[开关柜]

低压开关柜在地震条件下的安全性

文/西门子（中国）有限公司能源管理集团SIVACON合作伙伴支持团队　夏欣荣

本文通过对地震学基础知识的描述，介绍了怎样正确判断低压开关设备的抗震能力。西门子SIVACON 8PT低压开关柜在强震条件下有良好的表现，这是已经通过试验的方法模拟地震发生时的加速度值验证过的抗震能力。这种试验并不是一个简单的过程，不但需要分析开关柜设备本身的反应谱曲线(RSC)，还要考虑场地条件对设备的影响。本文引用了频域分析的方法，介绍了设备抗震能力的分析过程。

随着经济的增长，现代用户对配电安全性的要求越来越高，即使在出现一些极端情况下，例如地震，也需要供电设备在一定条件下能够可靠运行，以保证危险设备可以安全关闭或重要数据得到备份等。确保极端情况发生时，也不会由于供电突然中断而造成无可挽回的灾难性后果。所以现在低压开关设备的招标文件中一般都有对设备抗震等级的要求，有的要求低压柜可以抗8级地震，也有用烈度来描述的，如抗震烈度要求为8°等。这都表现了用户对开关设备可靠性的要求越来越高，不过单纯的用震级和烈度并不能完全反映低压开关设备的实际抗震能力，这是为什么呢？我们还是先了解一下什么是地震以及它是怎样破坏我们地面建筑和设备的。

地震是一种自然现象，也是一种自然灾害，为了保障地震发生时人的生命安全，减少财产损失，以及自动控制设备在各个领域安全运行（包括核电站、地铁、桥梁、高层建筑物、数据中心等），人们一直以来对抗震防震高度重视。中国是个多地震的国家，分布广、面积大，尤其是高烈度区运行的设备，它的安全评估更是非常重要。为了讲述这方面的知识，首先介绍地震的基本名词和概念。

震源：地下发生地震的地方叫震源，它是一个区域。

震中：震源在地面上的投影称为震中。由于震源是一个区，所以震中也是一个区。地面上受损最严重的地区称为极震区，但有时由于地震局部地质条件的影响，所以实际的极震区并不一定是理论上的震中区。

震源深度：将震源和震中都分别看做是一个点，则震源到震中的距离叫做震源深度。

震中距离：建筑物以及设备等到震中的最小地面距离称为震中距离。

震级：地震是地壳中断层错动运动，以地震波的形式携带大量的能量引起地面运动。开始是纵波引起垂直运动，后面是横波引起水平运动。为了定量描述能量的大小，提出地震震级的概念。地震震级是按地震仪记录的地动位移，以一定的标准表示地震能量大小的一种量度称之为地震震级，用M表示。释放出来的能量越多，震级越大，反之越小。用统计方法求出震级M和能量E的经验公式：$\log 10E = A + BM$，式中A、B为常数，一般A取11.8，B取1.5，即$\log 10E = 11.8 + 1.5M$。一般情况下震级分为1~8级，到目前为止，世界上记录到的最大震级是1960年在智利发生的8.9级地震。一般5级以上的地震才会在地面上造成破坏（地表裂缝，房屋破损、倒塌等）。

烈度：由于抗震设计的需要人们提出了烈度的概念。一次地震只有一个震级，但是一次地震的影响和破坏程度是不一样的。如同一颗炸弹爆炸后远处与近处房屋破坏程度不同的道理一样。按一定宏观标准来表示地震对地面影响和破坏程度的一种量度称为烈度。目前我国和世界大多数国家把地震烈度分为十二度，是通过历史上许多个地震宏观考查资料统计和总结出来的，并相应

制定了“中国地震烈度表”。根据相关文献，7°区对应的地面加速度为0.125g，8°区为0.25 g，9°区为0.5g，10°区为0.8g（g=9.81 m/s^2）；除了“中国地震烈度表”外，还有“MSK烈度表”，是由前苏联的麦德维捷夫、德国的施蓬怀尔和捷克的卡涅克共同提出的烈度表；日本七阶烈度表J.M.A等其他一些烈度表，不同的烈度表对地震后破坏程度的划分也不尽相同，同时对应的加速度值也有所区别。

了解了这些基本常用的地震知识后，不难理解为什么不能简单地用震级做为低压开关柜的抗震指标。因为震级是固定的，它对设备（低压开关柜）的直接影响还受到传播途径（震中距）、场地条件（设备安装的地点的地质条件）的影响。从工程抗震的角度也不宜用震级，这是因为烈度与加速度有良好的对应相关性，而震级却没有。但是单纯用烈度来表示设备的抗震能力也缺乏定量的数据，对于对设备可能造成的毁坏程度的评估和抗震设计来说，烈度这个量太主观，因为烈度本身就是一个定性的衡量地震发生后在地面产生破坏结果的度量，是靠地震发生后人为观察得出的结果。后来随着强震观测技术的进步，当每次产生的破坏结果与被地震仪测出的加速度对应后，就产生了烈度与加速度的对应关系。由于这是一个积累的经验值所以给出对应加速度只是一个范围。此外，不同烈度表对应的加速度值是不一样的，如果希望用烈度大致衡量设备在所属烈度区的工作能力，需要给出具体的烈度表名称。总结震级和烈度的关系就是，震级对烈度有影响，在震中距相同情况下，震级大烈度高，反之即小；烈度对震级没有影响。但烈度与加速度有相关性，烈度高加速度值大，反之即小。具体数值可参见相应“烈度表”。

里氏震级是个能够很好反应地震严重程度的度量，但它反映的能量是个宏观概念，无法反应作用在具体设备上地震能量的大小，也无法很好地测量地震过程中设备承受力的大小。然而加速度却与地震中固定在建筑物内的低压开关柜所受到应力有更好的关联性。由于$F=ma$，式中的m是设备的重量，a就是地震发生时传到设备安装地点的加速度。根据设备受力的大小进行抗震设计，才能有效达到抗震的目的。既然惯性力是地震发生时破坏设备的因素，我们可以通过降低设备重量和重心高度的方式减轻惯性力的作用。西门子的Sivacon 8PT低压开关柜在结构设计中已充分考虑到这一点，比如较重的框架开关均安装在设备较低的位置，这样不但散热效果好同时提升了开关柜的整体抗震能力；再者就是设备本身的抗剪切力能力，所有的螺栓、螺丝均采用8.8级，并用规定的力矩和垫圈紧固，此外所有承重部件均采用2.5 mm厚的冷轧板或敷铝锌板，非承重结构及辅助加强支撑采用的也是2.0 mm的冷轧钢板。如果需要开关柜可以承受更大的加速度，还需要对开关柜的一些地方做辅助的加强，例如对8个支撑角和电流较大的框架断路器的安装板底部进行加强处理（如图1所示）。加了这些辅助加强后的8PT具有非常强的抗震能力。从振动学的角度来讲，这些措施实际是增加了设备的阻尼。当地震发生时，传递到开关柜上的振荡波会使这些结构件相互作用，产生磨擦力和噪声，从而消耗地震波产生的能量。阻尼也是影响设备抗震能力的一个重要物理量，为了简化，在地震试验中常把阻尼表示为设备实际阻尼跟系统临界阻尼比值百分数，通常这个百分数被看作临界阻尼百分数。设备的阻尼属性限制了设备发生共振时的振幅，所以不同阻尼的反应谱曲线的高度也不相同，一般来说5%的阻尼系数适合于大多数设备和材料在谐振点的反应谱特性。

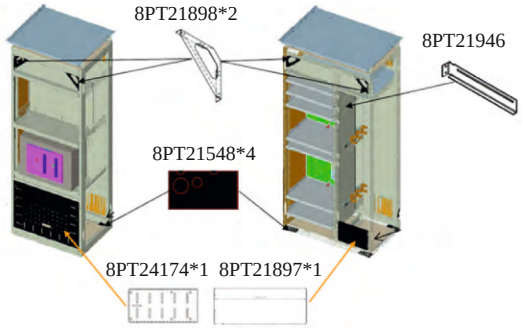

图1　SIVACON 8PT低压开关柜的抗震设计

前面了解到了怎样使低压开关柜具有良好抗震能力，除了骨架结构设计的合理和材质的选择外，还需要一些额外的加强措施。然而怎样去评估设备的抗震能力呢？这就需要根据标准IEC60068－3－3的要求进行地震试验。该标准中所规定的加速度数据包括大地加速度ag和层面加速度a_f，$a_f=Ka_g$（K是由于楼面升高，加速度被放大的系数，$K_{max}=3$）。当把开关设备直接安装到同地面等高的基础上时，只要没有提供其它的数据，就可以将这个加速度值算作是作用于开关设备固定平面（也就是大地）的加速度（这里$K=1$，亦即$a_f=a_g$）。当把开关设备安装到处于地平面以上若干米的固定平面上或者是安装到非刚性固定平面（钢筋混凝土地面）上时，用系数K表

述出由于设备安装位置升高引起的加速度升高，如果没有提供有关层面加速度或者开关设备安装的信息，就使用系数$K=2$，也就是说，就以所给出的大地加速度的2倍值为依据作为开关设备的要求。这里的加速度值是指零周期加速度ZPA（Zero Period Acceleration），也就是地震发生的整个过程中设备安装地点激发加速度的最大值。要理解ZPA需要再次提到一个跟加速度相关的非常重要的值：频率f。地震的能量是以波的形式作用在设备上的，既然是波就肯定有频率。由于每一个开关柜设备和组成它的单个部件都有其固有频率，如果地震波的频率与其相符就会产生谐振，这时地震波的振幅就会被最大程度的放大，对设备产生更大的破坏力，所以需要找到谐振点对应加速度的值。在时域范围内，一次真实的地震中频率总会随着时间而变化，而且没有规律，在这个时刻决不会知道下一时刻的频率。因此我们要换一个角度看世界，在频域中研究频率和加速度的关系，这样就方便多了。靠什么将加速度和频率联系起来呢？傅里叶（Fourier）告诉我们任何周期函数都可以看做不同振幅不同相位正弦波的叠加。所以为了简单起见我们可以暂时把地震的波形模拟成一个理想的正弦波，其位移公式为$S=A\sin\omega t$，其中角频率$\omega=2\pi$ Frenquency，A是最大振幅，对此式进行两次求导即得加速度$a=-A\omega 2\sin\omega t$。根据这种函数关系科学家们开发了一种叫做加速度反应普的方法。通过振动台上的试验可以将加速度与频率的函数关系绘制出曲线，这种曲线称为反应谱曲线RSC (Response Spectrum Curve)（如图2所示），图2中纵轴是加速度，横轴是频率，其中试验反应谱（Test Response Spectrum）为我们绘制了一条包络线，在所有设备的谐振点上，实验反应谱应该包络需求反应谱（Required Response Spectrum）。当振动频率高于40 Hz时（也有资料认为33 Hz是零周期加速度的门槛频率），加速度处于一个固定的值，这个值叫做零周期加速度，也就是前面提到ZPA，因为这时候可以把系统看作是一个坚固系统，原始地震产生的加速度的值不会被放大或减小，也就是最大层面运动时的加速度值，这个加速度值与阻尼无关，无论阻尼多少（2%，5%，7%…）ZPA值总是一定的，所以统一作为衡量设备抗震能力的加速度值。在试验中获得了设备的ZPA值，对应IEC60721－2－6或美国统一建筑物代码UBC以及其他地区性（如中国）分级标准所规定的地震带资料，就可以定性相关设备的抗震能力。经过试验的SIVACON 8PT低压开关柜被证明当ZPA＝6 m/s²时，在地震期间仍能保持工作能力，对应于UBC/CBC Zone 3；ZPA＝9 m/s²时，地震后无需维护依然保持工作能力，对应于UBC/CBC Zone 4。图3对比了不同地震烈度表的分级和8PT抗震能力所在的位置。

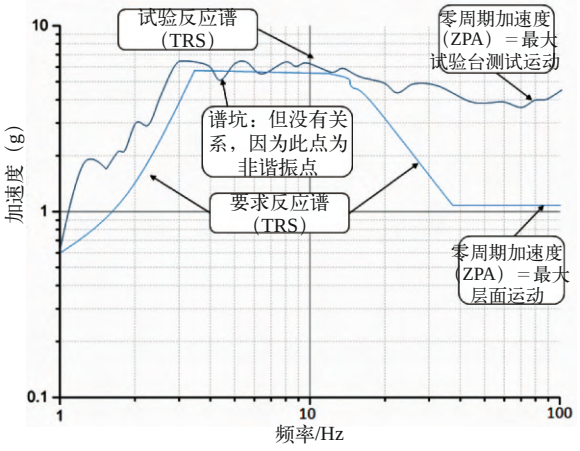

图2　加速度与频率的函数关系曲线

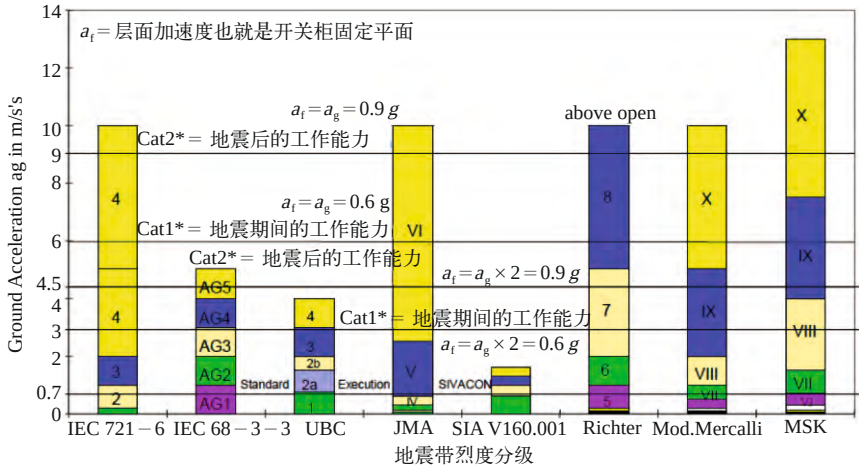

图3　地震带烈度表分级对比

影响设备的抗震能力有诸多因素，不但跟设备本身有关，还跟设备安装地点的场地条件有关；场地条件不但跟地点有关，还跟建筑物本身的设计有关。现在低压开关柜一般都安装放置在建筑物内，所以地震发生时实际设备所承受到的加速度或频谱已经是被建筑物“过滤”后的波了。有的建筑物会放大地震波，有的会减弱，这都得根据具体情况进行分析和试验，所以对于一些高要求客户会提出所需频谱的范围（Required Response Spectrum），绘制这样的频谱曲线也并非易事，需要了解当地地震的条件和标示在频谱中的土壤属性等，但是却能很精确地评估地震发生后设备的需要抗震能力。地震试验本身是个很复杂的的过程，它需要找到谐振点，在3个方向上以设定的阻尼比率模拟振动过程，根据试验结果绘制时域加速度曲线，再转换为频域（Test Response Spectrum），然后比对需求反应普（Required Response Spectrum）等等，限于篇幅在这里没有详细介绍地震试验步骤，希望通过此文能对设备抗震能力评估有所了解。EA

（收稿日期：2016.06.18）
（编辑：白文亭）

（上接第51页）

经永磁调速器改造后的实际节电率μ。

$$\mu=\frac{(D_1,\ D_2)\ Q}{W} \tag{5}$$

式中，D_1为改造前单耗，即改造前单位给水量需要的耗电量，kW·h/m^3；D_2为改造后单耗，即改造后单位给水量需要的耗电量，kW·h/m^3；Q为改造后总给水量，m^3；W为3#泵改造前耗电量，kW·h；

在对72 h电动机耗电量的测试下，得出如表2的相关数据。

表2　测试过程记录的参数统计

测试时段	1#定速泵电动机耗电量	4#定速泵电动机耗电量	3#定速泵电动机耗电量	汽动泵耗汽折算电量	总耗电量	总给水量/m^3	单耗
改造前	21590	18750	20470	31440.9	92250.9	28871	3.2
改造后	18180	18045	15177	31483.9	82885.87	27556.10	3.01
总节电量				5235.66			
节电率（%）				25.58			

由表2可以直观地看出，在给水泵的有效功率基本不变的情况下，效率的提高也可以有效降低电动机的能耗。由此证明了，永磁调速器可实现系统能源的最优匹配，通过提高系统效率起到节能的效果。

结束语

永磁调速器投资和维护费用低，节电率高，是各类风机，水泵等离心式负载的理想改造方式。醋酸化纤公司供水系统永磁调速改造项目的实施，不仅达到了调速节能的目的，永磁调速器减小系统振动、空载起动和过载保护等优点还延长了设备的寿命，提高了整个系统的安全稳定性。从长期运行的角度考虑，永磁调速器能为公司带来明显的经济效益，在风机、水泵改造方面将会拥有更广阔的应用前景。EA

（收稿日期：2016.06.18）
（编辑：白文亭）

更　正

本刊2016年第09期“产品与技术”栏目刊登的“自动转换开关在变电站站用电系统中的应用”一文作者单位更正为“国网安阳供电公司”，特此更正。

《电气时代》编辑部