Ð

## 基于三相对称电压注人法的配电网接地线检测技术

程乐峰,余 涛

(华南理工大学 电力学院、广东 广州 510640)

摘要:针对配电网线路发生"带地线合闸"这一恶性事故,提出了基于三相对称电压注入法的接地线检测技 术,开发了基于数字信号处理器(DSP)的配电网线路临时接地线检测装置。将各频率电压注入信号下的采 样电流值与阈值进行比较,利用比较结果综合确定配电网线路是否存在未拆除接地线。现场试验结果表明 所提检测方法和开发装置可有效检测出未拆除的三相、两相及单相接地线,并可识别相间短路情况,从而方 便检修人员快速确定并拆除临时挂接地线,实现安全合闸送电。

关键词:配电网:检修:接地线检测:数字信号处理器:三相对称电压注入法

中图分类号: TM 72; TS 736+.2 文献标识码:A

问题,没有太大的实际应用价值,对配电网复杂的 电气环境的适应性较差,难以满足工程上大规模推

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.004

为了获得造价低、实用性强、覆盖面广的新型接 地点智能检测装置,本文提出一种基于三相对称电 压注入法的配电线路临时挂接地线检测方法,并开发 了检测装置。该装置的逆变单元产生某中频段且频 率可调的三相对称电压检测信号,并注入配电检修 或改造线路,对三相回路进行检测(三相回路由装 置、待测线路、大地、临时挂接地线和装置接地线等 构成);提取三相回路电流采样信号,经滤波、调理放 大后送入装置 CPU 进行综合判断分析。通过模拟三 相短路过程,采集回路电压、电流信号,识别线路检 测回路是否闭合,进而判断是否存在未拆或漏拆接 地线,并显示检测结果,以便检修人员快速查找并 拆除临时挂接地线。所提检测方法和开发的检测装 置对于安全合闸送电、防止带地线合闸恶性事故的 发生具有十分重要的意义。

#### 检测原理 1

广的实际需要。

图 1 为检测原理示意图。由图可见,发生三相 短路后,若不考虑装置自带限流电阻,则每一相的电



图 1 检测原理示意图 Fig.1 Schematic diagram of detection principle

引言 0

配电网临时接地线检测是配电作业重要的一 环<sup>[1-2]</sup>。配电网检修和改造过程中,必须挂接临时接 地线,以保证工作人员的人身安全。在作业完成后, 必须拆除接地线以及相关的装置,变电站才能合闸 送电[3-4]。若在合闸送电之前,仍存在接地线没有完 全拆除的情况,便会发生带接地线合闸送电的恶性 事故。带接地线合闸会造成三相短路,短路发生后, 线路中的电流骤增,不仅会破坏配电设备,造成大范 围停电,引起大量的负荷损失,影响工业用电,还会 危及电力工作人员的人身安全。

为了防止带接地刀闸或接地线送电这一恶性误 操作事故的发生,变电站会装设五防系统,通过一系 列逻辑判断和电气连锁及机械锁具进行闭锁,这对 防止误操作事故的发生起到了一定的作用[5-6]。尽管 五防系统可以防止带接地线合闸这一电气误操作 事故,但它还存在严重不足:现有的五防装置不能解 决检修线路上的临时接地线安全拆卸问题[7-9];不 能用于线路检修进行安全监视而导致出现漏拆接地 线的可能性100;不能反馈信息使调度人员了解接地 线拆除情况,导致调度误下命令合闸送电[11]。

在高压输电网以及变电站中,已经出现了不少 监测系统[12-13]和检测装置[14-15]。但由于配电网的复 杂性以及检测原理的差异性,这些设备在 10 kV 及 以下电压等级配电网中并不适用。

已有的配电网接地线检测技术研究[16-24]或多或 少存在一定的检测局限性、准确性和稳定性方面的

收稿日期:2016-02-21:修回日期:2017-02-22

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

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177051,51477055) and Science & Technology Project of China Southern Power Grid Company (K-GD2014-204)

$$I = \frac{u_{\rm f}}{(r_0 + jx_0)l + R_{\rm x}} \tag{1}$$

其中, $u_{f}$ 为注入电压信号(单位为 V); $r_{0}$ 为线路单位 长度电阻(单位为  $\Omega/km$ ); $x_{0}$ 为线路单位长度电抗 (单位为  $\Omega/km$ ), $x_{0}=\omega L_{0}=2\pi f L_{0}, L_{0}$ 为线路单位长 度电感(单位为 H/km),f为逆变桥输出的注入电 压信号频率;l为测试线路接地点与测量点距离; $R_{x}$ 为等效接地电阻, $R_{x}=R_{G}+R_{G20}$ 。

为了排除接地电阻的影响,以极坐标形式表示, 假定注入电压信号为 U∠0°,电流信号为 I∠φ,将电 压、电流代入式(1)中,得:

$$I \angle \varphi = \frac{U \angle 0^{\circ}}{(r_0 + j\omega L_0)l + R_x}$$
(2)

令:U/I=R,注入电压信号频率为 $f, \omega=2\pi f$ ,线路呈感性,电压相角超前电流,即 $\varphi$ 为负角度且 -180°< $\varphi$ <0°。将式(2)等号两边展开,实部和虚部 对应相等。则有:

$$\begin{cases} R\cos\varphi = R_x + r_0 l\\ R\sin\varphi = -2\pi f L_0 l \end{cases}$$
(3)

利用式(3)即可求得测量点与接地点之间的距离 *l*:

$$l = -\frac{U\sin\varphi}{2\pi f I L_0} \tag{4}$$

由式(4)可知,测量点与接地点之间的距离 l 与 等效接地电阻  $R_x$  无关,只与  $U_x I_x \varphi_x f$  和  $L_0$  有关。当 第 i 次注入电压信号频率为  $f_i$  时,相应的测量点与接 地点之间的距离  $l_i$  为:

$$l_i = -\frac{U_i \sin \varphi_i}{2 \pi f_i I_i L_0} = A \frac{U_i}{I_i} \frac{1}{f_i} \sin \varphi_i$$
(5)

其中, $A = -1/(2\pi L_0)$ ,为常数。

由此可得*l* 正比于电压和电流的幅值比值、注入信号频率倒数及电压和电流相角差的正弦值,即:

$$l \propto \frac{U}{I} \frac{1}{f} \sin \varphi \tag{6}$$

因此,在得到大量的 *l<sub>i</sub>(i=1,2,…,n)*后,可使用 最小二乘法或加权法进一步求出等效的较优的 *l*,如 采用加权法,给每个 *l<sub>i</sub>(i=1,2,…,n)*赋予一个加权 系数 *k<sub>i</sub>(i=1,2,…,n)*,该系数与测量所处环境、所选 测量信号具体频率等有关。式(1)—(6)未考虑装 置自带电阻,在实际测量过程中,根据经验需要加一 个限流电阻,以防电流过大烧毁仪器或危及测量人 员安全,计及该限流电阻,则测量点与接地点之间的 距离计算阐述如下。

在每组频率(频率为 $f_i$ ,i=1,2,...,n)信号注入下,对回路三相电流进行采样,利用数字信号处理器(DSP)计算其幅值和相角,记为 $I_A \angle \varphi_A \land I_B \angle \varphi_B \land I_C \angle \varphi_C$ , 一般线路呈感性,则 $\varphi_A \land \varphi_B$ 和 $\varphi_C$ 取负值。假设A相注入电压信号为 $U_A \angle 0^\circ$ ,以A相为基准,则B、C相 注入电压信号分别为  $U_{B} \angle -120^{\circ}$  和  $U_{C} \angle 120^{\circ}$ ,则根据图 1,可得三相回路方程为:

$$\begin{cases} (R_{xA} + jX_{LA})I_A \angle \varphi_A - U_A \angle 0^\circ = 0\\ (R_{xB} + jX_{LB})I_B \angle \varphi_B - U_B \angle -120^\circ = 0\\ (R_{xC} + jX_{LC})I_C \angle \varphi_C - U_C \angle 120^\circ = 0\\ \end{cases}$$
(7)  
$$R_{xA} = R_x + R_1 + R_{LA} = R_x + R_1 + r_0 l_A\\ R_{xB} = R_x + R_2 + R_{LB} = R_x + R_2 + r_0 l_B\\ R_{xC} = R_x + R_3 + R_{LC} = R_x + R_3 + r_0 l_C \end{cases}$$

其中, $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ 分别为装置内部A、B、C相上自带的 限流电阻; $R_{IA}$ , $R_{IB}$ , $R_{IC}$ 分别为A、B、C相线路电阻;  $l_A$ , $l_B$ , $l_C$ 分别为A、B、C相线路测量点与接地点间的 距离; $X_{IA} = x_0 l_A$ , $X_{IB} = x_0 l_B$ , $X_{IC} = x_0 l_C$ ; $\varphi_A$ , $\varphi_B$ 和 $\varphi_C$ 分别 为A、B、C相电流滞后对应电压的相角,取负值,可通 过装置测量或计算得到; $I_A$ , $I_B$ , $I_C$ 和 $U_A$ , $U_B$ , $U_C$ 分别为 回路三相电流和电压幅值, $I_A$ , $I_B$ 和 $I_C$ 可通过装置测 量或计算得到,由于采用三相对称电压信号,  $f_A U_A = U_B = U_C = U_o$ 

在每组频率对称电压信号(频率为 $f_i$ )下,根据式 (1)—(6)的方法展开式(7),比较等号两边的实部和 虚部,可计算得到各相的接地距离 $l_A$ 、 $l_B$ 和 $l_c$ 如式 (8)所示。

$$\begin{cases} l_{Ai} = -R_{A} \frac{1}{2 \pi f_{i} L_{0}} \sin \varphi_{A} \\ l_{Bi} = -R_{B} \frac{1}{2 \pi f_{i} L_{0}} \sin (\varphi_{B} + 120^{\circ}) \\ l_{Ci} = -R_{C} \frac{1}{2 \pi f_{i} L_{0}} \sin (120^{\circ} - \varphi_{C}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{A} = U_{A} / I_{A} \\ R_{B} = U_{B} / I_{B} \\ R_{C} = U_{C} / I_{C} \end{cases}$$
(8)
$$(9)$$

对于式(8),可知计算的 A、B、C 相接地距离与 接地等效电阻  $R_x$  及装置内每相自带的限流电阻  $R_j$ (j=1,2,3)无关,仍然满足式(6)的关系,即与每相注 入的电压和电流信号幅值比值、信号频率倒数、电压 和电流相角差的正弦值成正比。从另一方面看,若 线路参数严格一致,装置自带限流电阻也一致,即  $R_{LA}$ =  $R_{LB}=R_{LC}$ 、 $R_1=R_2=R_3$ ,则输出三相电流相量也是对称 的,且满足相量和为零,这样流过等效接地电阻上的 电流为零,相当于接地电阻上始终为零电位,与接地 电阻大小无关。短路掉线路上感应的对地电容电 流,消除其给装置和操作人员带来的危险,这也是 采用对称三相电压信号注入检测的原因之一。

根据式(8),对于每组频率的注入信号下,计算 分别得到每相的接地距离 *l*<sub>Ai</sub>、*l*<sub>Bi</sub> 和 *l*<sub>Ci</sub>,取 *l*<sub>Ai</sub>、*l*<sub>Bi</sub> 和 *l*<sub>Ci</sub> 的算术平均值作为该组频率 *f*<sub>i</sub>下确定的接地距离 *l*<sub>ii</sub>:

$$l_{fi} = \frac{l_{Ai} + l_{Bi} + l_{Ci}}{3} \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{10}$$

令 n=100, 根据式(10) 测量得到 100 组接地距

离数据集合,即{*l*<sub>1</sub>,*l*<sub>2</sub>,…,*l*<sub>100</sub>},取这 100 组数据的均 方根平均值,可最终得到一个较佳的接地距离*l*,即:

$$l = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} l_{f_i}^2} = \sqrt{\frac{l_{f_1}^2 + l_{f_2}^2 + \dots + l_{f_{100}}^2}{100}}$$
(11)

*l*的计算值可在确定存在接地线的情况下辅助检修工人及时查找接地线并进行拆除,提高工作效率。

#### 2 硬件设计

图 2 为检测装置的总体硬件结构设计原理图。 图中,检测装置主要由数据处理芯片 TMS320F2812、 三相逆变电压源、线路残压检测单元、电流信号采样 单元、注入电压信号采样单元、液晶显示和按键输入 电路组成。检测装置充分利用数据处理芯片的 AD 转换模块、PWM 波输出模块、GPIO 输出模块,实现 对电压电流信号的精确采样、三相逆变电源幅值和 频率控制以及对继电器的开关控制。三相逆变电 源与待检测线路通过继电器相连,当残压过大时,继 电器动作,保证操作人员和接地线检测仪的安全。



Fig.2 Hardware design of device

#### 2.1 电流采样电路设计

电流采样信号由采样电阻上的电压获得,其值 在 mV 级别,为了对电流信号进行处理,利用采样 INA118 芯片对电流信号进行放大。图 3 为一个通道 的电流采样单元的电路设计原理图。

INA118 具有精度高、功耗低、共模抑制比高和 工作频带宽等优点,适合对各种微小信号进行放大。 INA118 独特的电流反馈结构使得它在较高的增益 下也能保持很高的频带宽度。由 3 个运算放大器组 成差分放大结构,内置输入过压保护,且可通过外置 不同大小的电阻实现不同的增益。

由于 DSP 允许的采样信号为 0~3 V,因此通过 INA118 芯片将交流信号升至 1.5 V之内,并通过运 算放大器升至 1.5 V,从而保证采样信号在 DSP 的允 许范围之内<sup>[25-26]</sup>。

基于 DSP2812 的快速计算与处理能力,电流采 样信号在送达 DSP 后进行数字滤波,从而极大地简 化了电路设计,减小了工频电路信号的干扰。

#### 2.2 信号源电路设计

通过 PSCAD/EMTDC 建模并进行仿真,仿真结 果表明由于分布电容的存在,输电线路中注入信号 频率越高,则分布电容上流过的电流越大,极大地影 响了检测精度。同时为了排除线路中干扰信号的影 响,信号频率应与工频信号错开。综合以上因素,最 终选取 500 Hz内的中频段信号作为信号源频率,并 通过仿真和现场试验验证其可行性。

为了满足便携式测量的要求,检测装置采用 12 V 可充电锂聚电池作为电源输入。由于三相逆变电压 幅值为 10 V 左右,因此需要通过升压电路将电压从 12 V 升高到 20 V 以上。装置采用"Boost 升压+三相 全桥逆变"的技术方案,如图 4 所示。



图 4 信号源方案设计

Fig.4 Schematic design of signal source

Boost 电路将输入的 12 V 电压升压为 20 V 以上的直流电压,DSP2812 输出 3 对互补的 PWM 波控制 MOS 管的通断,然后经过 LC 滤波电路得到 10 V 的标准正弦波。检测装置的 MOS 管采用 IRF540, MOS 管驱动芯片采用高性能的全桥 MOS 管专用芯片 IR2110,可极大地简化电路设计并降低功率损耗。

#### 3 判据设计和装置开发

本文所开发检测装置判断有无接地线存在的判





据主要基于阈值电流法,装置对检测回路三相电流 进行采样,通过滤波调理和放大后送入 DSP 进行综 合判断分析。如前文所述,检测信号对回路进行扫 频检测,得到一系列采样电流值,DSP 对其进行统计 分析,并依次与阈值进行比较。由 PSCAD/EMTDC 仿 真和现场调研可知,当线路上不存在接地线时,线路 上几乎没有电流;当线路上存在接地线时,通过注入 电压信号,线路上的电流可达到几十甚至上百 mA。 图 5(a)所示为单条无分支线路 PSCAD/EMTDC 仿 真图,假设 0.2 s 时有临时接地线接地,仿真后得到 的电流波形图如图 5(b)所示。

通过仿真得出:当没有接地线时,线路上流过很 小的电流;当有临时接地线时,线路上流过的电流比 没有接地线时大很多。因此,可以设置一个限值来 判断有无接地线存在,本文检测仪装置判断接地线 的依据为:

$$I > \gamma I_0$$
 (12)

其中,I为实际检测电流;阈值电流 $I_0$ 取 10 mA; $\gamma$ 为校正因子, $0 \leq \gamma \leq 1$ ,可根据现场实际实验情况作适当 调整。 $\gamma I_0$ 可取 10 mA 以下数值,即当检测信号(一般有几十至几百 mA)超过且较大于阈值 $I_0$ 时,线路 中存在未拆除接地线。通过大量的现场试验发现,若 线路不存在接地线,则采样回路电流值只有几 mA, 不超出 10 mA,大多时候甚至接近于 0,达到  $\mu$ A 级, 这可以通过下文的现场试验观察到。

另外,为了提高检测精度,数据处理芯片每周期 采样 256 个点。信号处理算法采用 FIR 数字滤波和



Fig.5 Simulation model of single line without branch and simulative current waveform

快速傅里叶变换(FFT)<sup>[27-28]</sup>:先采用 FIR 进行数字滤 波,然后利用 FFT 计算工频以及注入频率下的电压、 电流大小及两者的相位差。最后根据计算得到的特 定频率信号注入下的电压、电流大小及两者的相位 差,依据式(1)—(12)即可得到接地点距采样点的大 致距离,辅助检修人员确定并拆除接地线。

装置检测流程如图 6 所示,图中阀门阈值 U<sub>pan</sub> 根据装置、人体电压安全等级在 DSP 芯片内设置,



图 6 装置检测流程图 Fig.6 Flowchart of detection with device

2

用于对残压 U<sub>0</sub>进行判断。

#### 4 现场试验

在肇庆广宁县新建基建 10 kV 线路进行了现场 试验。该线路为双回线路,由 220 kV 翠竹变电站引 出,其中,9 号杆塔与 24 号杆塔距离 3 369 m;18 号 杆塔与 24 号杆塔距离 1 584 m。装置挂接在 24 号杆 塔进行测量,分别在 9 号和 18 号杆塔挂接地线进行 了 5 组试验:存在三相接地线试验,存在两相接地线 试验,存在单相接地线试验,存在相间短路试验及无 接地情况试验。测量时采用供电局常用的摇表进行 对比测试。在 9 号和 18 号杆塔的 5 组试验中,样机 均可正常检测并显示各种接地故障以及拆除接地 线后的线路情况。

图 7 为所开发的接地线检测装置在现场检测存 在三相接地线试验、存在两相接地线试验、存在单相 接地线试验及存在相间短路情况试验的液晶模块显 示结果。



图 7 现场试验结果 Fig.7 Results of field test

#### 5 结论

a. 在配电网检修或改造工作中,在恢复合闸送 电前需要检测临时挂接地线是否存在,因此本文研 究了配电网线路接地线检测技术,并开发一种基于 DSP 的接地线检测装置,主要功能单元包括三相电 流采样电路、三相全桥逆变单元、核心 DSP 控制和 分析单元等,该装置采样精度高,可准确采集检测回 路三相电流有效值。

b.装置可对三相接地线接地、两相接地线接地、 单相接地线接地和相间短路情况进行有效检测和 识别,并在检测接地线存在的基础上,计算测量点与 接地点之间的距离,辅助检修人员及时确定并拆除 接地线,提高效率。

c. 通过仿真和现场试验,装置选用 500 Hz 以下 的中频段作为注入检测信号的频率(间谐波效果更 佳),可有效降低分布电容电流的影响,并抵制信号 干扰。所开发装置对于实现安全合闸送电具有重要 的意义,可为各供电局、电力试验单位等企业的检修 部门提供一定的借鉴和参考。

#### 参考文献:

- [1] 刘仁琪,吕晓俊,黄进,等.临时接地线综合管理系统的开发和应用[J].电力系统自动化,2010,34(22):109-112.
  LIU Renqi,LÜ Xiaojun,HUANG Jin,et al. An integrated temporary grounding line management system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(22):109-112.
- [2] 张慧芬,潘贞存,桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):64-66.
  ZHANG Huifen,PAN Zhencun,SANG Zaizhong. Injecting current based method for fault location in neutral isolated power system
  [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(3):64-66.
- [3] 唐成虹,宋斌,胡国,等. 基于 IEC61850 标准的新型变电站防误系统[J]. 电力系统自动化,2009,33(5):96-99.
  TANG Chenghong,SONG Bin,HU Guo,et al. A new electric anti-maloperation system based on IEC61850 standard [J].
  Automation of Electric Power Systems,2009,33(5):96-99.
- [4] 孙一民,侯林,揭萍,等. 间隔层保护测控装置防误操作实现方法
  [J]. 电力系统自动化,2006,30(11):81-85.
  SUN Yimin,HOU Lin,JIE Ping,et al. Implementation of maloperation proof on platform of relay and control units between bays[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(11):81-85.
  [5] 短令中奏广召 类体等 五防系统在短能化变电站中应用分析
- [5] 智全中,秦广召,娄伟,等. 五防系统在智能化变电站中应用分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):108-111.

ZHI Quanzhong, QIN Guangzhao, LOU Wei, et al. Application analysis of fail-safe unit in the intelligent substation [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23):108-111.

[6] 胡巨,陈宏辉.一种新型的变电站在线式五防系统的实现[J].电 力系统保护与控制,2010,38(19):118-121.

HU Ju, CHEN Honghui. Application of the on-line antimaloperation system in substation [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 118-121.

[7] 洪耀鹏. 微机"五防"装置的应用与管理[J]. 广东电力,2005,18
 (3):74-76.

HONG Yaopeng. Application and management of micro-computer based misoperation-proof lockout device [J]. Guangdong Electric Power,2005,18(3):74-76.

- [8] 刘雪飞,刘国亮.关于变电站五防闭锁装置的探讨[J].电力系统保护与控制,2008,36(19):77-80.
   LIU Xuefei,LIU Guoliang. A discussion on miss operation blocking device in substation[J]. Power System Protection and Control,2008,36(19):77-80.
- [9] 李建军. 变电站微机五防闭锁装置存在的问题及验收[J]. 电力 安全技术,2007,9(1):20-22.

LI Jianjun. The existent problems and acceptance of substation microcomputer based misoperation-proof lockout device[J]. Electric Safety Technology,2007,9(1):20-22.

[10] 唐慧强,葛黎黎,景华. 基于无线传感器网络的接地电阻检测系统[J]. 仪表技术与传感器,2015,2(2):54-56,70.

第 37 卷

TANG Huiqiang, GE Lili, JING Hua. Grounding resistance detecting system based on wireless sensor network [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015, 2(2):54-56, 70.

[11] 肖波,张显,王西伟,等. 基于模糊神经网络的小电流接地系统
 单相接地故障定位研究[J]. 仪表技术与传感器,2014,3(3):
 65-67.

XIAO Bo,ZHANG Xian,WAGN Xiwei, et al. Research on fuzzy neural work based method for fault location in neutral isolated power system [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014,3(3):65-67.

[12] 邢鲁华. 高压直流输电线路保护与故障测距原理研究[D]. 济 南:山东大学,2014.

XING Luhua. Research on protection and fault location principles for HVDC transmission lines [D]. Ji'nan;Shandong University,2014.

[13] 蒋彪. 高压直流输电系统接地极线路保护方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学,2013.

JIANG Biao. Research on grounding pole lines protection method in high voltage direct current system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2013.

[14] 张凤龙. 高压线路施工接地检测装置的设计与实现[D]. 保定: 华北电力大学,2013.

ZHANG Fenglong. The implementation and design of grounding detection device of high voltage line construction[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.

[15] 刘艳敏. 高压输电线路高阻接地故障检测新方案研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

LIU Yanmin. A novel technique for high-impedance grounding fault detection in high voltage transmission line[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2009.

[16] 姜静,余涛,黄剑斌,等. 配网接地线安全检测仪的研制[J]. 电测与仪表,2013,50(60):93-96.

JIANG Jing, YU Tao, HUANG Jianbin, et al. Development of distribution network ground wire security detector[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(60):93-96.

[17] 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,2010,30(7):134-140.

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, 30(7):134-140.

[18] 李玉庆,陈振华,张祖伟. 基于 GSM 的接地线信息检测装置研 究[J]. 电工电气,2014,21(3):44-47.

LI Yuqing, CHEN Zhenhua, ZHANG Zuwei. Study on grounding line information detecting device based on global system for mobile communication[J]. Electrotechnics Electric, 2014, 21(3): 44-47.

[19] 黄建杨,魏健,俞杭科,等. 输电线路防漏拆接地线系统的设计 及实现[J]. 水电能源科学,2015,33(8):166-169.

HUANG Jianyang, WEI Jian, YU Hangke, et al. Design and realization of preventing neglecting removing ground wire on transmission line system[J]. Water Resources and Power, 2015, 33 (8):166-169.

[20] 吴靓,侯碧玮,张英杰,等. 基于环路阻抗角的配电网接地线状态的检测方法[J]. 中国农村水利水电,2014,41(7):149-156.

WU Jing, HOU Biwei, ZHANG Yingjie, et al. A detection

method based on the measurement of impedance angle on the working conditions of grounding lines in transmission lines[J]. China Rural Water and Hydropower,2014,41(7):149-156.

- [21] 施慎行,董新洲,吴家华,等. 配电线路单相接地故障自愈方案
  [J]. 电力自动化设备,2012,32(11):97-101.
  SHI Shenxing,DONG Xinzhou,WU Jiahua,et al. Self-healing of single-phase grounding fault for power distribution lines [J].
  Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):97-101.
- [22] 魏光村,高云,田华,等. 输电线路接地线实时检测装置的开发 与应用[J]. 数字技术与应用,2012,3(6):33-34.
  WEI Guangcun,GAO Yun,TIAN Hua, et al. Development and application of transmission lines grounding wire real-time detection device[J]. Digital Technology & Application,2012,3 (6):33-34.
- [23] 伍文聪,姜静,余涛,等. 配电网临时接地线检测方法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(23):151-155.
  WU Wencong,JIANG Jing,YU Tao,et al. Study on temporary grounding lines detection method for distribution network[J]. Power System Protection and Control,2012,40(23):151-155.
- [24] 刘尚国. 预防带地线合闸报警装置[P]. 北京:CN2454914,2001-10-17.
- [25] 蔡鸿,叶满春,李宋. 基于 DSP 在线实现特定谐波消除技术的 2
   种方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):114-120.
   CAI Hong, YE Manchun, LI Song. Two DSP-based methods of online specific harmonic elimination [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):114-120.
- [26] 吕建国,吴馥云,胡文斌,等.动态搜索调节调制波偏置的 SPWM 三电平逆变器中点电压平衡控制方法[J].电力自动化设备, 2015,35(12):73-79.

LÜ Jianguo,WU Fuyun,HU Wenbin,et al. Modulation wave offset adjustment by dynamic search to balance neutral-point voltage of three-level SPWM inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):73-79.

- [27] 牛胜锁,梁志瑞,苏海锋,等. 无功补偿电容器组参数在线辨识 方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):123-128.
  NIU Shengsuo,LIANG Zhirui,SU Haifeng,et al. Online parameter identification for reactive power compensation capacitor branch
  [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):123-128.
- [28] 王泽,杨洪耕,王佳兴,等. 消除负频率影响的低频间谐波快速检测方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):140-145,156.
  WANG Ze,YANG Honggeng,WANG Jiaxing, et al. Rapid low-frequency interharmonic detection with negative-frequency elimination[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3): 140-145,156.

#### 作者简介:



程乐峰

程乐峰(1990—),男,湖北黄冈人,博士 研究生,通信作者,主要研究方向为配网自动 化以及电力系统运行与控制等(E-mail: chenglf\_scut@163.com);

余 涛(1974—),男,云南昆明人,教 授,博士,主要从事复杂电力系统的非线性 控制理论和仿真、智能控制等方面的研究工 作(**E-mail**:taoyul@scut.edu.cn)。

### Grounding wire detection based on three-phase symmetrical voltage injection method for distribution network

CHENG Lefeng, YU Tao

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

**Abstract**: A technique based on the three-phase symmetrical voltage injection method for detecting the grounding wire of distribution network is proposed to prevent the serious accident of "closure with grounding wire", and a DSP-based device is developed to detect the temporarily-grounding wire of distribution network. The currents sampled under the injected voltages of different frequencies are compared with the thresholds to check if there is any grounding wire remained in the distribution network. The results of field test show that, the proposed method and the developed device could effectively detect any remained three-phase, two-phase or single-phase grounding wire, and identify the inter-phase short circuit fault, which simplifies the quick detection and removal of temporarily-grounding wire for the safe distribution network energizing.

Key words: distribution network; maintenance; grounding wire detection; DSP; three-phase symmetrical voltage injection method

(上接第 18 页 continued from page 18)

# Fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normalization for three-phase asymmetrical distribution network

ZHOU Jiawei, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZANG Haixiang

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: A fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normalization is proposed for threephase asymmetrical distribution network. Based on the coordinate transformation, an angle reference is introduced to implement the complex normalization for shifting the whole impedance phases to decrease the ratio of R/X, which weakens the effect of voltage phase-angle on the active power and the effect of voltage magnitude on the reactive power for the fast decoupling of distribution network state-estimation. The principle of optimal angle reference selection is obtained according to the network characteristics, which ensures the reliable convergence of the fast decoupled state-estimation algorithm. The current measurements are treated as the power measurements to fit for the PQ fast decoupled state-estimation model. Simulative results of standard test examples show that, the proposed algorithm improves the numerical computation stability of distribution network state estimation and enhances the online state estimation speed of large-scale distribution network, while guarantees the estimation precision.

Key words: distribution network; three-phase unbalance; state estimation; complex normalization