电流分别为 0.28 kA/0.35 kA/0.18 kA, BC 两相相位差约 130.00° , 电流判据存在误判的可能, 但正常运行时线路两端电压基本保持对称, 可以避免断线保护误判。

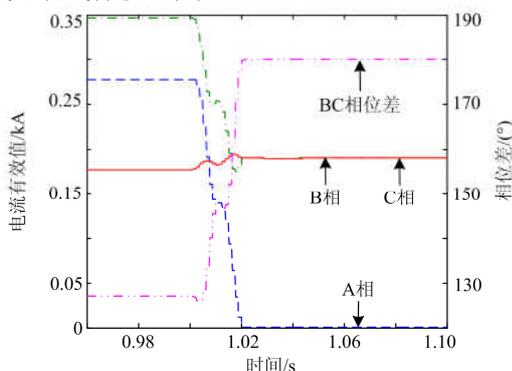


图 10 不对称运行分支线 A 相断线故障前后电流
Fig. 10 Current of asymmetric branch before and after phase A broken-line fault

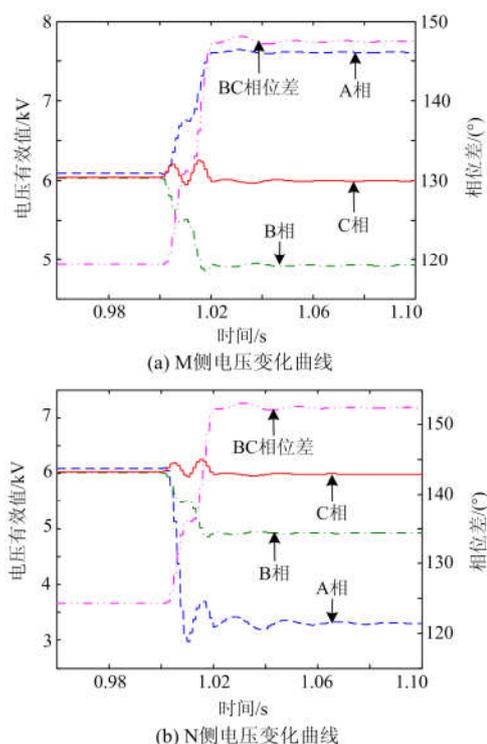


图 11 不对称运行分支线 A 相断线故障前后两端电压
Fig. 11 Voltage at both end of the asymmetric branch before and after phase A broken-line fault

发生 A 相断线后, 故障相电流几乎降至 0, 变化幅度接近 100%, 非故障相电流大小相等, 相位差增大至 179.86° 。M 侧故障相电压升至 $1.25U_M$, B 相电压降至 $0.82U_M$, C 相电压幅值基本保持不变, BC 两相电压相位差增大至 147.41° 。N 侧故障相电压降至 $0.54U_N$, 非故障相电压与 M 侧基本相同, 符合理论分析, 能够可靠判断出断线故障。

该分支发生 A 相断线且电源侧故障前后, 线路两端电压变化曲线和图 10 类似, 其 M 侧故障相电压降至 0, 两非故障相电压升至线电压水平, 相位差缩小至 59.91° ; N 侧故障相电压变化较图 10(b) 更加明显, 其幅值升至 $1.71U_N$ 。该分支发生 A 相断线且负荷侧接地故障前后, 故障点两侧三相电压变化趋势和图 11 中所示的趋势相同, 而变化幅度更大, M 侧故障相电压升至 $1.61U_M$, 两非故障相电压分别变为 $0.29U_M$ 和 $1.45U_M$, 且相位差增大至 179.91° , N 侧故障相电压接近于 0。

故障后电源侧线电压基本保持故障前的对称状态, 而负荷侧线电压不再对称, 如图 12 所示, 发生 A 相断线后 U_{AB} 、 U_{CA} 均有大幅度降低, 主馈线断线两者降至额定值的 50.05%, 不对称分支断线两者分别降至额定值的 37.49%和 62.31%。包含故障

相的线电压幅值有较大幅度的降低。

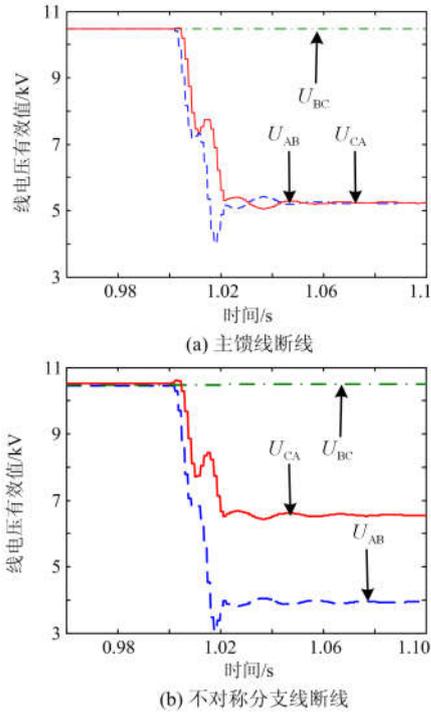


图 12 单相断线故障前后 N 侧线电压

Fig. 12 Line-line voltage at N side before and after single phase broken-line fault

由仿真结果来看，不论是对称还是不对称运行状态，发生单相断线故障后，故障点两侧电压变化情况同前文分析结果相吻合，印证了本文依据故障相幅值和非故障相相位差所设计的电压检测判据是有效的，同时利用本文所设计的方法可以判定出 $L=1$ 的测量点全部位于电源侧， $L=0$ 的测量点全部位于负荷侧，同时判定 L 不同的两个相邻的测量点之间发生了断线故障。

图 13、图 14 分别展示了发生 A 相断线且电源侧和负荷侧经过渡电阻接地故障前后线路两端的相电压变化曲线，其中过渡电阻为 500Ω 。在此过渡电阻水平下，线路两端的各相电压及零序电压变化趋势和前文分析一致，只要选取合适的整定值，电压辅助判据依然可以对单相断线加经过渡电阻接地复杂故障作出有效判断。此例可以说明，电压辅助判据有一定的耐过渡电阻的能力，但耐过渡电阻的水平 and 系统规模有关。

图 15 所示为轻空载分支线路单相断线简单故障线路两端零序电压变化曲线，其中故障距离占比为故障点至电源侧距离占线路总长度的百分比。故障前三相电压基本保持对称，发生单相断线简单故障后，故障位置越靠近电源侧母线，M 侧零序电压

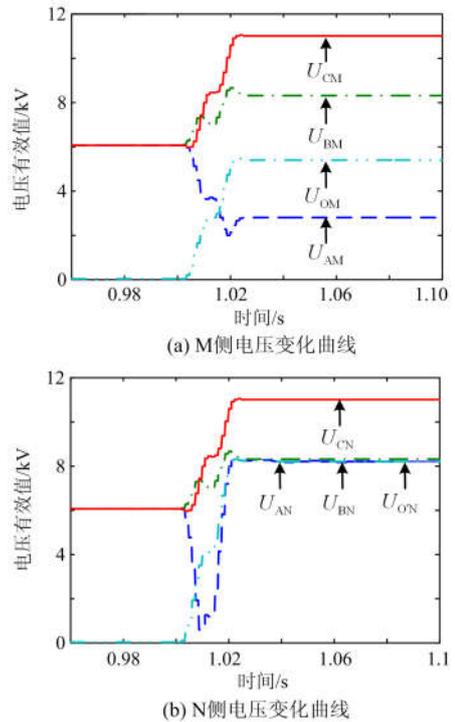


图 13 单相断线且 M 侧经过渡电阻接地故障前后两端电压

Fig. 13 Voltage before and after single-phase broken-line fault with M side on ground via a transition resistor

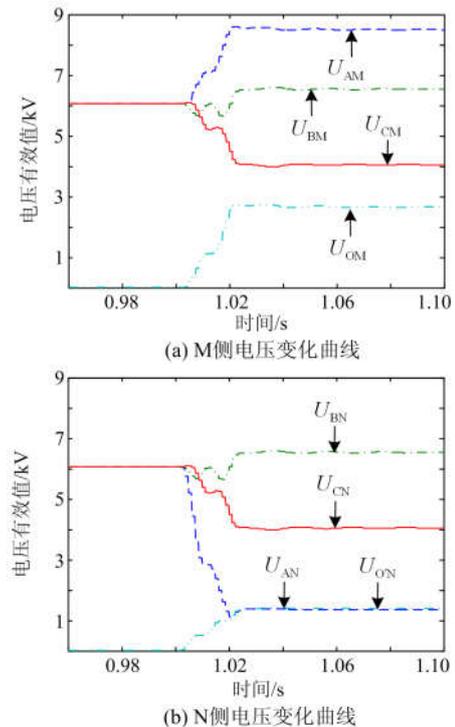


图 14 单相断线且 N 侧经过渡电阻接地故障前后两端电压

Fig. 14 Voltage before and after single-phase broken-line fault with N side on ground via a transition resistor

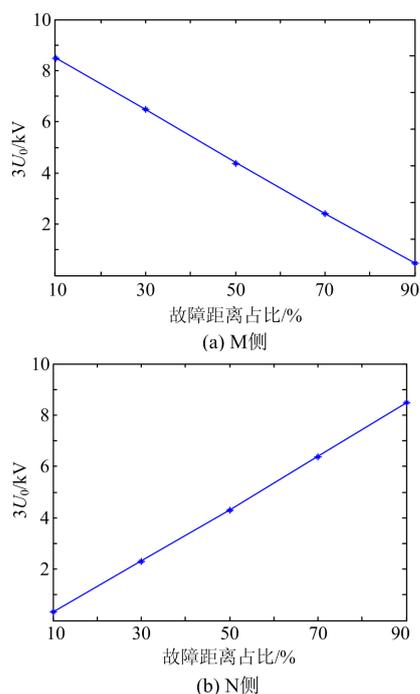


图 15 单相断线故障后零序电压随故障位置变化曲线

Fig. 15 Graph for zero sequence voltage changes with the fault position after single phase broken-line fault

幅值越大, N 侧零序电压幅值越小; 发生单相断线且电源侧接地故障后, M 侧 U_0 约为 U_M 大小, N 侧 U_0 约为 $1.5U_N$; 发生单相断线且负荷侧接地故障后, M 侧 U_0 约为 $0.5U_M$ 。仿真结果表明在线路轻空载运行状态下, 断线故障会产生较大的零序电压, 可以用作断线故障启动及保护判据。

4 结语

本文主要对配电线路单相断线故障特征进行了分析, 并提出了断线故障判断及保护方法, 结论如下:

1) 配电线路发生单相断线故障后, 负荷侧线电压不再对称, 会出现负序和零序分量, 影响负荷的正常工作, 需要尽快隔离故障。

2) 断线故障发生后电源侧线电压仍然对称, 不影响同一母线上其他非故障线路的正常供电, 但会出现零序电压, 对系统绝缘有不利影响。

3) 断线故障不会带来电流的突增, 但会导致某些相电压的升高, 因此对保护的快速性要求可稍低。

4) 依据故障线路各相电流、电源侧和负荷侧各相电压的变化规律, 能够对是否发生断线故障、断线故障类型及断点所在区段进行可靠判断。

5) 与采用序分量的断线保护判据相比, 基于相

电流、相电压的判据不仅实现方便, 而且能够较好克服互感器断线、非全相运行、系统不对称等异常情况的影响, 对于轻空载线路断线故障也能够正确判断。

6) 本文以单相断线故障为例进行了分析, 其分析方法和保护判据设计思路完全可以应用到多相断线场合, 具有可推广性。

参考文献

- [1] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources-a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [2] 谢俊, 李勇, 刘宏君, 等. 线路纵联零序方向保护误动机理分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 19-25.
XIE Jun, LI Yong, LIU Hongjun, et al. Mechanism analysis and countermeasure research on the misoperation of the zero sequence directional pilot protection of line[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 19-25.
- [3] 张慧芬, 桑在中. 架空线单相断线接地复故障分析[J]. 中国电力, 2013, 46(2): 65-71.
ZHANG Huifen, SANG Zaizhong. Analysis of single-phase grounding fault with line-broken on overhead transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(2): 65-71.
- [4] 李博通, 李永丽, 李洪波, 等. 同杆双回线断线故障复合序网分析法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 76-80.
LI Botong, LI Yongli, LI Hongbo, et al. New method for break-conductor fault analysis on double-circuit transmission lines based on interconnection of sequence networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 76-80.
- [5] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 小电流接地系统单相断线加接地故障的分析[J]. 继电器, 2004, 32(18): 6-9.
ZHANG Huifen, PAN Zhencun, SANG Zaizhong. Analysis of complex line breaking and grounding fault in the power system with neutral point indirectly grounded[J]. Relay, 2004, 32(18): 6-9.
- [6] 余水忠, 潘兰. 小电流接地系统的非短路故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 74-78.
YU Shuizhong, PAN Lan. Analysis of not-short circuit faults in neutral indirectly grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 74-78.
- [7] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 35-38, 43.
ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong, et al.

- Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 35-38, 43.
- [8] 马腾. 10 kV配电线路断线故障检测与定位研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- MA Teng. Line-break fault detection and location of 10 kV distribution line[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [9] 尤毅, 刘东, 李亮, 等. 基于负荷监测仪的10 kV架空线单相断线不接地故障区域判定[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 144-149.
- YOU Yi, LIU Dong, LI Liang, et al. Detection method based on load monitoring for 10 kV overhead line single-phase ungrounded open fault area[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 144-149.
- [10] 朱玲玲. 基于小波变换配电网单相断线故障选线与定位[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2009.
- ZHU Lingling. Based on wave-let transform single-phase-line-open fault selection and location of distribution system[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2009.
- [11] 朱玲玲, 张华中, 王正刚, 等. 基于小波神经网络单相断线故障选线和定位[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 12-17.
- ZHU Lingling, ZHANG Huazhong, WANG Zhenggang, et al. Single-phase open-line fault selection and location based on wavelet neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 12-17.
- [12] 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): 35-38.
- QU Gang, LI Changkai. Fault locating of non-grounding line break in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 35-38.
- [13] 弋东方. 关于 6~10 kV 电网中性点接地方式的讨论[J]. 电网技术, 1998, 22(7): 27-30.
- YI Dongfang. Research on neutral grounding in 6~10 kV power networks[J]. Power System Technology, 1998, 22(7): 27-30.
- [14] 郭丽伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.
- GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2340-2345.
- [15] KANG Qibao, CONG Wei, 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.
- [16] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 41-47.
- HE Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Reliability evaluation of different grounding cable networks on single-phase grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 41-47.
- [17] 陈禾, 陈维贤. 配电网中性点电位的作图分析[J]. 高压技术, 2004, 30(9): 22-23.
- CHEN He, CHEN Weixian. Graphic analysis of neutral potential in distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 22-23.
- [18] 吴红斌, 丁明, 宋金川, 等. 线路保护中PT断线判据的分析和改进[J]. 继电器, 2004, 32(3): 63-65.
- WU Hongbin, DING Ming, SONG Jinchuan, et al. Analysis and improvement of PT breaking criterion in line protection[J]. Relay, 2004, 32(3): 63-65.
- [19] 文明浩. 线路纵差保护CT二次断线判据分析[J]. 继电器, 2006, 34(18): 1-3.
- WEN Minghao. Analysis of second loop break criterion of CT used in differential protection of transmission line[J]. Relay, 2006, 34(18): 1-3.
- [20] 张五一, 张言滨, 刘华伟. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7): 24-27.
- ZHANG Wuyi, ZHANG Yanbin, LIU Huawei. Circuit loss analysis of three-phase unbalanced circuit in distribution network[J]. Relay, 2007, 35(7): 24-27.
- [21] 朱忆洋, 都洪基, 赵青春. 不对称参数同杆双回线选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 133-139.
- ZHU Yiyang, DU Hongji, ZHAO Qingchun. Research on phase selection for double-circuit lines on the same tower with asymmetrical parameters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 133-139.

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-08-30

作者简介:

康奇豹(1992—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: kangqibao@126.com

丛伟(1978—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: weicong@sdu.edu.cn

盛亚如(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: yarushengsdu@163.com

(编辑 张爱琴)