

# 电力系统电压暂降源定位方法综述

吕干云<sup>1</sup>, 孙维蒙<sup>1</sup>, 汪晓东<sup>1</sup>, 程浩忠<sup>2</sup>

(1. 浙江师范大学数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

**摘要:** 主要对电力系统电压暂降源的定位方法进行了综述。为了加深对电压暂降源定位问题的认识和理解, 从电压暂降的定义、引起原因入手, 介绍了电压暂降源定位问题的含义。重点讨论了当前现有的四类主要定位算法, 包括基于扰动功率和能量的定位法、基于阻抗实部的定位法、基于暂降分类的定位法及其他方法, 并分析了它们各自的原理、优势和不足。在总结目前现有电压暂降源定位方法的基础上, 从三个方面对今后的研究工作进行了展望。

**关键词:** 电能质量; 电压暂降; 源定位; 暂降分类; 综述

## Review on methods for voltage sag source location in power system

LÜ Gan-yun<sup>1</sup>, SUN Wei-meng<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, CHENG Hao-zhong<sup>2</sup>

(1. Department of Information Science and Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Methods for voltage sag source location in power system are reviewed in the paper. In order to understand the problem of voltage sag source location, the paper starts with definition and cause of voltage sags, and introduces the concept of sag source location. Four main methods presently used are discussed emphatically, including the disturbance power and disturbance energy based location method, the resistance sign based location method, sag classification based location method, and other methods. Their principles, advantages and disadvantages are compared. The achievements of all studies are concluded, and three prospects of future work are given in the end.

This work is supported by Natural Science Foundation of Zhejiang Province(No.Y1090182).

**Key words:** power quality; voltage sags; source location; sag classification; review

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0241-05

## 0 引言

电压暂降是指在系统频率时电压有效值(RMS)瞬时减小到额定值的10%~90%的范围内, 其持续时间一般为半个工频周期到数秒钟<sup>[1]</sup>。近年来, 由于电压暂降给敏感工业用户带来了巨大的经济损失, 已成为目前最严重的电能质量问题, 引起了国内外电工领域的广泛关注<sup>[2-3]</sup>。

目前研究者在电压暂降检测、分类方面已有较丰富的研究成果<sup>[4-5]</sup>。然而, 电压暂降给工业用户造成的巨大经济损失和责任如何分担, 如何公平合理地解决相关争议和纠纷, 则需确定电压暂降的方位。目前有关这方面的研究相对较少, 且缺少很充分的理论依据, 其可靠性和准确性有待于进一步提高。

本文将从电压暂降的引起原因入手, 分析电压暂降源的定位问题, 重点讨论当前现有的四类主要定位方法, 最后对今后的研究工作进行展望。

## 1 电压暂降起因与源定位

电压暂降造成原因总的来说是由于电源阻抗分压增加, 进而引起公共连接点(PCC)电压暂降。分为两方面, 一是由于流经系统电源阻抗的电流突然增大, 造成电源阻抗分压增加, 进而引起电压暂降; 二是由于系统阻抗的突然增加, 造成电源阻抗分压增加, 从而导致电压暂降。从实际情况看, 暂降主要由前者引起, 后者很少发生。前者主要有三类: 故障引起的电压暂降、感应电机启动引起的电压暂降、变压器激磁涌流引起的电压暂降。文献[6]采用模糊理论研究了电压暂降起因的分类, 算法简单快速。基于S变换的电压暂降分类<sup>[7]</sup>对三种暂降提

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y1090182)

取多种时频特征,较好地完成了暂降起因识别。准确判断暂降起因是暂降源正确定位的重要保证,且起因本身也是电压暂降源定位的一个指标。

电压暂降源的定位,就是确定引起电压暂降的干扰源位于监测装置的哪一侧<sup>[8]</sup>,从而界定供用电双方的责任。如图1所示,参照有功潮流的方向,如果故障发生在监测装置M的左边,称暂降源位于监测装置M的后方,或称上游方向;如果故障发生在M的右边,则称暂降源位于监测装置M的前方,或称下游方向。电压暂降源方位的确定对事故诊断、补偿以及责任认定十分必要<sup>[9]</sup>。目前电压暂降源定位主要有以下几种方法。

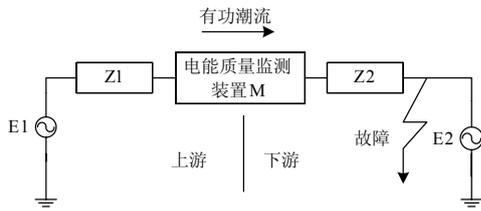


图1 电压暂降源定位示意图

Fig.1 Basic diagram of voltage sag source location

## 2 电压暂降源定位法

### 2.1 基于扰动功率和扰动能量的定位法

基于扰动功率和扰动能量的电压暂降源定位法<sup>[10]</sup>,使用暂降过程中的扰动能量和扰动功率来确定电压暂降源来自监测设备的哪一侧。因扰动造成瞬时功率的变化,即扰动功率定义为:

$$DP = P_f - P_{ss} \quad (1)$$

流过测量装置的扰动能量定义为:

$$DE(t) = \int_0^t DP(u)du \quad (2)$$

其中,  $P_f$ 和 $P_{ss}$ 分别为扰动期间的有功功率和扰动发生之前的稳态有功功率。

如果扰动能量 $DE$ 是正数,表明暂降源来自监测装置的下游区;如果 $DE$ 是负数,则说明扰动表明暂降源来自监测点的上游区。该法很大程度上依赖于扰动能量和扰动功率两个量的吻合度,如果两者得到的结果不匹配,那定位结果就容易出错。王成山等<sup>[11-12]</sup>将此法应用到了电容器投切引起的扰动源定位,并将此扰动功率和扰动能量法进行改进扩展,改进法较好地完成了系统释放能量或注入系统能量的多种扰动定位,包括电压暂降和电压脉冲等暂态扰动。

2008年,董新洲等<sup>[13]</sup>将扰动无功功率和无功能量引入到暂降源定位中,使对故障引起的暂降源定位法得到新扩展,首先利用希尔伯特变换提取出暂

降期间的瞬时有功功率和瞬时无功功率的变化量 $\Delta p(t)$ 、 $\Delta q(t)$ ,对其积分得到扰动有功能量和无功能量:

$$\Delta E_p(t) = \int_0^t \Delta p(t)dt \quad (3)$$

$$\Delta E_q(t) = \int_0^t \Delta q(t)dt \quad (4)$$

如果 $\Delta E_p(t)$ 、 $\Delta E_q(t)$ 都是正数,表明暂降源来自下游;如果 $\Delta E_p(t)$ 、 $\Delta E_q(t)$ 都是负数,则说明扰动源位于上游,该文还详细讨论了对称和不对称故障、故障接地阻抗以及故障时电压初相角的影响。此外,Roberto Chouhy在文献<sup>[14]</sup>也提到了利用无功功率变化的极性来进行暂降源定位。

### 2.2 基于阻抗实部的定位法

包括基于等效阻抗实部极性、基于系统轨迹斜率、基于电流实部极性以及基于距离阻抗继电器的定位法。

#### 2.2.1 基于等效阻抗实部极性的定位法

电压暂降发生大多数情况下都与故障有关,文献<sup>[15]</sup>从现有的电力系统保护和故障定位的方法中受到启发,提出基于监测点等效阻抗实部极性的暂降源定位法,先假定在监测装置发生电压暂降的另一侧参数不发生变化,然后根据测得因电压暂降而产生的基频正序电压、电流变化量的比值,获得所定义的等效阻抗:

$$Z_e = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{sag} - U_{pre}}{I_{sag} - I_{pre}} \quad (5)$$

其中: $U_{sag}$ 、 $I_{sag}$ 分别为电压暂降过程中的基波电压和电流; $U_{pre}$ 、 $I_{pre}$ 分别为电压暂降扰动前的基波电压和电流。

根据该等效阻抗实部的极性,来确定电压暂降源的位置。若等效阻抗实部为正,则暂降源位于上游方向,否则暂降源位于下游方向。该方法具有一定的通用性,下面的系统轨迹斜率法可认为是该法的一种变形。

#### 2.2.2 基于系统轨迹斜率的定位法

该方法<sup>[8]</sup>通过分析电压暂降期间的系统轨迹,将监测点的基波电压幅值与功率因数的乘积( $|V\cos\theta|$ )和电流幅值进行最小二乘法拟合,利用拟合线斜率来实现电压暂降源定位,正斜率表明暂降源来自监测点的上游区,负斜率则来自下游区。该斜率的正负性与等效阻抗实部极性物理含义相近,是等效阻抗实部极性定位法的一种变形。

#### 2.2.3 基于电流实部极性的定位法

这种方法<sup>[16-17]</sup>以电压方向为参考,通过观察分

析暂降期间的电流实部(即  $I \cos \theta$ ,  $\theta$  为功率因数角), 进行电压暂降源定位。如果在暂降的开始时刻该电流实部小于零, 则表明暂降源来自监测点的上游侧; 如果在暂降的开始时刻电流实部大于零, 则表明暂降源来自监测点的下游侧。需要注意的是, 该判断采用的电流是电流的变化量。考虑到式(5)中基波电压的变量恒为负, 那变化电流实部极性与等效阻抗实部极性则刚好相反, 因而该法也与基于等效阻抗实部极性定位法原理相近, 只是这里计算采用的时刻为暂降的开始时刻。

#### 2.2.4 基于距离阻抗继电器的定位法

大多数输电线路出于保护需要都会安装距离保护继电器, 文献[18]从该继电器处获得信息, 利用暂降前后阻抗及相角变化确定暂降源方位。如果  $|Z_{\text{sag}}| < |Z_{\text{preg}}|$  且  $\angle(Z_{\text{sag}}) > 0$  则表明暂降源来自下游区, 反之来自上游区。但在辐射网络中若故障发生在电源和距离阻抗继电器之间, 阻抗不会出现变化; 如果发生的故障是非永久性的, 可能无法从距离阻抗继电器处得出结论。

#### 2.3 基于暂降分类的定位法

该方法先根据监测点的电压/电流特征进行暂降原因诊断分类, 然后对不同起因暂降分别进行源定位。文献[19]先根据暂降前后的电流两次谐波判别出是否由变压器激磁引起, 若是则根据暂降前后基波电流变化量进行定位, 变化量大于某个阈值则表明暂降源在下游侧, 否则来自上游侧。若暂降不是由变压器激磁引起, 则根据暂降前后功率变化来判别是否由感应电机启动引起, 若功率变化大于某阈值, 则暂降由感应电机启动引起; 否则认为由故障引起, 此时再根据暂降前后基波电流相对变化量进行定位, 若该变化量大于某阈值, 则暂降源来自下游侧, 否则来自上游侧。楼书氢等<sup>[20]</sup>提出的暂降分类定位法与文献[19]的主要区别是, 故障引起的暂降定位采用了故障定位中常用的行波测距法, 效果较好。该类定位法考虑了不同电压暂降起因上的区别, 其暂降源定位具有更好的针对性。

#### 2.4 其他定位法

第四类方法跟前面一些方法相比, 一个重要特点是需要数据信息条件相对较少, 如需要较少的监测点, 或者监测点需要较少的数据信息。目前主要包括下面三种方法。

##### 2.4.1 仅基于电压量的定位法

上述一些方法基本上都同时需要测量电流量、电压量, 该方法<sup>[21]</sup>仅通过连接点电压的暂降幅度和相位跳变情况实现源定位, 认为由传输线故障和工业用户网内故障引起的电压暂降, 其暂降幅度与相

位跳变之间的轨迹线有不同模式特征, 据此判断出暂降源来自传输线故障还是用户网内。但该方法没有给出两边都是传输线情况下的暂降源定位, 文献[22]则对此进行了补充, 通过分析两输电系统之间变压器的两端电压暂降前后的变化, 来确定暂降源方位。设暂降前后变压器两侧电压相对变化量分别为  $\Delta V_1 = (V_{1\text{-pre}} - V_{1\text{-sag}}) / V_{1\text{-pre}}$ ,  $\Delta V_2 = (V_{2\text{-pre}} - V_{2\text{-sag}}) / V_{2\text{-pre}}$ , 如果  $\Delta V_2 > \Delta V_1$ , 则表明暂降源来自  $V_2$  侧; 反之则表明暂降源来自  $V_1$  侧。

##### 2.4.2 等效注入电流状态估计法

如果暂降扰动发生前电网参数和电压是已知的, 则故障位置和电流信息就能确定各节点的电压暂降情况。文献[23]通过状态估计法来求解各节点的故障电流信息:

$$Z = Hx + \varepsilon \quad (6)$$

其中:  $Z$  是  $m$  维的部分观测节点电压幅值;  $x$  是  $n$  维的故障电流稀疏向量;  $H$  是  $m \times n$  的观测矩阵;  $\varepsilon$  为量测误差。这里  $x$  为状态变量, 通过解这个状态估计问题, 求得各母线的故障电流, 从而确定电压暂降源的位置。

##### 2.4.3 支路电流变化量定位法

该方法<sup>[24]</sup>通过两步实现。首先通过故障电流对暂降电压的灵敏性分析, 确定电能质量监测装置的最优位置分布, 当这些位置的母线发生故障时, 将会导致较大电压暂降。然后根据监测装置所在母线的各支路电流变化量来实现暂降源定位:

$$D_i = \frac{I_f - I_s}{I_s} \quad (7)$$

其中,  $I_s$ ,  $I_f$  分别为电压暂降前后的电流值。然后找出每一监测装置中最大  $D_i$  的对应支路和所有监测装置最大两个  $D_i$  的对应支路, 如果最大支路电流变化是第二大支路电流变化量的三倍以上, 那前者所在支路就是暂降源的所在位置。否则再根据两个最大电流变化支路的电流方向及每一监测装置的最大支路电流变化等来确定暂降源位置。

### 3 研究展望

电压暂降是电力系统中两个最主要的电能质量问题, 而电压暂降比中断发生的频率要高得多, 因而相比之下很多欧美国家更重视电压暂降。特别是最近十几年来, 由于电网负荷日益复杂, 电压敏感设备不断增加, 电压暂降引起了巨大经济损失, 供电方和用户都希望明确责任、分清源头, 更好地协调电力市场环境下电力部门与用户之间的纠纷, 暂降源定位迫切需要解决。通过以上电压暂降源定位

方法综述,今后可以从下面一些角度开拓新的研究方向:

(1) 自从文献[10]较早提出电压暂降源定位以来,相应方法先后被提出,并取得了较丰富的成果。而当前现有的几类主要电压暂降源定位方法,包括扰动功率扰动能量法、实部电流法、系统轨迹法等,对负荷的动态特性因素考虑很少,影响了上述一些方法的定位准确度,总体准确性较低( $<85\%$ <sup>[25]</sup>),离实际应用要求还有一定的差距,且主要适用于辐射状电网的暂降源定位。

(2) 对暂降源的确定实际上应包括扰动源位置的确定和扰动起因的确定,且从理论上讲,扰动方位的确定与扰动起因有一定关系,在得出起因后再判定暂降源位置,具有改善定位算法精度的可能。所以,在不同暂降起因分析的基础上,更多考虑暂降情况下负荷特性的动态变化,将能实现一种具有更高精度和可靠性的暂降源定位法。

(3) 由于经济条件的限制,不可能在所有母线上安装电能质量监测。而现在大多数方法都只是确定暂降源对本节点的相对位置,而要正确定位暂降源在整个电网的准确位置,需要所有或大量节点的充分监测信息,所需条件很高。基于不确定信息的定位法在今后研究中将是一个新的重要方向。

### 参考文献

- [1] IEEE Std. 1159-1995. Recommended practice for monitoring electric power quality[S]. 1995.
- [2] Martinez J A, Martin-Arnedo J. Voltage sag studies in distribution networks—part I: system modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (3): 1671-1679.
- [3] Pereira F, Souto O, de Oliveira J, et al. An analysis of cost related to the loss of power quality[C]. // Proc. 8th Int. IEEE Conf. Harmonics Quality Power. Athens(Greece): 1998: 777-782.
- [4] 熊玲玲, 刘会金, 傅志伟. 基于小波包变换的电压骤降信号分析[J]. 继电器, 2004, 32 (11): 8-12.  
XIONG Ling-ling, LIU Hui-jin, FU Zhi-wei. Voltage sag analysis based on wavelet package transform[J]. Relay, 2004, 32 (11): 8-12.
- [5] Bollen M H J, Styvaktakis E. Tutorial on voltage sag analysis[J]. IEEE, 2001: 193-194.
- [6] Kezunovic M, Liao Yuan. A new method for classification and characterization of voltage sags[J]. Electric Power Systems Research, 58 (3), 2001: 27-35.
- [7] 杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇, 等. 基于 S 变换的电压凹陷分类专家系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 98-104.  
YANG Hong-geng, LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong, et al. S-transform-based expert system for classification of voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (1): 98-104.
- [8] Li C, Tayjasanant T, Xu W. Method for voltage sag source detection by investigating slope of the system trajectory[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150 (3): 367-372.
- [9] Arrilaga J, Booleen M J. Power quality following deregulations[J]. Pro. IEEE, 2000, 88 (2): 246-261.
- [10] Parsons A C, Grady W M, Power E J. A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy[J]. IEEE Trans Power Delivery, 15 (3), 2000: 1081-1086.
- [11] 王继东, 王成山. 基于小波变化的电容器投切扰动源定位[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (5): 20-24.  
WANG Ji-dong, WANG Cheng-shan. Capacitor switching disturbance source locating based on wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (5): 20-24.
- [12] 张文涛, 王成山. 基于改进扰动功率和能量法的暂态扰动定位[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (8): 31-34.  
ZHANG Wen-tao, WANG Cheng-shan. Transient disturbances location based on improved disturbance power and energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (8): 31-34.
- [13] Kong Wei, Dong Xin-zhou, Chen Zhe. Voltage sag source location based on instantaneous energy detection[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78 (3): 1889-1898.
- [14] Leborgne R C, Makaliki R. Voltage sag source location at grid interconnections: a case study in the zambian system[C]. //Power Tech, 2007 IEEE. Lausanne: 2007: 1852-1857.
- [15] Tayjasanant Thavatchai, Li Chun, Xu Wilsun. Resistance sign-based method for voltage sag source detection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 20 (4), 2005: 25-44.
- [16] Hamzah Noraliza, Mohamed Azah, Hussain Aini. A new approach to locate the voltage sag source using real current component[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72 (2): 113-123.
- [17] Hamzah Noraliza, Mohamed Azah, Hussain Aini. Locating voltage sag source at the point of common

- coupling in industrial distribution systems[C]. //PEDS 2005. Kuala Lumpur, 2005: 532-537.
- [18] Pradhan A K, Routray A. Applying distance relay for voltage sag source detection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (3): 529-531.
- [19] Seung Ill Moon, Seon-Ju Ahn. A method to determine the relative location of voltage sag source for power quality diagnosis[C]. //IFAC World Congress. 2005: 2192-2197.
- [20] 楼书氢. 配电网中电压暂降源的识别与定位[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- LOU Shu-qing. The identification and location of the voltage sag source in distribution system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [21] Gomez J, Morcos M, Tourn D, et al. A novel methodology to locate originating points of voltage sags in electric power systems[C]. // International Conference on Electricity Distribution. Turin: 2005.
- [22] Roberto Chouhy. Voltage sags: single event characterization, system performance and source location[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2007.
- [23] Liao Huaiwei. Voltage sag source location in high-voltage power transmission networks[C]. //Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh: 2008: 1-4.
- [24] Chang G W, Chao J P, Chu S Y, et al. A new procedure for tracking the source location[C]. //Power Engineering Society General Meeting. Tampa: 2007: 1-4.
- [25] Roberto Chouhy, Daniel Karlsson, Jaap Daalder. Voltage sags source location methods performance under symmetrical and asymmetrical fault conditions[C]. //IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Venezuela(Latin America): 2006: 1-6

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2010-01-08

作者简介:

吕干云(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电能质量、电力电子及人工智能在电力系统中的应用。

E-mail: ganyun\_lv@zjnu.cn

(上接第 222 页 continued from page 222)  
点击检索数据按钮, 便可以完成了查询, 结果显示在 Sheet1 中, 如图 4 所示数据值闭合或断开, 便是所查询压板的位置状态。

## 5 结语

智能压板系统成功解决了电力系统继电保护设备二次压板的位置监视问题, 利用计算机技术与网络通信技术成功实现了压板位置监视的自动化, 能准确、可靠地反映出压板的工作状态位置信息, 避免了人工操作出现失误后无法由微机监控实时报警而造成的重大损失, 有效地提高了压板位置信息管理的效率, 适用于 66 kV、110 kV、220 kV、330 kV 及 500 kV 高压、超高压变电站, 作为与网、省、地各级电力公司压板监测装置, 为电网的安全、经济运行提供一个有效的解决方案, 适应了数字化变电站与智能电网发展的不断需求。

目前, 智能压板系统实现二次装置运行、管理的各个环节“可控、在控”, 实现继电保护专业管理现代化, 从整体上提升电网调度运行管理水平。该系统在国家电网冯屯 500 kV 变电站中运行稳定, 效

果良好, 得到了电网生产运行人员的肯定与好评, 准备在更大的范围内推广应用。

## 参考文献

- [1] 任俊杰, 蒋岚. 电力系统继电保护压板图像识别系统[J]. 北京联合大学学报, 2004, 18 (2): 60-64.
- REN Jun-jie, JIANG Lan. The image recognition system of relaying plate in electric power system[J]. Journal of Beijing Union University, 2004, 18 (2): 60-64.
- [2] 汪洪明, 杨妮娜. 二次压板操作的安全措施与防范探讨[J]. 继电器, 2007, 35 (2): 76-78.
- WANG Hong-ming, YANG Ni-na. Discussion on security and prevention of the operation of secondary pressure plate[J]. Relay, 2007, 35 (2): 76-78.

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2009-12-28

作者简介:

牛志刚(1961-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化装置、继电保护等;

贾腾飞(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与数字化变电站; E-mail: jtf1002@126.com

徐庆录(1957-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为通信、自动化、继电保护等。