

超高次谐波问题及其研究现状与趋势

汪颖, 罗代军, 肖先勇, 李媛, 徐方维

(四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065)

Review and Development Tendency of Research on 2~150 kHz Supraharmonics

WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, LI Yuan, XU Fangwei

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Supraharmonics are a new power quality issue in process of rapid development of power electronic technology. This paper discusses the phenomenon from various aspects, including its generation and transmission mechanism, interaction, adverse effects, emission, measurement and standardization. This paper summarizes several kinds of common supraharmonic sources and their emission frequency bands, such as electric vehicle charging devices, photovoltaic inverters and lighting devices. Based on two aspects, i.e. resonance amplification and equipment malfunction, adverse effects of supraharmonics on system, equipment and power-line communication are analyzed. According to definition of primary and secondary emissions of supraharmonics, estimation methods of supraharmonic contribution are proposed. This paper summaries and compares existing analysis methods, measurement methods and related standards of supraharmonics, and puts forward research filed and direction in future.

KEY WORDS: supraharmonics; supraharmonic sources; primary emission; secondary emission; measurement methods; standards

摘要: 超高次谐波是电力系统电力电子化过程中产生的电能质量问题。从超高次谐波的产生机理、传播机制、交互影响、危害、发射水平、测量与标准化等角度进行剖析。分析了电动汽车充电装置、光伏逆变器、照明装置等常见超高次谐波源及其发射特点;从谐振放大和设备异常两层面对超高次谐波对系统、设备和电力载波通信的影响;将超高次谐波划分为原生发射和次生发射,提出几种估计超高次谐波贡献度的思路;并对现有超高次谐波测量、分析方法和标准等进行了比较,指出未来的研究方向。

关键词: 超高次谐波; 超高次谐波源; 原生发射; 次生发射; 测量方法; 标准

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2508

0 引言

随着新能源、电动汽车等的发展和利用,电力系统内的超高次谐波问题越来越突出,引起了工业界和学术界重视。2017年6月,国际供电会议CIRED针对2~150 kHz超高次谐波(supraharmonics)问题专门设立了创新论坛(RIF)、技术座谈会(Tutorial 4),并在“光伏系统带来的电能质量问题”圆桌会议(RT1)上进行了讨论^[1]。可以说,超高次谐波是CIRED 2017的主题之一。

对超高次谐波的研究起源于20世纪80年代^[2],21世纪以来,明确将超高次谐波定义在2~150 kHz范围^[3-4]。先后采用了“高频谐波(high frequency harmonics)”^[5]、“高频畸变(high frequency distortion)”^[6]、“数万赫兹频率(frequency of some tens of kHz)”^[7]或“2~150 kHz频率(the frequency range 2 to 150 kHz)”等术语^[8]。2013年,IEEE PES年会上,首次提出“supraharmonics”术语。2014年,Math Bollen在《IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility》杂志上给出了正式命名。我国学者肖湘宁^[9]、肖先勇、林海雪^[10]、刘森^[11]等也同期采用了类似术语。

国际上对超高次谐波开展了大量研究。国际电工委员会(IEC)、国际大电网会议(CIGRE)和欧洲电工标准化委员会(CENELEC)等,分别成立专门工作组。IEC/SC 77A工作组在2015年提出应建立30~150 kHz谐波兼容性标准^[12];CENELEC于2010、2013和2016年分别对150 kHz以下电磁干扰发布了研究报告^[13-15];EN 50160工作组在2013年的应用指南^[16]中,加入了9~95 kHz电压限制。2015年,第23届国际供电会议上,CIGRE/CIRED联合工作组C4.24专题讨论了超高次谐波测量问题^[17]。2017年,CIGRE JWG C4/C6.29专题讨论了

基金项目: 四川省科技厅: 非线性负荷谐波责任划分国际合作(2017HH0081)。

Fund Project: Non-linear Load Harmonics Responsibility Division International Cooperation, Science and Technology Department of Sichuan Province (2017HH0081).

光伏逆变器引起的超高次谐波^[18-19]。

本文以 2017 年国际供电会议中涉及的超高次谐波为切入点，对超高次谐波的产生、发射水平、危害、测量与限制标准等进行剖析，指出工业界和学术界面临的问题和挑战，希望能为理解和认识超高次谐波起到抛砖引玉的作用。

1 超高次谐波产生机理及谐波源分类

1.1 超高次谐波产生机理

广义上讲，产生超高次谐波的电气设备，即可认为是超高次谐波源。传统以晶闸管为代表基于相控原理的电力电子装置，除产生特征次谐波外(金属冶炼 5th、7th、11th、13th，高压直流输电与特高压直流输电 11th、13th 以及 23th、25th)，也产生超高次谐波。然而，由于近年来大量以绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 为代表基于斩控技术的电力电子装置进入电力系统，引起超高次谐波问题日益突出，因此，将其作为本文的讨论对象。新能源并网、柔性直流输电、储能电池接入等采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术、多电平技术的电力电子装置，其谐波发射特性具有超高次、宽频域特征^[20]，符合超高次谐波的频率范围定义，可认定为超高次谐波源。

电压源换流器(voltage sourced converter, VSC)是新能源、储能、柔性直流输电与系统的接口，既可以做逆变运行也可以做整流运行，具有代表性。下面以电压源逆变器为例，阐述超高次谐波产生机理。

令 VSC 开环运行，输出电压 u_{inv} 的频谱如图 1 所示。其中，纵坐标表示谐波占基波含量的百分比； f_{fund} 表示基波频率； f_s 表示 VSC 开关频率。由图可见 u_{inv} 除基频分量外，还包含开关频率及其副边带谐波。可以认为 PWM 调制是超高次谐波的源头。

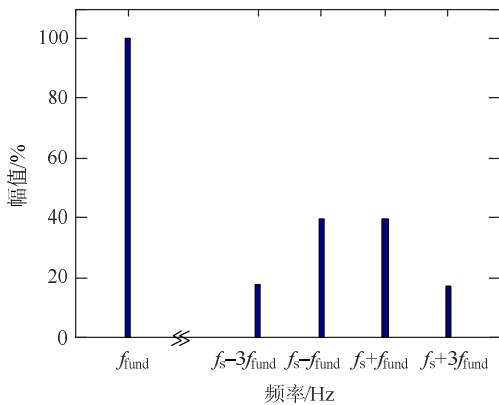


图 1 输出电压 u_{inv} 的频谱
Fig. 1 Spectrogram of output voltage u_{inv}

进一步地，典型 VSC 系统框图如图 2^[21]所示。其中， C_{dc} 为输入侧电容； S_1 — S_6 为开关管； i_{inv} 为逆变器侧滤波电感电流； L_1 、 C_f 和 L_2 组成 LCL 型输出滤波器； R 为抑制 LCL 谐振峰阻尼电阻； i_c 为流过滤波器电容电流； L_g 为系统侧电感； u_a 、 u_b 和 u_c 为系统三相谐波源； i_g 为并网电流； i_{ref} 为参考电流； $G_f(s)$ 为电流控制环路增益； u_{ic} 为输出调制波； u_m 为三角载波； d 为功率管的占空比输出。

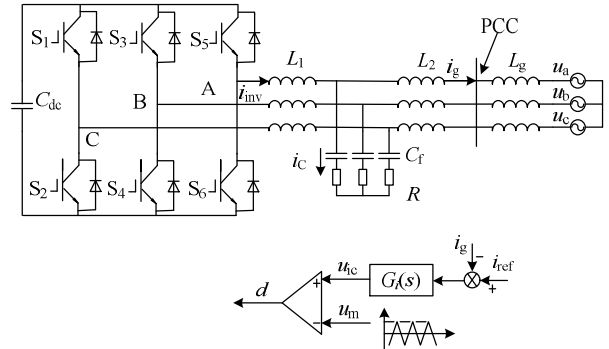
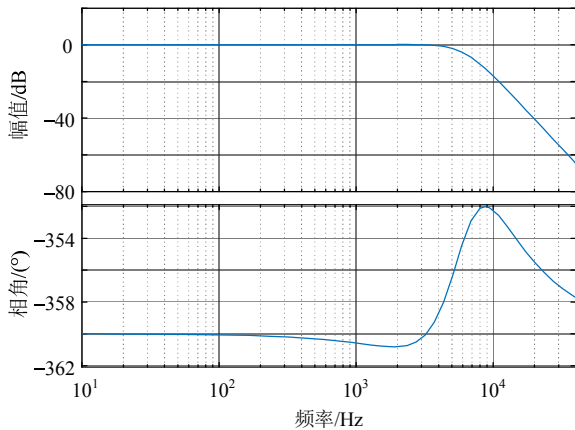


图 2 典型 VSC 系统框图
Fig. 2 Block diagram of typical VSC

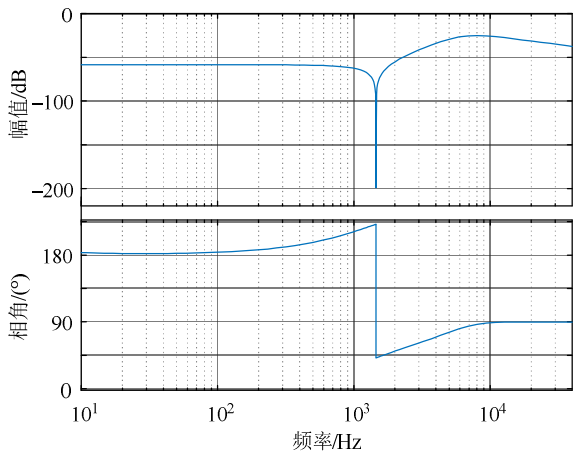
基于古典控制理论的比例-积分-微分(PID)控制仍为当前并网 VSC 的主导控制策略，将并网电流反馈作为最内环是并网 VSC 普遍采用的方式。无论是新能源并网的最大功率点跟踪，参与系统电压频率调整的虚拟同步机控制，或者是直接跟随系统 P、Q 指令，均会通过外环(电压频率调整^[22-23]、功率闭环^[24-25]或直流电压闭环^[26-27])形成并网电流指令，最终通过如图 2 所示的电流闭环控制实现并网。在三相系统中， i_{ref} 代表同步旋转坐标系下的 d、q 轴电流指令， $G_f(s)$ 多为比例-积分(PI)控制；在单相系统中， i_{ref} 代表交流指令， $G_f(s)$ 多为比例谐振(PR)控制。控制环路增益选择以基波频率分量无静差为主要目标，超高次谐波的滤除主要依靠 LCL 滤波实现。选取典型 LCL 参数^[21]，做出并网电流-至-参考电流，以及并网电流-至-系统电压的传递函数波特图，如图 3 所示。可以看出，虽然经 LCL 滤波，开关频率谐波在很大程度上受到抑制，但仍然有所保留。

值得注意的是，VSC 并网控制中往往还加入系统电压前馈控制，可以抑制系统电压畸变等带来的电流畸变，这样将进一步增强并网 VSC 的电流源特性。

考虑到以上 VSC 并网控制策略，现有很多研究将斩控式电力电子装置产生的谐波建模作为电流源^[7,28-29]。然而，该谐波电流源与传统相控电力电子装置产生的谐波电流特性有显著区别，具体原



(a) 并网电流/参考电流伯德图



(b) 并网电流/系统电压伯德图

图 3 传递函数伯德图

Fig. 3 Bode diagram of transfer function

因为：1) 相控式电力电子装置谐波电流集中在低频次，而低频段系统谐波阻抗远小于装置谐波阻抗，因而谐波电流源特性明显，并具有较固定的相位分布。2) 斩控式电力电子装置 PWM 调制方式繁多，典型的同步调制、异步调制、特定谐波消去法等，均影响开关频率的谐波输出特性，谐波相位分布确定困难。3) LCL 滤波器具有固有谐振峰，将放大谐振频率处的信号，形成谐波。虽然现有较多文献提出解决方案，如阻抗重塑^[30-31]、有源阻尼法^[32-33]等，但由于元件参数误差、温漂等因素，并网电流环增益形状可能偏离设计，导致谐振峰未被有效抑制。4) 斩控式电力电子装置谐波电流集中在高频次，高频段系统谐波阻抗与 LCL 滤波器阻抗相当。当多台 VSC 并联或组网时，多 LCL 滤波器并联使网络中谐波阻抗分布无法降阶处理，因此分析更加复杂，且具有谐振的可能。

综上所述，虽然将并网 VSC 等效为超高次谐波电流源具有一定依据，但在谐波发射特性，谐波测试实验设计与分析理论方法，系统超高次谐波阻抗分析方法等方面仍值得进一步深入探究。此外，

各类斩控式电力电子装置，如带有源功率因数校正 (active power factor correction, APFC) 的电动汽车充电桩、LED 照明装置、以模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 为代表的多电平并网逆变器等仍值得更细致地研究其超高次谐波发射特性。

1.2 现有研究中的超高次谐波源分类

超高次谐波源大致可分 3 类：1) 开关频率几十到几百 kHz 的电力电子换流器；2) 照明装置；3) 电力载波(power-line communication, PLC)等其他设备。

1.2.1 电动汽车充电装置

电动汽车充电装置等电力电子装置是典型超高次谐波源。文献[34-36]对充电装置产生的超高次谐波的测试表明，电动汽车充电装置发射的谐波电流在 3~29 kHz 频段，且开关频率处的谐波电流最大，可达到电动汽车最大充电电流的 9%^[34]，随着频率的升高，超高次谐波电流呈下降趋势，但在开关频率及其整数倍频率附近会出现电流陡升现象。电动汽车充电装置开关频率的多样性，导致产生的超高次谐波频带分布广，从数 kHz 到上百 kHz。电动汽车充电装置的典型开关频率及其开关频率处电流谐波发射水平如表 1 所示。

表 1 电动汽车充电装置的开关频率及发射水平
Tab. 1 Switching frequency and emission level of electric vehicle charging devices

序号	测试对象	台数	开关频率/kHz	发射水平/dBμA
1	电动汽车 1 ^[34]	1	10.03	112.3
2	电动汽车 2 ^[34]	1	—	—
3	电动汽车 3 ^[34]	1	28	112.4
4	电动汽车 4 ^[34]	1	—	—
5	电动汽车 5 ^[34]	1	5.2, 6.55	93.1
6	电动汽车 6 ^[34]	1	11	89.6
7	电动汽车 1 ^[35]	1	27.3	110
8	电动汽车 2 ^[35]	1	—	—
9	电动汽车 3 ^[35]	1	35.4	101
10	电动汽车 4 ^[35]	1	100	80
11	充电装置 PCC 点 ^[36]	多台	10	—

1.2.2 光伏逆变器

国内外学者对光伏逆变器产生的超高次谐波进行了测试^[37-45]，包括对采用或未采用最大功率点跟踪控制的逆变器的测试，对单台逆变器或光伏电场并网点等的测试，测试场景包括仅接入光伏逆变器或相邻馈线接有其他负荷的光伏逆变器接入母线，测试时间包括白天和夜晚。测试结果表明，光伏逆变器会在 2~20 kHz 频率范围产生较大谐波电流，开关频率处的谐波电流最大，可达到基波分量的 2%。当频率大于 45 kHz 后，谐波电流较小，但

开关频率整数倍频率附近会出现电流升高现象。光伏逆变器开关频率通常小于 20 kHz，小功率单相逆变器的开关频率接近上限，大功率三相逆变器的开关频率通常低于 5 kHz，多台光伏逆变器同时接入时，开关频率约 16 kHz。典型开关频率及开关频率处电流谐波发射水平如表 2 所示。

表 2 光伏逆变器的开关频率及发射水平
Tab. 2 Switching frequency and emission level of photovoltaic inverters

序号	测试对象	备注	开关频率/ kHz	发射水平/ dBμA
1	光伏逆变器 1 ^[37]	1 台, 5kW, 单相	16	—
2	光伏逆变器 2 ^[37]	1 台, 5kW, 单相	16	—
3	光伏逆变器 3 ^[37]	1 台, 5kW, 单相	16	—
4	光伏逆变器 4 ^[37]	1 台, 15kW, 三相	16	—
5	光伏逆变器 ^[40]	多台	16~19	103
6	光伏逆变器 1 ^[41]	1 台, 15kVA, 单相	16.5	97.5
7	光伏逆变器 2 ^[41]	1 台, 15kVA, 单相	16.5	97.5
8	光伏逆变器 3 ^[41]	1 台, 15kVA, 单相	16	100
9	光伏电场 ^[42-43]	8 台, 850kW 光伏电场	3, 6, 9, 15	130
10	光伏电场 ^[44]	9×100kVA, 三相	3, 6, 9	120
11	光伏逆变器 ^[44]	11×(1~10)kVA, 单相	10, 16, 25	100
12	光伏逆变器 ^[45]	400kW 光伏电场	4~10	—

可见，充电装置、光伏逆变器等电力电子装置引起的超高次谐波频率主要与开关频率有关。

1.2.3 照明装置

LED 灯、高压钠灯、紧凑型节能灯等类型的照明电器是超高次谐波源。照明装置采用不同类型整流器时，产生的超高次谐波频率、发射水平均有差异，典型频率范围及对应电流谐波发射水平如表 3 所示。

研究表明，照明装置在主要频带产生的超高次谐波电流谐波含量约占基波分量的 1%~4%。同类型照明装置产生的谐波受灯具数量影响较大，照明装置之间存在谐波抵消现象。因此，在评估多谐波源导

表 3 照明装置发射的超高次谐波频率和发射水平
Tab. 3 Supraharmonic emission frequency and emission level by lighting devices

序号	测试对象	备注	主要频带/ kHz	发射水平/ dBμA
1	LED 灯 ^[46]	25 W	6.3, 41	60, 46
2	高压钠灯加电子镇流器 ^[46]	78 W	2.8, 68~80	70, 54
3	高压钠灯加电感镇流器 ^[46]	65 W	2~20	74.8
4	紧凑型节能灯 ^[47]	低于 25 W	20~60	54
5	紧凑型节能灯 ^[48]	7 W	30~50	69.5
6	紧凑型节能灯 ^[48]	4 W	30~50	69.5
7	白炽灯 ^[49]	2 盏, 60 W	9~122, 189~199	63.2, 59.5
8	紧凑型节能灯 ^[49]	7 盏, 5~15 W	9~122, 189~199	76.3, 59.7
9	LED 灯 ^[49]	2 盏, 2.5~3 W	9~122, 148~187	77, 70

致的超高次谐波发射水平时，应考虑谐波源之间的相互抑制作用。

1.2.4 其他设备

国内外对洗衣机、节能锅、LED 显示器、移动通信基站、PLC、鼠笼式感应电动机等不同设备产生的超高次谐波的测试结果，如表 4 所示。遗憾的是，尚未得到系统性结论。

表 4 其他设备发射的超高次谐波频率和发射水平
Tab. 4 Supraharmonic emission and emission level by other electrical appliances

序号	测试对象	备注	主要频带/kHz	发射水平/dBμA
1	LED 显示器 ^[49]	—	9~122	72.1
2	节能锅 ^[49]	85 W	9~122	84.3
3	手机基站 ^[50]	—	57.6, 65, 115.5	125, 111, 102
4	洗衣机 ^[50]	—	27, 45, 103	135, 135, 120
5	PLC ^[51]	—	3~148.5	—
6	鼠笼式感应电机 ^[52]	1.1 kW	1.1~4.4	—

实测表明，超高次谐波客观存在，可将超高次谐波源分为换流器、照明和其他装置等 3 类，不同类型超高次谐波源产生的谐波频率范围、发射水平、产生机理等不同，尚需进一步研究。

2 超高次谐波的传播

2.1 超高次谐波电流的传播

与低频谐波传播方式不同，超高次谐波通常在邻近设备之间传播。这是因为在低压网络中，系统阻抗由变压器和电缆阻抗构成，而用户阻抗表示所有用户设备及其连接线路阻抗之和。在 2~150 kHz 频率范围内，系统侧阻抗表现为感性，而用户侧阻抗由所连接用户设备的滤波电容决定，表现为容性^[10]。因此，对于超高次谐波而言，系统侧谐波阻抗往往大于用户侧谐波阻抗，这使得由设备发射的超高次谐波电流中的绝大部分会流入相邻设备，而只有少量部分会流入系统^[53-54]，如图 4 所示。

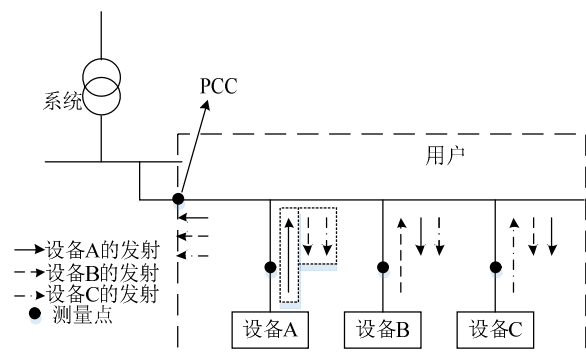


图 4 超高次谐波电流的传播

Fig. 4 Propagation of supraharmonic currents

2.2 原生发射和次生发射

为刻画超高次谐波的传播，Math Bollen 提出了

一次发射(primary emission)和二次发射(secondary emission)概念^[7]。林海雪、肖湘宁教授将其解释为原生发射和次生发射^[9-10]。现有文献普遍接受和采用上述发射概念,将接入系统的设备的超高次发射等效为图5^[55]。其中, Z_s 为背景谐波阻抗; E_s 为背景谐波电压源; I_1 为原生发射; I_2 为次生发射; $I_{em}=I_1-I_2$ 为设备谐波发射的总电流; J_c 为设备谐波电流源; Z_c 为设备谐波阻抗; U 为PCC点电压。

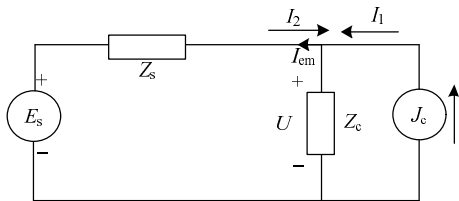


图5 原生发射和次生发射

Fig. 5 Primary and secondary emission

2.2.1 原生发射

原生发射是指由设备自身的非线性引起的超高次谐波发射。由图5所示电路,接入系统设备的超高次谐波原生发射^[55]为:

$$I_1 = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} J_c \quad (1)$$

设备的谐波原生发射特性取决于设备自身的非线性和谐振特性^[54]。

在实际测量中,原生发射是指设备单独运行时测量到的超高次谐波,如文献[53]通过单独测量LED灯、光伏逆变器,发现LED灯的原生发射的主要频带为2~30 kHz、光伏逆变器原生发射的主要频率为16 kHz。文献[54]通过测量发现电动汽车充电装置原生发射的主要频率为100 kHz。

2.2.2 次生发射

次生发射定义为背景侧(相邻设备或系统)含有超高次谐波,接入线性设备,在PCC点测量所得谐波。因此,PCC点测量所得的谐波电流 I 包含原生发射电流 I_1 和次生发射电流 I_2 。目前区分原生发射和次生发射的方法主要有2种:方法1,单独测量每个设备,获得其谐波发射频谱,然后与该设备和其他设备同时工作时的频谱进行比较,以区分原生和次生发射^[35,53-54,56];方法2,在多个设备同时工作时,通过打开或关闭某个设备,来获得更多关于原生和次生发射的信息^[38-39]。在如图5所示电路中,次生发射^[55]为

$$I_2 = \frac{1}{Z_s + Z_c} E_s \quad (2)$$

次生发射特性由附近设备的谐波发射强度、连接点阻抗与系统阻抗之间的关系确定^[53]。

在实际测量中,次生发射是指某设备在接入其他设备后,该设备端子处测量到的超高次谐波电流的增量。如文献[53]对一个连接有光伏逆变器和电视的系统分别测量其PCC点和光伏逆变器处的超高次谐波电流。发现当电视连接时,光伏逆变器在16 kHz频率处的谐波幅值增加了2倍,并且出现了由电视产生的55 kHz谐波,这是由次生发射导致的。由此说明,次生发射对超高次谐波的影响远大于低频谐波问题中的“背景谐波”的影响,可能造成超高次谐波幅值产生较大的增幅。

2.2.3 谐波贡献

目前,关于谐波贡献估计的方法主要适用于低频谐波。由图5所示电路,可得:

$$E_s = U - Z_s I \quad (3)$$

$$J_c = (U/Z_c) + I \quad (4)$$

在PCC点运用叠加定理^[57],可得:

$$U_{E_s-PCC} = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} E_s \quad (5)$$

$$U_{J_c-PCC} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} J_c \quad (6)$$

式中 U_{E_s-PCC} 和 U_{J_c-PCC} 分别表示系统侧和设备对PCC点的谐波电压贡献。

然而,在实际测量中只能获得 U 和 I 的数据,并不能同时求得阻抗 Z_s 、 Z_c 和谐波源 E_s 、 J_c 的值。针对这个问题,文献[58-59]提出通过主导波动物量法来近似求取 Z_s 和 Z_c 的值,文献[60]提出一种参考阻抗的方法来近似求取 Z_s 和 Z_c 的值。当求出谐波阻抗 Z_s 和 Z_c 的值后,即可通过PCC点测量得到的数据,基于式(3)~(6)来估计设备和系统侧对PCC点的谐波电压贡献。

独立分量法是目前用于求解谐波阻抗和谐波源较为公认的方法,该方法可以只通过 U 和 I 的数据求得 Z_s 、 Z_c 、 E_s 和 J_c ^[61-62]。然而,该方法的不足之处是,只适用于两侧谐波源相互独立的情况。

量化原生、次生发射的谐波责任是治理谐波污染、执行“奖惩性方案”^[63]的前提。然而当前谐波责任量化的研究还集中在低频谐波领域,在超高次谐波领域应用的有效性还需要进一步讨论。

3 超高次谐波的危害

超高次谐波的危害主要表现为电气设备之间超高次谐波的交互影响和系统谐振。

3.1 超高次谐波的交互影响

3.1.1 相同发射水平设备之间的交互影响

文献[7]提出一种简单的模型来分析相同发射

水平设备之间以及设备与系统之间的交互影响，如图 6 所示。其中，将谐波源等效为电流源模型 i_L ； C 为连接在系统与设备之间的 EMC 滤波器的电容； R 为系统阻抗； i_{em} 表示设备 1 与背景侧(系统和其他设备)之间流动的谐波电流，包含设备 1 的原生和次生发射； i_{grid} 表示流入系统的超高次谐波电流。

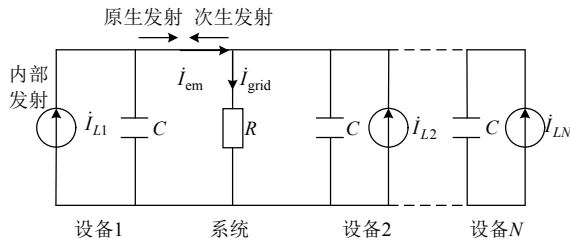


图 6 相同发射水平设备之间超高次谐波交互影响模型

Fig. 6 Interaction model of supraharmonics between devices of identical emission levels

当多台设备同时运行时，设备 1 与背景侧之间的流动电流为

$$i_{em} = \frac{1 + (N-1)j\alpha}{1 + Nj\alpha} i_{L1} - \frac{j\alpha}{1 + Nj\alpha} \sum_{i=2}^N i_{Li} \quad (7)$$

式中： $\alpha = \omega RC$ ； $\omega = 2\pi f$ 为角频率。

假设每台设备的内部发射电流 i_{Li} 的幅值相等，设备 1 发射的总谐波电流幅值为

$$I_{em} = \sqrt{\frac{1 + N(N-1)\alpha^2}{1 + N^2\alpha^2}} I_L \quad (8)$$

流入系统的总电流为

$$i_{grid} = \frac{1}{1 + jN\alpha} \sum_{i=1}^N i_{Li} \quad (9)$$

其幅值为

$$I_{grid} = \sqrt{\frac{N}{1 + N^2\alpha^2}} I_L \quad (10)$$

由此可见，随着连接设备的增加，单台设备发射的总谐波电流幅值会逐渐趋于该设备内部发射的电流幅值，而几乎与系统阻抗、EMC 滤波电容等无关。而流入系统的电流幅值与设备量 N 的平方根成反比，即流入系统的谐波电流幅值会随着并联设备数量的增加而减小。

Anders Larsson 博士及其团队对依次打开的 48 盏日光灯的 PCC 点和其中某盏灯的超高次谐波电流进行测量。发现在 48 盏灯同时打开的情况下，测量到的单盏灯谐波电流幅值和只开一盏灯时的谐波电流幅值大致相同；而在 PCC 点几乎不含超高次谐波分量^[64]。文献[65]指出，随着日光灯开启数量的增加，流入系统的超高次谐波电流会减少，15 盏后，流入系统的超高次谐波量趋于稳定。造成这一现象的原因可能是：超高次谐波的叠加是矢量的相加，叠加结果受相位的影响，可能是相互助增，

也可能是相互助减。

3.1.2 不同发射水平设备之间的交互影响

文献[28]通过如图 7 所示的等效电路来分析不同超高次谐波发射水平设备之间的交互影响。其中， i_{L1} 和 i_{L2} 分别表示设备 1 和设备 2 的内部发射电流； C_1 和 C_2 分别为设备 1 和设备 2 与系统之间的滤波器电容； R 为系统阻抗。

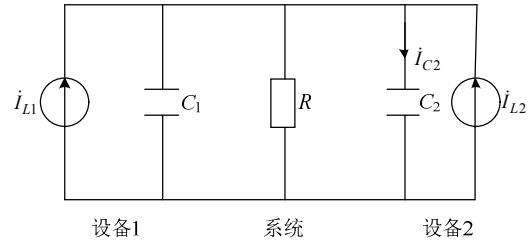


图 7 不同发射水平设备之间超高次谐波交互影响模型

Fig. 7 Interaction model of supraharmonics between devices of different emission levels

假设备 1 的超高次谐波发射水平较大，设备 2 的超高次谐波发射水平较小，则流过 C_2 的电流为

$$i_{C2} = \frac{j\alpha_2}{1 + j(\alpha_1 + \alpha_2)} (i_{L1} + i_{L2}) \quad (11)$$

式中： $\alpha_1 = \omega RC_1$ ； $\alpha_2 = \omega RC_2$ 。

由于 $|i_{L1}| \gg |i_{L2}|$ 且 $\alpha_i \gg 1$ ，则流过 C_2 的电流幅值为

$$I_{C2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} I_{L1} \quad (12)$$

可见，当相邻设备的超高次谐波发射水平相差较大时，超高次谐波电流往往从发射水平较大的设备流向发射水平较小的设备。

然而在某些情况下，超高次谐波电流也会从发射水平较小的设备流入发射水平较大的设备^[53-54]。造成这一现象的原因可能是：较大发射水平设备的变流器与较小发射水平设备的 EMC 滤波器之间存在谐振，导致变流器呈现低阻抗特性。

3.1.3 超高次谐波交互影响导致电气设备异常

超高次谐波导致的电气设备异常，可分以下 4 类情况：

1) 设备间歇性工作或功能失效。

文献[66]指出开关频率为 3 kHz 的电压源型换流器会影响 3 kHz 倍数频率波段信号的正常接收；当打印机与换向振荡频率为 6 kHz 的机床同时运行时，打印质量显著下降。由数控铣床逆变器引起的频率 8 kHz、幅值 5 V 的电压畸变，可能造成居民用户的咖啡机故障、数控铣床周期性故障、理发店吹风机自动开停 30~40 次^[42]。

电力载波在被广泛用于远程抄表的同时,也给其他工频设备带来了不利影响^[67],这种影响可分为2类^[3]:①用于通信的电压信号在通过终端设备时产生的电流,导致设备过热或引起其他干扰;②载波信号导致的电压波形畸变导致终端设备误动作。

当频率较高时,整流等分流电路中的电容会呈低阻抗特性,产生高频电流,导致电容温度升高,影响正常工作和寿命^[68]。风机产生的3~7 kHz谐波可能造成电容器组电流增大,引起设备发热^[69]。文献^[67]发现,某些频率的电力载波信号可能影响触摸调光灯的正常使用,还可能导致天线放大器、交通灯控制系统或住宅加热控制系统故障^[70]。

2) 设备无法工作或损坏。

文献^[66]指出用于防止过电压浪涌的压敏电阻在10%量级的换相振荡下,短时间内就会由于过热而失效;一台正常使用的机床,会产生几kHz频率的电压畸变,当一台精密测量装置连接到其控制部分的插座时,测量装置立即被损坏。

3) 电力载波通信故障。

文献^[3]通过实验和现场测试发现导致通信故障的原因有2个:①终端用户设备在通信频率范围发射的电压或电流信号可能导致通信信号的丢失或传输错误;②终端用户设备在通信频率范围形成的低阻抗通路导致接收机只能接收到部分信号。

文献^[71]对佛蒙特扬基交流变电站的一条345 kV线路进行现场测量。发现调谐电路内的低阶串联谐振会引起PLC调谐设备过电压,导致PLC电路中的元件饱和,从而产生干扰PLC电路正常运行的噪声。文献^[72]中连接直流电弧炉的线路上产生了同样的干扰。文献^[73]在实验室环境下研究负荷对PLC的影响,发现当存在低阻抗设备时,绝大部分通信信号会流过低阻抗设备,而只有少部分通信信号被接收器接收。

4) 设备或装置发出噪声。

换流器换向振荡引起的kHz频率范围内的电压畸变会使得通信设备发出明显的噪音^[66,74]。文献^[40]出现相似的情况,数控铣床逆变器产生的8 kHz频率的电压畸变导致电视机发出噪声。文献^[75]指出脉宽调制换流器的机械振荡会导致感应电机在几kHz到十几kHz频率范围内产生极高的噪声。

综上所述,当前国内外对超高次谐波交互影响的研究主要集中在相邻设备间的传播和影响,关于超高次谐波在配电网跨电压等级间交互影响的研

究还极其欠缺。

3.2 超高次谐波的谐振

3.2.1 超高次谐波的谐振模型

电力电子设备的EMC滤波器可能与变压器或配电馈线上电感器的漏感发生谐振。谐振会造成谐波放大^[56,66,74]等多种电能质量问题。为分析设备谐振对系统的影响,文献^[28]在文献^[7]的基础上,建立如图8所示的谐振模型。其中, L 表示PCC点系统阻抗的电感部分。

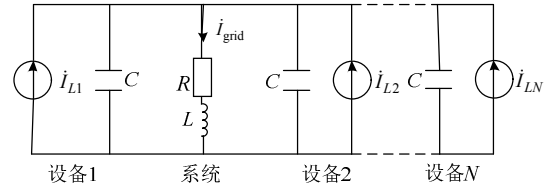


图8 超高次谐波的谐振模型

Fig. 8 Resonance model of supraharmonics

当多个设备同时运行时,假设每台设备的内部发射电流 I_L 的幅值相等,则流入系统的超高次谐波电流为

$$I_{grid} = \frac{N}{(1 - N\beta) + jN\alpha} I_L \quad (13)$$

式中: $\alpha = \omega RC$; $\beta = \omega^2 LC$ 。

其幅值为

$$I_{grid} = \frac{N}{\sqrt{(1 - N\beta)^2 + (N\alpha)^2}} I_L \quad (14)$$

当谐振频率 $\omega = 1/\sqrt{NLC}$ 时,流入系统的超高次谐波电流有最大值:

$$\max I_{grid} = \sqrt{N} (\sqrt{L/C} / R) I_L \quad (15)$$

可见,谐振点的谐波放大倍数与设备量 N 的平方根成正比;而谐振频率与设备量 N 的平方根成反比。

3.2.2 超高次谐波导致的系统谐振问题

超高次谐波的谐振会导致谐振点处谐波放大,文献^[76]表明风电场谐振点频率附近的谐波幅值明显高于其他频率段的谐波幅值。文献^[53]发现当光伏逆变器和电视机的EMC滤波器发生谐振时,光伏逆变器16 kHz频率处的超高次电流幅值增加了2倍。文献^[38]中,当光伏逆变器和多个家用电器组成的负荷连接时,发现光伏逆变器在开关频率处的谐波电流幅值增加了5倍。

超高次谐波导致的谐振对电力系统有诸多不利影响:造成变压器快速老化^[77],电子设备间歇性故障、噪音或发电单元脱网^[74],后者已在新疆等地风电场发生。

需要指出的是,超高次谐振与高比例电力电子

装置引起的超/次同步谐振是 2 个不同的研究命题。关于超/次同步谐振问题，目前已有一些理论成果^[28,78-79]。然而，现有关于超高次谐波多为测量现象或运行问题报道，但机理性研究成果还非常欠缺。

4 测量

准确测量 2~150 kHz 频率范围内的电压和电流是进行超高次谐波发射评估和制定超高次谐波免疫力水平测试标准的基本前提和要求^[80]。

4.1 测量方法

2~150 kHz 谐波的测量方法主要由 IEC 制定。目前，在 IEC 61000-4-7^[81]的附录中介绍了 2~9 kHz 频率范围的谐波测量方法；IEC 61000-4-30 Ed.3^[82]草案针对 9~150 kHz 频率范围对的谐波测量，提出了一种不同于 IEC 61000-4-7 标准的测量方法。这 2 种方法均是从频域角度来分析超高次谐波，其测量过程可分为信号调制、在线预处理和离线后处理 3 步，如图 9 所示^[1]。

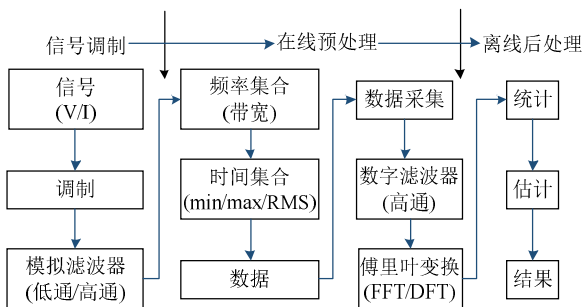


图 9 超高次谐波测量过程

Fig. 9 Measurement process of supraharmonics

CISPR 16-2-1^[83]是一个无线电广播标准，该标准中介绍了 9 kHz~30 MHz 频率范围的谐波测量方法。表 5 对 3 种测量方法的原理进行了简要介绍。

表 5 3 种测量方法的原理

Tab. 5 Principle of three measurement methods

标准	频率范围/kHz	测量时间间隔	带宽/Hz	信号覆盖/%
IEC 61000-4-7	2~9	200 ms	200	100
IEC 61000-4-30 Ed.3	9~150	32×0.5 ms 在 10/12 个周期内	2000	8(采样频率 1024 kHz)
CISPR 16-2-1	9~30×10 ³	—	200(非矩形)	—

4.2 测量准确度

影响超高次谐波测量准确度的主要因素有高通滤波器的使用和外部传感器的带宽。

对于信号的测量而言，如果测量信号的基波周期不是测量时间间隔的整数倍，则基波的部分能量会泄漏到整个频谱^[80]。而相比于 50 Hz 或 60 Hz 的

工频信号而言，频率在 2 kHz 以上的信号幅值非常小^[84]。由此可见，频谱泄漏会严重影响 2 kHz 以上频率信号的准确测量。因此，在测量 2 kHz 以上频率信号时，需要使用合适的高通滤波器，来避免频谱泄漏给谐波测量带来的不利影响。

文献[80]指出测量信号的带宽频率不同，会导致测量结果产生不同程度的差异。对于如 PLC 信号、背景噪声等宽带发射，当测量所采用的带宽分别为 200 Hz 和 2 kHz 时，测量结果相差约为 10 dB μ V；对于如光伏逆变器脉宽调制等窄带发射，测量差值相对较小。文献[85]也提到，带宽是影响超高次谐波测量准确度的因素之一。因此，为保证测量信号的可比性，测量信号应具有相同频率的带宽。

另外，设备结构、运行条件和测量方法也会影响超高次谐波测量的准确性^[86]。

4.3 信号分析方法

信号的分析方法有 3 种，分别是时域分析、频域分析和时-频域分析。

CISPR 16-2-1 标准中的测量方法是一种基于时域分析的测量方法。由于高频和低频频谱分量呈现出不同的时间行为，高频分量通常不具有稳定的快速动态特性，因此频率和幅值可随时间而变化^[87]。文献[66,84]发现当基于时域分析方法来分析超高次谐波信号时，在 ms 级时间尺度上，谐波信号的幅值和频率可能发生变化。

IEC 61000-4-30 Ed.3 中的谐波测量方法允许存在测量间隙，当超高次谐波的部分或者全部信号位于测量间隙内时，可能导致测量误差甚至信息完全丢失^[80]。而 IEC 61000-4-7 中测量方法虽然没有测量间隙，可以获得测量频段信号的所有信息，但是该测量方法的测量频段较窄，无法对 9~150 kHz 频段的超高次谐波进行测量。

由此可见，仅采用时域或频域分析来处理信号，会存在一定的局限性。而采用时-频域的分析方法可以有效地解决上述 2 种方法的局限性。文献[84]提出采用短时傅里叶变换来分析超高次谐波信号。短时傅里叶变换相当于一个带通滤波器，能将宽带信号分解成一组频率不同的时变窄带分量，相比于通过长时间窗口获得的频谱而言，能获得更多的信息^[88]。文献[87,89]通过滑动窗口对传统基于旋转不变技术信号参数估计(estimation of signal parameters via rotational invariance technique, ESPRIT)的频域分析方法进行改进，使其能够在不同的时间对不同的频段进行分析。

综上所述，在对超高次谐波的测量结果进行分

析时,采用时-频域的分析方法能够获得更多的信息,得到更为准确的分析结果。然而目前的畸变指标主要是在频域,缺乏用于超高次谐波在时-频域分析的量化指标。另外,由于超高次谐波的频率范围为2~150 kHz,因此至少需要300 kHz的采样频率对其进行采样,而现有的电能质量监测装置(满足EN50160标准)不满足此要求。

5 标准

随着超高次谐波问题的日益显著,其标准的制定与实施成了目前需要解决的主要问题之一。在2010年发布的CENELEC报告^[13]和最近出版的EN50160应用指南^[16]中,均提到了2 kHz以上频段标准的重要性。

同低频谐波标准相同,超高次谐波标准也主要从兼容性水平、发射限制、免疫力测试水平和测量方法等方面来考虑。

兼容性水平是指“指定的电磁干扰水平作为协调发射和免疫力限制的参考水平”。即兼容性水平标准的制定是制定发射限制和免疫力测试水平标准的前提。遗憾的是,目前已有的兼容性水平标准只对频率范围在9~30 kHz的谐波发射达成了共识^[90]。对于30~150 kHz频率范围的故意(intentional)发射干扰源的兼容性水平,目前仍在激烈的讨论中^[9,91]。

关于超高次谐波发射限制标准,EN 50065^[51]给出了频率范围3~148.5 kHz的低压电气装置上的PLC传送的电压限值。IEC 61000-3-8对频率范围95~150 kHz的PLC传送给出了限值标准,且与EN 50065对应频段的限制限值一致^[4]。CISPR 15^[92]给出了9~150 kHz频率范围的感应炉和照明设备的谐波发射限制标准。文献[93]建议将CISPR 15的限值标准扩展到2~150 kHz,并将其应用于所有设备。

频率范围2~150 kHz的谐波发射免疫力测试水平在IEC 61000-4-19^[94]中给出。该标准旨在说明工作在工频频率下额定电压为280 V的电气和电子设备在受到如电力电子和PLC等超高次谐波干扰时的免疫力水平。

对于超高次谐波发射测量方法的标准在本文4.1节中已有介绍。其中,表6中的“故意”表示故意发射干扰源,是指专门用来发射电磁能量的设备(如PLC、雷达等)是通过向空间发射有用信息的电磁能量来工作的;“非故意(non-intentional)”表示非故意发射干扰源,是指在完成自身功能的同时附带产生电磁能量发射的设备(如光伏逆变器、开关电

表6 超高次谐波标准现状
Tab. 6 Supraharmonics standard status quo

项目	兼容性水平 (非故意)	兼容性水平 (故意)	发射限制 (非故意)	发射限制 (故意)	免疫力测试水平	测量方法
2~9 kHz	最终国际标准草案 (对应 IEC 61000-2-2)	最终国际标准草案 (对应 IEC 61000-2-2)	—	—	—	IEC 61000-4-7
9~30 kHz	61000-2-2)	61000-2-2)	感应炉和照明设备 (CISPR)	50065	IEC 61000-4-19	IEC 61000-4-30 Ed.3
30~150 kHz	草案	—	—	EN 50065, IEC61000-3-8	—	—

源等)。

6 结论

本文对国内外关于2~150 kHz频率范围的谐波发射的研究现状进行了回顾,对超高次谐波的产生、危害、发射、测量方法和相关标准等进行了综述。

超高次谐波是在电力系统电力电子化的发展趋势下,产生的一种新的电能质量问题。随着系统中超高次谐波含量的快速增加,对这种新的电能质量问题的关注、研究和解决显得更为重要。目前,超高次谐波领域的研究趋势主要有:

1) 目前主要通过设备发射的谐波频段来判断该设备是否为超高次谐波源,对于超高次谐波源的判定缺乏具体的技术指标。因此,需要对超高次谐波源进行指标设置,来规范超高次谐波源的定义。

2) 对于超高次谐波的交互影响,目前的研究主要是模拟和实际测量。如何量化由超高次谐波交互影响,尤其是由谐振引起的电流放大给相邻设备和系统带来的危害,有待进一步研究。

3) 迄今为止,国内外对超高次谐波危害的研究主要集中在相邻设备间的传播和影响,尚未对系统内传播、不同电压等级间的传播和影响进行系统研究。后者应作为今后的研究方向。

4) 现有的电能质量监测装置(满足EN50160标准要求)的采样频率较低,无法用于超高次谐波的测量,因此需要开发满足超高次谐波采样频率的监测装置,保证超高次谐波的准确测量。

5) 由于超高次谐波具有频率高,谐波含量少等特点,在对测量结果进行分析时,往往需要采用时-频域的分析方法。而目前的畸变指标主要是在频域,无法对超高次谐波的测量结果进行准确的分析。因此,需要对现有的指标进行改进,给出符合超高次谐波在频域、时域和时-频域的量化指标。

参考文献

- [1] Meyer J, Klatt M, Stiegler R. Supraharmonics(2 to 150 kHz) in low voltage networks[C]//Tutorial 4, 24th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Glasgow, United Kingdom, 2017: 1-30.
- [2] Vines R M, Trissell H J, Gale L J, et al. Noise on residential power distribution circuits[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1984, 26(4): 161-168.
- [3] Ronnberg S K, Bollen M H J, Wahlberg M. Interaction between narrowband power-line communication and end-user equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 2034-2039.
- [4] Bollen M, Olofsson M, Larsson A, et al. Standards for supraharmonics (2 to 150 kHz)[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, 3(1): 114-119.
- [5] Paulsson L, Ekehov B, Halen S, et al. High-frequency impacts in a converter-based back-to-back tie; the Eagle Pass installation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1410-1415.
- [6] Girgis A A, Clapp M C, Makram E B, et al. Measurement and characterization of harmonic and high frequency distortion for a large industrial load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 427-434.
- [7] Rönnerberg S, Larsson A, Bollen M, et al. A simple model for interaction between equipment at a frequency of some tens of kHz[C] //21st International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Frankfurt, Germany, 2011: 1-4.
- [8] Larsson A. On high-frequency distortion in low-voltage power systems[D]. Luleå tekniska Universitet, Luleå, 2011.
- [9] 肖湘宁. 低压电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[C]//第五届全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展论坛, 西安, 中国, 2017: 1-32.
- [10] 林海雪. No.4 电网谐波问题的新发展-谈超级谐波[J]. 供用电, 2016, 33(1): 35-38.
Lin Haixue. No.4 The new development of harmonic problems in power grid about supraharmonics[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1): 35-38(in Chinese).
- [11] 刘森, 黄毕尧, 王聪, 等. 超级谐波研究综述[J]. 电测与仪表, 2017, 54(12): 7-15.
Liu Sen, Huang Biyao, Wang Cong, et al. A review on the studies of supraharmonics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(12): 7-15(in Chinese).
- [12] IEC SC 77A Plenary meeting(77A/913/RM) in Stresa, Italy, 2015[S].
- [13] CENELEC SC 205A. Study report on electromagnetic interference between electrical equipment. Systems in the Frequency Range below 150 kHz, SC205A/Sec0260/R, 2010[S].
- [14] CENELEC SC 205A. Study report on electromagnetic interference between electrical equipment. systems in the frequency range below 150 kHz, SC205A/Sec0260/R, 2013[S].
- [15] CENELEC SC 205A. Study report on electromagnetic interference between electrical equipment. systems in the frequency range below 150 kHz, SC205A/Sec0260/R, 2016[S].
- [16] CLC/TR 50422: 2013, Guide for the application of the European Standard EN 50160, 2013[S].
- [17] Bollen M, Rönnerberg S, Zavoda F, et al. CIGRE/CIRED working group C4.24-power quality and EMC issues associated with future electricity networks - status report[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Lyon, France, 2015: 1-5.
- [18] Smith J, Rönnerberg S, Bollen M, et al. Power quality aspects of solar power-results from CIGRE JWG C4/C6.29[C]//24th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Glasgow, United Kingdom, 2017: 1-5.
- [19] Meyer J, Rönnerberg S, Smith J. CIGRE C4/C6. 29: Survey of utilities experiences on power quality issues related to solar power[C]//24th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Glasgow, United Kingdom, 2017: 1-5.
- [20] 帅智康, 肖凡, 涂春鸣, 等. 宽频域谐波谐振劣化机理及其抑制措施[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 16-23.
Shuai Zhikang, Xiao Fan, Tu Chunming, et al. Resonance degradation mechanism of wide-band frequency harmonic and the elimination strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 16-23(in Chinese).
- [21] 李泽斌, 罗安, 田园, 等. LCL 型光伏并网逆变器电流内环控制方法[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2772-2778.
Li Zebin, Luo An, Tian Yuan, et al. Inner current loop control method for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2772-2778(in Chinese).
- [22] 张羽, 李咸善. 基于频率调整策略的微电网多目标优化自愈控制[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 831-839.
Zhang Yu, Li Xianshan. Multi-objective optimization of self-healing control of microgrid based on frequency adjustment strategy[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 831-839(in Chinese).
- [23] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变器电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
Ding Ming, Yang Xiangzhen, Su Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93(in Chinese).
- [24] 李善寿, 张兴, 张鸿恺, 等. 基于功率闭环控制与 PSO 算法的全局 MPPT 方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4809-4816.
Li Shanshou, Zhang Xing, Zhang Hongkai, et al. Global MPPT method based on power closed-loop control and PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4809-4816(in Chinese).
- [25] 祝青, 张兴, 李善寿, 等. 一种基于功率闭环的动态多峰值最大功率点跟踪算法研究与测试[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1218-1227.
Zhu Qing, Zhang Xing, Li Shanshou, et al. Researches and tests of a dynamic multi-peak maximum power point tracking algorithm based on power loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1218-1227(in Chinese).
- [26] 史晏君, 段善旭, 刘邦银. 链式 STATCOM 并网电流直流分量抑制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 15-21.
Shi Yanjun, Duan Shanxu, Liu Bangyin. Suppression of DC current injection for cascade STATCOMs[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(36): 15-21(in Chinese).
- [27] 沈瑶, 罗安, 陈燕东, 等. 基于功率前馈的光伏并网控制方法及稳定性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2449-2454.
Shen Yao, Luo An, Chen Yandong, et al. A power feedforward-based control approach for grid-connection of photovoltaic generation and its stability analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2449-2454(in Chinese).
- [28] Bollen M, Hooshyar H, Ronnberg S. Spread of high frequency current emission[C]//22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, Sweden, 2013: 1-4.
- [29] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 108-113.
Zhong Qing, Gao Xinhua, Yu Nanhua, et al. Accommodating capacity and mode of distributed generation under harmonic constrained in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 108-113(in Chinese).

- [30] 曾正, 赵荣祥, 吕志鹏, 等. 光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4547-4558.
Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Lü Zhipeng, et al. Impedance reshaping of grid-tied inverters to damp the series and parallel harmonic resonances of photovoltaic systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4547-4558(in Chinese).
- [31] Céspedes M, Sun J. Impedance shaping of three-phase grid-parallel voltage-source converters[C]//27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), Orlando, USA, 2012: 754-760.
- [32] Gullvik W, Norum L, Nilsen R. Active damping of resonance oscillations in LCL-filters based on virtual flux and virtual resistor[C]//European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2007: 1-10.
- [33] 许津铭, 谢少军, 肖华锋. LCL滤波器有源阻尼控制机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 27-33.
Xu Jinming, Xie Shaojun, Xiao Huafeng. Research on control mechanism of active damping for LCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 27-33(in Chinese).
- [34] Schöttke S, Meyer J, Schegner P, et al. Emission in the frequency range of 2 kHz to 150 kHz caused by electrical vehicle charging[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC Europe), Gothenburg, Sweden, 2014: 620-625.
- [35] Möller F, Müller S, Meyer J, et al. Impact of electric vehicle charging on unbalance and harmonic distortion—field study in an urban residential area[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Lyon, France, 2015: 1-5.
- [36] Kattmann C, Rudion K, Tenbohlen S. Detailed power quality measurement of electric vehicle charging infrastructure[C]//24th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Glasgow, United Kingdom, 2017: 1-5.
- [37] Uribe-Pérez N, Angulo I, Hernández-Callejo L, et al. Study of unwanted emissions in the CENELEC-A band generated by distributed energy resources and their influence over narrow band power line communications[J]. Energies, 2016, 9(12): 1007.
- [38] Moreno-Munoz A, Gil-de-Castro A, Rönnberg S, et al. Ongoing work in CIGRE working groups on supraharmonics from power-electronic converters[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Lyon, France, 2015: 1-5.
- [39] Ronnberg S, Bollen M and Larsson A. Grid impact from PV-installations in northern Scandinavia[C]//22nd International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Stockholm, Sweden, 2013: 1-4.
- [40] Klatt M, Meyer J, Schegner P, et al. Emission levels above 2 kHz—laboratory results and survey measurements in public low voltage grids[C]//22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, Sweden, 2013: 1-4.
- [41] Torquato R, Freitas W, Hax G R T, et al. High frequency harmonic distortions measured in a Brazilian solar farm[C]//17th International Conference on Harmonics and Quality of Power(ICHQP), Horizonte, Brazil, 2016: 623-627.
- [42] Chicco G, Russo A, Spertino F. Supraharmonics: Concepts and experimental results on photovoltaic systems[C]//International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation(ISNCC), Lagow, Poland, 2015: 1-6.
- [43] Gianfranco C, Fabio C, Radu P, et al. Experimental Indicators of current unbalance in building-integrated photovoltaic systems[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(3): 924-934.
- [44] Varatharajan A, Schoettke S, Meyer J, et al. Harmonic emission of large PV installations case study of a 1 MW solar campus[C]//International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), Cordoba, Spain, 2014: 701-706.
- [45] Joshi T, Heydt G, Ayyanar R. High frequency spectral components in distribution voltages and currents due to photovoltaic resources[C]//North American Power Symposium(NAPS), Washington, USA, 2014: 1-6.
- [46] Gil-de-Castro A, Moreno-Munoz A, Larsson A, et al. LED street lighting: A power quality comparison among street light technologies[J]. Lighting Research & Technology, 2013, 45(6): 710-728.
- [47] Blanco A M, Gasch E, Meyer J, et al. Web-based platform for exchanging harmonic emission measurements of electronic equipment [C]//15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, China, 2012: 943-948.
- [48] 林顺富, 黄娜娜, 朱明星. 不同照明负荷对配电网电能质量的影响[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(3): 1-7.
Lin Shunfu, Huang Nana, Zhu Mingxing. Influence of different lighting loads on power quality of the distribution system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(3): 1-7(in Chinese).
- [49] Martínez D A, Pavas A. Current supraharmonics identification in commonly used low voltage devices[C]//IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications(PEPQA), Bogota, Colombia, 2015.
- [50] Bartak G F, Abart A. EMI in the frequency range 2-150 kHz[C]//Proc. Int Symp on Electromagnetic Compatibility, Tokyo, Japan, 2014: 577-580.
- [51] Signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz—Part 1: general requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances, EN 50065-1[S]. 2001.
- [52] Babaa M Y K F, Boucherma A K M. Analytical analysis of rotor slot harmonics in the line current of squirrel cage induction motors[J]. Journal of Electrical Engineering, 2006, 57(1): 12-19.
- [53] Rönnberg S, Bollen M. Measurements of primary and secondary emission in the supraharmonic frequency range 2-150 kHz[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Lyon, France, 2015: 1-4.
- [54] Gil-de-Castro A, Rönnberg S K, Bollen M H J. Harmonic interaction between an electric vehicle and different domestic equipment[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC Europe), Gothenburg, Sweden, 2014: 991-996.
- [55] Bollen M H J, Rönnberg S K. Primary and secondary harmonics emission; harmonic interaction—a set of definitions[C]//17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Horizonte, Brazil, 2016: 703-708.
- [56] Leroi C, De Jaeger E, UCL-Belgium U C L. Conducted disturbances in the frequency range 2-150 kHz: influence of the LV distribution grids[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, France, 2015: 1-5.
- [57] Xu W, Liu Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [58] 龚华麟, 肖先勇, 刘亚梅, 等. 基于主导波动能筛选原理的用户谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 22-27.
Gong Hualin, Xiao Xianyong, Liu Yamei, et al. A method for assessing customer harmonic emission level based on the dominant fluctuation filtering principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 22-27(in Chinese).
- [59] 陈宗碧, 肖先勇. 基于相关性筛选原理的公共连接点谐波畸变量的分层量化[J]. 电测与仪表, 2015, 52(3): 6-10.
Chen Zongbi, Xiao Xianyong. A method to hierarchical quantification

- on harmonic distortion of the point of common coupling based on the correlation filtering principle[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(3): 6-10(in Chinese).
- [60] Papic I. Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(1): 425-433.
- [61] Karimzadeh F, Esmaeili S, Hosseinian S H. A novel method for noninvasive estimation of utility harmonic impedance based on complex independent component analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(4): 1843-1852.
- [62] Zhao X, Yang H. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(1): 381-388.
- [63] McEachern A, Grady W M, Moncrief W A, et al. Revenue and harmonics: An evaluation of some proposed rate structures[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(1): 474-482.
- [64] Larsson E O A, Bollen M H J. Measurement result from 1 to 48 fluorescent lamps in the frequency range 2 to 150 kHz[C]//14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bergamo, Italy, 2010: 1-8.
- [65] Rönnerberg S. Emission and interaction from domestic installations in the low voltage electricity network, up to 150 kHz[D]. Luleå Tekniska Universitet, Luleå, 2013.
- [66] Unger C, Krüger K, Sonnenschein M, et al. Disturbances due to voltage distortion in the kHz range-Experiences and mitigation measures[C]//18th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Turin, Italia, 2005: 1-4.
- [67] Pikkarainen M, Vehmasvaara S, Siddiqui B A, et al. Interference of touch dimmer lamps due to PLC and other high frequency signals[C]//Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), Tartu, Estonia, 2012: 1-6.
- [68] Meyer J, Haehle S, Schegner P. Impact of higher frequency emission above 2 kHz on electronic mass-market equipment[C]//22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, Sweden, 2013: 1-4.
- [69] Kalesar B M, Noshahr J B. Capacitor bank behavior of cement factory in presence of supraharmonics resulted from switching full power frequency converter of generator(PMSG)[C]//24th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Glasgow, United Kingdom, 2017: 535-538.
- [70] Pakonen P, Vehmasvaara S, Pikkarainen M, et al. Experiences on narrowband power line communication of automated meter reading systems in Finland[C]//Electric Power Quality and Supply Reliability Conference(PQ), Tartu, Estonia, 2012: 1-6.
- [71] Tatro P J, Adamson K A, Eitzmann M A, et al. Power line carrier interference from HVDC converter terminals[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, 8(3): 827-840.
- [72] Franklin G A, Hsu S M. Power line carrier interference caused by DC electric arc furnaces[C]//Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003: 1063-1068.
- [73] Rönnerberg S, Lundmark M, Andersson M, et al. Attenuation and noise level: potential problems with communication via the power grid[C]//19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, Austria, 2007: 1-4.
- [74] Unger C. Current developments for the reduction of power quality related disturbances in industrial installations[C]//8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management(APSCOM), Hong Kong, China, 2009: 1-5.
- [75] Lo W C, Chan C C, Zhu Z Q, et al. Acoustic noise radiated by PWM-controlled induction machine drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(4): 880-889.
- [76] Yang K, Bollen M, Yao L. Theoretical emission study of windpark grids: Emission propagation between windpark and grid[C]//11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), Lisbon, Portugal, 2011: 1-6.
- [77] Voss G, Mattatia S, Bajog G. Interaction between power electronic components and distribution transformers — risk evaluation and mitigation techniques[C]//18th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Turin, Italia, 2005: 1-3.
- [78] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(9): 2366-2372.
Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(9): 2366-2372(in Chinese).
- [79] 王亮, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 大规模双馈风电场次同步谐振的分析与抑制[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(22): 26-31.
Wang Liang, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, et al. Analysis and mitigation of SSR problems in large-scale wind farms with doubly-fed wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(22): 26-31(in Chinese).
- [80] Klatt M, Meyer J, Schegner P. Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz[C]//16th International Conference on Harmonics and Quality of Power(ICHQP), Bucharest, Romania, 2014: 818-822.
- [81] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 4-7: Testing and measurement techniques-General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connect thereto[S]. Edition 2.0, 2008.
- [82] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30, Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 4-30: Testing and measurement techniques-Power quality measurement methods[S]. Edition 3.0, 2015.
- [83] International Electrotechnical Commission. CISPR 16-2-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 2-1: methods of measurement of disturbances and immunity-conducted disturbance measurements[S]. 2014.
- [84] Larsson E O A, Bollen M H J, Wahlberg M G, et al. Measurements of high-frequency(2 - 150 kHz)distortion in low-voltage networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1749-1757.
- [85] Verzele P, Knockaert J, Desmet J. Appropriate methods to analyze power conversion harmonics[C]//International Conference on Renewable Energies and Power Quality(ICREPQ). Bilbao, Spain, 2013: 1-6.
- [86] Klatt M, Meyer J, Elst M, et al. Frequency responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz[C]//14th International Conference on Harmonics and Quality of Power(ICHQP), Bergamo, Italy, 2010: 1-6.
- [87] Alfieri L, Bracale A, Carpinelli G, et al. A wavelet-modified ESPRIT hybrid method for assessment of spectral components from 0 to 150 kHz[J]. *Energies*, 2017, 10(1): 97.
- [88] Zavoda F, Rönnerberg S, Bollen M, et al. CIGRE/CIRED/IEEE working group C4.24-New measurement techniques in the future grid[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, France, 2015: 1-5.
- [89] Gu I Y H, Bollen M H J. Estimating interharmonics by using sliding-window ESPRIT[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(1): 13-23.

- [90] IEC document 77A/914/CD. Amendment 1 to IEC 61000-2-2: Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 2-2 : Environment-compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems[R]. 2015.
- [91] IEC document 77A/901/INF. Definition of compatibility levels in the frequency range 2-150 kHz. assessment 162 of consensus level (Maintenance IEC 61000-2-2 and 61000-2-12)[R]. 2015.
- [92] International Electrotechnical Commission. Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment[S]. Edition 8.0, 2013.
- [93] Larsson E O A, Bollen M H J. Emission and immunity of equipment in the frequency range 2 to 150 kHz[C]//IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009: 1-5.
- [94] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-19, Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 4-19: Testing and measurement techniques—Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signaling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports[S]. Edition 1.0, 2014 .



汪颖

收稿日期: 2017-10-27。

作者简介:

汪颖(1981), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电能质量与优质供电, E-mail: 20312028@qq.com;

罗代军(1994), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与谐波责任划分;

肖先勇(1968), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量与优质供电等;

李媛(1980), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网技术和准 Z 源变流器等, E-mail: yli@scu.edu.cn;

徐方维(1978), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量和谐波责任划分等。

(责任编辑 马晓华)