

配电网中电压暂降源的检测方法比较

楼书氢^{1,2}, 徐永海^{1,2}, 陈恩黔³

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学电气工程学院, 北京 102206; 3. 贵州电力调度通信局调度科, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 电压暂降因为对敏感设备的危害而成为最受关注的电能质量问题之一。电压暂降源的检测对电能质量故障检测、诊断及缓和策略的制订十分必要, 并有助于合理解决电力部门与用户之间的纠纷。对现有的基于扰动功率和扰动能量, 基于等效阻抗实部符号, 基于不同故障类型等电压暂降源检测的方法进行了详细的分析, 比较了它们各自的特点; 在总结目前电压暂降源检测方法的基础上, 对今后的配电网电压暂降源检测方法研究工作进行了展望。

关键词: 电能质量; 电压暂降源; 检测; 配电网

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)15-0063-05

0 引言

随着电力电子、自动化技术的发展, 过程控制器、可编程逻辑器件、调速驱动器等设备对电压暂降越来越敏感, 这些设备的使用越来越广, 因此对于工业用户来说, 电压暂降已经逐渐成为主要的电能质量问题。同时, 对于电力部门来说, 由电压暂降引发的客户抱怨以及经济纠纷增多^[1], 也会影响其在电力市场环境下的竞争力。根据检测到的电压暂降数据特征识别其产生原因, 是电压暂降的一个重要评价指标。电压暂降源的确定对电能质量故障检测、诊断、缓和策略的制订是十分必要的^[2], 而且研制减缓电压暂降对负荷影响作用的装置, 以期将扰动产生的影响降到最小, 也需要确定扰动的位置。准确的识别以及电压暂降源位置的确定, 不但有助于评估区域配电系统和选择合理的治理措施, 而且可以作为电力市场环境下电力部门与用户之间协调纠纷的重要依据, 同时相关的电能质量问题能得到顺利的解决, 电力部门和用户双方遵循的标准也可以制订出来。

1 电压暂降源的检测方法

电压暂降源的检测, 就是确定引起电压暂降的故障发生在监测装置的哪一侧^[3]。如图 1 所示, 参照基波有功潮流的方向, 如果故障发生在 A 处, 则位于监测装置 M 的后方, 或称为上游方向; 如果发生在 B 处, 则位于监测装置 M 的前方, 或称为下游

方向。

1.1 采用基于扰动功率和扰动能量的方法

文献 [4] 是较早对扰动源的定位进行研究的, 文中提出可以通过对扰动功率和扰动能量的检测得到因发生扰动而出现的功率和能量的变化, 并以此来确定扰动源, 相对于功率潮流方向, 位于测量装置的哪一侧。

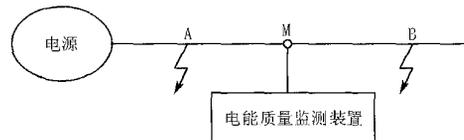


图 1 电压暂降源检测示意图

Fig 1 Schematic diagram of sag source detection

在平衡系统中, 三相瞬时功率在稳态时是一个常数, 而在扰动发生时, 瞬时功率会因电压、电流的暂时脱离稳态而变化。即

$$DP(t) = p(t)_f - p(t)_{ss} \quad (1)$$

其中: $DP(t)$ 代表的是因扰动造成的瞬时功率的变化, 即扰动功率, $p(t)_f$ 是扰动发生时的三相瞬时功率值, $p(t)_{ss}$ 是扰动发生前稳态时的三相瞬时功率值。理想情况下, 在没有扰动发生时, $DP(t)$ 值为零。 $DE(t)$ 被定义为是 $DP(t)$ 的积分, 即

$$DE(t) = \int DP(t) dt \quad (2)$$

与 $DP(t)$ 相类似, $DE(t)$ 代表的是因扰动所造成的流过测量装置的能量值的变化, 即扰动能量。在理想情况下, 扰动过程中的 $DE(t)$ 直接受到 $DP(t)$ 的影响, 因为在系统其它地方 $DP(t)$ 值为零。为确定扰动源的方位, 需要计算因扰动而产生的 $DE(t)$ 值的变

基金项目: 华北电力大学博士学位教师科研基金资助项目

化^[5]:

$$DE = DE_F - DE_0 \quad (3)$$

其中: DE_F 是扰动结束时的 $DE(t)$ 值, DE_0 是扰动开始时的 $DE(t)$ 值。如果 DE 是正数, 扰动位于测量装置之前; 而如果 DE 是负数, 则说明扰动位于测量装置之后。

文中指出扰动功率和扰动能量是可以用来确定电压暂降和电容器投切这两种扰动发生在测量装置的哪一侧的。但它并没有数学分析算法, 而且这个方法的可信度也会因为扰动功率和扰动能量的结果不匹配而降低^[3]。

1.2 采用距离阻抗继电器的方法

大多数的输电线路出于保护的都需要都会安装距离阻抗继电器, 文献[6]指出, 电能质量监测装置可以通过距离阻抗继电器或者能实现相应功能的算法得到计算出电压暂降发生前后阻抗的幅值和相角所需要的信息, 电压暂降源的位置就可以由同一时刻各处电能质量监测装置提供的信息来确定了。提出的判定方法是:

如果 $|z_{\text{sag}}| < |z_{\text{pre sag}}|$, $z_{\text{sag}} > 0$, 则电压暂降源位于电能质量监测装置的前方;

如果 $|z_{\text{sag}}| < |z_{\text{pre sag}}|$, $z_{\text{sag}} < 0$, 则电压暂降源位于电能质量监测装置的后方。

这个方法在确定电压暂降源位置时, 也有一些局限: 在辐射网络中, 如果故障发生在电源和距离阻抗继电器之间, 即在距离阻抗继电器的后方, 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。

1.3 采用判定直线斜率的方法

文献[3]提出了判定直线的斜率来确定电压暂降源位置的方法。该文认为, 当电压暂降发生时从测量点获得的基频电压幅值与功率因数的乘积和基频电流幅值之间的关系对于不同的故障发生点是不同的, 可以应用最小二乘法将测得的 $(I, |U \cos \alpha|)$ 在直角坐标上用一条直线连起来, 通过判断连接这些点的直线的斜率来确定电压暂降源的位置。

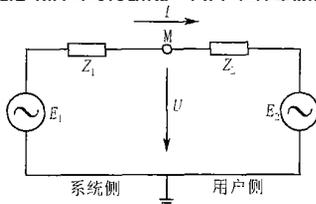


图2 电压暂降源检测分析等效电路

Fig 2 Equivalent circuit for sag source detection analysis

如图2, 参照有功潮流的方向,

$$U = E_1 - IZ_1 \quad (4)$$

U 、 I 可以直接测得, 上式左右两边乘以 I^* (共轭), 并取实部, 有

$$U I \cos \alpha_2 = E_1 I \cos \alpha_1 - I^2 R \quad (5)$$

α_2 为 U 、 I 的相角差, α_1 为 E_1 、 I 的相角差, R 是 Z 的实部。

$$U \cos \alpha_2 = -RI + E_1 \cos \alpha_1 \quad (6)$$

若 $\cos \alpha_2 > 0$, $|U \cos \alpha_2| = U \cos \alpha_2$, 当 $\cos \alpha_1$ 在扰动发生时变化不大, 就有测得的各点坐标 $(I, |U \cos \alpha_2|)$ 位于一条斜率为 $-R$ 的直线上。相反若 $\cos \alpha_2 < 0$, 则有

$$|U \cos \alpha_2| = RI - E_1 \cos \alpha_1 \quad (7)$$

各点坐标位于一条斜率为 $+R$ 的直线上。

由此给出的判定方法:

如果连接各点坐标 $(I, |U \cos \alpha_2|)$ 的直线的斜率为正, 则电压暂降源位于上游方向。

如果直线的斜率为负, 则电压暂降源位于下游方向。

同时, 如果电压暂降发生过程中, 有功潮流的方向改变的话, 则电压暂降源位于上游方向。

这个方法由于只需要知道直线的斜率, 不需要计算其它参数, 或是设定限值, 因而简单且易于实现。此外, 这种方法采用了大量的数据, 也会提高它的可信度。尽管进一步的研究发现, 在故障于测量装置的某一侧发生时, 测量装置另一侧的参数不发生变化的这一假设并不能满足, 但通过理论分析证明, 这个方法还是适用的。

1.4 采用基于等效阻抗实部符号的方法

电压暂降的发生大多数情况下都与故障有关, 于是从现有的关于电力系统保护和故障定位的方法中受到启发, 将系统和负荷分别视为一个整体, 基于电能质量监测点处的等效阻抗实部符号的方法在文献[7]中提了出来。通过对等效电路进行的电压暂降分析, 即假定在电能质量监测装置的一侧发生电压暂降时, 监测装置另一侧的参数不发生变化, 根据测得的因电压暂降而出现的基频正序电压、电流的改变量的比值, 获得文中所定义的等效阻抗, 再由它的实部的符号, 来确定电压暂降源的位置。

如图2, 假设用户侧发生扰动, 并导致测量点M处发生电压暂降前, 有

$$U = E_1 - IZ_1 \quad (8)$$

当扰动发生后, 电压、电流变为 $U + \Delta U$, $I + \Delta I$, 其中 ΔU 、 ΔI 分别为用户侧出现扰动后电压、电流的

变化量。并认为 Z_1 和 E_1 在扰动过程中都不发生变化,于是有:

$$U + U = E_1 - (I + I) Z_1 \quad (9)$$

由此可以得到系统侧的阻抗 $Z_1 = -\frac{U}{I}$ 。相似的,如果假定系统侧发生扰动,也可以得到用户侧的阻抗 $Z_2 = -\frac{U}{I}$ 。于是阻抗 $Z_c = -\frac{U}{I}$ 的符号因为扰动发生的位置而有不同,这也是文中提出的方法的基础。当检测到电压暂降产生时,由下式计算等效阻抗。

$$Z_c = \frac{U}{I} = \frac{U_{\text{during}} - U_{\text{pre}}}{I_{\text{during}} - I_{\text{pre}}} \quad (10)$$

其中: $(U_{\text{during}}, I_{\text{during}})$ 、 $(U_{\text{pre}}, I_{\text{pre}})$ 分别为电压暂降发生前和暂降过程中相应的基频正序电压、电流值。由于阻抗总是正值,就用它的实部的符号来确定电压暂降源的方位。相应的判定方法是:

如果获得的等效阻抗的实部为正,则电压暂降源位于上游方向。

如果获得的等效阻抗的实部为负,则电压暂降源位于下游方向。

这个方法虽是从线性系统中推导得出的,但对于含有变频调速驱动设备、感应电动机等非线性负荷的系统,也是适用的。仿真、试验和现场实测的结果,都证实这个方法是可行的。

1.5 采用基于不同故障类型的方法

文献 [8] 指出,对扰动源的确定包括扰动源位置的确定和扰动源种类的确定,扰动方位的确定和扰动的起因有关联,可以由相应的方法来实现。

当线路出现故障时,故障处的阻抗降低,会有较大的短路故障电流流向故障处,故障处附近的电压同时也会下降,直到保护装置动作,消除故障,电压才又恢复。文中给出的线路故障引起的电压暂降波形特征:电压暂降发生和恢复波形陡,突变信号间的电压幅值基本不变,暂降幅值明显要低于变压器投运和感应电动机启动这两种情况下的幅值。相应的判定方法是:

如果 $\frac{I_{\text{sag}}}{I_{\text{ss}}} > Th_{\text{LF}}$, 则电压暂降位于下游方向;反之,则位于上游方向。

其中: I_{sag} 为电压暂降发生时电流基频分量, I_{ss} 为线路故障前电流基频分量, Th_{LF} 是 $\frac{I_{\text{sag}}}{I_{\text{ss}}}$ 的限值。限值的

确定需要考虑到电流幅值会因系统强度、阻抗的不同而变化。

变压器投运时,由于铁心的饱和特性,会在送电端产生数倍于额定电流的涌流,其大小和变压器投运时正弦电压的初相角及铁心剩磁有关。变压器投运引起的电压暂降总是三相不平衡的,线圈铜损导致暂降电压的恢复也是个逐渐的过程。文中给出的变压器投运引起的电压暂降波形特征:三相电压暂降程度不同;暂降电压逐渐恢复,没有突变;暂降电压波形中含有高次谐波,尤以二次谐波为主^[9]。确定是变压器投运引起电压暂降的方法是:

如果 $\frac{I_2}{\sum_{h=2}^7 I_h} > Th_{\text{h1}}$, 则认为是变压器投运;反之,则为其它原因。

其中: h 谐波次数, I_h 为 h 次谐波电流的变化, Th_{h1}

为 $\frac{I_2}{\sum_{h=2}^7 I_h}$ 的限值,它的选取还需要考虑变压器的因

素。与线路故障时的判据相似,相应的判定方法是:

如果 $\frac{I_{\text{sag}}}{I_{\text{ss}}} > Th_{\text{TR}}$, 电压暂降位于下游方向;反之,则位于上游方向。

其中: I_{ss} 为变压器投运前电流基频分量, I_{sag} 为因变压器投运引起电压暂降时的电流基频分量。 Th_{TR}

为变压器投运 $\frac{I_{\text{sag}}}{I_{\text{ss}}}$ 的限值。

感应电动机启动时,会从电源处汲取为额定电流 5~10 倍的大电流,但与线路故障时的故障电流相比,这个电流的幅值并不是很大,而且在电机达到稳定运行状态之前是呈指数形式衰减的,因而在线路故障时所采用的方法并不适用。而且与变压器投运时三相电压不平衡不同,感应电动机是一种平衡负荷。它的启动相当于系统中负荷的增加,即感应电动机启动前后有功功率会有变化,于是感应电机启动时电压暂降源相对位置的确定方法为:

如果 $\frac{P_{\text{post}} - P_{\text{pre}}}{P_{\text{pre}}} > Th_{\text{RM}}$, 则电压暂降位于下游方向;反之,则位于上游方向。

其中: P_{pre} 为感应电机启动前,稳态时的有功功率, P_{post} 为感应电机启动后稳态时的有功功率, Th_{RM} 为 $\frac{P_{\text{post}} - P_{\text{pre}}}{P_{\text{pre}}}$ 的限值,它会因感应电机的种类和额定值

而有所不同。

文中也给出了在确定电压暂降的三个主要原因后,采用相应方法确定电压暂降源相对位置的算法。

2 结束语

自从文献[4]较早提出对电压暂降源的检测方法以来,随着电压暂降因其对敏感设备的危害而引起广泛的关注,相应的各种检测方法先后被提了出来。文献[4]提出的方法除可以对电压暂降和电容器投切定位外,还能用于电动机启动的定位。如果扰动功率初始峰值的极性与扰动能量的变化一致,则更能证实由扰动能量判断所得出的结果。文献[7]从现有的电力系统保护和故障定位的方法受到启发,提出的基于等效阻抗实部符号的方法,有坚实的理论基础。该方法将系统和负荷分别视为一个整体,然后通过对能较清晰分出上游和下游的辐射型网络进行分析而得出,其电压、电流等所需参数可直接利用电力系统中已有装置得到。等效阻抗实部符号方法具有一定的通用性,文献[3]所述的基于直线斜率的方法可认为是该方法的一种变化形式。文献[8]认为,对扰动源的确定包括扰动源位置的确定和扰动源种类的确定,扰动方位的确定和扰动的起因有关,并给出了在确定引发电压暂降的起因后,判定电压暂降源相对位置的算法。

小波变换因具有较好的时-频局部化特性,可以克服傅里叶变换的局限性,在电能质量分析中得到了广泛的应用^[10,11]。文献[12]和文献[13]分别基于小波变换和小波变换与人工神经网络相结合的方法,由电压暂降波形特征,根据引发电压暂降的起因对电压暂降进行分类,这为电压暂降源的检测方法提供了新的思路。电压暂降源的检测是今后电力系统电能质量控制的一个重要方面,目前的方法还有各自的一些局限性,因而有必要改进现有的方法或是在现有方法基础上尝试提出新的方法,以期对电压暂降源检测方法有进一步的发展,提高检测方法的适用性与检测结果的精度。

参考文献:

- [1] McGranaghan M F, RMueller D. Voltage Sags in Industrial Systems [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1993, 29(2): 397-403.
- [2] Arrilaga J, Boolean M H J, Watson N R. Power Quality Following Deregulations [J]. Pro IEEE, 2000, 88(2): 246-261.
- [3] Li C, Tayjasant T, Xu W, et al Method for Voltage-sag-source Detection by Investigating Slope of the System Trajectory [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 2003, 150(3): 367-372.
- [4] Parsons A C, Grady W M, Powers E J, et al A Direction Finder for Power Quality Disturbances Based upon Disturbance Power and Disturbance Energy [A]. Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Athens (Greece): 1998 693-699.
- [5] Parsons C, Grady W M, Powers E J, et al Rules for Locating the Source of Capacitor Switching Disturbance [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1999. 794-799.
- [6] Pradhan A K, Routray A. Applying Distance Relay for Voltage Sag Source Detection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 529-531.
- [7] Tayjasant T, Li C, Xu W. A Resistance Sign-Based Method for Voltage Sag Source Detection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4): 2544-2551.
- [8] Ahn S J, Won D J, Chung L Y, et al Determination of the Relative Location of Voltage Sag Source According to Event Cause [A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Colorado: 2004.
- [9] Bronzeado H S, Brogan P B, Yacamini R. Harmonic Analysis of Transient Currents During Sympathetic Interaction [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 2051-2056.
- [10] 徐永海,肖湘宁,杨以涵,等. 小波变换在电能质量分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 55-58.
- [11] XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al Application of Wavelet Transform in Power Quality Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 55-58.
- [12] 胡铭,陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位 [J]. 电网技术, 2001, 25(33): 12-16.
- [13] HU Ming, CHEN Heng. Detection and Location of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform Modulus Maxima [J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 12-16.
- [14] 王克星,宋政湘,陈德桂,等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34.
- [15] WANG Ke-xing, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui, et al Interference Source Identification of Voltage Sag in Distribution System Based on Wavelet Transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 29-34.

[13] Zheng G, Meiyang X, Wenli H, et al. Classification of Voltage Sag Based on Wavelet Transform and Wavelet Network[A]. Proceedings of Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai: 2004.

楼书氢(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析;E-mail: loushuqing2@163.com

徐永海(1966-),男,博士,副教授,从事电力系统谐波、电能质量等方面的研究工作;

陈恩黔(1981-),男,工程师,主要从事电力调度通信工作。

收稿日期: 2006-01-09; 修回日期: 2006-03-04

作者简介:

Comparison on methods for voltage sag source detection in power distribution network

LOU Shu-qing^{1,2}, XU Yong-hai^{1,2}, CHEN En-qian³

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. Guizhou Power Grid Dispatching and Communication Bureau, Guiyang 550002, China)

Abstract: Voltage sag is one of the most concerned power quality disturbances in power systems because of its severe damage to voltage-sensitive loads. The detection of voltage sag source is necessary for power quality troubleshooting, diagnosis, and mitigation strategy development. Moreover, the disputes about the major responsible party can be resolved fairly. This paper presents current methods of voltage sag source detection, such as the disturbance power and disturbance energy based method, the resistance-sign based method, and the method based on the event cause. The performance comparisons are made among these methods. The achievements of all former studies are concluded, and the prospect of future works is given.

Key words: power quality; voltage sag source; detection; distribution network

国家电网公司设立电力交易中心

2006年8月3日,国家电网公司设立电力交易中心工作会议在北京召开。国家电网公司将在公司总部、区域电网公司、省(自治区、直辖市)电力公司三个层面设立三级电力交易中心,履行本单位所辖区域内电力市场交易的职责。各级电力交易中心在经过一段时间试运行后,将尽快投入正式运行。

近年来,公司系统各级电力调度机构狠抓电网安全生产,积极开展“三公”调度,为电网安全稳定运行及公平交易做出了积极贡献。但随着电力体制改革的不断深化,电力市场交易规模的逐步扩大,社会对电网安全和电力交易监管的日益提高,以及公司发展方式的转变和“四个服务”工作的深入开展,公司现行的发电计划制定和执行实行的分散管理、多头对外的模式不适应新形势的要求,目前建立新型的电力市场交易管理模式已显得十分必要和紧迫。

电力交易中心的设立将有效整合和规范公司系统涉及电力市场交易的各项业务,建成与三级电力市场体系相一致、统一规范、开放透明、服务优质的电力市场交易体系,更好地服务发电企业和电力市场体系建设。

设立电力交易中心将遵循安全第一的原则,坚持统一调度,确保电网安全稳定运行;坚持促进三级电力市场体系建设的原则;坚持公平、公开、公正的原则,遵循市场交易规则,有序开放电力交易,及时披露信息,依法接受监督;坚持优质服务的原则。

国家电网公司领导强调,公司各单位要统一思想,提高认识,深刻理解设立电力交易中心的重要意义。设立电力交易中心有利于全面推进三级电力市场体系建设,促进能源资源在更大范围、更大规模和更有效率地优化配置;有利于电网安全稳定运行的规范化管理,理清调度和市场交易的管理界面;有利于公司更好地履行“四个服务”的宗旨,打造服务平台,优化服务流程,提高服务质量;有利于更好地接受政府监督和各方监督。