

【专家简介】李澍森，男，教授级高工，1983年毕业于华北电力学院北京研究生部电力系，获硕士学位。现任国网电力科学研究院高压电器研究所总工，主要从事电能质量，定制电力，电力测量等方面的研究。

供电系统的电压下凹

——国网电力科学研究院电能质量专家李澍森专访

记者：李高工，您好！非常感谢您在百忙之中就电能质量的有关问题接受我们的采访。我们了解您最近研究比较多的电能质量问题是电压下凹和上凸，能否请您解释什么是电压下凹和上凸？

李澍森：Voltage dip (or sag) 和 Voltage swell 在电工词典上的译名是‘短时间电压下降’和‘短时间电压上升’，顾名思义，是指在短时间内(通常指半个周波至 1min)供电系统电压突然下降或上升，且超出正常电压偏差允许值，然后又返回到正常的电压水平。

我们认为电工词典中对 voltage dip 及 Voltage swell 的翻译是在国内没有对这一问题引起广泛重视并深入研究的背景下进行的，虽然其意思准确，但不太精炼。语言是发展的，在这里我们推荐用‘电压凹陷’或‘电压下凹’来表示 voltage dip，用‘电压凸升’，或‘电压上凸’来表示 voltage swell。这样翻译更为形象化，其涵义是：供电电压应是一条在允许偏差范围内波动的近似水平的函数，但在短时间内突然下降或上升，使平坦的电压曲线向下凹陷或向上凸出了一小段时间。

在欧洲供电电压特征标准 EN50160 "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems (European Standard)" 中对 voltage dip 的定义为：有效值电压突然降至额定电压的 90% 至 1%，然后又恢复至正常电压，这一过程的持续时间为 10ms—60s。电压下凹的深度则定义为电压额定值与电压下凹过程中的最小值之差。

美国 IEEE 电气电子工程师协会推荐标准(IEEE Std. 1159-1992)中对 voltage dip 的定义是：“工频电压有效值的下降，其持续时间为 0.5 个周波至 1 分钟时间内”。

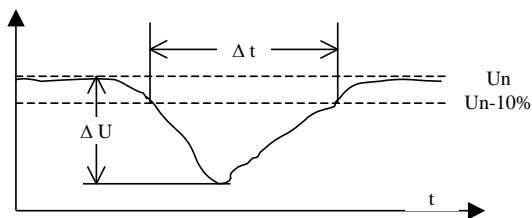


图 1 电压下凹示意图

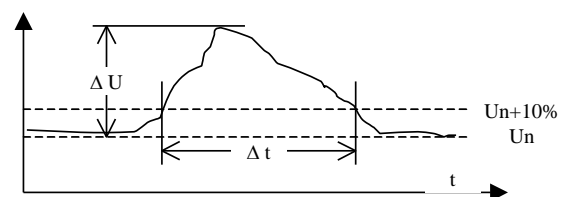


图 2 电压上凸示意图

图 1 是电压下凹的有效值波形示意图,图 2 是电压上凸的有效值波形示意图。虽然欧美发达国家的有关标准是在 90 年代初制定的,但早在 80 年代初就已经展开研究并取得大量的应用成果。近年的期刊及国际电能质量方面会议中,有关电压下凹的文章也明显增多。目前的研究范围已相当广泛和深入,主要包括:不对称电压下凹特性;电压下凹过程的仿真计算;电压下凹在不同电压等级之间的渗透;缓减电压下凹的技术措施等^[1-7]。不同设备对电压下凹的敏感度不尽相同,甚至于电压下凹的深度,持续的时间,电压下凹起始时刻的相位角,都会对同一设备造成不同的影响。国外对电压下凹的研究是与用电设备的技术更新分不开的,特别是数字式自动控制技术自 80 年代来大规模应用于工业生产,对供电系统的电压提出了更高的要求。相比之下,我国在这方面的研究尚未真正起步

记者: 作为资深的电能质量专家,请谈谈电压下凹带来的危害有哪些?

李澍森: 电压下凹与电压中断的危害几乎相当。我们对电压中断及其危害都有比较清晰的认识。电压中断是指供电电压突然降低到额定值的 1% 以下,且其持续时间大于 1min,持续时间小于 1min 的电压中断通常将其归纳为电压下凹。

电压中断依据其持续时间可分为长时间(>3min)和短时间的(≤3min)。依据其性质又可分为预先安排的和突发的。对于因电网建设,检修等预先计划的电压中断,供电部门可事先通知用户,用户可通过调整生产计划,使其损失降到最低。对于偶然事故引起的电压中断,则使用户的生产被迫中断,从而造成严重的经济损失。

电压下凹通常是由供电系统的短路故障或用户内部的短路故障引起,是不可预测的随机事件。如雷击和绝缘子污闪引起系统短路后被保护迅速切除,尔后自动重合闸成功,会引起一次电压下凹过程。即使是某用户内部故障短路,也会影响到其它的用户。

大多数的电压下凹持续时间小于 1s,下凹的深度小于 60%。然而,较长时间(>1s)及较大深度的电压下凹也会不时发生。在某些供电区域,由于用户用电设备的启动(如大功率异步电动机)也会引起电压下凹。

在中性点不接地系统中,发生瞬时单相接地故障时,另两健全相的对地电压会升至额定电压的 $\sqrt{3}$ 倍,这一过程就是电压上凸。

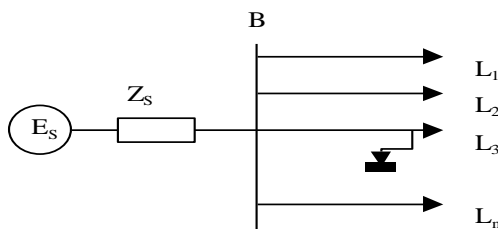


图 3 供电系统及电压下凹

如图 3 所示, 某供电所母线有若干用户的供电线路, 当其中的 L_3 线路距供电母线电气距离 Z_{L3} 处发生三相短路, 母线 B 处的电压会下降 $U_B = E_S Z_{L3} / (Z_S + Z_{L3})$, 随着保护成功动作切除故障, 母线 B 的电压恢复至正常值。在这一过程中, 所有与用户 B 在同一公共联结点的其它用户都经历了一次电压下凹, 其电压下凹的深度为

$$\Delta U\% = \left| \frac{Z_S}{Z_S + Z_{L3}} \right| \cdot 100\% \quad (1)$$

对于 L_3 的用户, 如果自动重合闸不成功的话, 则意味着再一次电压中断 (voltage interruption)。

对于不对称短路故障, 计算分析其各相电压下凹的最小值时, 应采用对称分量法来分析。在分析不对称短路的电压下凹沿电力系统传播时, 对于传播途径中的 Y/ Δ 接法的变压器, 要特别注意其对正序分量的相移与对负序分量的相移是正好相反的。其计算方法类似于系统短路的分析计算。

对于由感应电动机启动造成的电压下凹程度, 可以采用下面的近似的计算公式: 当感应电动机在额定电压下启动时, 电压下凹时的最小电压值为

$$U_{\min}(pu) = \frac{U(pu) \cdot kVA_{SC}}{kVA_{LR} + kVA_{SC}} \quad (2)$$

其中 $U(pu)$ = 系统实际电压, 用额定电压的标么值表示;

kVA_{LR} = 电动机转子锁定时的制动功率, 用 kVA 表示;

kVA_{SC} = 系统在电动机端点的短路容量, 用 kVA 表示。

电压下凹的危害同电压中断一样, 主要是针对那些对电压敏感的用户, 如半导体制造业, 造纸, 纤维抽丝, 板材加工, 注塑压模生产线等。对电压下凹较为敏感的设备有可编程控制器、变频调速电机 (ASD), 计算机和接触器等。在生产自动化程度日益完善和普及的今天, 即使是连续生产过程中的某一台设备感受到电压下凹, 也可能使整个生产线停运, 导致出次品或废品。其结果是增加了企业的制造成本, 减少了企业的利润和国家税收。在现代大规模工业自动化生产中, 由计算机等数控技术的控制处理过程趋于更加复杂与更加精确, 一旦由于电压下凹而造成生产过程中断, 重新启动将耗费数小时之久。而生产企业又必须通过这种自动化的生产线来降低生产成本, 提高产品的竞争力。如对于纺织厂由 ASD 驱动的主要设备, 降至 80% 额定电压, 持续时间只有 6 个周波的一次电压下凹, 其代价相当于电压中断 2 小时造成生产停顿的损失。

有资料表明在欧美等国，一次电压下凹造成的经济损失至少在数百万美元以上。在欧洲，企业认识到电能质量对其生产的影响后，在与供电部门签订供用电协议时对电能质量做出了严格的限定，并明确双方各自的权利和义务。其中对电压下凹的频度及深度规定，以供用电设备的产权分界线为界，由于供电方的原因（包括系统短路）引起的某一深度的电压下凹不得超过若干次/年（例如 5 次/年），若超过了协议规定的次数，用户有权向供电方索赔因此造成的全部损失。在东南亚，有的国家也在进行通过协议解决争端的探索^[12]。

一个简单的例子就是当今个人计算机的应用十分普遍。当电压下凹到额定值的 70% 及以下时，可能造成计算机程序紊乱，数据丢失。这也就是为什么一些重要的计算机设备都要配备装配不停电电源（UPS）。同样对于基于单片机原理的数控设备，复印机，银行自动提款机等，都会遇到类似的问题。

美国计算机制造商协会 (Computer Business Equipment Manufactures Association, 缩写为 CBEMA) 最早提出了一组如图 4 所示的 CBEMA 曲线，它描述计算机能承受某种幅度及持续时间的电压下凹或电压上凸的能力。其中横轴描述事件发生的持续时间，如电压低于下限，则说明设备将会因能量不足而停机；而电压高于曲线上限时，则会引起其它方面的误动作，如引起绝缘破坏，过电压跳闸，过激励等。这种曲线已成为度量各种设备性能的事实标准。图 4 的形式已成为电压敏感设备标准化设计的目标，也是描述设备免疫能力的格式之一。

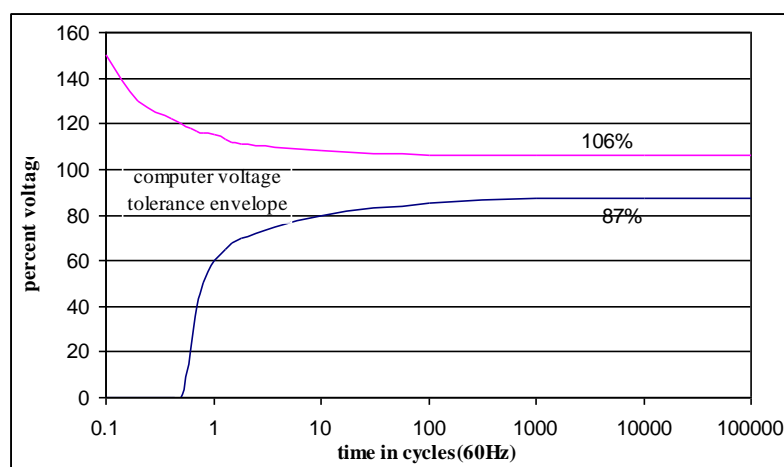


图 4 美国计算机协会 CBEMA 曲线

生活中受电压下凹影响的事件也屡见不鲜，1999 年 11 月 9 日中国国际广播电台报道美国《商业周刊》的一名编辑因被困在电梯内长达 40 小时，以心理和身体受严重伤害为由向办公大楼的物业管理部门提出索赔 2500 万美元的要求。此次电梯故障的原因是由于供电系统突然降压 1 秒钟造成的，而这一秒钟又碰巧让倒霉的怀特先生赶上了，从而引发了这起索赔官司。

记者：根据您的研究，如何预防电压下凹，是否有具体的解决措施帮助供用电双方？

李澍森：虽然不可能完全消除电压下凹，但减少发生的次数是能够实现的。在供电系统方面，可以通过加强线路巡视，及时修剪线路走廊两旁的树枝来防止通过树木造成短路；在变电设备周围加设护栏防止动物造成的短路；定期清洗绝缘子防止污闪等。对于落雷较多的架空线路要进行调研。有成果表明，如果线路杆塔的接地电阻较高，雷击的能量不能通过接地系统迅速吸收时，则会袭击输电线路^[7]。因此接地系统的可靠性也直接影响到电能质量。

电力用户也应该采取措施来避免电压下凹带来的影响。用户在设备订货合同上应向设备制造商明确这方面的技术要求，以使设备对某程度内的电压下凹有免疫力。制造部门提供的产品技术说明中应该有类似 CBEMA 的特性曲线，并标明该特性曲线的适用条件。如国内家用电器生产厂家近年来针对某些地区电压长期过低的现状，设计生产了宽电压输入范围的家用户用电器，在某种程度上对电压下凹有免疫力，尽管生产厂家的初衷并不在此。

用户也可采用其它的技术措施来防止电压下凹带来的影响，如装配 UPS，备用电源等，但要求这些设备能在半个周波内对电压下凹作出反应并切换成功，同时能在足够的时间内提供用电设备所需的能量。还有其他的一些措施包括：(1) 铁磁谐振变压器，其特点是可在输入电压较大的变动范围内提供较稳定的输出电压；(2) 磁合成器，但要求负荷在数千伏安容量下才较为经济；(3) 各种在线，离线 UPS；(4) 超导储能设备等。

有的文献针对防止 PC 机受电压下凹影响而停机的问题推荐了三种措施：(1) 在 PC 机内部的直流电源侧加装两个 680 μ F 的大容量电容(直径和高度为 35 \times 45mm)，这种方案可使 PC 机躲过深度在 30% 以上，且持续时间在 1 秒内的电压下凹。实际测量及调查表明，大部分的电压下凹在此范围内，同时 PC 机箱内部也有空间来安装这两个附加的大容量电容。(2) 在商业及工业用户内部装配 UPS，这当然可避免更为严重的电压下凹，但投资相对较高。(3) 在供电所内装配动态电压调节器(DVR for Dynamic Voltage Restorers)，这个方案当然可使所有的用户受益，但成本巨大。通过进行技术经济比较，其他文献中提出在用电设备内部解决问题是最为经济的方案，在用户内部装配附加设备的全社会成本要高些，而在供电方采取相应的稳压措施是费用最高的方案。当然这不是说供电部门没有责任，如前所述，供电部门应该努力降低因系统方面原因造成的电压下凹。用户也有责任降低电压下凹发生的频度和深度，以减少对用户本身及其它用户的影响。如启动大容量的感应电动机时，可通过降低起动电压或其它措施来减少所需的起动电流，从而到达减小因电动机启动而造成的电压下凹；通过内部技术管理减少短路事故等。

记者：您觉得我国目前的对电压下凹和上凸重视程度现状是怎么样的？您对改进目前这种局面有什么好的建议。

李澍森：电力系统谐波，间谐波，电压波动与闪变，操作中的浪涌电压等，和电压下凹同属电能质量问题，但欧洲电力部门及用户对电压下凹的关注程度比其它有关电能质量问题的关注程度要强得多，其中一个重要的因素是，在电能质量的诸多种原因中，由电压下凹引起的用户投诉占整个电能质量问题的 80% 以上，

而由谐波、开关操作过电压等引起的电能质量问题只有不到 20%。相比之下，我国在这方面的研究尚未真正起步。

电压下凹作为电能质量指标之一，在国际上受到越来越多国家的关注。随着全球经济一体化，电力市场将逐步开放，而用户的负荷种类将更加多样化，对电压中断及电压下凹将会作出严格的限定要求。为此建议：

1. 尽快组织国内各有关单位对电压下凹问题进行全面的研究，并对敏感用户进行调查，了解有关情况。通过长期的协作，建立包括电压中断及电压下凹在内的数据库。
2. 研制检测电压下凹的监测仪，对配电系统和相关的用户进行长期监测，并与企业配合，收集有关数据。对系统的监测及对用户的调查是一个长期的过程，特别是对系统的监测，至少需要持续一年以上。同时还要根据不同地区的实际进行测量调查。
3. 成立全国性的专家小组，收集各国家和地区的电压下凹标准进行研究，指导各地区开展相关的研究，并适时制定出相应的国家标准。
4. 电气设备制造商也应该了解有关电压下凹等方面的电能质量知识，改进产品的性能，提高其输入电压的适用范围。