

# 电能质量： 智能电网建设中的关键问题之一

◆ 中国电力科学研究院 林海雪

未来相当长时期内，电网发展仍要面临两个方面的挑战：一是传统化石能源的枯竭、环境污染（即温室气体排放）；二是用户对供电可靠性和电能质量的更高要求<sup>[1]</sup>。电网的发展都必须以保证电能质量为前提。智能电网也不例外。作为现代电网的发展方向和目标，智能电网建设是一个综合而又十分复杂的系统工程。智能电网建设中所涉及的电能质量问题，主要是指分布式电源（风电、太阳能发电等）的接入、电力电子技术和集成通信技术的应用，以及用电智能化所面临的问题。

## 1 分布式电源接网的电能质量

智能电网不仅要兼容大型的集中的电厂，还要兼容不断增加的分布式电源。分布式电源主要指以天然气为燃料的燃气轮机、内燃机、微型气轮机等发电，太阳能光伏发电、热发电，以氢气为燃料的燃料电池，风能发电等，其容量规模一般不大。分布式电源的利用是缓解能源危机、减少环境污染、提高供电可靠性和电能质量的关键措施之一。其中，可再生能源（如风能、太阳能）利用过程中，其分散性与不确定性会给电能质量的控制带来诸多问题。

(1) 电压偏差的控制和调整。可再生电源往往在中、低压配电线并网，改变了传统配网的单向供电模式。例如，风电注入电网的功率会直接影响电压水平。电压偏差与电网的短路容量和风力发电装置的有功无功功率有关。图1为功率因数为0.95的500kW风电注入电网而引起的电压偏差示意图<sup>[5]</sup>。由图可知，短路容量愈大，风电引起的电压偏差愈小；短路容量不变且和注入功率相同时，电压偏差则随着电网阻抗相角的不同而发生变化，或正或负。当较大的风力发电电源与用户在同一母线（连接点）时，有可能使用户电压偏差超标。

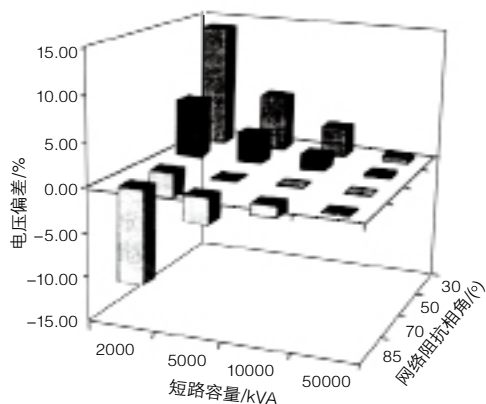


图1 由功率因数为0.95的500kW  
风力发电注入电网而引起的电压偏差

分布式电源的发电机一般配备励磁系统，在一定程度上可以调节无功功率，因而具有一定的电压调节能力。因此，大家普遍认为分布式电源可以提高配电馈线的电压调节能力，调节速度可能比调节变压器抽头或投切电容器还快，但实际情况并非完全如此。例如，分布式电源远离变电站时，它对变电站母线电压的调节能力就很弱；发电机采用感应电机型（如某些风电机）时，还可能吸收无功，不能调节电压；电网企业一般不希望分布式电源对公共连接点处的电压进行调节，因为可能产生干扰；在多个分布式电源之间有时也会产生调节的互相干扰；小容量分布式电源通常无能力进行电压调节；大容量分布式电源虽可调节电压，但必须要有配电系统调度中心的配合。而且分布式电源的启停往往受用户控制，一旦停运，公共连接点（PCC）处的电压调节就不能实现。

(2) 电压波动和闪变。风电中的风况及塔影效应对并网风电机组引起的电压波动和闪变影响很大，主要影响因素是平均风速和电网阻抗相角。单台风电机组引起的短期闪变 $P_{st}$ 或长期闪变 $P_{lt}$ 可

以用式(1)表示<sup>[7]</sup>:

$$P_{st} = P = C_c(\psi_k, V_a) \frac{S_{ref}}{S_k} \quad (1)$$

式中  $C_c$  为风电机的闪变系数, 是电网阻抗相角  $\psi_k$  和风机中心高度处年平均风速  $V_a$  的函数;  $S_k$  为风电机端子处的短路容量;  $S_{ref}$  为风电机的基准视在功率。表1为某一风电机的  $C_c$  与  $\psi_k$ 、 $V_a$  的关系。

表1 某一风电机闪变系数  $C_c$  与年平均风速、电网阻抗相角的关系

$\psi_k / (^\circ)$	30	50	70	85
$V_a / m \cdot s^{-1}$	$C_c(\psi_k, V_a)$			
6.0	7.5	3.2	0.8	3.8
7.5	7.7	3.3	1.2	4.0
8.5	7.9	3.4	1.8	4.5
10.0	8.0	3.5	2.0	5.2

式(1)中  $P_{lt}$  和  $P_{st}$  相等, 是因为在估计风电闪变时, 10min 内的闪变值 ( $P_{st}$ ) 可能会持续 2h ( $P_{lt}$ );  $C_c$  还和机组结构、技术性能有关。

表1仅是例举。若有多台发电机连接到电网的公共连接点(PCC), 则可用式(2)合成求出总闪变值。

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N [C_{ci}(\psi_k, V_a) \cdot S_{refi}]^2} \quad (2)$$

式中  $C_{ci}(\psi_k, V_a)$  为第  $i$  台风电机的闪变系数;  $S_{refi}$  为第  $i$  台发电机基准视在功率;  $N$  为接到 PCC 处的风电机数目。

(3) 谐波和间谐波。一台直接接到电网的风电机, 若没有电力电子变换器, 正常情况下在连续运行期间不会引起显著的谐波或间谐波畸变; 在起动时, 由于软启动晶闸管的作用, 可能有一个短时间突发的畸变脉冲, 但只要脉冲时间不超过几十 s, 一般便不成问题。

带有电力电子变换器的变速风电机组(如图2所示), 在运行中将会产生谐波和间谐波畸变。因此, 谐波电流发射必须加以规定。各次谐波电流以及最大总谐波电流畸变的频率一般应限定在电网基波频率的 50 倍以内。

图3为测量到的谐波畸变电流的例子。IEC 61800-3(1996) 标准推荐, 电流总谐波畸变率应小于 5%。若干台风电机在 PCC 处的谐波电流可采用式(3)合成。

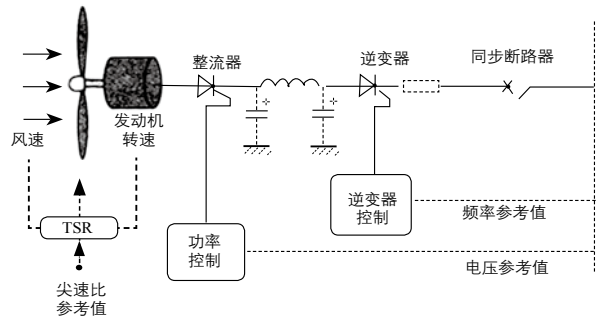


图2 并网变速风电系统电气结构图

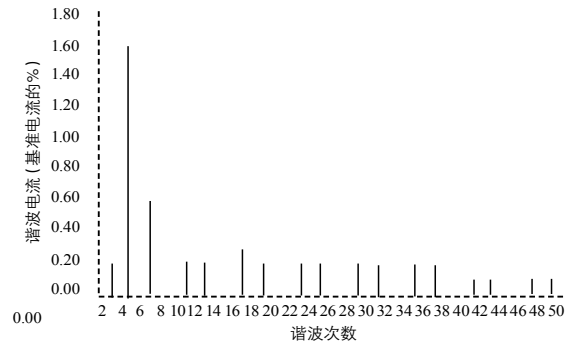


图3 从一台带有电力电子变换器的风电机测量到的谐波电流畸变发射的例子

$$I_{h\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{I_{hi}}{n_i} \right)^\alpha} \quad (3)$$

式中  $I_{hi}$  为第  $i$  台风机的  $h$  次谐波电流;  $n_i$  为第  $i$  台风机的变压器变比;  $\alpha$  为合成指数。当  $h < 5$  时,  $\alpha = 1.0$ ;  $5 \leq h \leq 10$ ,  $\alpha = 1.4$ ;  $h > 10$ ,  $\alpha = 2.0$ 。

分布式电源发电机本身会产生 3 次谐波, 如与发电机相连的供电变压器在发电机侧的绕组若为星形(带中性点接地), 则 3 次谐波就有可能形成通路; 若该绕组为三角形, 则 3 次谐波会在绕组中形成环路因而不会注入或很少注入系统。另外, 当分布式电源与配电网直接相连时, 有可能向配电网注入直流, 使变压器和电磁元件出现磁饱和现象, 引起发热、振动, 并使附近机械负荷产生转矩脉动。

(4) 供电的短暂中断和可靠性。分布式电源通常设计为备用发电系统。但从主电源向备用电源的转移往往不是无缝转移, 仍有极短的中断。

如果正常运行时, 分布式电源与电网企业的主供电电源并列运行, 情况可能要好一些。如果分布式电源与系统并列运行或同时还带部分负荷时, 一旦出现故障, 分布式电源容量又太小, 或转移的负荷太大, 则可能要切除部分负荷, 或仅带少量不可

中断的负荷,否则会引起孤立电网电压和频率的下降,无法维持正常运行。

分布式电源对配电网可靠性产生的影响,有利还是不利,需视具体情况而定,不能一概而论<sup>[9]</sup>。

1) 不利情况: ①大系统停电时,由于燃料(如天然气)中断或辅机电源失去,部分分布式电源会同时停运,供电的可靠性也就无法提高。②分布式电源与配电网的继电保护配合不当,可能使继电保护误动,反而降低可靠性。③不适当的安装地点、容量和连接方式会使配电网可靠性降低。

2) 有利情况: ①分布式电源可改善输配电网的过负荷和堵塞情况,增加输配电网的输电裕度,提高电网可靠性。②在一定的分布式电源配置和电压调节方式下,可缓解电压暂降,提高系统对电压的调节性能,从而提高电网的可靠性。③特殊设计的分布式电源可当电力输配电网发生故障时继续保持运行,从而提高了电网的可靠性水平。

(5) 铁磁谐振。在分布式电源通过变压器、电缆线路、开关等与配电网相联情况下,一旦配电网发生故障(如单相对地短路)而配电网侧开关断开时,分布式电源侧开关也会断开。如若此时分布式电源变压器未接负荷,则变压器的电抗与电缆的大电容可能发生铁磁谐振而造成过电压,还可能产生相当大的电磁力,使变压器发出噪声甚至损坏。

(6) 频率稳定性。大型电网具有足够的备用容量和调节能力,分布式电源接入时,一般不必考虑频率的稳定性;对于孤立运行的小型电网以及分布式电源装机容量(指不稳定的风电机组)达到或超过电网装机容量的20%时,则造成的频率偏移和稳定性问题不容忽视。

由于风电具有随机波动特性,其发电出力随风力大小而变化,因此为保证正常供电,电网需根据并网的风电容量增加相应的旋转备用容量。风电上网越多,旋转备用容量也越大。因此,为保证风电机组运行的安全稳定和提高整个电网的运行经济性,必须有适当的应对措施,如采用风电与水电联动外送、采用灵活交流输电技术进行动态潮流和动态无功电压控制、采用大功率储能装置对波动功率进行快速跟踪调节等。

相对于风电机组而言,太阳能电站一般容量规模较小,接入电网对电能质量影响不大。例如上海闵行紫竹科学园区1MW太阳能发电系统示范工程,如图4所示<sup>[6]</sup>。但太阳能发电系统在接入电网运

行时,仍有诸多问题需要考虑。例如,从光电板感受的直流电势,需要通过光伏逆变器转换成交流电压,以便与公共电网并网。虽然换流器件采用全控可关断器件(IGBT)与采用晶闸管的常规换流器相比,理论上谐波电流可得到很大的抑制,但实际上,光伏逆变电源运行时仍能注入谐波电流。

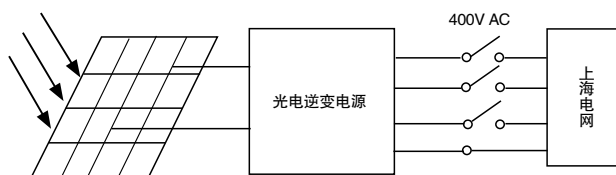


图4 1MW太阳能发电系统

实测表明,图4所示的400V母线电压波形畸变率(THDu)与太阳能发电系统的运行关系不大(停运时THDu为0.51%~0.62%,运行时为0.53%~0.76%),因为400V短路容量远大于太阳能的输出功率。太阳能发电系统最大功率输出时,400V光伏逆变器输出电流的频谱如图5所示。其谐波电流成分主要是2、3、4、5、6、7、8、9次。

测试发现,采用IGBT的光伏逆变器仍有约10%的谐波电流注入电网,三相谐波电流明显不平衡(相差2倍以上),低次偶次谐波电流值较大。

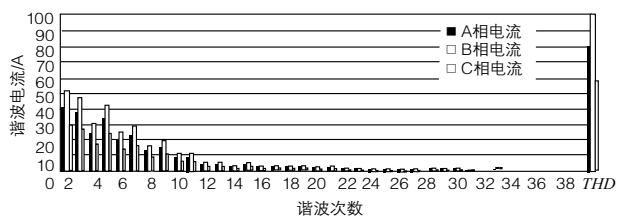


图5 400V电流频谱

因此太阳能发电系统独立运行或与其他发电系统构成小系统运行时,其产生的谐波电流应给予重视。

根据日本和德国的家用光伏发电设备的安装情况和运行经验表明,安装在居民屋顶上的光伏发电系统大多直接并网运行,一般不安装蓄电设备,因而会产生一定量的反向功率输入电网。因此,在大量安装光伏发电设备的情况下,无功补偿和调节手段显得极为重要。

## 2 电力电子与集成通信技术的应用

智能电网还大量应用电力电子技术,作为其快速、灵活的控制手段,以提高供电可靠性和电能质量,例如高压直流输电(HVDC)、灵活交流输电

(FACTS)、柔性直流输电(VSC-HVDC)、定制电力(Custom Power, CP)、智能高压设备等。这些设备多数采取了一定措施,但仍是谐波源,因此其谐波的影响及瞬态干扰仍需要特别关注。

智能电网的通信系统为了高效应用,必须在通用标准的基础上实现全集成。一旦海量数据信息通过电力线进行传输(如电力线载波),便成为谐波源或间谐波源。因此,IEC 61000-2-2标准中给出限值规定<sup>[8]</sup>,以保证信号的电磁兼容性。

### 3 用电智能化的挑战

低劣的电能质量会带来巨大损失。一个计算中心失电2s就可能破坏几十h数据处理结果,造成几十万美元的经济损失。1~2周期供电电压暂降,半导体生产线就可能被破坏,导致几百万美元损失。电力事故导致美国每年损失达1100亿~1600亿美元。据2008年11月欧盟调查报告<sup>[10]</sup>显示,低劣的电能质量(包括供电可靠性)所造成的经济损失每年高达1500亿欧元以上。

电能质量敏感的负荷数量不断增加,而改善电能质量的费用该由谁来支付,是电力企业还是用户?这是一个目前有争论的问题。因此,优质电能质量的费率结构问题应提上议事日程,各相关电力机构也应给予充分重视。

我们现在已有多种技术和设备能够将干净可靠的电力送给用户<sup>[4]</sup>。比如:电能质量表计,系统广域电能质量监测,各种储能设备,电子系统健康状况监测,新的分布式电源(如燃料电池、微型燃气轮机)为敏感负荷提供洁净电力等。当然这一切需要设备制造商、电力公司、用户和标准机构之间的支持与合作。

未来的智能电网将按需求等级收费,因而电能质量的科学分级和合理评估又成了新的挑战。

### 4 结束语

大量分布式电源的接入,改变了传统电网的单向供电模式,对电网电压水平的控制和调整带来许多问题。大量新能源的利用,特别是风能和太阳能等不稳定电源的接入,会引起供电电压的波动和闪变;许多分布式电源接入电网,会产生谐波和间谐波;各种电力电子装置和“集成”通信技术等会使电网中电磁环境更为复杂,出现新的技术问题等,对此必须研究解决。根据用户需要提供相应等

级的电能质量,即“按质论价”,解决一些特殊的电能质量问题,如“孤岛”运行时电网的电压和频率控制,防止故障时可能引发的铁磁谐振等新问题都须研究解决。

与电能质量相关的这些问题,若得不到妥善解决,则智能电网建设必定会受到影响。因此,电能质量是建设智能电网过程中的关键问题之一。■

### 参考文献

- [1] 余贻鑫. 智能电网研究现状与发展趋势[J]. 电能质量, 2010, (05): 31~33
- [2] 刘振亚主编. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010年4月
- [3] 张兰. 可再生能源前景广阔[J]. 电力系统装置, 2001, (4): 54~55
- [4] 许晓慧主编. 智能电网导论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009年9月
- [5] J.O.Tande(挪威), N.Jenkins(英国). 分散发电电能质量的国际标准[C]. 1999年第15届国际供电会议论文集(第四分册), 中国电机工程学会城市供电专委会译, 2000年
- [6] 高美良. 1MW太阳能发电系统的电能质量问题[J]. 电能质量, 2010, (03): 101~102
- [7] 国标GB/T 20230-2006/IEC 61400-21: 2001《风能发电机组—电能质量测量和评估方法》[S]2006-07-20发布
- [8] IEC 61000-2-2: 2002《EMC-Part 2-2: Environment-Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems》[S]
- [9] 胡学浩. 分布式发电(电源)技术及其并网问题[J]. 电工技术杂志, 2004, (10): 1~5
- [10] Jonathan Manson, Roman Targosz. European power quality survey report[M]. Leonardo Energy.org, November 2008

### 作者简介:

林海雪, 教授级高工, 硕士, 长期从事电能质量和动态无功补偿装置的研究、开发和工程应用工作; 主持和参与制定电能质量国家系列标准; 参与编著翻译专著10本, 发表论文80余篇; 获国家科技进步三等奖1项, 省部级科技进步二等奖2项; 享受国务院特殊津贴待遇; 现返聘为输配电及节电技术国家工程研究中心和中国



电力科学研究院中电普瑞科技公司高级顾问, 全国电压电流等级和频率标准化技委会顾问, 中国电源学会电能质量专委会顾问。