

配电网短路故障在线监测及综合诊断研究

温立彬,山雨,常亮,陈淑波,唐志宇

(国网内蒙古东部电力有限公司 兴安供电公司,内蒙古 乌兰浩特 137400)

摘要: 为了提高配电网短路故障在线监测及诊断识别能力,提出了一种配电网在线监测和短路故障的综合诊断方法。基于电压测量和电流测量的系统模型,设计了对配电网线路运行状态的在线监测装置;并通过搭建仿真模型,对线路发生不同短路故障时的运行状态进行分析和对比;最后对该在线监测装置的测量性能进行试验验证。其结果表明:该在线监测装置性能良好,能够较为准确捕捉线路运行的实时状态,并结合短路故障的综合判据能够正确识别线路所发生的故障。研究成果可为配电网短路故障在线监测及综合诊断技术提供参考。

关键词: 短路故障;在线监测;综合诊断;电压电流监测

中图分类号: TM713 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21215

Research on Comprehensive Diagnosis and Online Monitoring of Distribution Network Under Short-circuit Fault

WEN Libin, SHAN Yu, CHANG Liang, CHEN Shubo, TANG Zhiyu

(Xing'an Power Supply Company, State Grid Eastern Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd., Ulanhot 137400, Nei Monggol, China)

Abstract: In order to improve the ability of on-line monitoring and diagnosis under short-circuit fault in distribution network, a comprehensive diagnosis method for online monitoring and network short-circuit fault identification was proposed. An online monitoring device was designed based on the model of voltage and current. And then the running state of different short-circuit faults was simulated and analyzed. Finally, the measurement performance of this device was verified through experiments. It can be obtained that the online monitoring device has good performance and accurately capture on the real-time online monitoring. And the type of short-circuit fault can be correctly identified combing with the comprehensive criterion. The research results can provide references for online monitoring and comprehensive diagnosis of short-circuit fault in distribution network.

Key words: short-circuit fault; online monitoring; comprehensive diagnosis; voltage and current detection

随着国民经济的迅速发展,社会现代化程度越来越高,电网安全可靠稳定地运行对人们生产生活的影 响程度越来越大^[1-2]。配电线路承担着用户的重要责任,其供应的电力充沛、安全以及稳定是国家和人民经济可持续快速发展的基础^[3-4]。

由于如今配电网的规模以及覆盖的范围不断增大,运行复杂性也随之变大,运行不断接近最大负荷,因此,配电网发生故障频率和风险也日益上升^[5-7]。

配电网内的故障主要分成了两类,分别为简

单故障以及复杂故障两大类,其中复杂故障本质为多个简单故障组成^[8-10]。配电网内的短路故障主要有单相接地短路故障、两相短路故障、三相短路故障以及两点接地短路故障四种类型。其线路一旦出现故障,将会直接影响配电网供电的可靠性,从而给社会安全生产造成巨大的损失,也将会对国民日常的生活和工作产生影响。因此,对配电线路的故障检测以及故障诊断技术展开相关研究是十分有必要的。

针对配电网故障检测以及故障诊断技术的研究中,目前通常采用电力互感器就是电磁式电

基金项目: 国网内蒙古东部电力有限公司科技项目(SGMDXA00YWJS1700274)

作者简介: 温立彬(1973—),男,硕士,Email: xadlscb@126.com

压互感器和电磁式电流互感器^[11-13]。但随着用户的用电负荷不断上升,电网运行的电压等级也随之增大,对原来电压和电流测量装置的绝缘强度以及测量精度提出了更高的要求^[14-16]。此外,在目前配电网中,监测装置通常对变电站内部以及线路末端进行有效监测,但针对架空线路运行状态的监测则鲜有研究,并且由于未考虑配电网的结构,造成判断过程比较复杂且计算量大^[17-18]。传统的配电网故障检测以及故障诊断技术已经难以迎合现阶段配电网的发展需求,因此,亟需研究一种配电网短路故障在线监测及综合诊断技术,提高配电网故障的监测和判断能力。

短路故障的综合判据。最后搭建有关实验对该装置以及综合判据进行了验证,其结果对配电网短路故障的在线监测及综合诊断技术有重要的参考意义。

1 线路在线监测装置设计

配电网线路故障将会造成线路运行情况发生变化,主要体现在电流信号和电压信号^[19-20]。因此,基于电压测量系统模型和电流测量系统模型设计一种对电压和电流同时进行在线监测的装置。

1.1 电压测量系统模型

依据等效电荷法的基本模型,能够得到有导体周围的电场与其电位存在成比例关系^[21]。若将某配电网线路一回路的边界条件假定为下式:

$$\begin{cases} \varphi_{R \leq r_0} = \varphi(t) \\ \varphi_{R \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

那么该线路附近的电场和它的电位的关系可以用下式表示^[22]:

$$E(t) = \frac{r_0}{R_0^2} \varphi(t) \cdot e_p \quad (2)$$

式中: $E(t)$ 为测量点的电场强度; R_0 为测量点至线路中心的长度; r_0 为导线半径; $\varphi(t)$ 为被测线路的电位; e_p 为方向矢量。

电场耦合电压传感器的结构示意图如图1所示。

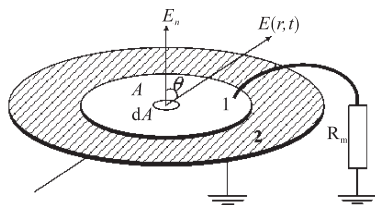


图1 电场耦合传感器等效结构

Fig.1 Equivalent structure of electric field coupled sensor

如图1所示,电场耦合电压传感器的构成包括:模块1为金属电极, A 为其外表面的面积;模块2为绝缘接地体; R_m 则为和同轴电缆连接的接地电阻。

当空间场强为 $E(r,t)$ 时,传感器金属电极表面将产生感应电荷 q ,并会在其表面产生闭合的高斯曲面。利用在该面上获取微元 dA ,并根据高斯定理得到感应电荷 q 计算公式为

$$q = \oint_A \varepsilon_0 E(r,t) dA \quad (3)$$

式中: ε_0 为相对介电常数。

由于其电场强度是不断变化的,将式(3)两面进行微分,得到:

$$\frac{dq}{dt} = \oint_A \varepsilon_0 \frac{dE(r,t)}{dt} dA \quad (4)$$

接地电阻 R_m 有电流经过因此必然存在压降 $V_0(t)$,压降和接地电阻的关系可以表示为

$$V_0(t) = R_m \oint_A \varepsilon_0 \frac{dE(r,t)}{dt} dA \quad (5)$$

将式(2)代入式(5),可以得到被测导体电位与传感器测量结果的关系:

$$V_0(t) = R_m \frac{d\varphi(t)}{dt} \oint_A \varepsilon_0 \frac{r_0}{R_0^2} dA \quad (6)$$

被测导体的电压与传感器输出信号 $V_0(t)$ 之间的比例系数为

$$A_q = \oint_A \varepsilon_0 \frac{r_0}{R_0^2} dA \quad (7)$$

可以看出, A_q 的大小取决于传感器与导体电极的几何尺寸及其间的距离,还有电极的法向分量和电场强度间夹角等因素。因此,传感器的输出电压最终可以表示为

$$V_0(t) = R_m A_q \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (8)$$

1.2 电流测量系统模型

电流测量系统采用基于Rogowski线圈工作原理^[22-23],其结构为在非铁磁材料的环形构架上均匀紧密地缠绕着漆包线形成环形线圈,被测导体无需与线圈接触,可从线圈中心穿过,其结构示意图如图2所示。

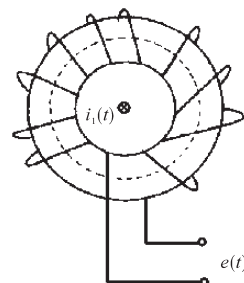


图2 电流测量系统结构图

Fig.2 Structure diagram of current measurement system

依据电磁感应定律可知电流流过的导体周围会形成磁场,安培环路定律为

$$\oint Hdl = i_1 \quad (9)$$

式中: dl 为线圈圆周线微元的长度; H 为磁场强度; i_1 为流过导体的电流。

则距离导线 r 处的磁场强度和磁感应强度分别为

$$\begin{cases} H = \frac{i_1}{2\pi r} \\ B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi r} \end{cases} \quad (10)$$

式中: μ_0 为真空磁导率,值为 $4\pi \times 10^7$ H/m。

根据电磁感应定律,在通过导体的电流出现变化时,其会产生感应电动势,并定义为

$$\begin{cases} e(t) = \frac{d\Psi}{dt} \\ \Psi = N\Phi \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\Phi = \oint BdS = \oint \frac{u_0 i_1}{2\pi r} dS = \frac{u_0 i_1}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_0}$

式中: Ψ 为总磁链; N 为Rogowski线圈匝数; Φ 为磁通; dS 为磁通经过的微元截面; r_1 为磁场距离。

则 $e(t)$ 能够定义为

$$e(t) = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{u_0 N h}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_0} \frac{di_1}{dt} \quad (12)$$

通过式(12)可得到Rogowski线圈的输出电压与导体电流对时间的导数存在正比例关系,因此还需要利用积分电路测量导体电流,其工作原理电路如图3所示。

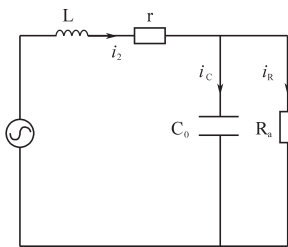


图3 Rogowski线圈的工作原理电路图

Fig.3 Working principle circuit diagram of Rogowski coil

图3中, R_a 为采样电阻,而 i_r 则为通过该电阻的电流值, i_c 为杂散电容的支路电流, r 和 L 分别为线圈的内阻和自感, C_0 为匝间电容。

根据基尔霍夫电压定律得到回路电压方程为

$$-M \frac{di_1}{dt} = L \frac{di_2}{dt} + i_2 r + i_r R_a \quad (13)$$

当取样电阻 R_a 的值较小,且满足:

$$\frac{1}{\omega C_0} \gg R_a \quad (14)$$

假定 i_c 值为0,则基尔霍夫电压定律可简化为

$$-M \frac{di_1}{dt} = L \frac{di_2}{dt} + i_2 (r + R_a) \quad (15)$$

当电流变化率很大时,则式(15)可表示为

$$M \frac{di_1}{dt} = L \frac{di_2}{dt} \quad (16)$$

由式(16)可得:

$$i_2 = \frac{1}{L} \oint M \frac{di_1}{dt} dt = \frac{M}{L} i_1 R_a$$

此外,依据现场实际条件,能够对Rogowski线圈进行参数选型,根据不同型号可以测量超过100 kHz的高频电流或脉冲、工频以及谐波电流等信号。

1.3 在线监测装置设计

电压电流一体化的传感器如图4所示。为了实现电压、电流的一体化测量,该装置分成了两个模块,其左边为电压传感器部分,其右边为电流传感器部分。两边不同的传感器利用开放型卡扣的设计,将其结合在一起,形成综合在线监测装置。通过开放型卡扣,让该装置能够较为便捷地在配电线路上进行安装,并且其中间孔径的大小能够依据实际情况进行设计。

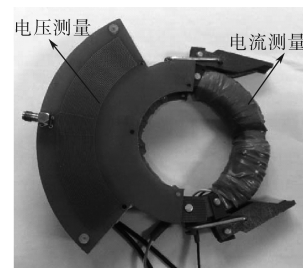


图4 电压电流一体化的传感器

Fig.4 Voltage and current integrated sensor

电压、电流一体化传感器主要存在以下优点:

- 1)结构简单、轻便,有利于现场安装;
- 2)实现了电压信号和电流信号的同步测量;
- 3)因与线路为非接触形式,具有更好的稳定性;
- 4)不存在铁磁谐振,其测量范围大;
- 5)数据比较容易传输。

2 短路故障综合诊断仿真研究

2.1 配电网故障仿真模型的建立

通过电力系统离线仿真软件搭建配电网故障仿真模型,其系统框图如图5所示。图5中,发电机元件模型可以等效为理想电源与阻抗的串

联,其额定电压值为110 kV,额定容量为60 MV·A;变压器采用的是变比为110 kV/10 kV的三相双绕组变压器,且其容量为100 MV·A;配电线路长度设定为1 km。此外在线路上设置故障发生装置,可以模拟线路发生不同的故障,并设定故障发生时间为0.5 s,持续时间为0.1 s。

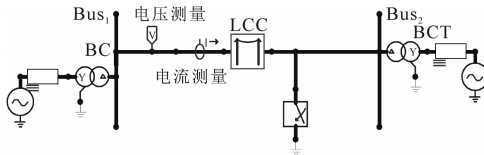


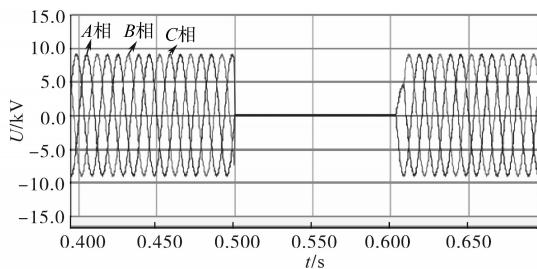
图5 线路故障仿真模型

Fig.5 Simulation model of line fault

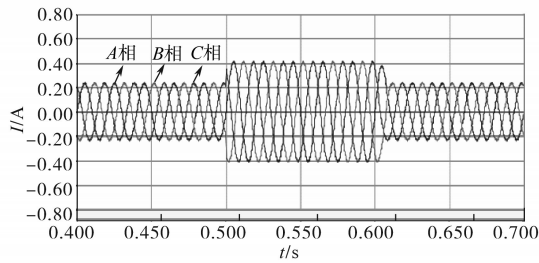
2.2 短路故障仿真模拟结果

2.2.1 三相短路故障

当设定故障类型为ABC三相短路时,观察三相电压电流的仿真波形如图6所示。



(a) 三相短路时的三相电压波形图



(b) 三相短路时的三相电流波形图

图6 三相短路时的波形

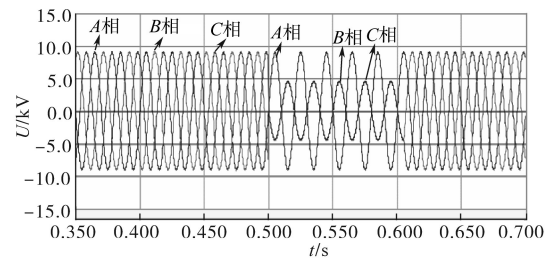
Fig.6 Waveforms of three phase short circuit

由图6可以得出:若在线路上产生三相短路故障,在故障出现时,其三相电压值同步骤变至0,同时其三相电流将急剧上升。在故障持续0.1 s后,线路故障排除,则其三相运行状态又恢复正常。

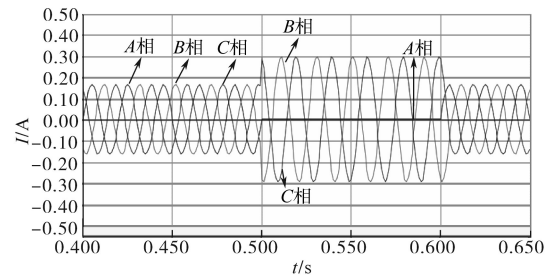
2.2.2 两相相间短路

当设定故障类型为BC两相相间短路时,观察三相电压电流的仿真波形如图7所示。由图7可以得出:若在线路上产生BC两相相间故障,线路BC相电流将会忽然上升,两者电流大小相等且相位相反,同时BC相电压将会减小至原来的

二分之一,并存在大小相等且相位相同的关系。非故障的A相其电压不会产生变化,但其电流变为0。



(a) 两相相间短路时的三相电压波形图



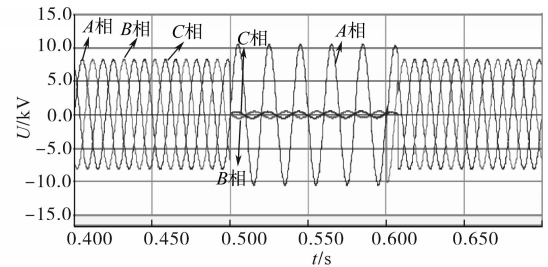
(b) 两相相间短路时的三相电流波形图

图7 两相相间短路时的波形

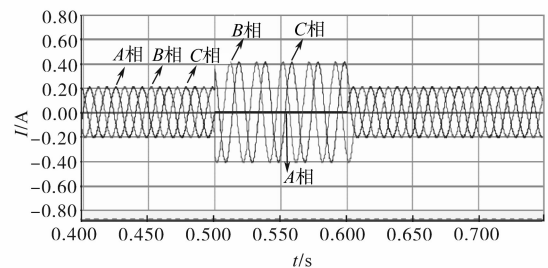
Fig.7 Waveforms of two-phase short-circuit

2.2.3 两相接地短路

当设定故障类型为两相短路接地时,观察三相电压电流的仿真波形如图8所示。



(a) 两相接地短路时的三相电压波形图



(b) 两相接地短路时的三相电流波形图

图8 两相接地短路时的波形

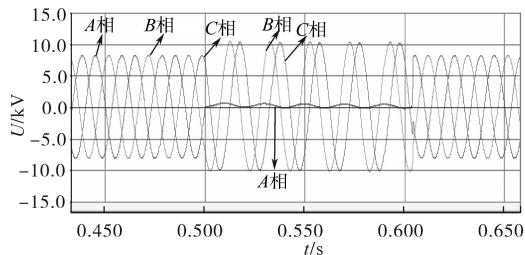
Fig.8 Waveforms of two-phase short-circuit grounding

由图8可以得出:若在线路上产生BC两相短路接地时,其故障的BC相电流将会忽然上升,同

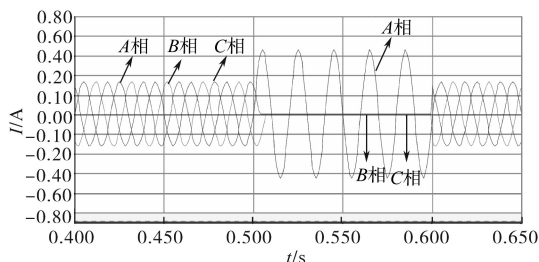
时其电压急剧下降,接近为0;非故障的A相其电压小幅度增大,但其电流则降为0。

2.2.4 单相接地短路

当设定故障类型为A相单相接地短路,观察三相电压电流的仿真波形如图9所示。



(a) 单相接地短路时的三相电压波形图



(b) 单相接地短路时的三相电流波形图

图9 单相接地短路时的波形

Fig.9 Waveforms of single phase to ground short circuit

由图9可以得出:若在线路上产生A相单相接地短路故障时,其故障的A相电流将会骤然上升,同时其电压直接降为0;非故障的BC相电压将会增大,此时若为中性点不接地系统,其电压值将会增大至线电压。

2.3 短路故障综合判据

通过对配电网的短路故障特征进行仿真研究,总结出根据线路电压电流发生的变化情况,所判断出故障类型的具体特征为:

1)当配电网采集的信号为线路三相的电流突然上升,而且其三相的电压又直接降至零。该情况判断为出现了三相短路故障。

2)当配电网采集的信号为有两相电流突然急剧上升,并且其相位是相反的,同时该两相的电压忽然减少为之前的二分之一,此外,另外一相电流则是直接突变为零,且该相电压未出现变化。该情况判断为出现了两相短路故障,并且故障发生在电流突然增大的两相上。

3)当配电网采集的信号为有两相电流突然急剧上升,而且其电压却突变至零;另外一相的情况则是相反,其电流突变至零,而电压却有少量的增大。该情况判断为出现了两相

短路接地故障,并且故障发生在电流突然增大的两相上。

4)当配电网采集的信号为有一相的电压忽然下降至零,但该相的电流却急剧增大,此外,另外两相的情况却是相反的,其电流忽然下降至零,但是电压较原先却有少量的增大。该情况判断为出现了单相接地短路故障,并且故障发生在电流突然上升的那相上。

3 在线监测传感器性能实验研究

3.1 实验设计

针对线路发生不同短路故障时线路的电压与电流变化情况进行实验研究,其实验框图如图10所示。

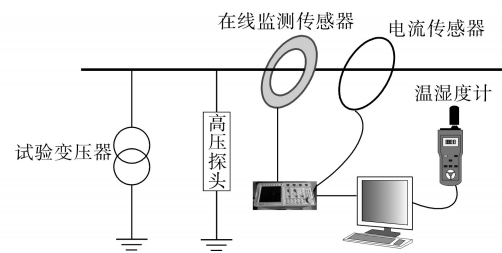


图10 实验系统框图

Fig.10 Experimental system block diagram

变压器参数为:额定电压为110 kV,且频率为50 Hz,通过该试验变压器将工频标准电压升高至所需电压;示波器的参数为:衰减倍数为800且宽为60 MHz的高压探头;电流互感器作为电流比对测试的标准器,其型号为SDD-MG8系列钳型电流互感器。

在各组实验开始前,通过温湿度计记录下大气条件。

实验平台通电后,调节试验变压器改变线路电压,并利用在线监测传感器对线路电压和电流进行测量,其输出的测量信号,在通过硬件电路处理后,传输至示波器进行显示,并传输至电脑进行保存。

3.2 传感器电压性能试验

利用泰克无源示波器高压探头与本文设计的电压互感器进行对比试验。

高压探头输出电压与真实电压的变比为1 000:1,输出电压波形连接到示波器,结果如图11所示。从图11中可以看出本文设计的电压互感器与高压探头测量得到的电压波形大致相同,电压波形没有明显畸变。

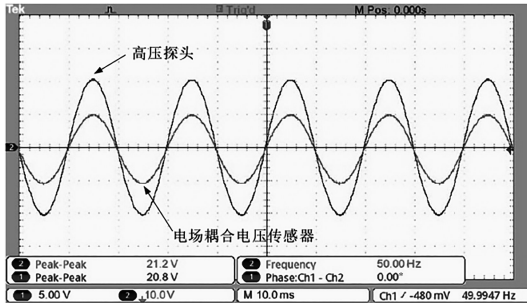


图11 传感器与高压探头的稳态波形
Fig.11 Steady state waveforms of sensor and high voltage probe

调节试验变压器,分别利用传感器和高压探头测量电压并记录,为减小测量误差,每组试验G分别测量三次,结果取平均值,结果如图12所示。从图12可以看出,两种测量结果非常接近,则表明了设计的传感器电压测量较为准确,利用n表示单位“组”。

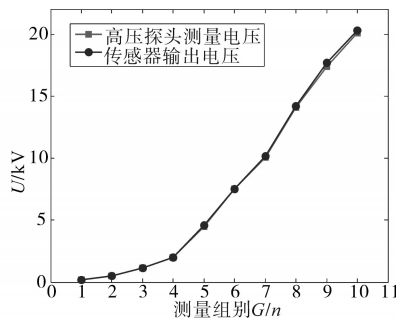


图12 传感器与高压探头电压测量结果
Fig.12 Voltage measurement results of sensor and high voltage probe

3.3 传感器电流性能试验

利用搭建的试验平台,分别利用Rogowski线圈和钳型电流互感器测量电流,并连接到示波器显示,两者测量得到的电流波形如图13所示。

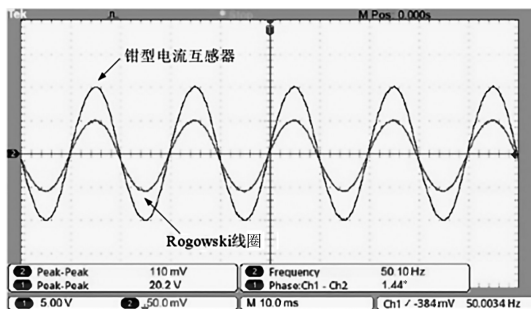


图13 传感器与钳型电流互感器的稳态波形
Fig.13 The steady state waveforms measured by Rogowski coil and clamp current transformer

图13结果表明,本文设计的Rogowski线圈与钳型电流互感器测得的电流波形大致相同,电流

波形没有明显畸变。

改变阻抗值,分别利用Rogowski线圈和钳型电流互感器测量电流值并记录,为减小测量误差,每组试验分别测量三次,结果取平均值,其结果如图14所示。从图14可以看出,两种测量结果非常接近,则表明了设计的传感器电流测量较为准确。

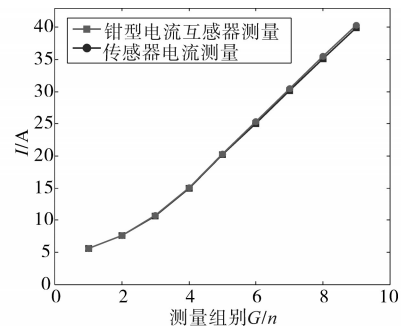


图14 传感器与钳型电流互感器测量结果
Fig.14 Current measurement results of sensor and clamp type current transformer

4 短路故障综合诊断的实际应用

将该复合监测的传感器进行实际挂网安装应用,其短路故障综合诊断技术总的系统框图如图15所示。通过在每段线路连接处的端部安装电压电流一体化传感器装置,实现对该段线路电压和电流信号进行实时采集,并通过智能通讯服务器进行信号接收,利用信号无线传输将数据传输至后台监控机,最后监控机将数据导入至数据服务器和判断与分析服务器,其中数据服务器主要进行保存和调阅,而判断与分析服务器主要是对接收的信号数据进行判断。

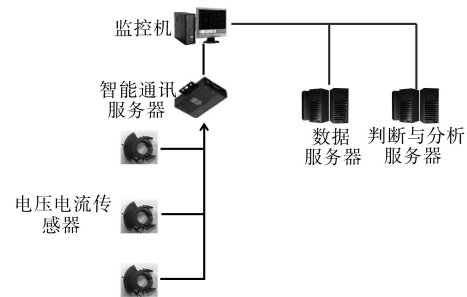


图15 总的系统框图
Fig.15 System block diagram

现状配电网中的在线监测装置大部分布置在变电站或负荷侧,而不是在架空线路上,因此不能对配电网线路上的电压和电流信号进行有效采集,即无法获得配电网线路上故障出现时其电压和电流的特征变化,则不能对故障进行有效

判断和识别。

短路故障综合诊断装置在挂网安装后,对其装置的正确性进行检验。测得线路正常运行时的电压和电流波形如图16所示,通过对波形的分析,可以读出该装置能够较为准确地获得线路上实际的运行状态。

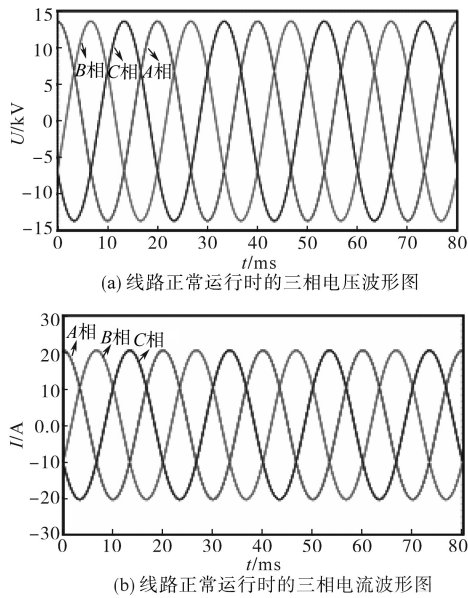


图16 线路正常运行时的波形

Fig.16 Waveforms of normal operation of line

由于本系统仍在试验阶段,因此其挂网安装检测范围较小。在本装置挂网安装的半年内,该线路出现了一次单相短路接地故障,该装置采集到的电压和电流波形如图17所示。

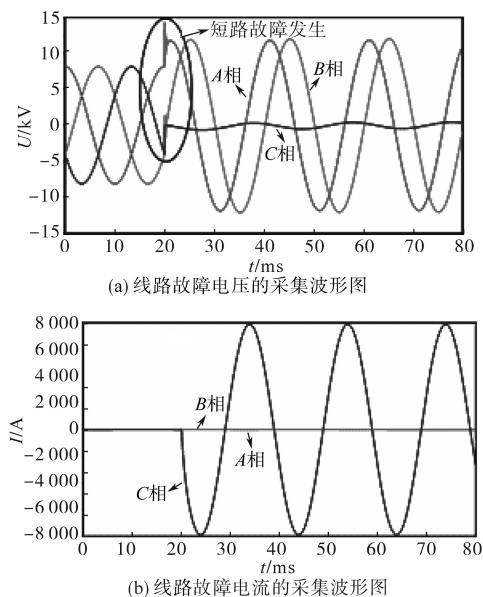


图17 线路故障时的波形

Fig.17 Waveforms in case of line fault

从图17中能够得出,当线路故障发生时,其故障相C相的电流将会发生突变、剧烈增加,但是其电压值将会突降至零;而且此时非故障相A相和B相的现象则是相反的,这两相的电流会突降至零,而其电压将会有所升高。

通过分析上述信息,并与短路故障综合判据对比,能够得出故障波形与单相接地短路故障现象一致。

5 结论

本文研究了配电网中短路故障的综合诊断及处理方法,基于电压测量系统模型和电流测量系统模型,设计了线路在线监测装置。该装置能够对线路的运行情况进行实时监测,包括电流信号和电压信号。

通过搭建配电网故障仿真模型,得到了在线路发生三相短路故障、两相接地短路故障、两相相间短路故障以及单相接地故障时,其线路运行状态的变化情况,并总结出了配电网短路故障的综合判据。

通过设计相关实验,对在线监测装置的实际应用效果进行验证,结果表明该装置运行情况良好。

通过实际挂网实验,再次验证了该装置以及综合判据的可行性。其结果对配电网短路故障的在线监测及综合诊断技术有重要的参考意义,并进一步推动了配电网自动化技术的智能化程度。

参考文献

- [1] 孔涛,程浩忠,李钢,等. 配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2009,33(19):92-99.
- [2] 赵波,王财胜,周金辉. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化,2014,38(18):125-135.
- [3] 黄志伟,葛少云,罗俊平,等. 城市配电网发展策略探讨[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(6):111-115.
- [4] 徐琴,柳劲松,韩伟福,等. 配电网建设现状及发展趋势分析[J]. 华东电力,2013,41(12):2532-2535.
- [5] 郑贤舜,韩翊,卓一,等. 随机矩阵理论在配电网早期故障检测中的应用研究[J]. 电气应用,2019,38(3):58-63.
- [6] Ge S, Ji S, Liu H, *et al.* Reliability assessment of high-medium voltage level distribution networks based on cooperative analysis of multi-level networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(19):172-181.
- [7] Pang Y J, Wang Q H, Liu C B, *et al.* A new reliability evaluating method for distribution network[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013,392:651-655.

[8] Guo M, You L, Wei X, *et al.* A flexible current limiting method of distribution network short circuit fault based on the voltage feedback control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11):48-56.

[9] Shuai Z, Dong H, Xiong Z, *et al.* Comparative study of short-circuit fault characteristics for VSC-based DC distribution networks with different distributed generators[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 528-540.

[10] 高伟,陈伟凡,杨耿杰,等.基于奇异值分解和多级支持向量机的配电网故障类型识别[J].电子测量与仪器学报,2018(2):62-71.

[11] 季涛.利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J].电工技术学报,2012,27(8):172-178.

[12] 陈维贤,陈禾.配电网中电压互感器消谐、单相消弧和单相永久性故障切线问题的解决方案[J].高电压技术,2012,38(4):776-781.

[13] 韦家旗,唐菁.电磁式电流互感器运行状态评价应用研究[J].电测与仪表,2010,47(1):51-54.

[14] Zhao S, Yang S, Lu S, *et al.* Method for online measurement of optical current transformer onsite errors[J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(2):025014.

[15] Liu M, Yun Y X, Yuan H Y. Research on ferro-resonance of electromagnetic voltage transformer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 448-453:2478-2481.

[16] 卓浩泽,唐志涛,李金瑾,等.温度对电子式电流互感器与传统电流互感器输出精度的影响[J].电测与仪表,2018,55(4):98-102.

[17] 辛海军.变压器局部放电的检测单元与信号处理[D].沈阳:沈阳工业大学,2005.

[18] Sultan A R, Mustafa M W, Saini M. Single-line to ground-fault detection for unit generator-transformer based on wavelet transform and neural networks[J]. Applied Mechanics & Materials, 2016, 818:47-51.

[19] 李文宝,陈贤祥,任仁,等.非接触电压测量系统[J].仪表技术与传感器,2014(1):50-52.

[20] 谭卫斌,张维,权立,等.一种新型配电网在线监测装置的研制[J].电力系统保护与控制,2019,47(1):164-171.

[21] 余梦婷,汪金刚,温生东,等.基于电场逆问题的非接触电荷感应式电压互感器研究[J].电测与仪表,2012,49(10):82-85.

[22] 梁曦东,周远翔,曾嵘.高电压工程[M].第2版.北京:清华大学出版社,2015.

[23] 王宝诚,王德玉,邬伟扬.罗氏线圈的频率特性分析与传感器的设计方法[J].电工技术学报,2009,24(9):25-31.

收稿日期:2019-12-04

修改稿日期:2020-01-09

(上接第44页)

馈稳压控制策略,并在动态前馈与闭环算法切换过程中引入状态机判断条件,使算法间的切换更为平滑。最后,通过仿真与实验证明了针对宽电压输入的动态前馈稳压策略的有效性。

参考文献

[1] 刘闯,李航,孙洲同,等.多电平高压级联 Boost 直流变换器研究[J].电气传动,2016,46(4):30-36.

[2] 周皓,童朝南,王芸,等.基于2路输入的三电平光伏并网系统的研究[J].电气传动,2012,42(5):20-22,55.

[3] 何海洋,姚刚,邓焰,等.一种三电平交错并联 Boost 变换器[J].电工技术学报,2006,21(6):23-28,34.

[4] 张韬,赵涛,徐友,等.基于 Buck-Boost 电路的三电平逆变器中点平衡控制研究[J].电测与仪表,2017,54(19):79-83.

[5] 姚川,阮新波,曹伟杰,等.双管 Buck-Boost 变换器的输入电压前馈控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(21):36-44.

[6] 于海坤,许建平,张斐,等.具有宽负载范围的新型 Boost 功率因数校正器[J].电工技术学报,2011,26(12):93-98.

[7] 皇金锋.Boost型三电平开关变换器的建模与闭环设计[J].电力电子技术,2012,46(1):37-39.

[8] 张志,周浩.基于交错控制的三电平升压型 DC/DC 光伏控制器研究[J].电测与仪表,2019,56(4):129-134.

[9] 樊立萍,冯翔.基于模糊 PI 的 Boost PFC 变换器的控制改进[J].电测与仪表,2019,56(22):121-125,145.

[10] 李浩,周宇飞,凌倩倩.基于非线性电感的 Boost 变换器建模及动力学研究[J].电测与仪表,2019,56(16):39-44.

[11] Sun X, Yuan Y, Wang B, *et al.* Zero-voltage switching three-level Buck-Boost bidirectional converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2):293-300.

[12] Zhang Yun, Shi Jilong, Zhou Lei, *et al.* Wide input-voltage range boost three-level DC-DC converter with quasi-Z source for fuel cell vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9):6728-6738.

收稿日期:2019-11-27

修改稿日期:2020-01-02