[DVR]

简述动态电压恢复器（DVR）在配电网中的应用

文/中航太克（厦门）电力技术股份有限公司　刘广艳　何　春

随着用户用电设备技术的发展和更新，特别是数字控制信息技术在工业生产中大规模应用，电能质量问题也越来越严重，配电网对电能质量问题的改善需求尤为迫切。通过分析现阶段电压暂降对配电系统供电可靠性造成的影响，综述电压暂降的定义和特点，最后简要介绍电压暂降的检测方案。

近年来，由于当代供配电体系规模的扩大和运营管理自动化水平的提高，系统中的冲击性不均衡负荷及电力电子技术设备极大地恶化了系统的电能质量。另外，工业程控计算机和PLC等高智能设备在现代工业制造中的广泛应用，大大地提升了现代工业的自动化水平。同时，它们对电能质量扰动也非常敏感。配电网对供电电压质量提出了更高的要求，电能质量扰动是造成临时降压和短时停电的一个日益突出的因素，极大地危害了电力配电网系统的正常安全平稳运行，即使短时间的电压降低都可能导致上述设备无法工作，严重时甚至会导致工业生产连续过程中设备的停机，造成巨额损失。

将配电系统改造成无电压波动、无对称等实时控制的柔性化配电网，以满足电力负荷对供电质量和供电可靠性日益提高的需求。在配电网系统的各类电能质量问题中，电压暂降和短时间中断是发生频率最高、影响最为严重的一类。有监测数据表明，电压暂降和短时中断两者占到全部工业电能质量问题的92%以上。为改善电能质量，动态电压恢复器（Dynamic Voltage Restorer，DVR）可补偿电压骤降、晃电，能够降低网损、提升配电网输电能力，同时给用户侧提供较高用电效率和降低电能损耗，具备较好的节能降耗能力。

本文仅以笔者目前了解到的情况对电压暂降和短时中断暂态电能质量问题起因、特点及对配电网造成的影响进行分析，目的在于促进DVR的广泛应用，共同推动电能质量的进步。

配电系统可靠性与电压暂降的相关性

配电系统可靠性评估的是配电网的充裕度通过供电可靠性指标进行检验。那么怎样衡量供电可靠性呢？IEEE提出了相关指标，例如IEEE Std 1366，根据定义，供电可靠性是用来评估和反映供电系统对用户连续性供电的能力。在电力供给紧张时期，大家普遍以为，为了保证长期不间断供电，供电系统就可靠，电能质量的好坏主要体现在供电连续性上。目前为止，电力行业实施的用户供电可靠性指标统计用户时长只以1 min、3 min或5 min以上的电源中断来考核，实际这个时间性只能反映出电力用户平均长时间电压中断的情况。在IEEE Std.1159—1995标准中规定，大于1 min的中断称之为长时间中断。

相对于只有停电才受影响的传统设备来说，电压暂降和短时中断就能影响到那些非常敏感的高新技术设备负荷，短时电压的突然变化会导致这些敏感设备不正常运行等事故，经济损失大。相关影响

体现如下：

1）用户端越来越多的先进电气设备对电压暂降非常敏感。高科技设备和微电子技术自动化生产线以及由其组成的其他负荷，比传统的机电设备和负荷对暂态电压质量更敏感。同时，该子荷载的承载能力所占比例也越来越大。

2）系统电压暂降会导致敏感用户长时停机。系统引起的电压暂降可能导致系统和电力用户间完全断电。当电压下降幅值和持续时间超过敏感负荷的耐受能力时，将影响其正常工作，导致自我重启动，引起后端自动化生产线停工现象。这种非计划性的短时中断使装配线上的加工材料报废，导致生产中断几小时不等。

3）电压暂降给敏感用户带来巨大的经济损失。电压暂降导致电力用户清理现场并长时间重启设备。每次事件都会给用户带来严重的经济损失和伤害。调查显示，电压暂降给台湾新竹科技园（中国的半导体产业园区）的企业造成了10万～100万美元的经济损失。

4）电压暂降在电能质量问题中日益突出。随着当代电网容量和技术的发展，大规模自然灾害造成的停电范围减小，计划停电的概率降低，用户平均停电次数减少，进一步提高了传统电源长期供电的可靠性。我国某些电网可靠率可达99.9%或99.99%。

5）外电网线路单相接地故障是造成电压暂降的主要原因，雷击是输配电线路单相接地故障的常见原因。研究表明，电压暂降占配电系统故障的70%～80%。在输电系统故障中，电压暂降的比例超过96%。目前，根据欧美国家的调查，除停电外，电压骤降已成为质量投诉的主要原因，在所有关于电力问题的投诉中，电压暂降占80%以上，其他投诉不到20%。

电能质量事件类型如图1所示。

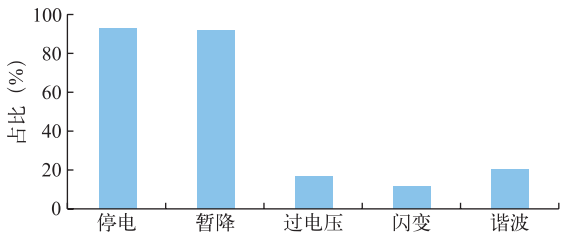

图1　电能质量事件类型

综上所述，电压暂降与非计划停电的长期停电类似，将产生巨大的经济损失。传统的基于长期停电的供电可靠性已不能满足工业行业和客户发展的要求。电压骤降是不可避免的。为了减小电压暂降的影响，可以采用DVR来解决电压暂降问题。

电压暂降的定义

电压暂降是指电力系统中某一点的工频电压均方根值下降至0.01～0.9（pu），并在短时持续0.5 T～1 min后恢复正常现象；根据持续时间可划分三个阶段：0.5～30 T、30 T～3 s和3 s～1 min，其中大部分电压暂降的持续时间为0.5～30 T。

在电压暂降的过程分析中，暂降时残余的电压均方根值与额定电压的比值定义为暂降幅值，将电压暂降从开始发生到最终结束中间的时间定义值为持续时间和电压暂降发生时通常会产生电压相位的改变，称之为相位跳变。电压暂降幅值、电压持续时间和电压相位跳变是一次电压暂降扰动最主要的三个特征值量。暂降阈值、残余电压（简称残压）和暂降深度等都是经常会用到的术语。暂降阈值是指为检测电压暂降最开始的起始点或最终的结束点而规定的电压幅值；残余电压是指电压暂降或短时中断过程中记录的电压最小值；暂降深度是指电压暂降时的残余电压幅值与参考电压幅值的百分比。参考电压（U_{ref}）是电压暂降深度、暂降阈值的基准值，可选择标称电压来作为基准。

电压暂降相关的特征量如图2所示。

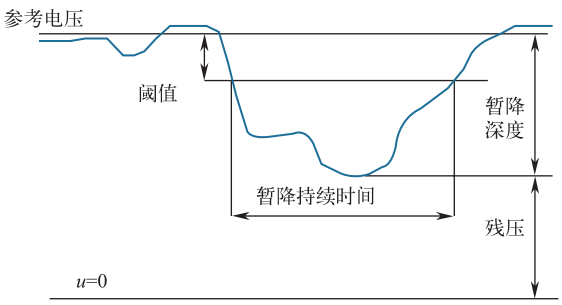

图2　电压暂降相关特征量

由以上定义可知，暂降深度和暂降幅值是一对相对于参考电压的定义相反的参量。

一般情况下，可设定电压暂降的结束阈值和起始阈值相同。

在单相系统中，当电压均方根值降低到暂降阈

值（起始阈值）以下时，作为电压暂降的开始；当电压均方根值上升到等于或者大于暂降阈值（结束阈值）时，作为电压暂降的结束。

如图3所示，在三相系统中，假设一个三相电压暂降是发生在最先受扰动相的均方根值电压低于暂降起始阈值的时刻，只有各相电压均方根值都等于或大于电压暂降的结束阈值时，该暂降才结束。

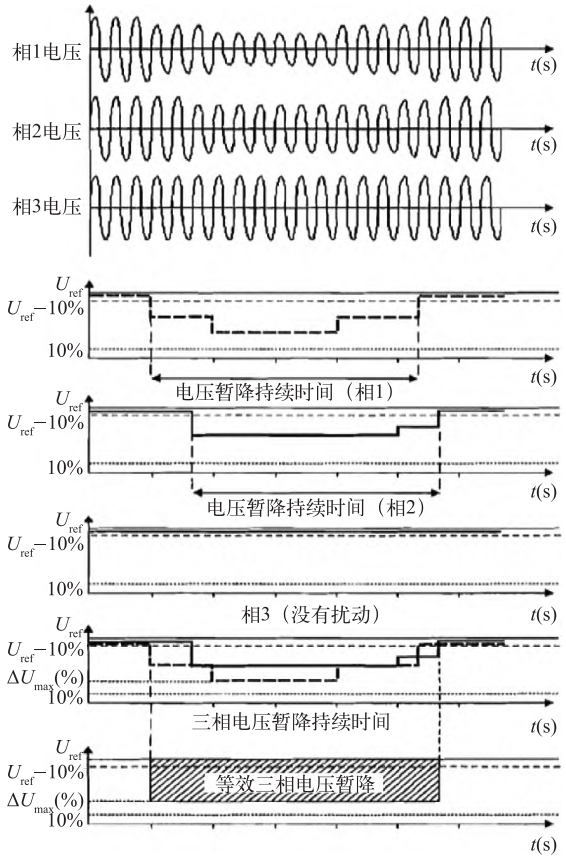

图3　三相系统电压暂降的持续时间（假定U_{ref}为90%）

一定时间内电压暂降发生的次数叫暂降频次，是表现电压暂降对敏感电力用户影响频繁程度的重要指标。暂降频次越高，则对敏感负荷的影响频繁程度越高。图4是美国配电网电能质量调查项目实测电压暂降时，电压暂降频次、电压暂降幅值和电压持续时间的柱状图。从图4可知，暂降幅值在0.1～0.9（pu）之间，电压暂降发生的次数随着持续时间的变短而有较大幅度的提高，暂降幅值在0.7～0.9（pu）的电压暂降占70%；持续时间小于1 s的约占90%；持续时间小于0.1 s的约占60%。短时间的电压暂降次数多，电压暂降造成的损失就是一个累积叠加的结果。

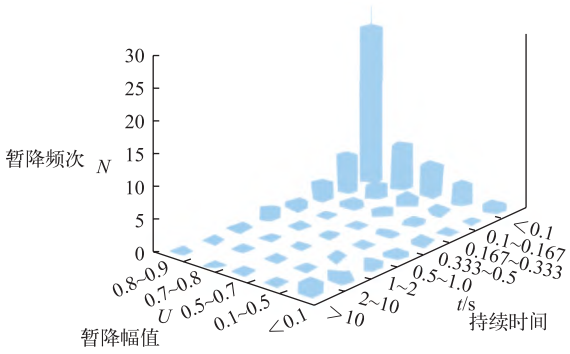

图4　暂降频次、暂降幅值与持续时间的关系

电压暂降的特点

1）当代电力系统电压暂降次数逐渐增多。虽一次电压暂降的损失不大，但因天气原因导致的暂降次数是停电事故的数倍和几十倍，故电压暂降对用户造成的损失和危害非常明显。

2）电压暂降具有持续时间短、影响范围广的特点，短路引起的电压暂降会影响数公里以外负荷的正常运行。传输系统中的电压暂降将沿着传输线路传输到配电系统，并最终传输到终端企业用户，影响敏感设备的正常运行。

3）电压暂降使敏感设备无法获得所需的高质量的电能。由设备故障引起的电压暂降将导致电压与电气设备间的电气连接中断，同时破坏用户设备生产线的连续运行。

电压暂降的检测

多数电压暂降是由配电系统故障引起的，持续时间小于200 ms。动态电压恢复器是解决电压暂降等暂态电能质量问题的有效设备，电压暂降的检测是有效处理电压暂降的前提。电压暂降的检测主要是检测以下几个特征。

（1）均方根值计算方法

电压暂降是指供电电压均方根值在短时间突然下降的情况。采用均方根值计算方法可以衡量电压的暂降程度。在该方法中，通过电压的有效值来获得电压的幅值，根据周期信号的有效值，通过计算时间域中一周期的数字均方根，得到电压的有效值，即

$$U=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}u_i^2} \tag{1}$$

式中，N为每周期的采样点数；u_i为第i个采样点的

电压值。

（2）峰值电压方法

峰值电压是时间t的函数，即

$$\sqrt{2}U=\max_{0<\tau<T}\left|u(t-\tau)\right| \tag{2}$$

式中，$u(t)$为采样电压波形；τ为延迟时间；T为半个周期的整数倍。

（3）基波分量方法

基波电压是时间t的函数，即

$$U_f(t)=\frac{2}{T}\int_T u(\tau)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\tau}\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

式中，$\omega=\frac{2\pi}{T}$；T为基波周期；f为基波电压频率。

以上三种方法能得到电压暂降的幅值，无法获得电压暂降的相位跳变。

（4）单相电压变换

假设单相电压信号，即

$$u(t)=x\cos(\omega t)-y\sin(\omega t) \tag{4}$$

式中，ω为基波电压的角速度。

设$\sin(\omega t)$与$\cos(\omega t)$是与暂降前电压同相位的正余弦信号，即

$$\begin{cases}u_d(t)=2u(t)\times\sin(\omega t)\\u_q(t)=2u(t)\times\cos(\omega t)\end{cases} \tag{5}$$

经三角函数积化和差运算，即

$$\begin{cases}u_d(t)=-y+y\cos(2\omega t)+x\sin(2\omega t)\\u_q(t)=x+x\cos(2\omega t)-y\sin(2\omega t)\end{cases} \tag{6}$$

对$u_d(t)$与$u_q(t)$的平均值求出x与y，从而得出暂降电压的幅值与相位跳变，即

$$\begin{cases}\sqrt{2}U=\sqrt{(x^2+y^2)/2}\\\theta=\arctan\frac{y}{x}\end{cases} \tag{7}$$

典型案例

以芯片制造企业为例，芯片生产制造过程中原料高纯度、环境高洁净度、温湿度恒定不变及工艺复杂等特点对电力供应提出了高电能质量要求。而动态电压恢复器系统由静态开关、逆变器、输出隔离变压器和储能元件等组成。正常情况下，它在旁路模式下工作，设备补偿响应速度快，补偿准确，效率高，可用于10 kV/35 kV电压配电，确保变电站配电负荷不受电压暂降影响。考虑到保护配电负荷设备，动态电压恢复器系统可以优先配置合理的储能元件，以解决电压暂降问题。

案例一（见图5）：国内某光电项目的MOCVD生产线时常出现电压闪变、跌落和瞬时供电中断，每次电压闪变都可能导致出废品，甚至某些机器需要重新起动，因此对供电系统提出了更高的要求。

解决方案：中航太克提供单机容量2 500 kV·A的动态电压恢复器和后备时间1.5 s的超级电容模组，典型响应时间≤2ms，超级电容模组物理性充放电，支持快充快放，电子旁路工作效率≥99%，大大降低了用户设备运行损耗费用。

图5　案例一照片

集中治理接线方式（见图6）：动态电压恢复器串在配电变压器低压侧和配电盘间，用于多个敏感负荷的集中保护。

图6　集中治理接线方式

案例二（见图7）：随着火电厂辅机变频器的大规模使用，我国各级配电网都出现了电压瞬时波动导致机组跳闸的问题。上述事故的主要原因是辅机（特别是磨煤机、引风机和给煤机/给粉机等）的变频器不具备低压穿越能力，当电网由于故障而电压降低时，辅机变频器无法逃脱系统保护和故障元件隔离时间，致低压保护动作跳闸，导致机组跳闸和锅炉灭火。

解决方案：中航太克提供10 kV·A的动态电压恢复器和后备时间5 s的超级电容模组，治理85%～115%电压范围外的储能逆变，保证锅炉给煤机变频器的正常切换。

图7　案例二照片

分散治理接线方式（见图8）：动态电压恢复器安装于低压侧，用于保护某一特定敏感负荷。

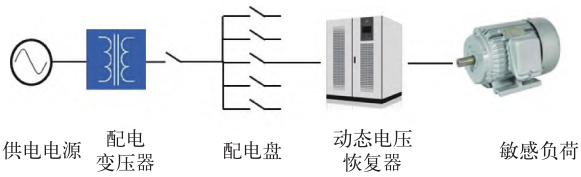

图8　分散治理接线方式

结束语

设备的智能化等对供电质量提出了更高的要求，动态电压恢复器具备连续电压补偿功能，能够提高电力系统的供电可靠性和终端用户的用电水平，助力制造强国。**EA**

（收稿日期：2022-02-17）

参考文献

[1] 赵希正．强化电网安全 保障可靠供电：美国“8·14”停电时间给我们的启发[J]．电网技术，2003，27(10)：1-7．

[2] CHENG P T，HUANG C C，PAN C C，et al．Design and implementation of a series voltage sag compensator under practical utility conditions[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2003，39(3)：844-853．

[3] 肖遥，李澍森．供电系统的电压下凹[J]．电网技术，2001，25(1)：73-77．

[4] CHENG P T，HUANG C C，PAN C C，et al．Design and implementation of a series voltage sag compensator under practical utility conditions[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2003，39(3)：844-853．

[5] Heine P，Pohjanheimo P，Lehtonen M，et al．A method for estimating the frequency and cost of voltage sags[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2002，17(2)：290-296．