

基于采样值极性变化的主动干预式消弧装置故障选线新方法

古展基^{1,2,3}, 苏忠阳², 蔡泽祥³, 黄勇², 杨文勇⁴, 李凡²

(1. 深圳市国电科技通信有限公司, 广东 深圳 518109; 2. 广州穗华能源科技有限公司, 广州 510530; 3. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 4. 贵州电网有限责任公司毕节供电局, 贵州 毕节 551700)

摘要: 文中基于主动干预式消弧装置动作前后故障特征,通过理论分析零序电流相量变化与接地电阻、线路长度的函数非单调关系,证实以故障线路在快速开关合闸前后的突变量模最大为依据的单相接地选线方法,存在误选线路的可能。依据函数关系中极性分析结果,分别从硬件采样模块和软件选线方法这两个层面,提出了一种基于高频采样模块的零序电流暂态波形采样值极性识别选线法。该方法一方面利用霍尔传感器高频传变特性,研制成高频采样模块,另一方面,利用在接地故障时,仅故障线路零序电流极性相反这一故障特征,设计了经由采样值极性识别与投票的接地选线方案。为验证新选线方法有效性,通过在PSCAD/EMTDC搭建仿真系统,并在1:1真型试验场中,搭建典型工况模拟故障场景进行试验。仿真和试验结果均表明了新选线算法的有效性,且有一定的工程应用价值。

关键词: 配电网; 单相接地; 主动干预式; 高频采样; 极性识别

Novel Fault Line Selection Method for Active Intervention Arc Suppression Device Based on Polarity Change of Sampled Values

GU Zhanji^{1,2,3}, SU Zhongyang², CAI Zexiang³, HUANG Yong², YANG Wenyong⁴, LI Fan²

(1. China Gridcom Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518109, China; 2. Guangzhou Smart Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510530, China; 3. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 4. Bijie Power Supply Corporation of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guizhou Bijie 551700, China)

Abstract: Based on the fault characteristics before and after operation of the active intervention arc suppression device, in this paper the non-monotonic relationship between the zero sequence current phasor variation and both the grounding resistance and the line length is analyzed theoretically. It is thereby confirmed that the single-phase grounding fault line selection, which is based on the criterion of the maximum variation magnitude of the fault line before and after the fast switching operation, may result in incorrect line selection. Based on the polarity analysis result derived from the function relationship, this paper proposes a novel line selection method that identifies the polarity of sampled zero-sequence current transient waveform using a high-frequency sampling module. The proposed method is systematically realized through improvements at both the hardware sampling stage and the software algorithmic level. On the one hand, the high frequency sampling module is developed by using the high frequency transmission characteristic of Hall sensor. On the other hand, by utilizing the fault characteristic that only the zero-sequence polarity of the faulty line is reserved during a ground fault, a grounding line selection scheme is designed based on polarity identification of sampled values and a voting mechanism. For verifying the effectiveness of the novel line selection method, a simulation system is built in PSCAD/EMTDC, and a simulation fault scene under typical working conditions is constructed in a 1:1 full-scale test field for test. Both Simulation and experimental results

收稿日期:2026-04-10; 修回日期:2026-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51577073);中国南方电网公司科技项目(060700KK52170016);广东省重点领域研发计划项目(2019B111109002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51577073), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company(060700KK52170016), Key - area Research and Development Program of Guangdong Province (2019B111109002).

show not only the effectiveness of the novel line selection algorithm, but also its engineering application value.

Key words: distribution network; single-phase grounding; active intervention type; high-frequency sampling; polarity identification

0 引言

中国 10 kV 配电网的中性点接地方式主要采用不接地、消弧线圈接地、小电阻接地^[1-4]。以上 3 种接地方式由于自身的技术路线缺陷,均难以在城乡等架空线路较多的区域进行广泛应用。中国城郊及农村地区,10 kV 线路很大部分采用架空导线为主,单相接地故障率高,接地点跨步电压和接触电压对行人安全造成威胁、间歇性弧光接地对设备安全危害大,多数变电站系统的电容电流约在 2~10 A 范围,小电流选线跳闸困难,是主动干预式消弧装置(下称消弧装置)应用的良好场景之一。近年来,一种基于快速开关合闸实现电压型消弧的消弧装置^[5-6]在 10 kV 配电网应用,这种基于快速开关合闸的电压型消弧方式取得了良好的消弧和人身安全防护效果^[7-11]。

但基于零序电流相量突变的选线算法^[12-14],在实际应用中存在误选的可能。

文中将从现场运行的主动干预式消弧装置为背景,根据现场故障运行数据实际情况,理论分析现有相量突变算法的问题,从而分别从硬件采样模块和软件选线方法两方面,提出了一种基于高频采样模块的零序电流暂态波形采样值极性识别选线的新方法,并验证方法有效性。

1 现场运行数据初步分析

2022 年在某地区的两个变电站内投运消弧装置,采用了基于快速开关合闸前后的故障线路零序电流相量突变量的模为最大的选线算法。两个变电站 10 kV 电压等级均为单母线,10 条线路。消弧装置接入见图 1。

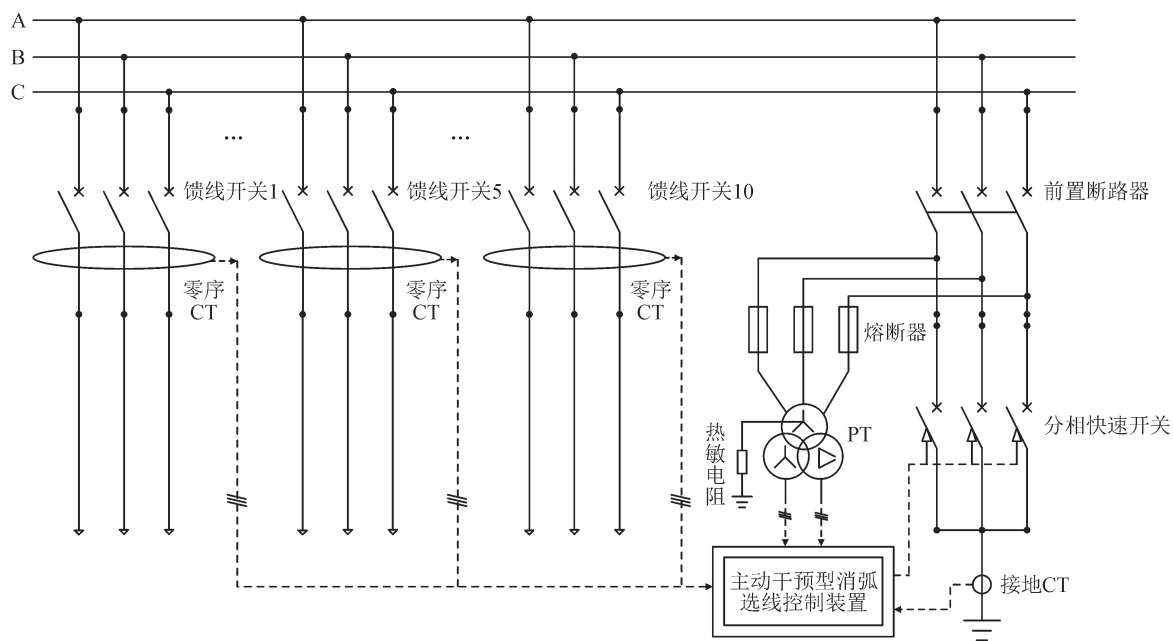


图1 消弧装置接入 10 kV 母线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of arc suppression device connected to 10 kV bus

2023 年发生 3 起比较典型的接地故障事故,当时错误选线结果上报,后经调度“拉路”选线确定真实的故障线路。故障录波见图 2-4。

从图 2-4 中分别计算各线路零序电流在开关消弧装置启动后,快速开关合闸前一周波的有效值,以及快速开关合闸后一周波的有效值。记录实际故障线路和现场运行选线算法判断的故障线路,见表 1。

可见,基于快速开关合闸前后的故障线路零序电流相量突变量模为大小的选线算法,出现了误选

故障线路的情况。

2 零序电流相量突变过程理论分析

假设故障线路经过渡电阻 R_f 接地,忽略绝缘泄露电导,并设三相对地电容对称,即 $C_A=C_B=C_C=C$ 。

当 A 相接地时,线路各相对地导纳为^[15-17]

$$\begin{cases} Y_A = \frac{1}{R_f} + j\omega C \\ Y_B = Y_C = j\omega C \end{cases} \quad (1)$$

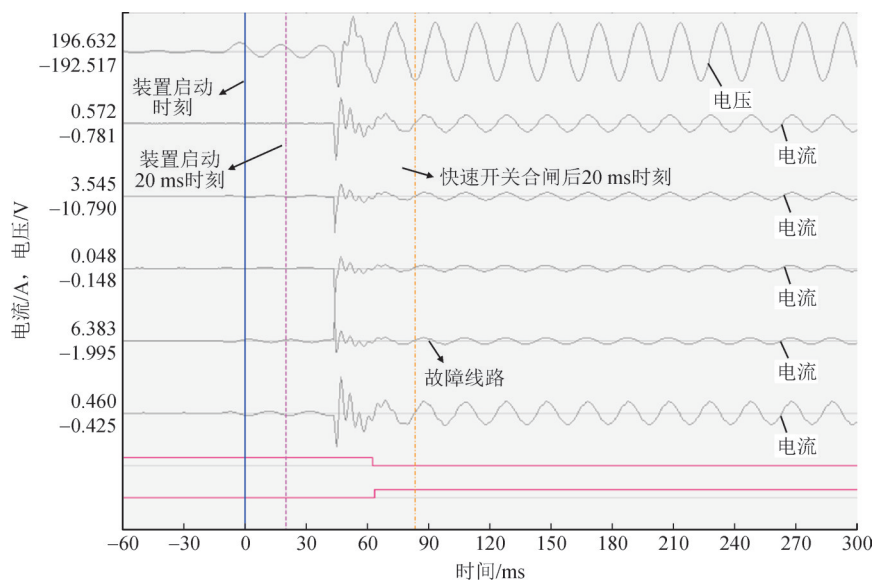


图2 断线接水泥地接地故障录波波形

Fig. 2 Recording waveform of a broken wire connected to a cement ground fault

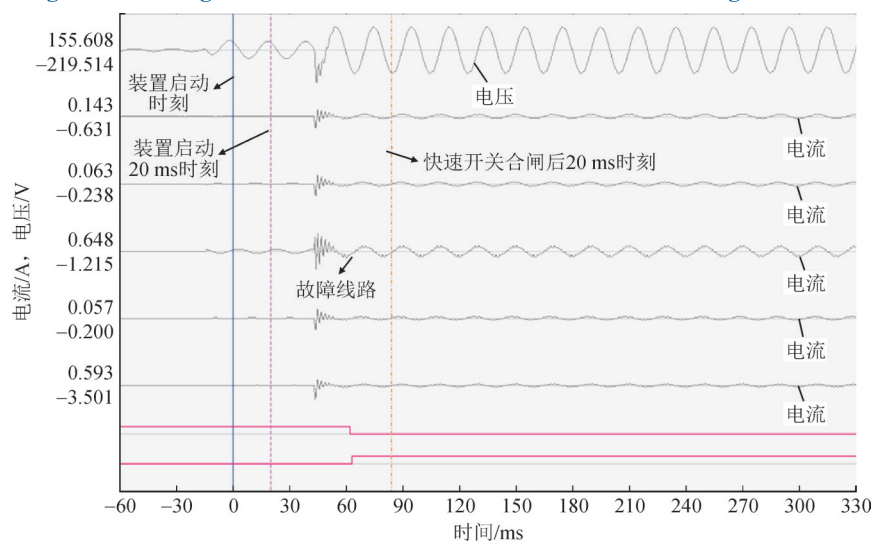


图3 电阻接地(架空线路)故障录波波形

Fig. 3 Resistance grounding(overhead line) fault recording waveform

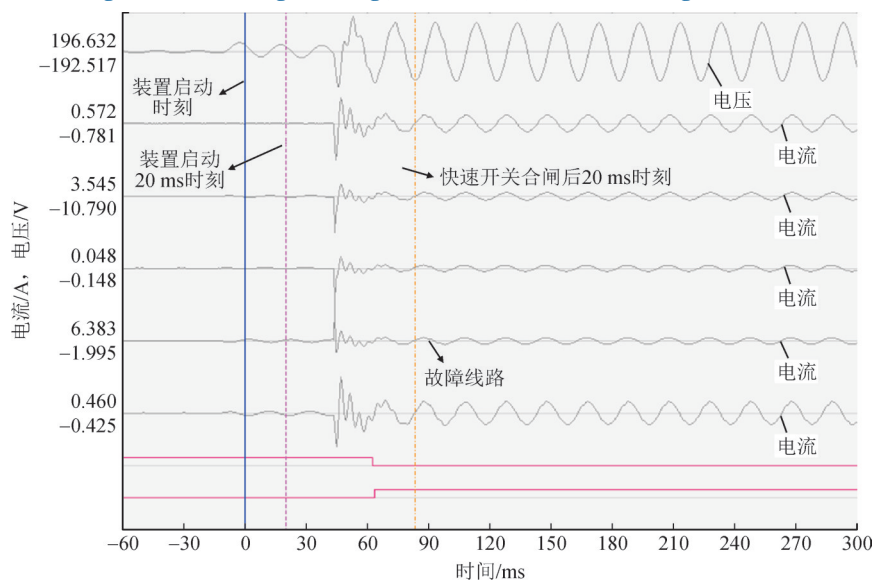


图4 电阻接地(混合线路)故障录波波形

Fig. 4 Resistance grounding(mixed circuit) fault recording waveform

表1 运行线路单相接地故障时零序电流合闸前后有效值

Table 1 Effective value of zero sequence current before and after closing when single-phase grounding fault occurs in operating line

实际故障线路	采样线路	故障启动后一周波	故障相接地开关合闸后一周波	各线路零序电流相量变化	零序电流相量突变法选线结果
龙独线	龙安线	0.109 A $\angle$ 130.56°	0.766 A $\angle$ -47.68°	0.760 A $\angle$ -140.50°	龙安线
	龙独线	0.190 A $\angle$ -32.63°	0.014 A $\angle$ -46.04°	0.176 A $\angle$ 31.57°	
	龙青线	0.075 A $\angle$ -173.68°	0.503 A $\angle$ -45.15°	0.553 A $\angle$ -140.94°	
	龙黑线	0.012 A $\angle$ 143.79°	0.100 A $\angle$ -45.17°	0.102 A $\angle$ -141.47°	
龙独线	龙藏线	0.003 A $\angle$ -117.44°	0.010 A $\angle$ 6.33°	0.011 A $\angle$ 172.15°	龙黑线
	龙独线	0.055 A $\angle$ 35.50°	0.125 A $\angle$ -12.64°	0.077 A $\angle$ 176.60°	
	龙青线	0.002 A $\angle$ -92.57°	0.007 A $\angle$ 18.88°	≈ 0	
	龙黑线	0.034 A $\angle$ -139.10°	0.098 A $\angle$ -3.09°	0.125 A $\angle$ 172.17°	
龙青线	龙安线	0.171 A $\angle$ -131.16°	0.775 A $\angle$ 6.38°	0.884 A $\angle$ 177.23°	龙安线
	龙独线	0.002 A $\angle$ -84.12°	0.009 A $\angle$ 20.24°	≈ 0	
	龙青线	0.198 A $\angle$ 50.61°	0.412 A $\angle$ 16.25°	0.272 A $\angle$ 172.05°	
	龙黑线	0.020 A $\angle$ -122.37°	0.101 A $\angle$ 8.67°	0.111 A $\angle$ 179.14°	

这时中性点对地电压为

$$U_0 = -\frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = -\frac{1}{1 + j3\omega CR_f} U_A = \beta U_A \quad (2)$$

$$\beta U_A = U_A e^{j(\pi-\varphi)} \cos \varphi$$

式(2)中, $\beta = -\frac{1}{1 + j3\omega CR_f}$, β 为系统单相接地时中性点位移电压 U_0 与相电压 U_{ph} 的比值, 称为接地系数。当 $R_f = 0$ 时, $|\beta| = 1$ 时, 即上述的金属性接地情况; 当 R_f 为有限数值时, $|\beta| < 1$ 。 φ 为零序相角, 可推导 $\tan \varphi = 3\omega CR_f$ 。

此时, 单相接地故障时全相电压为^[16-17]

$$\begin{cases} U'_A = U_A + U_0 = U_A [1 + e^{j(\pi-\varphi)} \cos \varphi] \\ U'_B = U_B + U_0 = U_A a + U_0 = U_A \left[e^{-j\frac{2\pi}{3}} + e^{j(\pi-\varphi)} \cos \varphi \right] \\ U'_C = U_C + U_0 = U_A a^2 + U_0 = U_A \left[e^{-j\frac{4\pi}{3}} + e^{j(\pi-\varphi)} \cos \varphi \right] \end{cases} \quad (3)$$

假设母线共有 n 条出线, 其中 1 号线路的 A 相发生单相接地故障, 在快速开关合闸前, 除故障线路故障相外所有线路的电容电流均经大地流入故障点, 此时 1 号线路(故障线路)的三相电流分别为

$$\begin{cases} I_{1A} = I_{load1A} - I_{C1A} \\ I_{1B} = I_{load1B} + I_{C1B} \\ I_{1C} = I_{load1C} + I_{C1C} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: I_{load1A} 、 I_{load1B} 、 I_{load1C} 为 1 号出线中三相的负荷电流; I_{C1A} 、 I_{C1B} 、 I_{C1C} 为三相的电容电流。

故障线路的零序电流 I_{01} 为

$$I_{01} = \frac{1}{3}(I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}) = \frac{1}{3}(I_{load1A} + I_{load1B} + I_{load1C}) + \frac{1}{3}(I_{C1B} + I_{C1C} - I_{C1A}) \quad (5)$$

1 号线路 A 相流过的电容电流为其他所有线路电容电流的总和。即

$$I_{C1A} = I_{C1B} + I_{C1C} + \sum_{i=2}^n (I_{CiA} + I_{CiB} + I_{CiC}) \quad (6)$$

在中性点不接地系统中发生单相接地故障后, 负荷电流基本不受影响, 略去负荷不平衡影响, 求 I_{01} 。等效电路见图 5。

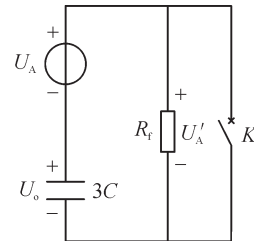


图5 不接地系统单相接地故障时等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of single-phase ground fault in ungrounded system

故障后快速开关合闸前

$$I_{01} = -\frac{1}{3} \sum_{j=2}^n (I_{CjA} + I_{CjB} + I_{CjC}) = -\frac{1}{3} \sum_{j=2}^n \omega C L_j \cdot (U_A + U_B + U_C) = -\omega C U_0 \sum_{j=2}^n L_j = \beta U_A \omega C \sum_{j=2}^n L_j \quad (7)$$

式(7)中, L_j 为 j 号线路长度。

由式(7)可知, 故障线路在快速开关合闸前零序电流受除其自身以外的其它线路长度和接地电阻影响。

快速开关合闸后(旁路故障点, 电流大部分被转移至消弧柜内), 故障线路零序电流 I'_{01} 可近似估算为

$$I'_{01} = \omega C L_1 U_A \quad (8)$$

由式(8)可知, 故障线路在快速开关合闸后零序电流受其自身容性电流和零序电压影响。

对两者取矢量差 Δ_1 , 即

$$\Delta_1 = I_{01} - I'_{01} = \beta U_A \omega C \sum_{j=2}^n L_j - \omega C L_1 U_A = \omega C U_A (\beta \sum_{j=2}^n L_j - L_1) \quad (9)$$

由式(9)可知,故障线路零序电流在快速开关合闸前后的突变量与系统的接地电阻、线路长度和分布有关系,突变量模大小无明显函数单调性。

在故障相合闸前后电容电流通路发生改变,等效电路见图6。

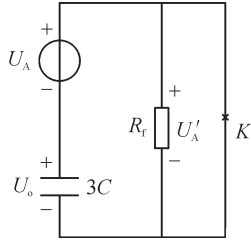


图6 消弧装置接地开关合闸后等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit after arc suppression device grounding switch is closing

在故障后快速开关合闸前, i 号非故障线路零序电流 I_{0i} 为

$$I_{0i} = I_{0iB} + I_{0iC} = \omega C L_i U_0 = \omega C L_i \beta U_A \quad i \in \{2, 3, 4, \dots, n\} \quad (10)$$

快速开关合闸后, i 号非故障线路零序电流 I'_{0i} 为

$$I'_{0i} = \omega C L_i U_A \quad i \in \{2, 3, 4, \dots, n\} \quad (11)$$

式(10)、(11)中, $\{2, 3, 4, \dots, n\}$ 为非故障线路集合。

两者取矢量差 Δ_i , 即

$$\Delta_i = I_{0i} - I'_{0i} = \omega C L_i U_0 - \omega C L_i U_A = \omega C L_i U_A (\beta - 1) \quad (12)$$

由式(12)可知,非故障线路零序电流突变量模大小在快速开关合闸前后无明显函数单调性,但取决于接地系数 β 。

故障线路和非故障线路在快速开关合闸前后的突变量的相量差 Δ 为

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_i = \omega C U_A (\beta \sum_{j=2}^n L_j - L_1) - \omega C L_i U_A (\beta - 1) = \omega C U_A (\beta \sum_{j=2, j \neq i}^n L_j - L_1 + L_i) \quad (13)$$

由式(13)可知,故障线路和非故障线路在快速开关合闸前后的突变量相量差与系统的接地电阻、系统的线路长度和分布有关系,无明显函数单调性,以突变量模大小进行选线,容易误选线路。

3 主动干预式消弧装置选线新方法

以母线零序电压为参考基准,根据式(7)、(8)所示,故障线路在快速开关合闸前后零序电流极性相反;根据式(10)、(11)所示,非故障线路在快速开关合

闸前后零序电流极性不变。

根据以上理论分析,文中采用基于高频采样模块的零序电流暂态波形采样值极性识别法进行接地选线。

3.1 采样模块设计

为反应零序电流暂态特征,根据香农采样定理,增加电流采样频率是有效的方法之一。常规继电保护装置采样速率一般为 2 kHz^[18-19],无法有效采集故障的暂态过程。为反应故障时的零序电源暂态特征,采样速率必须较常规继电保护要求高,因此对采样模块的硬件设计有较高的要求。文中采用基于霍尔传感器的采样模块硬件的总体构成见图7,高频传变特性好,采样灵敏度可达 50 mA,采样速率最高达到 25.6 kHz,能够真实反映原始信号,确保数据分析的真实性。

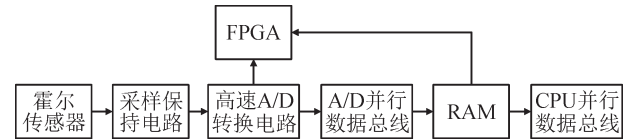


图7 采样模块硬件总体构成

Fig. 7 Overall composition of the sampling module hardware

选线精度随着 A/D 精度的下降而下降^[20],文中将硬件 A/D 的分辨率提升至 16 位,以提供更高的转换精度和提升细微的信号分辨能力。

3.2 选线方法设计

由式(7)、(8)可知,在快速开关合闸前,故障线路相对零序电压,存在明显的极性反转特征,而非故障线路与零序电压极性相同。文中描述的选线方法,是根据接地故障后零序电流暂态波形、在快速开关合闸前确定计算时间窗的划分数,形成一定数量的多组时域小块波形。根据零序电流采样值相量模(供判断采样值是否有效)和相对零序电压的极性进行该时间窗的选票判断,得出有效选票。最后根据每个时间窗的选票结果进行等权重投票选出故障线路。

1)对各线路故障在特定周期内做时域分割。为比较各线路对应波形间的时频局部特征,在故障开始时刻至快速开关合闸时刻的时段内对线路波形 A 做等间隔的时间窗划分,得到等时间间隔的一组时间窗,划分方法见图8。

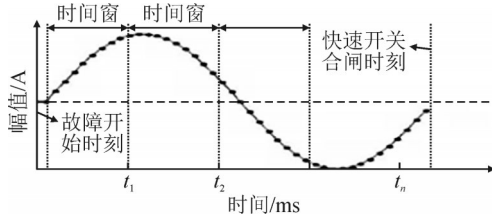


图8 时间窗划分示意图

Fig. 8 Schematic diagram of time-window division

根据故障开始时刻、快速开关合闸时刻两个时刻以确定各线路时间窗的划分数量,文中以1 ms为一个时间窗周期,故线路 m 的时间窗可以表示为集合

$$A_m = \{A_{mk}\} \quad k \in [1, 2, \dots, K] \quad (14)$$

式(14)中, A_{mk} 为线路 m 的第 k 个时间窗采样值元素集合。

每个时间窗又可以表示为

$$A_{mk} = \{B_{mk,f}\} \quad f \in [1, 2, 3, \dots, 0.001f_c] \quad (15)$$

式(15)中: f_c 为采样频率,Hz; $B_{mk,f}$ 为线路 m 的第 k 个时间窗的第 f 个采样值元素。

故10 kV线路系统的各时间窗集合可以用矩阵 S 表示为

$$S = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1k} & \dots & A_{1K} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2k} & \dots & A_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mk} & \dots & A_{mK} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nk} & \dots & A_{nK} \end{bmatrix} \quad (16)$$

2)时间窗内采样值元素计算判别。将采样值经过以母线零序电压为基准相位进行判别:若极性相反,则将 $B_{mk,f}$ 置1,否则置0,最后得到计算后的 A'_{mk} 。

3)等权重投票。在单个时间窗内 A'_{mk} ,若半数

以上的采样值元素都为1时,则该时间窗拥有一张有效选票,即将在 S 上将 A'_{mk} 置1。否则,该时间窗投弃权票,置0。等权重表示一个时间窗的选票数只有一张。

4)确定疑似线路。将矩阵 S 的元素选票处理后可得到 S' , S' 可表示为

$$S' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

遍历 S' ,统计各线路时间窗的投票结果,弃权票越多,母线发生故障的可能性越大;弃权票越少,线路发生故障的可能性越大。

最终的判据为:若弃权票数大于3/4的总票数,判定母线故障;否则,有效票数最多的线路为故障线路。

4 1:1 仿真及试验验证

4.1 仿真验证

1)仿真模型设置。为了验证上述选线方法,文中采用PSCAD/EMTDC进行仿真验证,搭建的系统仿真模型见图9。采用不接地系统且由架空线路组成的辐射状网络。仿真系统参数如下:正序参数为: $R_1=0.27 \Omega/\text{km}$, $X_1=0.335 \Omega/\text{km}$, $C_1=0.0097 \mu\text{F}/\text{km}$;零序参数为: $R_0=0.81 \Omega/\text{km}$, $X_0=1.005 \Omega/\text{km}$, $C_0=0.008 \mu\text{F}/\text{km}$ 。设置1-4号4条线路,线路长度分别是2、5、7、5 km。不平衡度设置为5%。

2)故障设置和结果分析。以16位采集分辨率下的不同采样频率、不同采样传感器灵敏度为文中所提新选线方法设置对比条件。

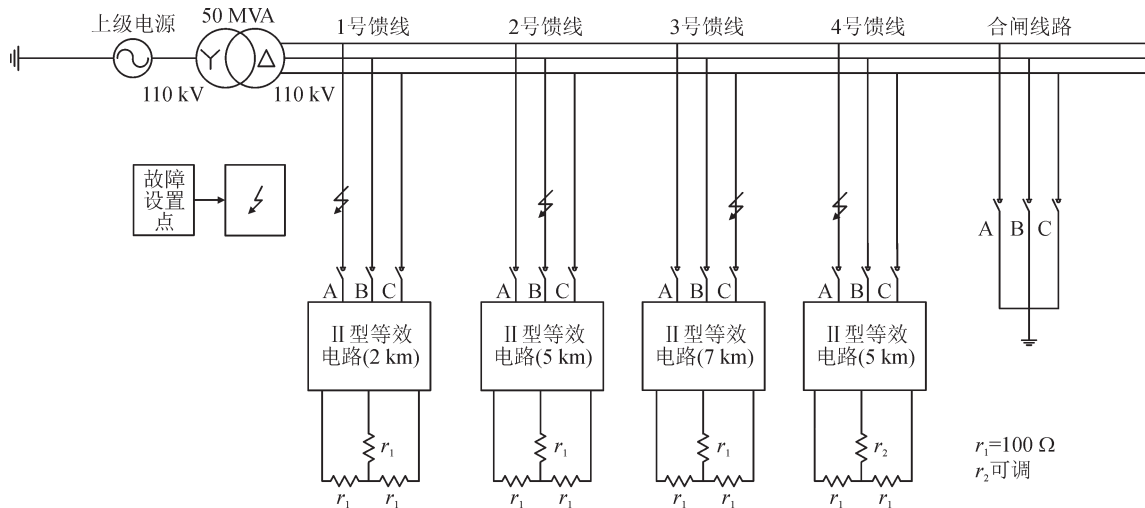


图9 仿真模型

Fig. 9 Simulation model

①不同采样频率下的选线结果。在1号线路的2 km处设置接地电阻为500 Ω的单相接地故障,选线结果见表2。由表2可见,文中所述算选线方法在高采样频率的情况下,选线结果越精确。从工程应用角度考虑,采用10 kHz的采样频率既能满足工程需要又比较经济。

表2 不同采样频率下的选线结果

Table 2 Line selection results at various sampling frequencies

采样频率/ kHz	各线路投票结果				弃权 票数	选线 结果
	1号	2号	3号	4号		
2	55	0	0	0	5	1号
5	57	0	0	0	3	1号
10	59	0	0	0	2	1号
20	59	0	0	0	2	1号

②采样传感器不同灵敏度下的选线结果。在1号线路的2 km处设置接地电阻为500 Ω的单相接地故障,采样频率设置为10 kHz,选线结果见表3。由表3可见,不同采样传感器灵敏度对选线结果有一定影响,文中所述的采用霍尔互感器提高电流采样值灵敏度有利于提高选线准确性。

表3 不同采样传感器灵敏度下的选线结果

Table 3 Line selection results under different sensitivities of the sampling sensor

采样传感器 灵敏度/mA	各线路投票结果				弃权 票数	选线 结果
	1号	2号	3号	4号		
50	58	0	0	0	2	1号
200	46	2	0	0	15	1号

2)故障位置不同下新选线方法选线结果。分别在3号线路距离母排的0、2、5、7 km处设置接地电阻为500 Ω的单相接地故障,采样频率设置为10 kHz,表中距母排为0时表示母线处设置接地故障。选线结果见表4。由表4可知,选线方法不受故障位置的影响。

表4 不同故障位置下的选线结果

Table 4 Line selection results in different fault locations

与母排 距离/km	各线路投票结果				弃权 票数	选线 结果
	1号	2号	3号	4号		
0	0	0	2	0	58	母排
2	0	1	57	1	1	3号
5	0	0	59	1	0	3号
7	0	0	60	0	0	3号

3)接地电阻不同下新选线方法选线结果。在2号线路的2 km处分别设置接地电阻为100、500、1 000、1 500 Ω的单相接地故障,采样频率设置为10 kHz,选线结果见表5。由表5可见,在一定接

地电阻范围内,选线方法不受接地电阻的影响。

表5 不同接地电阻下的选线结果

Table 5 Line selection results under different ground resistances

接地电阻/Ω	各线路投票结果				弃权 票数	选线 结果
	1号	2号	3号	4号		
100	0	60	0	0	0	2号
500	0	58	0	0	2	2号
1 000	1	51	4	0	4	2号
1 500	5	44	4	0	7	2号

4.2 1:1 真型试验验证

为验证选线及其装置应用效果,在1:1真型试验场中,搭建复杂工况故障场景进行真型试验。试验介绍如下:

1)场景设置。10 kV配电网真型试验场的一次拓扑结构见图10。该系统利用电容器组等集中参数模拟真实配电网的分布参数。试验线路、故障选线装置和消弧装置都连接至10 kV母线。10 kV母线通过外部线路上的降压变压器、调压变压器和升压变压器与外部10 kV进线相连。电容器分布在多条试验线路上,各线路上都配置有柱上开关。

图10中最左侧是待测的消弧装置,试验系统具有4条试验线路,通过选择各条线路中投切的电容容量可以设定回路中产生的零序电流大小,以实现故障选线装置应用效果的判断^[21]。

2)故障设置和结果分析。文中所述的消弧装置连接快速开关,成套接入上述的1:1真型试验场的10 kV母线。试验项目包括:①金属性接地故障;②频繁接地故障;③冲击负荷试验;④电缆弧光接地故障;⑤高阻死区(1 300 Ω);⑥电阻接地故障(500 Ω);⑦瞬时弧光接地;⑧母线故障;⑨低阻死区(1 000 Ω);⑩经水泥地接地故障。试验记录见表6。数据分别取故障启动后各线路随机采样值幅值极性(快速开关合闸前)、快速开关合闸后各线路随机采样值幅值极性,均以零序电压为参考相量。试验结果仅挑选了部分数据记录。

试验结果分析如下:

1)在频繁接地故障、冲击负荷试验、电缆弧光接地故障、高阻死区(1 300 Ω)、瞬时弧光接地、低阻死区(1 000 Ω)6项试验大项中,相量差选线结果和文中所述选线结果均正确。此处不赘述。

2)在金属性故障、电阻接地故障、母线接地故障、经水泥地接地故障4项试验大项中,根据相量差模大小的相量突变选线结果均出现错选的情况,而文中所述选线方法,选线均正确。

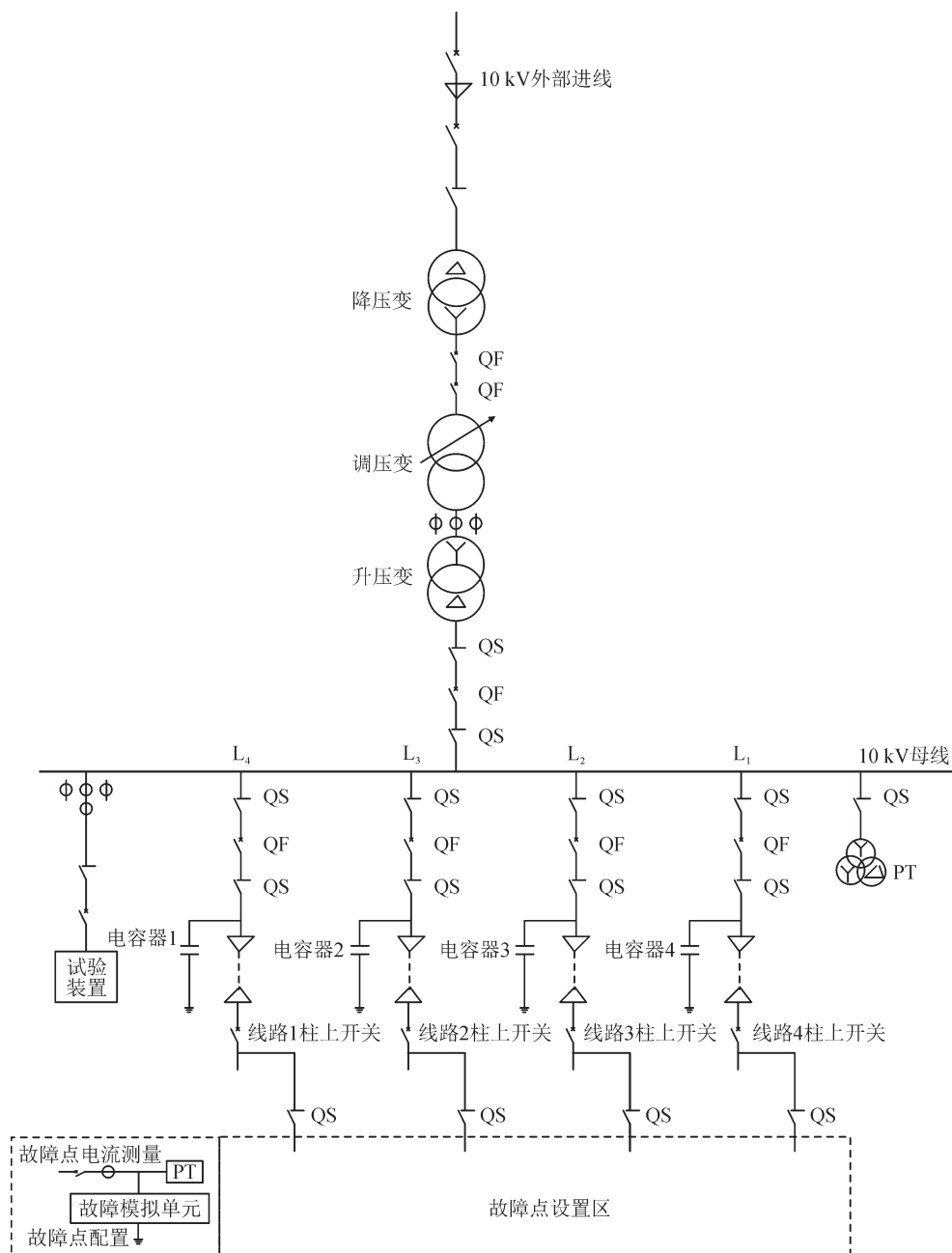


图10 真型实验场拓扑结构

Fig. 10 Topological structure of full-scale experimental field

5 结语

文中采用基于高频采样模块的零序电流暂态波形采样值极性识别法接地选线新方法,在硬件上通过提高采样频率和采样互感器灵敏度,提高了采样数据的准确度和精度。在软件上通过对零序电流暂态过程划分时域时间窗、对时间窗内的波形采样值进行极性识别,对时间窗的选票有效性进行分析,用于衡量该时间范围的数据真实和可靠程度,进而得到各时间窗的疑似故障线路结果,最后等权重投票获得最终的故障线路结果。理论分析、仿

真、1:1真型试验结果均表明本文所述选线方法的有效性,并具有一定工程应用价值。

参考文献:

- [1] 杨磊,汪佛池,赵涛,等. 10 kV配电网中性点接地方式选择及转供电技术措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2021, 4(1): 68-77.
Yang Lei, Wang Fochi, Zhao Tao, et al. Neutral grounding mode selection and power transmission technology for 10 kV distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021, 4(1): 68-77.
- [2] 张辉. 关于配电网中性点经消弧线圈接地方式的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 87-91.
Zhang Hui. Discussion on earthing mode of neutral point through

表6 1:1真型试验数据记录表
Table 6 1:1 full-scale test data record sheet

试验大项	故障设置 线路及 相别	故障启动后(快速开关合 闸前)各线路随机采样值 幅值极性 (线路L ₁ ~L ₃)	快速开关合闸后各线路随 机采样值幅值极性 (线路L ₁ ~L ₃)	相量差	相量突变 选线结果	新方法投票 票数	新选线方法 选线结果
金属性接地 故障	L ₃ C相	0.720 A∠-42.57°	0.766 A∠82.58°	1.320 A∠-70.92°		L ₁ :0票	
		0.009 A∠-31.55°	0.009 A∠96.42°	0.008 A∠32.44°	L ₁	L ₂ :0票	L ₃
		0.846 A∠138.76°	0.108 A∠84.72°	0.860 A∠145.95°		L ₃ :60票	
电阻接地 故障	L ₃ A相	0.701 A∠-115.79°	0.771 A∠119.79°	1.300 A∠-86.56°		L ₁ :0票	
		0.009 A∠-105.59°	0.009 A∠131.77°	0.009 A∠-166.91°	L ₁	L ₂ :0票	L ₃
		0.821 A∠65.51°	0.106 A∠140.67°	0.726 A∠69.03°		L ₃ :60票	
	L ₃ C相	0.143 A∠-86.83°	0.783 A∠78.31°	0.922 A∠-99.41°		L ₁ :0票	
		0.002 A∠-40.92°	0.008 A∠92.19°	0.009 A∠-78.95°	L ₁	L ₂ :0票	L ₃
		0.165 A∠95.34°	0.513 A∠80.96°	0.356 A∠-105.66°		L ₃ :60票	
母线接地 故障	A相母排	0.703 A∠-40.18°	0.774 A∠0.89°	0.522 A∠-116.96°		L ₁ :1票	
		0	0	0	L ₁	L ₂ :0票	母排F
		0.379 A∠-30.05°	0.410 A∠10.80°	0.278 A∠-105.73°		L ₃ :2票	
	B相母排	0.699 A∠44.58°	0.773 A∠87.26°	0.550 A∠-30.73°		L ₁ :1票	
		0	0	0	L ₁	L ₂ :0票	母排F
		0.379 A∠38.29°	0.415 A∠81.91°	0.297 A∠-36.36°		L ₃ :1票	
	C相母排	0.699 A∠-43.29°	0.775 A∠88.27°	1.345 A∠-68.84°		L ₁ :0票	
		0	0	0	L ₁	L ₂ :0票	母排F
		0.459 A∠-40.46°	0.509 A∠90.75°	0.882 A∠-66.20°		L ₃ :1票	
经水泥地 接地故障	L ₂ A相	0.109 A∠-126.56°	0.784 A∠28.64°	0.880 A∠-148.40°		L ₁ :4票	
		0.190 A∠70.10°	0.013 A∠28.98°	0.180 A∠72.82°	L ₁	L ₂ :50票	L ₂
		0.074 A∠-71.01°	0.515 A∠31.11°	0.535 A∠-141.12°		L ₃ :6票	
	L ₂ B相	0.110 A∠47.41°	0.783 A∠-139.68°	0.890 A∠41.19°		L ₁ :6票	
		0.192 A∠-116.01°	0.013 A∠-139.15°	0.180 A∠-114.39°	L ₁	L ₂ :48票	L ₂
		0.075 A∠102.62°	0.514 A∠-137.26°	0.555 A∠49.45°		L ₃ :6票	
	L ₂ C相	0.109 A∠-172.04°	0.773 A∠11.38°	0.882 A∠-169.04°		L ₁ :4票	
		0.191 A∠24.58°	0.013 A∠11.27°	0.178 A∠25.54°	L ₁	L ₂ :51票	L ₂
		0.075 A∠-116.68°	0.508 A∠13.86°	0.560 A∠-160.3°		L ₃ :5票	

注:时间窗数量均设置为60组。

arc suppression coil in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 87-91.

[3] 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.

[4] 李 华, 朱一民, 陈 琳, 等. 小电阻接地系统单相接地故障特征分析[J]. 广东电力, 2022, 35(12): 56-65.

Li Hua, Zhu Yimin, Chen Lin, et al. Transient characteristic analysis of single-phase ground fault in low resistance grounding system[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(12): 56-65.

[5] 李文龙, 何 山, 王维庆, 等. 主动干预型消弧装置应用性研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 1-9.

Li Wenlong, He Shan, Wang Weiqing, et al. Applied research on active intervention-type arc extinguishing devices[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 1-9.

[6] 卫晓辉, 邵文权, 程 远, 等. 配电网单相接地故障有源消弧技

术综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 58-65.

Wei Xiaohui, Shao Wenquan, Cheng Yuan, et al. Review of single-phase grounding fault active arc-suppression technologies in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 58-65.

[7] 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. Additional resistance based fault phase identification method suitable for active interference arc suppression device[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 180-186.

[8] 胡裕峰, 杨 琴, 齐金伟, 等. 主动干预装置与消弧线圈并列消弧技术分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 132-138.

HU Yufeng, YANG Qin, QI Jinwei, et al. Analysis of active intervention device and arc suppression coil parallel arc suppression technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(10): 132-138.

[9] 徐栋杰. 中性点不接地配电系统中主动干预式消弧方法与技术

- [D]. 广州:华南理工大学,2019.
- Xu Dongjie.Active intervention arc suppression method and technology in isolated neutral distribution systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2019.
- [10] 杨文勇,戴宇,刘丽,等. 配电网开关型消弧装置选相失败的特性及对策研究[J]. 供用电,2019,36(2):78-83.
- Yang Wenyong, Dai Yu, Liu Li, et al.Research on characteristics and countermeasures of phase selection failure of switch-type arc suppression device[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(2): 78-83.
- [11] 毛兴华,禹荣勋,罗俊. 配电网中性点接地方式对人身的影响及防范方法研究[J]. 电力与能源,2020,41(2):200-204.
- Mao Xinghua, Yu Rongxun, Luo Jun.Influence of distribution network neutral grounding mode on human beings and its preventive measures[J]. Power & Energy,2020,41(2):200-204.
- [12] 徐栋杰,刘文泽,李晓华. 开关型消弧装置的故障选相及选线方法[J]. 广东电力,2019,32(1):125-131.
- Xu Dongjie, Liu Wenze, Li Xiaohua.Fault phase selection and line selection methods for switch - type arc suppression devices[J]. Guangdong Electric Power,2019,32(1):125-131.
- [13] 郝越峰. 主动干预式消弧装置故障选线方法[J]. 高压电器,2021,57(2):184-188.
- Hao Yuefeng. Fault line selection method of active interference arc suppression device[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 184-188.
- [14] 陈迅. 中性点不接地运行配电网单相接地故障选线方法[D]. 长沙:湖南大学,2020.
- Chen Xun. Fault line selection method of single line to ground fault for ungrounded neutral distribution network[D]. Changsha: Hunan University,2020.
- [15] 姚春球. 发电厂电气部分[M]. 北京:中国电力出版社,2004:304-310.
- Yao Chunqiu.Electrical part of power plant[M]. Beijing: China Electric Power Press,2004:304-310.
- [16] 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.Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control,2021,49(3):96-103.
- [17] 郑日红,顾秀芳,韩如月,等. 配电网短路故障分析及其识别方法研究[J]. 工矿自动化,2012,38(4):23-29.
- Zheng Rihong, Gu Xiufang, Han Ruyue, et al.Analysis of short circuit faults of distribution network and research of its identification methods[J]. Industry and Mine Automation,2012,38(4):23-29.
- [18] 束洪春,肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化,2002,26(21):58-61.
- Shu Hongchun, Xiao Bai.A transient - based study of fault line selection for single-phase to ground faults on distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(21):58-61.
- [19] 古展基. 配电网区域保护与自愈控制系统建模及其通信网络性能分析[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- Gu Zhanji.Modeling of regional protection and self-healing control system for distribution network and its communication network performance analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2020.
- [20] 边华跃. 小电流接地系统单相接地故障新型选线装置的研究[D]. 保定:华北电力大学,2019.
- Bian Huayue.Research on a new type of line selection device for single-phase grounding faults in low current grounding systems[D]. Baoding:North China Electric Power University,2019.
- [21] 王鹏,冯光,韦延方,等. 10 kV 配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(11):178-187.
- Wang Peng, Feng Guang, Wei Yanfang, et al. Review of grounding fault testing and design of real experiment field for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(11):178-187.
- 古展基(1993—),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统保护与控制(通信作者)(E-mail:guzhanji@qq.com)。
- 苏忠阳(1969—),男,硕士研究生,教授级高级工程师,研究方向为电力系统自动化(E-mail:suzhongyang@gzzeta.cn)。
- 蔡泽祥(1960—),男,博士生导师,教授,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:epzxc@scut.edu.cn)。