

DOI: 10.7667/PSPC151797

基于 PSCAD/EMTDC 的配网检修线路临时挂接地线 仿真模型研究

程乐峰, 余涛

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对 10 kV 配网线路改造检修工作, 存在漏、拆接地线情况, 可能导致恶性“带地线合闸”事故发生, 研究基于信号注入的检修线路临时挂接地线检测方法。根据配网特点, 搭建适合地区电网变电站和输电线路的电磁暂态仿真模型, 模拟线路检修时挂接地线的物理环境。结合 PSCAD/EMTDC 模型, 验证检测方案的合理性, 并分析配网各因素对检测精度的影响, 主要包括: 不同注入信号频率、变压器接入、线路分支较多、同杆并架和大地电阻等。基于仿真分析, 提出一种基于电流分流原理的检测方案。仿真表明实际情况与理论符合, 可有效检测三相接地、两相接地和单相接地情况, 具有较好的实用性, 对于 10 kV 配网线路检修工作, 具有一定参考意义。

关键词: 配网线路; 检修; 临时挂接地线; PSCAD/EMTDC; 电流分流原理

Research on simulation model of temporary ground wires hanging on distribution maintenance lines based on PSCAD/EMTDC

CHENG Lefeng, YU Tao

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aimed at the lines rebuilding and maintenance work in 10 kV distribution network, the vicious accident of “closing with grounding wire” may happen due to miss removing the temporary grounding wires after the work, a grounding wire detection method based on signal injection is studied. According to the features of distribution network, an electromagnetic transient simulation model, which is suitable for power station and transmission lines, is established to simulate the physical environment of temporary grounding wires during lines maintenance work. Combined with the PSCAD/EMTDC model, the rationality of proposed detection scheme is verified, and then the factors impacting the detection precision is simulated for analysis, which contain different signal frequency, transformer access, line branches, common-tower transmission lines and the earth resistance. Based on simulation analysis, a detection scheme based on current diversion principle is proposed, and its simulation condition is proved same with theoretic situation, which could effectively detect the three-phase, two-phase and single phase grounding situations, thus has a better practicability, and for 10 kV distribution network lines maintenance work, as well as a certain guiding significance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177051 and No. 51477055) and the Science & Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. K-GD2014-204).

Key words: distribution network line; maintenance; temporary hanging ground wire; PSCAD/EMTDC; current diversion principle

0 引言

10 kV 配网线路在线路改造和检修时需要挂上临时接地线, 其作为配网改造、检修作业的重要一

环, 在完成作业后, 需要将所有的临时接地线拆掉, 目前, 这项作业过程主要依靠工作票制度和现场作业人员对安全规程的执行程度^[1-3], 因此, 在配电网线路改造和检修工作点多、面广的情况下, 漏、拆接地线或人为恶意设置短路线的发生概率很高^[4-5]。这就容易导致所谓“带接地点合闸送电”恶性事故发生, 即操作人员操作送电过程中, 在线路上所装的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177051, 51477055); 中国南方电网科技项目资助(K-GD2014-204)

接地线未拆除或者未拉开接地闸刀的情况下盲目合开关、闸刀而导致对地放电等恶性情况发生^[6-8]。对此，国内电网普遍采用的微机“五防”装置可通过一系列逻辑判断和电气连锁及机械锁具闭锁来抑制一些误操作行为，但对于“输电线路带地线合开关”这一误操作行为，还存在严重隐患^[6,9-10]。

目前，国内有关预防挂接地线合闸的研究主要集中在管理系统的搭建，如文献[11]通过安装在每组接地线上的识别码，对临时接地线进行识别，实现临时接地线在地线库中的对位存放与锁定，确保接地线能被正确取用和及时存放；文献[12]提出一种微分法，该方法对注入电流后的接地网上方磁场测量数据进行滤波和数值微分处理，可以直接绘制接地网的拓扑结构；文献[13]采用超声波测距方法判断接地线状态，并用串口摄像头对检修作业现场进行图像采集，以 GPRS 方式传送监控和图像数据，但超声波测距方式不稳定，摄像头技术比较花哨，数据传输问题需解决，很难构建统一大面积网络；文献[14]主要针对接地刀闸情况，当接地刀闸动作时会把接地刀闸状态信号通过 GSM 通信技术反馈给后台管理系统，但无法对接地情况实现管理，文献[15]则采用了 GPRS、GIS 和 GPS 等技术通过工作人员随身携带的 PDA 识别接地位置和接地状态，通知后台管理软件；文献[16]设计了一种接地线检测系统，供电方式采用高频电源，系统基于电流特性进行地线检测，并使用 GSM 无线数据网络传输接地信息，从而防止带地线送电事故。上述接地线管理系统，普遍采用 GPRS、GPS 和 GSM 等通讯手段，并应用远程视频、超声波测距和 RFID 等技术，顺应了数字化、通信化、智能化和自动化的发展趋势。这些管理系统一般存在以下几个问题：

- (1) 管理系统的构建方式多种，对于管理的规范性和普及性要求较高，实施起来比较繁琐^[15,17]；
- (2) 只涉及检修线路的常规接地检测，很难控制恶意接地等意外情况，如通过细铁丝接地这种情况，管理系统则无法检测到^[5-6]；
- (3) 通信技术有限，尤其是偏远的农村和山区，可能会出现信号不良，影响判断。

基于此，本文针对影响配网检修线路临时挂接地线检测的几个重要因素，进行 PSCAD/EMTDC 仿真建模研究，并提出一种可行的检测方案，该方案基于电流分流原理，通过仿真研究，表明该方案具有一定的实用性。

1 理论分析

1.1 实际接地情况

实际接地线是三相各自钳合后汇合成一根线(一般带绝缘层)到地面与金属接地棒(或杆塔自带的接地体)连接后接地，如图 1 所示。

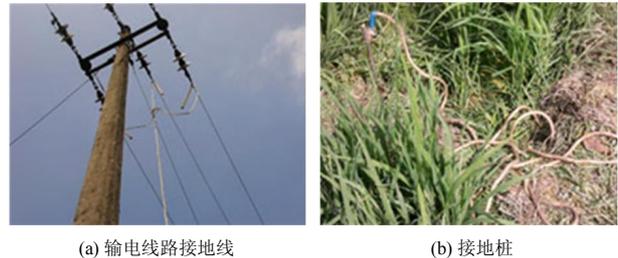


图 1 实际接地情况

Fig. 1 Actual grounding situation

一般情况下，输电线路往往存在多个点同时施工或检修的情况，此时接地点比较多也比较复杂，漏、拆接地线的风险比较大。按照操作规程，把接地线拆除后就不能再对线路进行操作，而要对线路进行操作就必须有地线接地，以确保人身安全。如图 2 所示为配网线路检修接地线实际接线原理图，图 3 为线路交叉感应及不良接地情况。

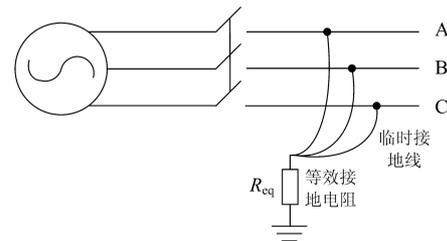


图 2 实际检修线路接地线原理图

Fig. 2 Grounding wire principle in practical lines maintenance



(a) 输电线路交叉情况 (b) 不良接地情况

图 3 线路交叉感应及不良接地情况

Fig. 3 Situation of lines crossing induction and bad grounding

因此，需针对以下几个实际存在的测量难点进行分析：(1) 同杆多回路情况，存在停运其中一条线路，另一条不停运可能，因此存在感应的干扰信号；(2) 其他正常投运线路经过某些检修线路也会存在

感应的干扰信号(如图3(a)所示),如同杆并架和分支线路较多等情况;(3)存在不良接地情况(如图3(b)所示);(4)接地点比较分散,距离远,接地线接地情况复杂多变,比如各接地点的土壤电阻率不同、山上(岩石)接地等情况,需考虑大地电阻情况,增加了检测难度;(5)根据操作规程,必须在有接地线的情况下操作,缩小了信号注入方式的选择范围,需考虑不同频率信号注入对检测结果的影响,增加了检测难度;(6)检修线路可能存在未断开的变压器,需考虑变压器对检测判断结果的影响;(7)检测仪器需要高精度电流互感器(毫安级别),需要定制。

根据实际的接地线情况,在实际检修过程中,工程人员先在工作地点附近装设接地线,同时调度也要求在检修的馈线需在变电站出口装设一组接地线,而实际拆除顺序则为:先拆除工程人员架设的接地线,交工作票后,调度部门再将变电站处的一组接地线拆除。

1.2 接地等效电阻计算

根据《电业安全工作规程》,要对线路进行作业就要求在停电状态下挂接地线后才可以进行操作,因此,在认为线路没有挂接地线的情况下(可能会有漏拆的接地线),是不能向检修线路接入检测装置来检测是否还存在未拆除的接地线。要向线路直接进行操作必须要有接地线的存在,本文拟在保留一组接地线的情况下向检修线路注入信号来检测是否存在接地线,若有则提示检修人员拆除,在确定没有其他接地线存在后再将检修仪与连同保留的一组接地线一起拆除,通过向最后一组接地线注入一个特定频率电压信号,再通过测量电流信号来判断是否存在其他连接地线,具体原理如图4所示。

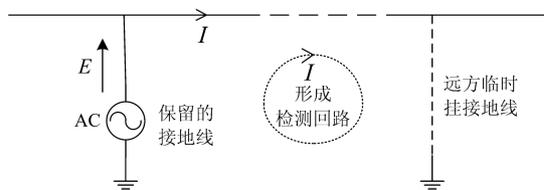


图4 具体接线原理图

Fig. 4 Concrete detection principle diagram

对于图4所示的接线原理图,可以借鉴钳形接地电阻测量仪的原理,其基本原理是测量回路电阻,钳表的钳口部分由电压线圈及电流线圈组成,电压线圈提供激励信号,并在被测回路感应一个电势 E ,在 E 的作用下,将在被测回路产生电流 I ,钳表则对 E 和 I 进行测量,并通过公式计算被测回路电阻 R ,同样也可利用钳表的电压线圈在回路上感应出电动势来嵌入电源,具体原理描述如下。

截面为矩形的环形均匀密绕螺绕环,其尺寸如图5所示,共 N 匝,在螺绕环的轴线上另放一无限长直导线,二者互感系数为 $M_{12}=M_{21}=M$,则可通过磁通链来求解 M 。

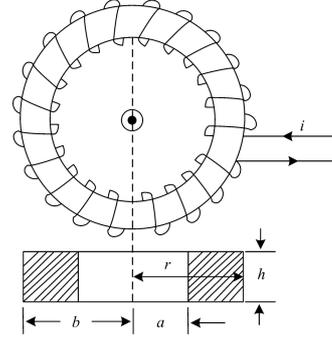


图5 螺丝环

Fig. 5 Collar screw

假设无限长直导线通电流 I_1 , 则其产生的磁场 $B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$, 螺绕环中磁通链为

$$\psi_{21} = N \int B dS = N \int_a^b \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} h dr = \frac{\mu_0 N I_1 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (1)$$

则互感系数 M 为

$$M = \frac{\psi_{21}}{I_1} = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (2)$$

另外也可计算 ψ_{12} , 如式(3)所示。

$$\psi_{12} = \int B dS = \int_a^b \frac{\mu_0 N I_2}{2\pi r} h dr = \frac{\mu_0 N I_2 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (3)$$

则此时互感系数 M 为

$$M = \frac{\psi_{12}}{I_2} = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (4)$$

可见,两种计算方法得到的互感系数 M 一样。当螺绕环的导线通入变化的电流时,如交流正弦电流,则直导线上将产生的互感电动势为

$$\begin{aligned} E &= -M \frac{di}{dt} = -M \frac{dI \sin(\omega t + \varphi)}{dt} = \\ &= -\omega M \frac{U}{R} \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= -f \mu_0 N h \frac{U}{R} \ln \frac{b}{a} \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: U 、 I 分别为正弦电压、电流有效值; R 为电阻。

根据上述原理,亦可将保留的接地线看作是无有限长的导线(实际接地线的长度远大于螺绕环的半径),在接地线上会有感应电动势,若还有其他接地线的存在,接地线、检修线路和大地将形成回路,会有感应电流在接地线上流通。因此可以通过接地线上是否流通电流来判断其他接地线的存在。一般

钳形接地电阻测量仪通过其前端卡环这一特殊的电磁变换器送入线缆的是 1.7 kHz 的交流恒定电压, 频率较高, 对所提测量方案未必适用, 需通过建模仿真研究频率对测量的影响。对于注入电源的电压值, 如果同样借鉴钳形接地电阻测量仪, 一般认为只有几伏特, 在仿真时假设为 5 V。

若存在其他接地线形成回路, 将有电流流入大地, 考虑接地电阻的阻值。严格来说, 接地电阻包括四个组成部分, 即接地引线的电阻、接地体本身的电阻、接地体与土壤间过渡电阻和大地的溢流电阻。与溢流电阻相比, 前三种电阻要小得多, 一般均忽略不计。大地并不是理想导体, 有一定的电阻率, 在外界作用下其内部如果出现电流, 显然就不再保持等电位。若地面上被强制流进大地经接地导体从一点注入, 进入大地以后的电流以电流场的形式向远处扩散, 设土壤电阻率为 ρ , 大地内的电流密度为 δ , 则大地中必呈现相应的电场分布, 其电场强度 $E=\rho\delta$ 。离电流注入点越远, 地中电流密度越小, 因此可以认为在相当远(或者无穷远)处, 地中电流密度 δ 已接近零, 电场强度 E 也接近零, 该处仍保持大地中没有电流时的电位, 即零电位。把接地点处的电位 U 与接地电流 I 的比值定义为该点的接地电阻 R , $R=U/I$, 是大地电阻效应的总和。

在实际挂接地线时, 按照规程是: 若杆塔无接地引下线时, 可采用临时接地棒, 接地棒在地面下深度不得小于 0.6 m, 并且按照规定, 高压接地棒的圆棒直径要求不小于 10 mm。可根据恒流场下静电场相似原理计算接地电阻, 对于垂直接地体, 如图 6 所示, 模拟电位梯度为圆形, 由于接地极与土壤的接触面积与半径成正比, 而接地极的接地电阻主要集中在 2 倍的导体长度范围内, 接地模拟圆上限取 $2L$, 下限取导体半径, 则有

$$R = \int_{d/2}^{2L} \frac{\rho}{2\pi r L} dr = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad (6)$$

式中: ρ 为土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$), L 为接地体长度, d 为接地体直径。

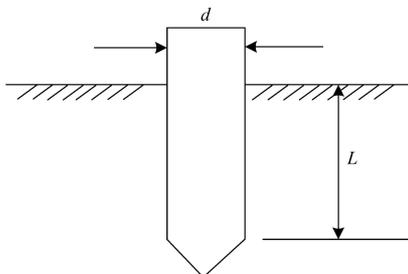


图 6 单根垂直接地体

Fig. 6 A single vertical grounding pile

理论上合格的接地线选用优质的铜材料制成, 只要接地线符合电压等级规格且其夹具干净、平整和紧固, 则其自身阻值及线具接触电阻是很小的, 按照规定总电阻约为 4Ω 。但往往因为现场检修人员的操作问题而使得实际接地电阻千差万别, 主要表现在片面理解将接地棒打入 60 cm 而没有考虑地表的土质是否符合要求。接地电阻大小与土壤电阻和接触电阻有很大关系, 其中土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) 是衡量土壤阻值的主要数据, 有机粘质土为 10, 砂质粘土为 100, 黄土为 250, 砂土是 500, 多石土壤则是 1 000, 而岩石高达 10 000, 高低相差几千倍。

2 仿真分析

2.1 搭建 PSCAD/EMTDC 仿真模型

本文基于前期现场调研情况和理论分析, 利用软件 PSCAD/EMTDC 进行建模仿真, 搭建的一个简单的 PSCAD/EMTDC 仿真模型如图 7(a)所示, 图中的模型是在一组接地线嵌入信号, 另外一组接地线则通过开关控制来模拟是否接有地线, 判断是否有接地线的依据是接地线上的电流, 仿真时间设置为 0.5 s, 一开始接有地线, 在 0.25 s 时拆除接地线, 在同一个测量电流波形图中可以比较接地线是否存在两种情况的不同。模型中直接用—个电阻等效接地电阻, 先取规定值 4Ω , 后面再研究不同接地电阻大小的影响。实际检修线路的长度变化较大, 有的只有几百米, 有的则长达几十千米, 这里先假设线路总长度为 5 km, 两组接地线的距离则是 3 km。本次建模为了更准确地模拟挂接地线的实际物理环境, 采用仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建相关模型进行仿真研究, 选择合适的注入信号频率, 验证检测方法的有效性。

PSCAD 是一个以图形为基础的电力系统模拟工具族, 是一种有效的用户图形界面, 能够显著地提高电力系统电磁暂态模拟研究的效率; EMTDC 是一套基于软件的电磁暂态模拟程序, 可以通过 PSCAD 进行调用, EMTDC 的优点之一是可以较为简单地模拟复杂电力系统, 包括直流输电系统及其相关的控制系统^[9,18]。

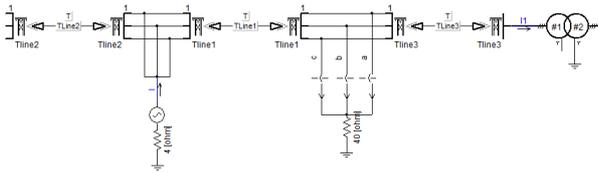
基于此, 其中架空线路的模型将选用频率决定参数模型 Frequency Dependent(Phase) Model, 该模型在是最为先进和精确的传输线时域分析模。频率决定参数模型需要设置杆塔的参数、导线参数(导线半径、电阻等), 该仿真建模使用的具体参数如下所述。

配电网的导线最小距离与档距有关, 如表 1 所

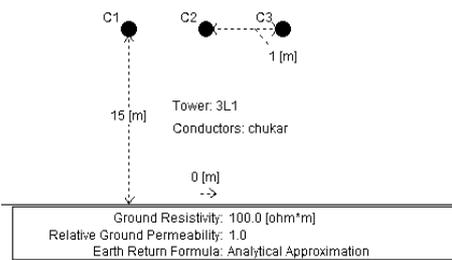
示。在城镇档距一般取 40~50 m, 在郊区档距一般取 60~100 m。一般情况下, 在广大的郊区和农村, 档距选择 80 m, 导线的最小线间距离为 0.85 m, 该仿真选择线间距离为 1 m, 且导线水平排列。而杆塔高度一般不是固定的, 仿真模型中选择杆塔高度为 15 m, 杆塔型号如图 7(b)所示。如图 8 所示, 为一个结构比较复杂的配网线路带地线的 PSCAD/EMTDC 仿真模型, 在仿真过程中, 接地线在此用一个接地电阻代替接地线, 由于接地电阻的规定阻值为不大于 4 Ω , 仿真时将其选为 2 Ω 。

表 1 配电网导线最小线间距离

档距/m	40	50	60	70	80	90	100
最小线间距离/m	0.6	0.65	0.7	0.75	0.85	0.9	1.0



(a) 搭建的简单模型



(b) 杆塔参数设置

图 7 简单的接地线检测 PSCAD/EMTDC 模型搭建
Fig. 7 A simple PSCAD/EMTDC simulation model for grounding wire detection

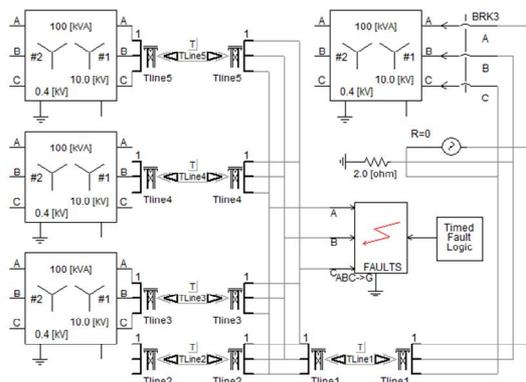


图 8 复杂的配网线路带接地线仿真模型

Fig. 8 A complex PSCAD/EMTDC simulation model for distribution lines with grounding wires

目前, 10 kV 配电网线路多数选用的导线型号为钢芯铝绞线 LGJ, 依据国标 SOJ206-87《架空配电线路设计技术规程》, 主干线及大分支线应不小于 LGJ-50 平方毫米, 负荷小的分支线及单个配电台区新建导线应不小于 LGJ-35 平方毫米。为了使建模更符合实际情况, 导线选择线路型号为 LGJ-70, 截面积则为 70 mm², 外径为 11.4 mm, 重量为 275.2 kg/km, 电阻率用铝的, 即 31.5 $\Omega\text{nm}^2/\text{km}$, 计算得到直流电阻大小为 0.45 Ω/km 。确定导线参数后可以通过垂弧式(7)计算弧垂。

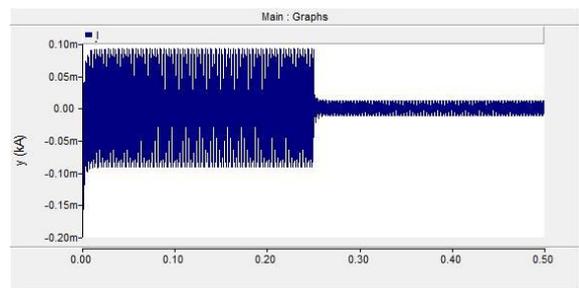
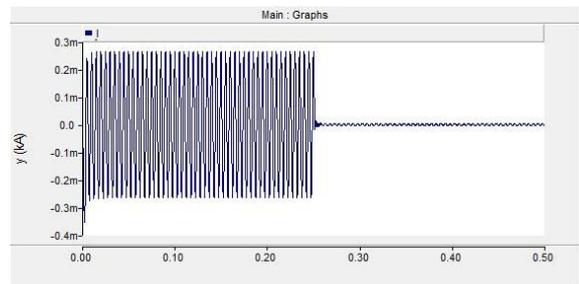
$$f = \frac{L^2 g}{8\sigma} \quad (7)$$

式中: f 为弧垂; L 为档距; g 为导线比载; σ 为导线应力。

计算得到 LGJ-70 的弧垂约为 1.5 m, 考虑到新架导线初伸长和施工中紧线松释后导线的回落(用紧线器或人力直拉紧线, 当松开紧线器或撤去人力时, 此时导线的弧度更比收线绑扎时大)将计算所得的弧垂收紧 20%以上, 即净剩 1.2 m 左右。下面针对几种影响接地线仿真的因素分别进行仿真研究和分析。

2.2 不同注入信号频率影响仿真分析

基于前述仿真模型, 在不同频率下, 仿真得到的电流结果(假设 0~0.25 s 有其他接地线存在, 而 0.25 s 后没有)如图 9(a)~(c)所示。需要说明的是, 在图 9 中, x 坐标轴: 单位为秒 s; y 坐标轴: 单位为 kA, 纵坐标中 m 表示毫, 为 10^{-3} , 如 0.02m=0.02 $\times 10^{-3}$, 表示 0.02 $\times 10^{-3}$ kA, 即 20 mA。

(a) $f=600$ Hz(b) $f=200$ Hz

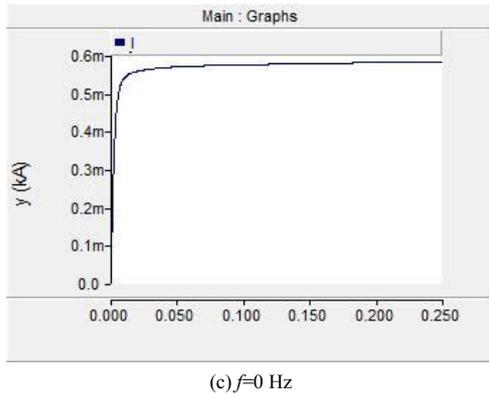


图 9 不同频率下的测量电流

Fig. 9 Detecting current in different frequency injection

从图 9 可以看出频率越高，其他接地线存在与否测得的电流值差距越小，甚至没有其他接地线存在时的电流比有其他接地线时的还要大。分析原因是线路上有分布电容的存在，电容电纳与频率有关，频率越高，则电纳越大，即阻抗越小，当总的电容的容抗比接地电阻还要小时，在就会出现至没有其他接地线存在时的电流比有其他接地线时的还要大的情况。由此看来，注入的信号应该选择低频信号，但前面的推导可知，感应电动势的大小与信号频率有关，若信号频率过小，则感应的电动势也会过小。同时在测量时可能会受到现场 50 Hz 工频及谐波信号的干扰，在二次电路可以对他们进行滤波，为了方便滤波，注入信号的频率应选择在工频 n 次谐波和 $n+1$ 次谐波之间(n 为正整数)。理论上， n 可取任意值，但若 n 取值较大，一方面，分布电感性抗会随着信号频率的增大而增大，另一方面，线路容抗会随着信号频率的增大而减少，这两者都会影响接地线是否存在的判断。分布电容除了跟信号频率有关还与线路长度有关，线路越长则容抗越小。考虑在可能出现的最极端情况选择合适的信号频率。下面假设线路长度为 80 km，将注入不同低频信号，进行模拟仿真，得到的结果如表 2 所示。

表 2 80 km 线路在不同频率信号下的仿真结果

Table 2 Simulative results of 80 km line in different frequency signal injection

信号频率/Hz	接地线上的电流有效值/A	
	其他接地线存在	不存在接地线
60	0.091 5	0.002 3
120	0.050 0	0.004 6
180	0.032 6	0.007 1
240	0.023 5	0.009 9
310	0.016 7	0.013 8

基于表 2，可见不同频率信号注入下，有接地线存在时线路上的电流有效值不同，且不存在接地线时，电流有效值一般都很小，只有几 mA 到十几 mA，考虑一定的裕度，本文认为选择中频段的检测信号比较合适，而判断检修回路有无接地线的算法可以选用阈值电流判断，一般情况下，线路上的感应电压几乎不存在偶次谐波，可采用偶次谐波注入，当然若能采用间谐波注入则更好，那样对注入信号的干扰则更小，可设定如下判据。

$$Q_{yu} \geq \chi \cdot Q_{ce} \quad (8)$$

式中： Q_{yu} 为阀门阈值，一般低于 10 mA，可取 5 mA、6 mA 等，也可根据现场实际情况作适当调整； Q_{ce} 为检修回路电流值(mA)； χ 为校正因子； $Q_{yu}=U_{in}/Z$ ， U_{in} 为实际注入电压有效值， Z 为设定的阻抗阈值，一般设定为 1 k Ω ，当检测情况满足式(8)时，即当检测信号低于阀门阈值时，可断定当前检修线路不存在临时挂接地线，反之则线路中存在未拆除接地线。

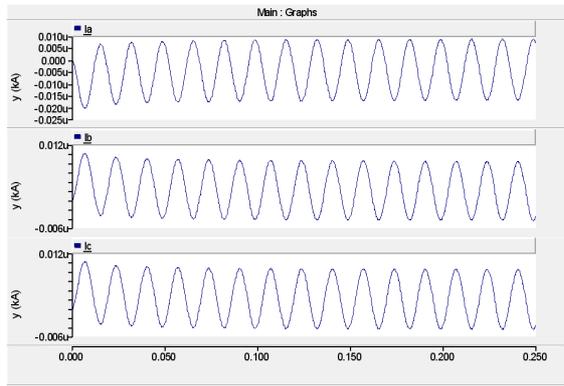
2.3 变压器接入影响仿真分析

前述仿真模型中未考虑变压器接入，在实际检修线路中往往是有挂接变压器的。35 kV 和 10 kV 配电变压器的联结组别通常为 Y,d11；10/0.4 kV 配电变压器的联结组别宜采用 Y,yn0 或 D,yn11。在我国城乡电网中，多采用三相四线制配电方式，为方便用户，10 kV 三相配电变压器广泛采用 Y,yn0 接线，可提供 380 V 和 220 V 两种电源电压。

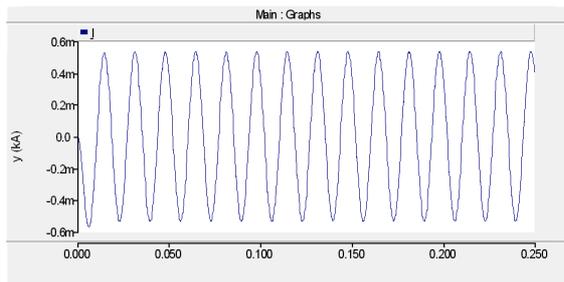
理论上，10/0.4 kV 配电变压器高压侧中性点不接地，在没有其他接地线存在时，不能形成回路，没有电流流过变压器。若还有其他接地线，但接地线只要是三相正确安装的，也是没有电流流经变压器的，只有当接地线只挂接一相或两相时才有电流流过。本文假设其他接地线存在，并且只有一相接地或两相接地，注入信号频率选择 60 Hz，线路长度设定为 5 km，进行仿真研究。

仿真考虑两相接地情况，接地线上流过电流以及流经变压器的电流，其仿真结果如图 10 所示。需要说明的是，在图 10 中， x 坐标轴，单位 s； y 坐标轴，单位 kA，图 10(a)中纵坐标中 μ 表示微，为 10^{-6} ，如 $0.020\mu=0.020 \times 10^{-6}$ ，表示 0.020×10^{-6} kA，即 0.020 mA，电流值很小，图 10(b)中纵坐标 m 同图 9 中纵坐标 m 含义一样，表示毫，即 10^{-3} 。

由图 10 可看出，确实有一定的电流流经变压器，但该电流值相对于接地线上的电流来说很小，主要原因是变压器对于信号反映的阻抗较大，当信



(a) 变压器流经电流



(b) 接地线上电流

图 10 考虑变压器接入配网时的仿真结果

Fig. 10 Simulation results considering access of transformer in distribution network

号频率更大时, 流经变压器的电流将更小, 如当注入信号为 240 Hz 时, 如图 11 仿真结果所示, 可看出电流明显比 60 Hz 时要小。图 11 中横坐标单位 s, 纵坐标单位为 kA, 其中纵坐标中 μ 含义同图 10(a)。

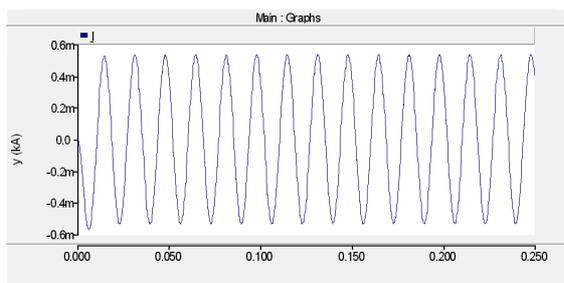


图 11 240 Hz 注入信号下单相接地存在时流经变压器电流
Fig. 11 Current of transformer in 240 Hz injection signal when a single-phase grounding condition exists

从图 11 可看出, 单相接地或两相接地时流经变压器的电流值明显要比三相同时接地时要小, 这是因为三相同时接地时相当于三相线路并联, 而当单相接地或两相接地时只有某一相或某两相流有形成回路, 相对于三相并联其总阻抗值是增大的, 所以接地线上的电流会减小。

2.3 分支线路较多时影响仿真分析

在实际配网线路中, 线路分支较多, 将对实际测量产生影响。从理论上分析, 只要信号频率选择恰当, 分支线路上的分布电容影响可以减少, 分支线路的长度对存在其他接地线时的电流影响甚小, 因为该电流主要是在两组接地线之间的线路流通, 因而分支线路长度主要影响的是没有其他接地线时的电流大小。表 3 为分支线路长度分别为 0, 5, 15, 30, 60, 80 km 时, 在没有其他接地线存在时的电流有效值统计表。

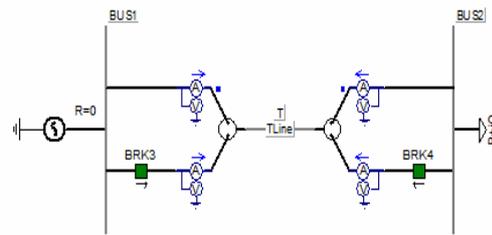
从表 3 统计情况看, 分支线路在较短时的影响是较小的, 当分支线路很长时, 就相当于分支是主干, 而原来的主干变成了分支。

表 3 电流有效值统计表

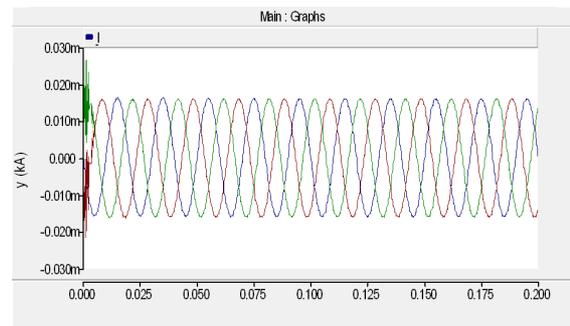
Table 3 Statistical table of current effective value	
分支线路长度/km	无其他接地线存在时的电流有效值/A
0	0.003 20
5	0.003 24
10	0.003 34
30	0.004 02
60	0.005 43
80	0.006 40

2.4 同杆并架影响仿真分析

如图 12 所示分别为研究空载变压器影响的仿真模型和感应电流仿真波形图, 图 12(b)中横坐标单位为秒 s, 纵坐标含义同图 10。



(a) 考虑同杆并架影响的仿真模型



(b) 感应电流仿真波形图

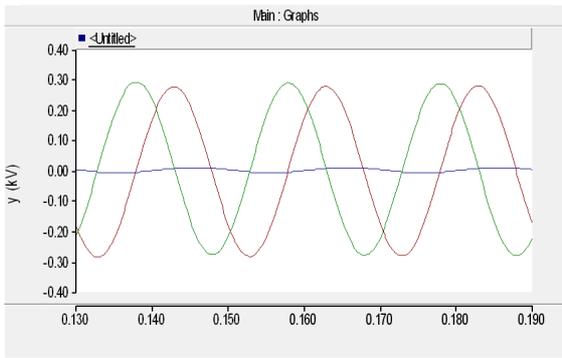
图 12 仿真模型和感应电流波形图

Fig. 12 Simulation model and induced current wave

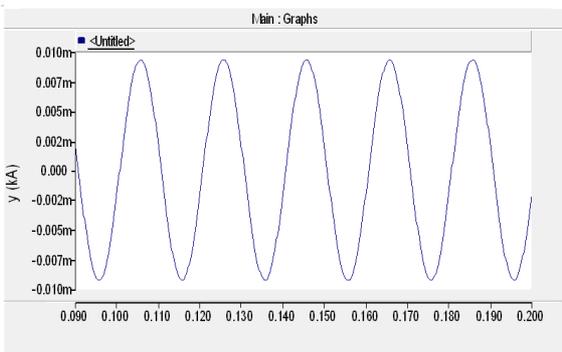
在实际情况下，基于前述可知同杆并架的问题是有，即存在停运其中一条线路另一条线路不停运的可能，因此会有感应的干扰信号存在，在没有挂接地线时，通过仿真发现在停运的一条线路上是有较高的感应电压，峰值达到 200 V，由图 12(b)可见，在停运线路上感应的电流幅值在 15 mA 左右。

由前述同杆并架的输电线路中存在较大的感应电压(严重情况可高达 500 V 左右)，感应电压可能会对所提信号注入法造成一定干扰，同时对设备和人员安全也可能造成威胁，考虑感应电压功率比较低，当其经电阻接地时感应电压会大大下降，基于此，对检修线路中的一相线路(带感应电压)采用不同电阻接地进行仿真，接地电阻分别取 10 kΩ/1 MΩ，仿真结果如图 13(a)~(d)所示，图中横坐标单位为 s，图 13(a)、(c)中纵坐标单位为 kV，图 13(b)、(d)中纵坐标单位为 kA，m 表示毫，等于 10⁻³。

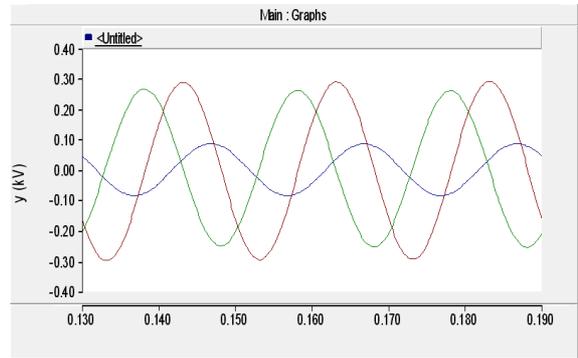
同时，三相短接后中心点电压应当接近于 0(纳安级)，只会因不平衡的缘故存在一定的感应电压，如图 13(e)所示，该图中纵坐标单位为 kA，n 表示纳，等于 10⁻⁹。根据该图可知，通过耦合电阻接地，不仅方便信号的注入，同时取合适的值可有效降低线路上的感应电压，抑制远方存在接地时回路中的工频电流，有效降低干扰信号对检测精度的影响，同时保证设备和操作人员的安全。



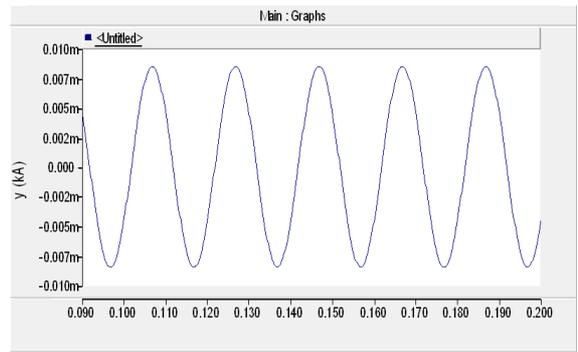
(a) 电阻为 1 kΩ 时的感应电压



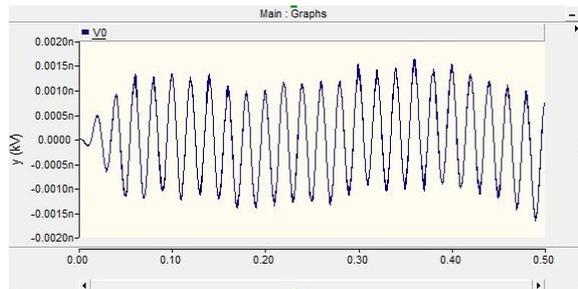
(b) 电阻为 1 kΩ 时的感应电流



(c) 电阻为 10 kΩ 时的感应电压



(d) 电阻为 10 kΩ 时的感应电流



(e) 三相短接后中心点感应电压

图 13 不同耦合电阻下的仿真波形图

Fig. 13 Simulation wave diagram under different resistance

2.5 大地接地电阻影响仿真分析

基于前述，可知大地电阻规定值很小，但往往实际情况并不如此，本文就注入信号为 120 Hz，线路长度分别为 5，15，30，60 km 时不同接地电阻的情况进行统计，如表 4 所示为接地线存在时和不存在其他接地时的电流有效值统计表。

由表 4 得出结论：在 120 Hz 信号下，随着线路长度和接地电阻的不断增大，有接地线时的电流值与没有接地线时的差距在不断减小，但不能区分两者差别，理论上只要检测装置设定好限值，当检测电流超出限值时就可判断有其他接地线的存在。

以上就是关于采用嵌入电压源方法(信号电压直接注入法)的研究，通过电磁暂态仿真和现场试验

表 4 电流有效值统计表

Table 4 Statistical table of current effective value

线路长度/km	接地电阻/ Ω	接地线的电流有效值/A	不存在其他接地线时的电流有效值/A
5	4	0.281 7	0.001 6
	10	0.231 0	
	50	0.086 5	
	100	0.046 7	
	200	0.024 2	
15	500	0.009 9	0.001 7
	4	0.241 5	
	10	0.204 2	
	50	0.083 5	
	100	0.046 0	
30	200	0.024 0	0.002 3
	500	0.009 9	
	4	0.134 0	
	10	0.124 5	
	50	0.071 4	
60	100	0.043 0	0.003 7
	200	0.023 4	
	500	0.010 0	
	4	0.066 4	
	10	0.064 5	
	50	0.050 0	
	100	0.036 0	
	200	0.021 9	
	500	0.010 1	

数据得出的结论是：该检测方法是可行的，本文认为可以选择中频段频率信号作为注入信号，如果采用间谐波效果会更好，至于电压值则根据实际测量精确度来进行选择。只要为接地线上的电流设定一个限值，只要注入信号后测得的电流是大于限值的，就可以判定存在有其他接地线。

3 基于电流分流原理的接地线检测方案

3.1 电流分流原理

除了采用上述提到的嵌入电压源方法进行检测外，本文还提出采用基于电流分流原理的检测方案进行测量，具体原理概述如下。

该检测方案是在有一组接地线未拆除的情况下利用电流分流原理进行检测，具体方法是：在线路上接入一个小电流源，理论上在没有其他接地线存在的条件下，流入为拆除接地线的电流大小与注入的电流源的电流大小近似相等，而当有其他接地线存在时，未拆除的接地线上的电流将被分流而减小，所以通过测量未拆除的最后一组接地线上的电流与注入的总电流进行比较，就可以检测出是否还

有其他的接地线存在。若检测出还有其他接地线存在，装置提醒工程人员进行查找并拆除，拆除后再利用最后一组接地线进行再一次的测量确保其他接地线已经被拆除。在确保其他接地线已经完全被拆除后，就可以将装置拆除后再把最后一组接地线拆除。此测量方法是在检修前挂接好所有接地线后将检测装置装设在最后拆除的一组接地线附近，装置的一端连接检修线路，而另一端连接该接地线的接地体，在检修完毕后拆除剩下最后一组接地线时再启动装置检测。这样，此测量方法是在不违反检修操作规程和确保检测人员安全的情况进行的。此方法简单结构原理图如图 14 所示。

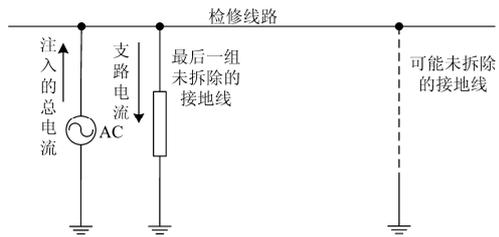


图 14 电流分流原理图

Fig. 14 Principle diagram of current diversion

3.2 搭建 PSCAD/EMTDC 仿真模型

注入电流信号的方法确定是使用恒流源，而要测量保留接地线上流过的电流只能使用电流互感器的原理进行测量，因而恒流源不能使用直流电源，而是使用交流电源。由前述嵌入电压的测量方案可知因线路分布电容的存在而使得信号频率对测量结果的影响较大，综合考虑认为选择 60 Hz 左右的信号较为合适，此时影响测量的因素为线路长度，因此，考虑线路长度影响后，假设接地电阻为 4 Ω ，仿真得到的电流有效值如表 5 所示。

表 5 电流有效值统计表

Table 5 Statistical table of current effective value

两组接地线间的 距离/km	电流有效值的比值(I_1/I_0)	
	有其他接地线存在	其他接地线已拆除
3	0.770 4	1.000 0
15	0.808 1	1.000 0
30	0.907 5	1.000 0
45	0.942 5	1.000 0
60	0.959 1	1.000 0
75	0.968 3	1.000 0
90	0.974 4	1.000 0

从表 5 可看出只要不存在其他的接地线，电流比值都为 1，而有其他接地线存在时，比值都不为 1。虽然线路越长，比值越来越接近于 1，但即使线路长达 90 km，比值也只有 0.974 4，只要测量仪器足够精确就可以得出比值不为 1，也就能分辨是否有

其他接地线存在。

理论上,对于接地线分相接地、只在一相或两相接地的错误接法,利用电流分流的测量方案是可以测量出来的,在模型上进行仿真,得到的仿真结果如表 6 所示,结果表明实际情况与理论符合。

表 6 电流有效值的比值统计表

两组接地线间的 距离/km	电流有效值的比值(I_1/I_0)		
	分相接地	一相接地	两相接地
3	0.792 8	0.844 6	0.794 5
15	0.821 3	0.858 0	0.823 4
30	0.918 0	0.928 0	0.913 1

当然,此方法仅供参考,其缺点是:恒流源要另外搭线,增加了操作。但恒流源可在装设接地线时一同接上,待需要测量时再打开电源开关,拆除时连同最后一组地线一起拆除。

本文所提两种检测方案对于相间短路而没有接地的情况无能为力。对于这种情况,在实际检测中,可人为将某一相进行接地,分多次注入信号检测即可识别相间短路这种情况。

4 结论

(1) 本文基于现场调研活动,针对 10 kV 配网检修线路临时挂接地线检测,搭建了适合地区电网变电站和输电线路的 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真模型进行分析,该模型可模拟线路检修时挂接地线的物理环境,通过模型验证了所提电压信号注入检测方案的合理性,所提方案实用性较强,对于实际线路检修和改造过程中接地线检测工作具有一定的指导意义。

(2) 所搭建 PSCAD/EMTDC 仿真模型针对影响 10 kV 配网检修线路临时挂接地线检测的几个重要因素,如不同频率的信号注入、变压器接入、分支线路较多、同杆并架和大地接地电阻等,进行了仿真建模分析,并得出结论,认为选择中频段信号(间谐波则更好)注入检测比较合适,而变压器接入、分支线路较多、同杆并架和大地接地电阻等对电压信号注入检测方案的影响很小,可采取相应的措施尽量消除影响。

(3) 根据仿真结果分析提出了另一种基于电流分流原理的检测方案,并通过仿真和数值统计分析得出该方案实际测量情况与理论相符合,该方案缺点则是恒流源要另外搭线,增加了操作,对于三相之间短接(相间短路)而没有接地的情况无能为力,解决办法是:可人为离线挂接一条接地线至某相线

路,如 A 相,并分别向每条线路注入变频信号进行检测,分析每次检测回路的采样电流,若检测 A 相、B 相时均识别到接地线存在,则说明 AB 相间短路;若检测 A 相、C 相均能识别接地线存在,则说明 AC 相间短路;若只识别到 A 相存在接地线,B、C 相不存在接地线,则有 BC 相可能存在相间短路,此时只需人为将接地线挂到 B 相上,并对 B、C 相分别检测即可判断是否存在 BC 相间短路。

参考文献

- [1] 刘家军, 缪俊, 姚李孝, 等. 电力检修作业挂接地线可视化监测装置[J]. 电力自动化设备, 2010, 38(7): 134-136.
LIU Jiajun, MIAO Jun, YAO Lixiao, et al. Visualized monitoring of grounding wire connection status for electric power maintenance operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 38(7): 134-136.
- [2] 刘家军, 刘博, 徐新, 等. 接触网作业地线的信息收集装置的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 139-143.
LIU Jiajun, LIU Bo, XU Xin, et al. Research on the grounding line information-gathering device of catenary operation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 139-143.
- [3] 刘健, 张小庆, 张志华. 继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 10-16.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16.
- [4] 钱佳琪, 叶佳卓, 旷哲, 等. 基于 S 变换的多端输电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 82-88.
QIAN Jiaqi, YE Jiazhao, KUANG Zhe, et al. A fault-location method for multi-terminal transmission network based on S transform[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 82-88.
- [5] 周龙. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [6] 刘家军, 缪俊. 新型电力检修作业地线装置的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 119-121.
LIU Jiajun, MIAO Jun. Research on new type of electric

- power overhaul grounding line device[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 119-121.
- [7] 李哲, 钟定珠, 李广华, 等. 电气误操作事故 100 例及原因分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [8] 张海龙, 徐建源, 王爱弘, 等. 配网中可移动地线防误管理系统的研究[J]. 低压电器, 2008, 38(15): 34-37. ZHANG Hailong, XU Jianyuan, WANG Aihong, et al. Research on anti-misoperation management system of mobile ground-wire in power grid distribution[J]. Low Voltage Apparatus, 2008, 38(15): 34-37.
- [9] 余涛, 叶文加, 梁海华. 同杆并架输电线路的停运线路合闸 EMTDC 仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 159-163. YU Tao, YE Wenjia, LIANG Haihua. EMTDC simulation of outage line closing for transmission circuits lines parallel connection on single tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 159-163.
- [10] 洪耀鹏. 微机“五防”装置的应用与管理[J]. 广东电力, 2005(3): 74-76. HONG Yaopeng. Application and management of microcomputer-based misoperation-proof lockout device[J]. Guangdong Electric Power, 2005(3): 74-76.
- [11] 黄锐, 梁庆龙, 张宝珠, 等. 变电站临时接地线在线监测系统[J]. 中国高新技术企业, 2010, 17(33): 87-88. HUANG Rui, LIANG Qinglong, ZHANG Baozhu, et al. On-line monitoring system for temporary grounding wire in substation[J]. China High-Tech Enterprises, 2010, 17(33): 87-88.
- [12] 王晓宇, 何为, 杨帆, 等. 基于微分法的接地网拓扑结构检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 73-78, 89. WANG Xiaoyu, HE Wei, YANG Fan, et al. Topology detection of grounding grids based on derivative method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 73-78, 89.
- [13] 刘家军, 姚李孝, 王勇科, 等. 电力线检修作业挂接地线挂接信息监视装置及监视方法: 中国, CN102231489A[P]. 2011-11-02. LIU Jiajun, YAO Lixiao, WANG Yongke, et al. The device and method for monitoring the information of hanging grounding wire in electrical lines maintenance work: China, CN102231489A[P]. 2011-11-02.
- [14] 徐建源, 窦文君, 王爱弘. 接地线状态在线监测系统设计[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 111-113, 120. XU Jianyuan, DOU Wenjun, WANG Aihong. Implementation of inadvertent energizing protection in distributed control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 111-113, 120.
- [15] 张占龙, 李德文, 郭祥书, 等. 线路检修及接地线状态监视预警系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 112-115. ZHANG Zhanlong, LI Dewen, GUO Xiangshu, et al. A monitoring and warning system for transmission network maintenance and grounding line working conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 112-115.
- [16] 张作宇, 李燕青. 一种接地地线的检测系统[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12): 17-23. ZHANG Zuoyu, LI Yanqing. A type of detecting system for grounding line[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(12): 17-23.
- [17] 刘家军, 陶凯, 杨帆, 等. 基于手持设备的电力检修作业地线挂接信息管理系统的开发[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(9): 49-55. LIU Jiajun, TAO Kai, YANG Fan, et al. Development of information management system of ground line of the electric power maintenance operation based on the handed device[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(9): 49-55.
- [18] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81. YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2015-10-12; 修回日期: 2016-01-03

作者简介:

程乐峰(1990-), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为配网自动化及智能优化算法; Email: chenglf_scut@163.com

余涛(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为复杂电力系统的非线性控制理论和仿真、智能控制算法等。E-mail: taoyul@scut.edu.cn

(编辑 姜新丽)