

# 基于实时监测数据校验的配电系统电压跌落仿真系统研究

毛涛, 乐健, 黄银龙, 刘开培

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 提出了在将实时监测与仿真计算进行有效结合的基础上对配电系统中由故障引起的电压跌落问题进行分析评估的系统设计方法, 以在提高仿真计算精确度的同时减小对现场监测设备数量的需求。给出了该系统的总体框架, 详细说明了实时监测数据导入 PSCAD、利用供电管理部门提供的实时网络拓扑和运行参数自动生成 PSCAD 仿真程序以及利用实时监测数据对仿真程序进行校验的方法。最后通过实例说明了该系统的功能。所提出的混合仿真系统研究为配电系统电压跌落问题提供了较好的理论基础和技术手段。

**关键词:** 电压跌落; 仿真计算; 实时监测; PSCAD

## Research on simulation system of voltage sag in distribution system based on real-time monitoring data verification

MAO Tao, LE Jian, HUANG Yin-long, LIU Kai-pei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** This paper proposes a system design method to analyze and evaluate the voltage sags problems caused by fault in distribution system by combining real-time monitoring and simulation calculation, in order to improve the precision of the simulation results and at the same time reduce the numbers of the monitoring device needed. The overall framework of the simulation system is presented, and the methods of importing real-time monitoring data into PSCAD, creating PSCAD simulation program automatically by using the real-time network topology and operation data provided by the power supply department, and calibrating the simulation program according to the real-time monitoring data are studied in detail. Finally, the system function is shown through a practical example. The proposed method which combines the real-time data and simulation calculation provides good theoretical basis and technique for the research of the voltage sag problems in power distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007065).

**Key words:** voltage sag; simulation calculation; real-time monitoring; PSCAD

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0122-06

## 0 引言

随着高新技术尤其是信息技术的飞速发展, 配电系统中的电压跌落问题给用户造成的损失越来越大<sup>[1]</sup>, 引起了包括供电部门、用户和科研单位等多方面的高度重视。部分企业已将电能质量纳入投资环境评估的一项重要内容, 要求供电部门提供全面的分析报告<sup>[2]</sup>。因此, 为了向用户提供科学客观的暂态电能质量的背景资料, 为了对造成电压跌落事件的原因、责任等进行客观科学的分析, 进而为治理电压跌落问题提供可靠的依据, 研究配电系统电

压跌落问题的分析方法和手段是非常必要且具有现实意义的。

目前进行配电系统电压跌落问题的分析主要有两种: 基于实时监测的方法和基于数学模拟的预测方法。基于实时监测的方法<sup>[3-4]</sup>存在的主要问题是由于电压骤降频率很低, 导致对其监测并进行评估比较困难, 因而实测方法需要长期的测量结果(10年以上), 目前在世界各国都是难以做到的。且通常单台监测设备的造价较高, 限制了其在配电网中的应用。基于数学模拟的随机预测法主要有故障点法<sup>[5]</sup>、临界距离法<sup>[6-7]</sup>和基于电磁暂态仿真软件的蒙特卡罗仿真法<sup>[8]</sup>。故障点法仅利用几个选定点的特定故障来仿真整个电力系统的特性, 但故障是一个

基金项目: 国家自然科学基金(51007065)

随机过程,可能发生在系统的任意处,其仿真结果不具有普遍性;临界距离法仅适用于辐射型的网络。蒙特卡罗仿真方法是通过数学模型或电路模型来描述整个电力系统,进而得到整个电网的特性。但仿真计算方法普遍存在难以根据实际运行情况调整仿真模型,从而仿真结果准确性较低的问题。

为了解决实时监测需要时间长、设备需要量大,以及仿真计算难以获取实际运行参数而准确性较差的问题,本文提出了一种将实时监测和仿真计算方法进行有效结合的配电系统电压跌落实时仿真系统。该系统利用实时网络拓扑和运行参数自动生成 PSCAD 仿真计算模型,利用电能质量监测数据对所建立的仿真计算模型进行校验,使得仿真计算结果与实测数据的误差小于设定的指标,从而提高了仿真计算模型的准确性。利用校验后的仿真计算模型来对目标配电网的电压跌落问题的特性进行仿真分析,提高了分析结果的有效性和准确性。本文给出了该系统的总体框架、实时监测数据转换方法、仿真程序的自动生成方法和仿真程序的校验方法。最后给出实例说明了该系统的功能。

## 1 系统总体框架

本文提出的基于实时监测数据的配电系统电压跌落仿真系统的总体框架如图 1 所示。

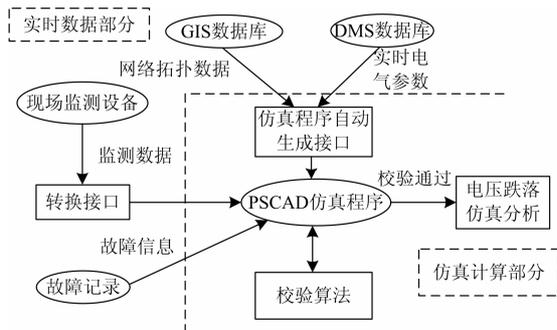


图 1 实时仿真系统的总体框图

Fig. 1 Framework of the real-time simulation system

该系统的主要组成和工作原理是:选择电磁暂态仿真计算软件 PSCAD 进行仿真计算。首先利用供电部门现有的各种数据库,通过编制的仿真程序自动生成接口,生成目标供电网络的初始 PSCAD 仿真程序。其中利用了地理信息(GIS)数据库,以获取网络拓扑数据和元件电气参数;利用了配电管理系统(DMS)数据库,以获取网络实时运行参数。其次,利用编制的现场监测数据的转换接口,将现场监测设备记录到的波形转换为 PSCAD 能识别的格式,并导入仿真程序。在初始仿真程序中,利用供电部门的故障记录提供的

相应故障信息,在仿真程序中设置故障,进行初步的仿真计算。接着将初步仿真计算结果与现场监测的波形进行对比,按照校验算法对仿真程序进行调整,直到仿真计算结果与实际监测结果之间的误差满足预设指标的要求,则认为仿真程序校验通过,可用于后续的关于电压跌落的仿真与分析。

可以看到,所提出的方法将仿真计算和实时监测进行了有效结合。其中的几个关键是实时监测数据的转换、仿真程序的自动生成和仿真程序的校验方法。

## 2 实时监测数据转换

现场监测设备的存储数据可转换为一种国际通用的 IEEE1159 所规定的电能质量数据格式(PQDIF)。PQDIF 格式使多种数据具有良好的兼容性,便于实现不同监测系统间数据共享。PQDIF 数据文件可通过第三方的共享软件 Top,将指定的记录转换为所需要的格式。PSCAD 具有外部数据接口模块,可识别特定格式的.txt 文件。因此,利用 Top 软件实现的现场监测数据转换接口的流程,以及各转换步骤中的数据文件格式如图 2 所示。

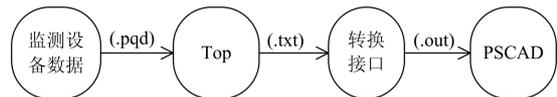
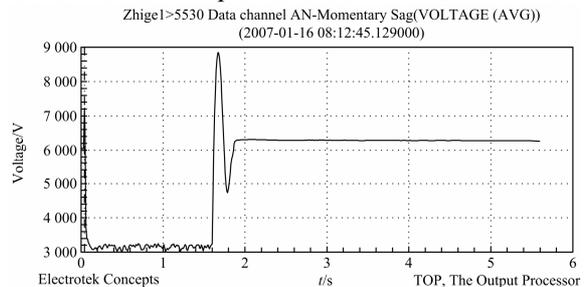


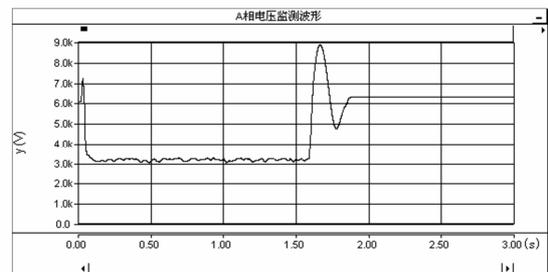
图 2 监测数据转换流程

Fig. 2 Diagram of the conversion of the monitoring data

图 3 为某母线处安装的现场监测设备所记录的一次电压跌落在 Top 软件中所显示的波形,以及将



(a) Top 中显示的波形



(b) PSCAD 中显示的波形

图 3 监测数据转换前后的波形

Fig. 3 Waveform of the monitoring data in the Top and PSCAD

该记录通过转换接口转换到 PSCAD 中进行显示的波形。由于监测到的三相电压的变化过程基本一致,故图中仅给出母线 A 相电压有效值的波形。根据数据对比可知,两波形的最大的数据点误差小于 0.1%,说明该接口实现了良好的数据转换。

### 3 仿真程序的自动生成

仿真程序自动生成接口的原理是从 GIS 数据库和 DMS 数据库中提取相应的信息,根据这些信息编写 PSCAD 的图形化仿真程序.psc,从而获得仿真计算模型。

在进行配电系统的电压跌落仿真计算时,目标区域内的元件数量非常多,例如,某个以 220 kV 变电站为中心的供电区域内,有 110 kV 变电站 6 座,每个变电站有 10 kV 母线 3~4 段,每段母线有 10 kV 出线 20~30 条,每条出线接有数量不等的负荷。可见,若建立起该区域完整的仿真计算模型进行电压跌落仿真计算,现有的硬件条件很难满足。因此,本文采用了分层的方法来生成仿真计算程序。该方法的原理框图如图 4 所示。

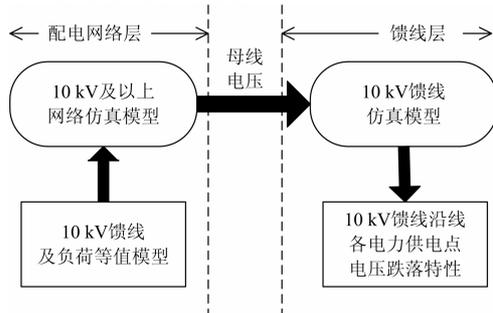


图 4 仿真计算模型的分层方法

Fig. 4 Layering method of the simulation model

仿真模型的分层原理是:首先自动生成 10 kV 及以上供电网络的仿真模型,此时各 10 kV 馈线及负荷进行等值处理<sup>[9]</sup>,其中馈线等效为一集总参数的阻抗,馈线沿线的负荷等效为一集中的由恒阻抗、恒功率和电动机模型以一定比例组合而成的负载。利用该模型来进行电压跌落仿真计算,从而得到各 10 kV 馈线的电压。以该电压为已知条件,代入到各 10 kV 馈线的仿真计算模型中,从而可得到 10 kV 馈线沿线各电力供应点的电压跌落特性。

可以看到,利用分层的方法,有效地减小了对配电网络的电压跌落问题进行仿真计算时的复杂程度,降低了仿真计算时对硬件的需求。

### 4 仿真程序校验方法

仿真程序的校验即是通过调整仿真模型中的参

数设置,使得通过仿真计算得到的安装有现场监测设备的母线处的电压跌落过程的特性与实际监测结果之间的误差满足预设指标。由于短路和接地故障是配电系统中产生电压跌落的主要原因,本文只针对这些故障引起的电压跌落问题进行研究。

表征电压跌落过程特性的两个主要参数是电压跌落的幅度和电压跌落的持续时间。对电压跌落的持续时间影响的最大因素是故障的持续时间,该信息可以从相应的现场监测设备的记录中获取。

对电压跌落的幅度影响较大的因素包括<sup>[10]</sup>:故障类型、故障发生地点、故障的特性、负荷模型<sup>[11]</sup>等。在这些因素中,故障的类型可以从现场监测设备的记录中获取。故障的发生地点可部分从供电部门的故障信息记录中获取,例如可确定具体是哪条馈线上发生故障,但故障发生在该馈线的具体位置则无法知晓。其他的因素如故障处的过渡电阻等则需要通过校验过程来确定。

考虑故障地点的过渡电阻时,认为监测点  $x$  位于故障点上游  $k$  公里处。则  $x$  点处的电压幅值可表示为

$$|U_x| = \sqrt{(U_{FR} + k\Delta U_R)^2 + (U_{FI} + k\Delta U_I)^2} \quad (1)$$

其中

$$U_F = U_{FR} + jU_{FI} \quad (2)$$

$$Z_{perkm} I_F = \Delta U_R + j\Delta U_I \quad (3)$$

式中: $U_x$  为  $x$  母线处的电压向量; $U_F$  为故障点处的电压向量; $Z_{perkm}$  为线路的单位阻抗值; $I_F$  为短路电流向量。

发生故障后,整个网络的等效阻抗发生变化,分析各母线处电压幅值随线路阻抗和负荷模型的变化关系是非常复杂的。且从式(1)可知,考虑过渡电阻后,电压跌落幅值曲线特性将不再与线路长度具有线性关系。但从式(1)分析可知,故障点与监测点的距离和过渡电阻对电压跌落过程中监测点处的电压幅值的影响的趋势是相同的,即距离增大和过渡电阻增大都会使得监测点处的电压幅值增大,反之减小。

因此,为了简化校验过程,可将馈线上故障发生的位置选定为馈线始端、距馈线始端 20%处、...距馈线始端 80%处等几个固定位置,而过渡电阻也按照类似方法进行处理。

以跌落过程中电压有效值的最大误差作为仿真与实测结果之间的误差,并设定当该误差小于实测结果的 1%时可认为仿真结果与实测结果基本相符。即预设指标为

$$\varepsilon = |U_{\text{mon}} - U_{\text{sim}}|_{\text{max}} < 0.01U_{\text{mon}} \quad (4)$$

式中： $U_{\text{mon}}$  为实测的电压有效值； $U_{\text{sim}}$  为仿真计算得到的电压有效值。根据对多个实测波形的分析， $U_{\text{mon}}$  在电压跌落过程中基本不变。

基于上述分析，本文提出的仿真计算模型的校验流程如图 5 所示。

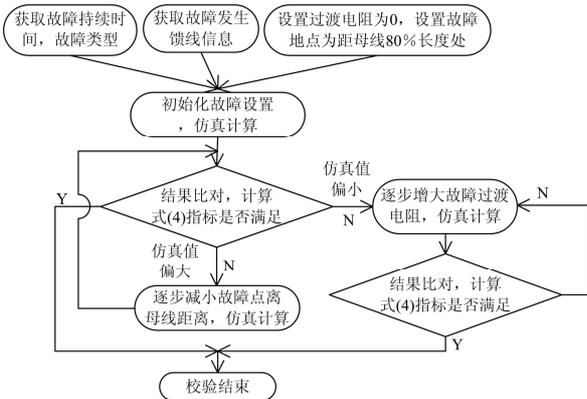


图 5 仿真模型校验流程

Fig. 5 Validation diagram of simulation model

## 5 应用实例

在某供电部门的 110 kV 变电站的 10 kV I 段母线处安装有电能质量监测设备。其监测到的某次电压跌落过程的波形如图 3(a)所示，利用监测数据转换接口转换到 PSCAD 中的波形如图 3(b)所示。对该监测波形进行分析可知，故障发生从 0.09 s 持续到 1.6 s，持续时间约为 1.51 s。电压跌落过程中相电压有效值为 3 200 V。且根据三相电压的变化规律基本一致可判定为发生了三相短路接地故障。从供电部门故障记录可知，同时间智格变大成 8188 线的台旭站/华虹二线 100 m 处发生故障并跳闸。利用仿真程序自动生成接口，生成了相应的 10 kV 及以上网络的仿真计算模型。同时利用上述分析结果，设置了该故障为三相短路接地，持续时间为 1.51 s。

根据仿真程序校验方法，首先设置故障过渡电阻为 0。首次仿真后得到的 A 相电压有效值如图 6 所示。

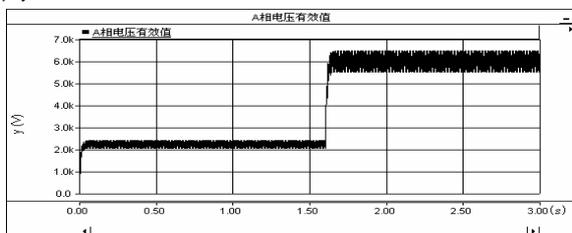


图 6 母线 A 相电压波形

Fig. 6 Phase A voltage waveform of the bus

该仿真波形与图 3(b)比对后可知，仿真计算得到的电压跌落过程中相电压有效值约为 2 200 V，增加过渡电阻至 2  $\Omega$ ，仿真波形如图 7 所示。

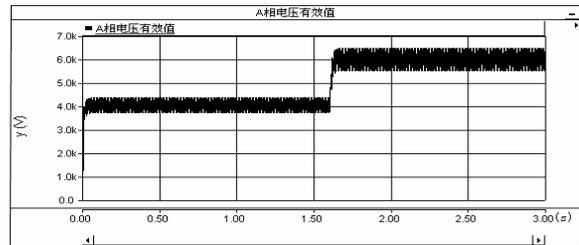


图 7 母线 A 相电压波形

Fig. 7 Phase A voltage waveform of the bus

该仿真波形与图 3(b)比对后可知，电压跌落过程中相电压有效值为 4 000 V，根据校验方法，将过渡电阻设置为 1.1  $\Omega$ ，仿真波形如图 8 所示。

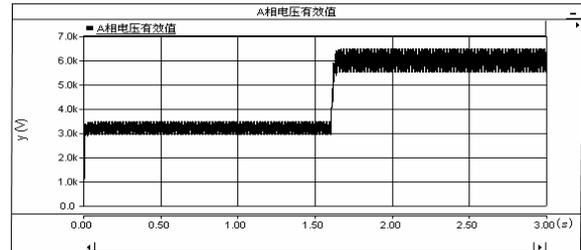


图 8 母线 A 相电压波形

Fig. 8 Phase A voltage waveform of the bus

该仿真波形与图 3(b)比对后可知，电压跌落过程中相电压有效值与监测值的最大误差为 2.32 V，满足预设指标式(4)的要求，可认为该故障设置的校验工作完成。

对比图 8 和图 3(b)发现，仍存在的不同是故障消除后电压恢复过程中电压上升的幅值不同，以及电压恢复为额定值的过渡过程时间不同。存在上述差别的原因在于：仿真中故障的切除是非常理想的，而实际中故障切除的时间可能较长，且这个过程是很难模拟的；另外，可通过调整等值负荷模型中的不同负载模型的比例使得电压恢复过程中最大的电压与实测值接近。考虑到通常在电压跌落的特性研究中对电压恢复过程不很关注，故该调整过程和仿真波形省去。

对仿真程序进行校验后，可得到本次故障中智格变 8188 线沿线各负荷点处的电压跌落特性。表 1 为 8188 馈线沿线各开关站母线处电压跌落过程中电压统计。

上述举例说明本文所提出的实时仿真系统在研究配电系统的电压跌落问题过程中有效结合了现场监测和仿真计算两种手段，利用较少的现场监测设

表 1 沿线各电力供应点电压有效值  
Table 1 RMS of the voltage of each power supply point along the line

电力供应点名称	A 相电压有效值/kV	跌落幅度/%
大成站/二段母线	2.867	56.56
大成站/路灯 560 M 负荷	2.628	60.19
大成站/路灯 370 M 负荷	2.629	60.19
大成站/德克负荷	2.629	60.19
大成站/塑胶负荷	2.631	60.14
台旭站/二段母线	2.483	62.38

备，能够获取整个配电系统各电力供应点的电压跌落特性，且精度较高。

利用校验后的仿真模型，可分析此次故障的电压跌落影响区域，如图 9 所示，图中标出了此次故障中各母线的电压跌落范围。

该系统还可用于计算其他电压跌落衡量指标，如 IEEE PES Task Force on Voltage Sag Indices 工作组所提出的 SARFI<sub>x</sub> 系数等。另外还可为供电部门分析故障发生地点提供一定的参考依据。

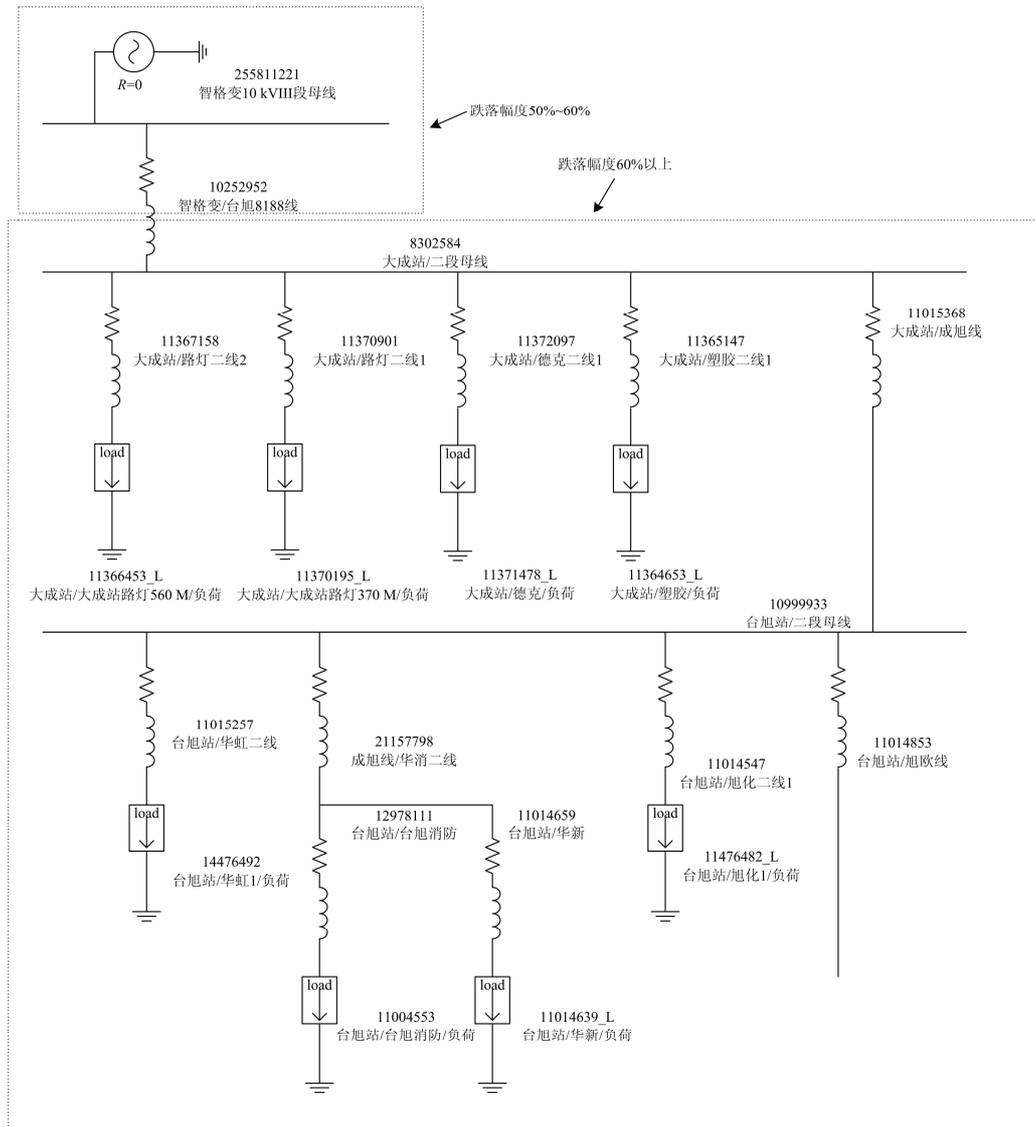


图 9 故障过程中各母线电压跌落分析

Fig. 9 Voltage sags of multi bus during the same fault

## 6 结论

本文所提出的基于实时监测的配电系统电压

跌落实时仿真系统将实时监测方法和数学模拟方法进行了有效的结合，同时具有需要监测的设备数量少，分析结果精确度较高的优点。基于本系统可分

析系统中每个电力供应点的电压暂降特性、分析系统发生故障时的影响区域等, 为研究分析配电网电压跌落问题, 进而制订电压跌落问题的解决方案提供了可靠的分析方法和技术手段。同时可以看到, 该系统有效地利用了供电部门现有的各种数据库资源, 具有较好的推广应用价值。

### 参考文献

- [1] 韩英铎, 姜齐荣, 乐健. 现代电力与 FACTS & DFACTS 技术[J]. 电力设备, 2003, 4(1): 5-10.  
HAN Ying-duo, JIANG Qi-rong, LE Jian. Modern power and FACTS and DFACTS technologies[J]. Electrical Equipment, 2003, 4(1): 5-10.
- [2] Vegunta S C, Milanovic J V. Estimation of cost of downtime of industrial processes due to voltage sags[C] // 2009 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2009: 1-4.
- [3] 江道灼, 张峰, 张怡. 基于配电监控终端的配电网故障区域判断和隔离[J]. 电力系统保护与控制, 2002, 30(15): 21-24.  
JIANG Dao-zhuo, ZHANG Feng, ZHANG Yi. Fault sections detection and isolation in distribution system based on FTU[J]. Power System Protection and Control, 2002, 30(15): 21-24.
- [4] 克长宾, 李永丽. 动态电压恢复器的电压跌落综合补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 94-99.  
KE Chang-bin, LI Yong-li. Study on voltage sags compensation strategy for dynamic voltage restorer[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 94-99.
- [5] 王东旭, 乐健, 刘开培, 等. 基于线路分段法的电压跌落监测网络优化布点策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 31-38.  
WANG Dong-xu, LE Jian, LIU Kai-pei, et al. Optimal location strategy of voltage dip monitoring network based on line sectionalizing method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 31-38.
- [6] 牟旭涛, 王宾, 潘贞存. 复杂配电系统电压跌落状态估计可观性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 32-40.  
MOU Xu-tao, WANG Bin, PAN Zhen-cun. The voltage sags state estimation observability analysis in complicated distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 32-40.
- [7] 刘海春, 徐立智, 谢少军. 基于周期相位的电压跌落检测方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 186-190.  
LIU Hai-chun, XU Li-zhi, XIE Shao-jun. Detection method of voltage sag based on period phase[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 186-190.
- [8] 王东旭, 乐健, 刘开培, 等. 基于虚拟节点的复杂电网电压跌落随机评估方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 190-197.  
WANG Dong-xu, LE Jian, LIU Kai-pei, et al. Stochastic assessment method of voltage dip in complex power grid based on virtual bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 190-197.
- [9] 吴振华, 王克文. 辨识网络拓扑错误的最小绝对值状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 29-35.  
WU Zhen-hua, WANG Ke-wen. State estimation using the least absolute value approach for topology error identification[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 29-35.
- [10] Filho J M, Leborgne R C. Voltage sags assessment based on fault characteristics[C] // 13th International Conference on ICHQP. 2008: 1-6.
- [11] Le T, Lamoree J, McGranaghan M. Distribution system voltage sags: interaction with motor and drive loads[C] // Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Chicago, USA, 1994.

收稿日期: 2013-01-18; 修回日期: 2013-05-14

作者简介:

毛涛(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事微电网运行与控制技术的研究; E-mail: maotaohejiaren@163.com

乐健(1975-), 男, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 主要从事电能质量控制技术、智能电网运行与控制技术的研究; E-mail: lej01@mails.tsinghua.edu.cn

黄银龙(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事微电网电能质量及其控制技术的研究。