第 49 卷 第 7 期：2983-2994 高电压技术 Vol.49, No.7: 2983-2994
2023 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221920

新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略

何晋伟[1]，孟维奇[1]，蒋　玮[2]，殷晓华[3]
（1. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072；2. 东南大学电气工程学院，南京 210096；
3. 江苏斯帕沃电子技术有限公司，苏州 215000）

摘　要：随着可再生能源发电在中低压配电网中接入比例不断升高，加上电力电子化冲击性、非线性负荷的大量应用，现代配电网中的电能质量问题受到广泛关注。选取电压质量、三相不平衡和谐波谐振三个电能质量典型问题进行概述，并结合国内外研究现状，针对每种典型电能质量问题梳理出若干条相对应的治理方案，最后总结出引发新能源配电网电能质量问题的原因虽然是电力电子技术的大规模应用，但电力电子化治理方案也是未来新能源配电网电能质量问题治理中必不可少的角色。

关键词：电能质量；新能源发电；电压质量；三相不平衡；谐波谐振；电力电子化治理方案

Power Quality Problems in Renewable Energy Power Distribution Systems: Analysis and Solutions

HE Jinwei[1], MENG Weiqi[1], JIANG Wei[2], YIN Xiaohua[3]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. Jiangsu Spavo Electronic Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy power generation accessed in medium and low-voltage distribution networks, as well as the massive application of power electronic impact and nonlinear loads, the power quality problems in modern distribution networks have received widespread attentions. In this paper, three typical power quality problems, namely, voltage quality problem, three-phase unbalance problem and harmonic resonance problem, are selected to be outlined. Combined with the research status at home and abroad, several corresponding solutions are sorted out for each problem. Finally, it is concluded that the power quality problems in new energy distribution networks arise from the large-scale application of power electronics technology. However, power electronic solutions will play an important role in dealing with the power quality problems in the future distribution networks.

Key words: power quality; new energy power generation; voltage quality; three-phase unbalance; harmonics and resonance; power quality solutions

0　引言

为了响应“双碳”目标，我国分布式新能源发电系统在配电网中的安装规模迅速扩大，但是，多种可再生能源不加控制地接入电网会造成严重的电能质量问题[1-4]。其一，光伏，风机的出力受天气等不确定性因素影响，其随机性和波动性会造成配电系统电压波动等问题；其二，大量单相和三相的分布式光伏无序接入，易引起配电系统的谐波和三相不平衡等问题；其三，新能源并网需要应用大量电力电子变换器装置，但是电力电子变换器开关动作和控制环路的相互作用，会引起系统谐波和振荡问题[5-8]。

传统配电网电能质量问题多为集中式的非线性负荷和冲击性负荷引起，相比之下，新能源配电网所面临的电能质量问题，无论是产生机理，传播规律，还是应对方法等都发生了深刻的变化[9-11]。随着大规模分布式新能源发电装置和电力电子化非线性、冲击性负荷接入，一方面传统配电网由无源网络转换为有源网络，系统的潮流路径和潮流分布更加复杂，造成配电系统电压波动、电压闪变等电能质量问题突出；另一方面，新增的大量多种类分布式电力电子变换器，使得系统阻尼显著下降，并给配电系统带来了大量的谐波源和振荡源。基于如

基金资助项目：国家自然科学基金(52077152)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077152).

上原因，如今的新能源配电网电能质量问题呈现出模型维度高，分布频带宽，随机性强分散性强等特点。传统的应对策略和治理装备，均不再适用于如今复杂的电能质量问题。因此，亟待开展适应新能源配电网行业发展的电能质量问题建模方法、分析手段，以及对应的治理装备开发研究[12-13]。

为了梳理当今新能源配电网电能质量问题研究的相关进展，本文结合国内外文献，首先就电压质量问题、三相不平衡问题、谐波谐振问题 3 个新能源配电网电能质量典型问题，从各自的特征，危害以及产生原因 3 个方面进行综述，接着针对每种电能质量问题的治理，依次提出若干条技术方案，最后对未来新能源配电网电能质量问题研究的发展趋势进行展望。

1 新能源配电网电能质量典型问题概述

1.1 电压质量问题

电压质量问题是新能源配电网电能质量问题的一个重要组成部分，按照现象的不同可以划分为电压波动与电压闪变问题，电压暂降与电压中断问题以及电压越限问题[14-15]。

1.1.1 电压波动与电压闪变

电压波动与电压闪变是短时间尺度电压质量问题，指节点电压在短时间内快速变化，并偏离额定值的现象。电压波动会给照明灯光带来亮度的闪烁，称之为闪变。电压波动与闪变带来的负面影响包括：照明灯光闪烁，电视机画面跳变，电机转速不稳定等等。IEC 标准对于电网电压正常波动范围规定如下：相对稳态电压变动值不得超过 3%，相对动态电压变化值超过 3%的持续时间不得长于 200 ms。在新能源配电网中，无论是可再生能源出力变化还是冲击性负荷的启停，都会引起附近节点的电压波动与闪变[16]。

1.1.2 电压暂降与电压中断

电压暂降与电压中断都是节点电压突然跌落，并在短时间内恢复的现象，不同点在于，电压暂降是指节点电压标幺值降低至 0.1~0.9，电压中断则是指节点电压标幺值降低至 0.1 以下。除此之外，两种问题的衡量指标也有所不同，电压暂降的衡量指标为跌落深度与持续时间，而电压中断的衡量指标为持续时间。电压暂降与电压中断问题危害巨大。从负荷侧而言，电压暂降与中断会引起电动机停机，计算机数据丢失等等。从电源侧而言，大幅度电压跌落会引发分布式新能源集群脱网，引发连锁式事故[17]。电压暂降与电压中断的产生原因复杂，总体上可归结于短路故障，雷击事故以及大功率冲击性负荷的启动[18]，根据产生原因不同，电压暂降与中断的持续时间一般为 10 ms 至 1 min。

1.1.3 电压越限

电压越限是节点电压在长时间尺度内偏离额定值的电压质量问题，根据偏离值正负又可以细分为欠电压问题与过电压问题。欠电压问题会造成用电设备不能正常工作，如电机堵转不能正常启动[19]；过电压问题则会破坏设备的绝缘，损害用电设备。在新能源配电网中，电压越限问题的原因主要是光伏出力的时间特性，以及高阻感比线路和长配电馈线。如图 1 所示，长配电馈线沿线并入大量分布式光伏电源，在白天光伏出力高时，线路潮流倒送，电压沿着馈线方向逐级递增，造成线路末端节点高电压越限。而在夜间光伏不出力，长馈线潮流正常分布，电压大小沿着馈线方向逐级递减[20]，造成线路末端节点低电压越限。

1.2 三相不平衡问题

三相不平衡是指三相电压或电流幅值不相等，相位相差不是 120°的现象。从用电侧的角度来看，三相不平衡问题是指三相电流不平衡，从供电侧的角度来看，三相不平衡问题是指三相电压不平衡。下面将从这两个角度对三相不平衡问题进行概述。

1.2.1 三相电流不平衡

用电侧的三相电流不平衡主要是由三相负荷不平衡引起的。在新能源配电网中，大量单相分布式电源和单相负载的无序接入，二者的随机性、波动性相互叠加，共同组成了系统的三相不平衡负荷。用电侧产生的三相不平衡电流给供电侧带来巨大危

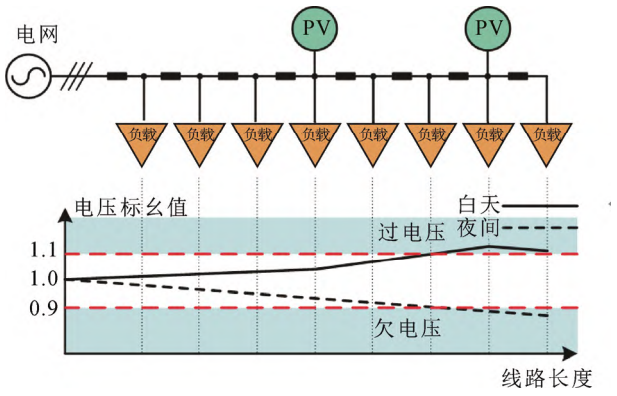


图 1 长馈线接入分布式光伏对电压分布的影响

Fig.1 Influence of voltage distribution for the connection of PV to long feeders

害，其不仅会增加配电线路和配电变压器的运行损耗，影响配电系统的经济运行，还会引发供电侧的三相电压不平衡，尤其是在电网等效阻抗大的弱电网中，三相不平衡电流会在电网等效阻抗上产生不对称压降，从而在 PCC 节点上产生三相不对称电压。

1.2.2　三相电压不平衡

供电侧的三相电压不平衡原因主要有 3 种，其一是配电线路对地参数三相不对称，其二是 PCC 节点附近发生三相不对称故障，其三为弱电网中三相不对称负载引起。三相电压不对称不论在用供侧，还是用电侧，都带来巨大负面影响[21]。一方面，三相不对称电压必然会引起三相不对称电流，因此会影响配电系统的经济安全运行。另一方面，三相不对称电压会降低电动机运行效率，还会给设备造成安全隐患，尤其是对于并网光伏逆变器。传统逆变器控制算法是针对三相对称电压制定的，在三相不对称电压下，并网逆变器的输出功率会发生二倍频振荡，引起直流侧电压波动，损害直流母线电容寿命，还会造成逆变器输出电流波形畸变，甚至触发电流幅值越限保护，引发脱网事故[22-23]。

1.3　谐波谐振问题

电力系统中的谐波会损害电气设备，产生通信干扰，甚至会使继电保护装置误动作，所以必须对配电网谐波含量进行限制。新能源配电网存在大量诸如分布式逆变器的非线性负荷，而且逆变器并网滤波器引入的容性感性元件在特定频率下会发生谐振[24]。种种原因使得新能源配电网谐波谐振问题呈现出模型机理复杂，治理难度大的特点[25-26]。下面从单并网逆变器谐波源建模、多并网逆变器谐波谐振交互影响和谐波谐振模态分析 3 个方面对谐波谐振问题进行概述。

1.3.1　单并网逆变器谐波源建模

目前对分布式电源经典的建模方法为等效阻抗建模[27]，如图 2(a)所示，将分布式电源等效为一个受控电流源 $I_0(s)$和一个输出阻抗 $Z_0(s)$并联的诺顿电路，将电网等效为一个恒定电压源 $U_g(s)$与系统阻抗 $Z_g(s)$串联的戴维南电路，那么并网逆变器的输出电流 $I(s)$可以表示为

$$I(s)=\frac{Z_0(s)}{Z_0(s)+Z_g(s)}\left(I_0(s)-\frac{U_g(s)}{Z_0(s)}\right) \tag{1}$$

如图 2(b)、(c)所示，如果在系统的固有频率处存在谐波源，那么系统会发生谐振。谐波电压源 $U_g^h(s)$来自于电网电压畸变，谐波电流源 $I_0^h(s)$来源于并网逆变器的非线性因素。当 $U_g^h(s)$的谐波频率接近阻抗网络的固有频率时，会引起系统的并联谐振，当 $I_0^h(s)$的谐波频率接近阻抗网络的固有频率时，会引起系统的串联谐振。谐振会放大系统的谐波污染，甚至使系统失稳[28]。

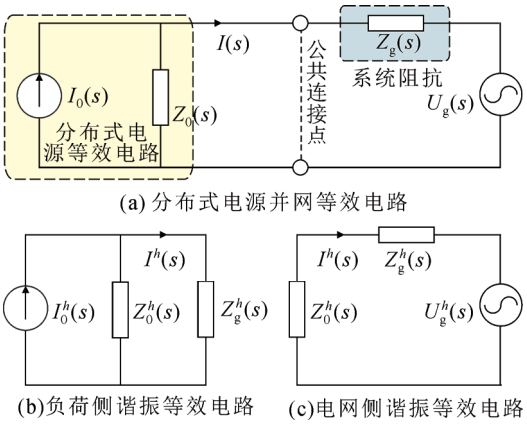


图 2　分布式电源谐波谐振阻抗分析模型

Fig.2　Harmonic resonance impedance analysis model of distributed generation

1.3.2　多并网逆变器谐波谐振交互影响

如图 3 所示，多台并网逆变器集群运行，每个逆变器都等效为一个电流源 $I_n(s)$和一个并联阻抗 $Z_n(s)$组成的诺顿电路，多个诺顿等效电路并联在公共连接点，其输出阻抗相互作用，使得系统的谐振频率前移[29]，这一现象虽然会让单台并网逆变器独立运行时输出电流谐波畸变率符合要求，但多台并联运行时，并网电流 $\Sigma I(s)$谐波畸变率会超标。对此，文献[30]提出建含多电压源型换流器(voltage source converter，VSC)的配电网高频等值电路模型，解析求解出端口阻抗的谐振频率，并分析出含多 VSC 配电网高频谐振特性。

多逆变器并联运行，除了与配电网发生谐振，逆变器之间也会产生谐振，产生循环于逆变器之间的交互式谐振电流。文献[31]研究了多并联 LCL 滤波逆变器相互作用引起的谐振特性和稳定性问题，将一个全局系统划分为若干子系统后进行分析，推导出系统的谐振频率和稳定边界，并对相互作用进行表征。有的专家学者从异步载波的角度分析该问题，他们认为，并联逆变器之间无法做到同步载波调制，在异步载波条件下，并联逆变器之间的边带谐振将被触发，然后交互电流变得不稳定。合肥工业大学张兴团队对逆变器在异步载波条件下的并联逆变器的谐振机理进行了研究，并就并网逆变器谐

振特性以及 LCL 滤波器参数对于谐振的影响得到了一些结论[32]。

1.3.3 谐波谐振模态分析

以上方法都是基于频域分析建立的谐波谐振模型，需要建立复杂的传递函数，计算量大。为此，有学者提出模态分析方法建立系统的谐波谐振模型，其基本原理为利用节点导纳矩阵的特性。若某个节点发生谐波谐振，那么系统的节点导纳矩阵将接近奇异，表现为节点导纳矩阵中出现接近 0 的特征值。相比于传统频域分析方法，模态分析方法可以轻松地确定系统的谐振频率以及谐振频率下系统各元件对谐振的参与程度等信息[33-34]。

2 新能源配电网电能质量典型问题治理方案

2.1 电压质量问题治理方案

根据电压质量问题类型的不同，可以有针对性的设计治理方法。对于冲击性负荷引起的快速电压波动与闪变问题，一般在冲击性负荷周围安装动态电压补偿装置[35]。对于预防重要敏感负荷遭遇电压暂降与中断问题，一般会为其配备备用电源。对于分布式电源出力的时空特性引起的电压越限问题，一般会在系统层面对功率进行优化调控[36]。下面本文将从具体的技术应用来介绍各种治理方案。

2.1.1 统一电能质量调节器(unified power quality conditioner，UPQC)

统一电能质量控制器是一种具有电压补偿功能的综合性补偿设备[37-38]。图 4 为含储能的统一电能质量控制器示意图，其左侧为并联变流器，向电网注入补偿电流 i_{CMP}，可实现无功补偿，谐波治理功能，同时支撑直流母线电压。右侧变换器通过耦合变压器串联在线路中，在线路中提供补偿电压 u_{CMP}，实现精细化调压和电压补偿。此外，该装置可充分利用其直流母线接入电池，通过充放电管理控制，从而实现提升控制自由度，拓展应用场景和功能。该装置在未来电能质量问题的治理有着广阔的应用前景[39-40]。

2.1.2 UPS 电源

UPS 电源是治理电压暂降与中断问题的有效方法，按照运行方式可分后备式与在线式两种，如图 5 所示。后备式 UPS 电源在外部供电正常时，逆变器不工作，在外部供电发生中断时，逆变器切换为工作模式，电池经过逆变器向负载供电。由于存在切换时间，因此，后备式 UPS 电源一般应用于电压

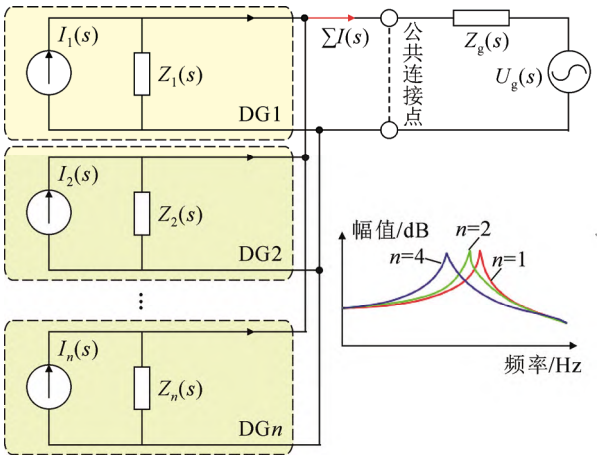


图 3 多逆变器并联谐波谐振阻抗分析模型

Fig.3 Harmonic resonance impedance analysis model of multi-inverter

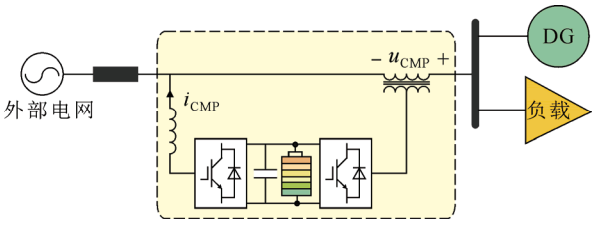
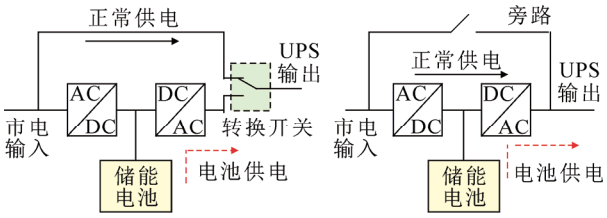


图 4 含储能的统一电能质量控制器示意图

Fig.4 Diagram of unified power quality controller with energy storage



(a) 后备式UPS电源 (b) 在线式UPS电源

图 5 两种典型 UPS 电源示意图

Fig.5 Diagram of two typical UPS power supplies

波动范围不大，负荷供电质量要求不高的场合，比如家用 UPS 电源。在线式 UPS 电源逆变器一直处于工作状态，在外部供电发生异常时，在线式 UPS 电源不存在切换时间，并且在外部供电正常时，在线式 UPS 电源还可以对外部电源电压波形进行改善。但是在线式 UPS 电源造价成本高，而且逆变器一直处于工作状态，损耗大，因此主要应用在医院，银行等供电质量要求高的场合。

2.1.3 动态电压恢复器

动态电压恢复器在电网发生电压暂降或电压

中断事故时快速动作，从而为补偿负荷提供安全稳定电能。动态电压恢复器可以分为串联型和并联型两种，如图 6 所示是一款基于超级电容的并联型动态电压恢复器，在外部电网电压 u_g 发生中断或者暂降时，晶闸管切换开关立即断开外部电网连接，与此同时，并联供电装置立即工作，在很短的时间内将公共连接点的电压 u_{pcc} 恢复到正常水平，做到外部电网与补偿装置的无缝切换[41]。并且动态电压恢复器在电网供电正常时处于旁路状态，因此损耗极低。

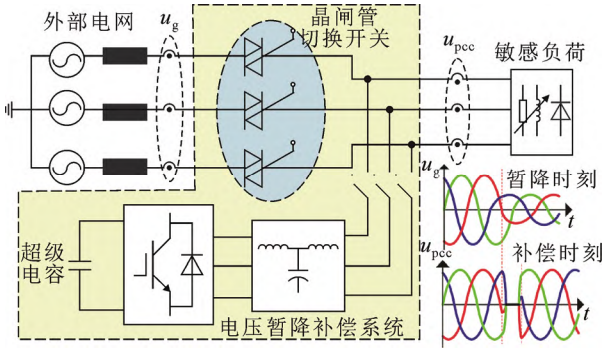


图 6　基于超级电容的并联型动态电压恢复器

Fig.6　Diagram of parallel DVR based on ultracapacitor

2.1.4　快速切换开关

快速切换开关是用电力电子器件取代的传统机械开关，一般配合其他电能质量补偿装置使用，如图 6 中的晶闸管切换开关。快速切换开关的通断时间为微秒级甚至纳秒级，大大低于机械开关的固有延迟时间。在切换过程中，可以实现负载电流无剧烈波动，用电负荷保持正常稳定工作，消除切换时间过长而产生电压中断问题给用电负荷带来额外的损失[42]。

2.1.5　智能软开关(soft open point，SOP)

智能软开关(SOP)是利用电力电子变换器，取代传统配电网联络开关的装置。它可以交换所连配电网之间有功功率，补偿无功功率，实现配电网潮流的智能调控。近年来，SOP 以其功率连续可控，控制方式灵活的特点被广泛应用于新能源配电网。如图 7 所示，$P_{L,n}$(n=1, 2, 3, …)表示负载消耗的有功功率；$P_{DG,n}$(n=1, 2, 3, …)表示新能源电源发出的有功功率，可以看出，在新能源出力过剩与负荷功率需求量大的两个配网台区之间装设 SOP，其可以将配电台区 1 中新能源的多余出力输送到配电台区 2 中，提高新能源消纳水平，同时优化两个配电台区的电压分布。关于 SOP 在配电网电压调节中的应用方法，文献[43]提出传统无功电压调节设备和 SOP 协调控制的日前优化模型，通过日前优化、日内优化和实时控制，从 3 个时间尺度上实现了所连配电网的电压波动抑制。而文献[44]提出 SOP 可以采用扰动观察法，在接入节点处施加功率扰动，得到节点电压对有功功率和无功功率的灵敏度系数，进而调整流过柔性多状态开关各端口变流器的功率，使电压回到合理范围内，实现对未知分布式电源出力和网络拓扑结构的配电网之间的潮流的自动分配。

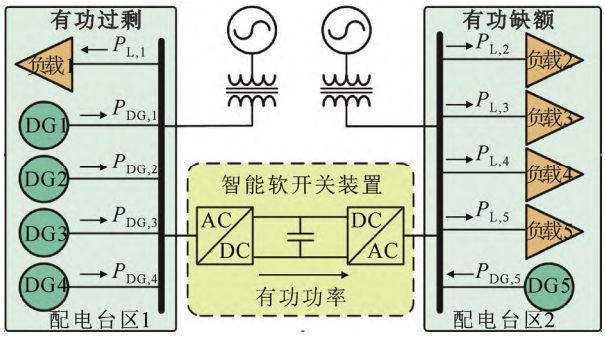


图 7　配电网间智能软开关技术应用示意图

Fig.7　Diagram of the application of soft open points in distribution network

2.1.6　就地协同调控技术

如图 8 所示，就地协调控制技术指的是按照地理和电气连接的远近差异，将配电网内所有的分布式电源，负荷，储能划分为若干个集群，以配电网电压合理分布为目标，本着就地消纳的原则，对集群内部的可控设备进行协调控制[45]。其中可以利用光伏逆变器的剩余容量和分布式专用无功补偿装

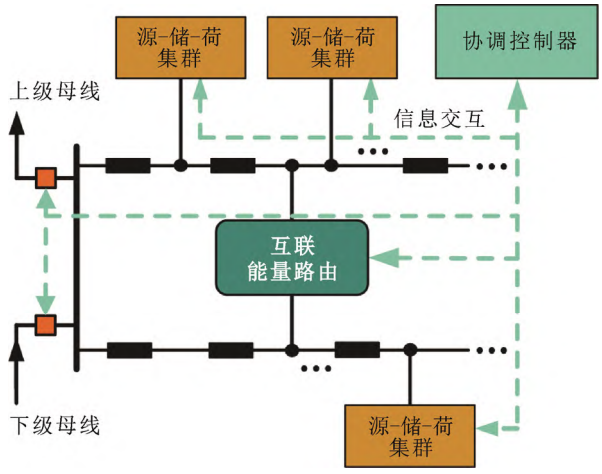


图 8　新能源配电网就地协同调控技术示意图

Fig.8　Diagram of local coordinated control technology for new energy distribution network

置，如电容器等对系统无功潮流进行调节，实现配电系统电压分布的优化调整[46]。但在低压光伏台区，考虑到线路阻感比高，该方法应用效果不佳。也可利用规模化分布式储能对可再生能源出力进行时空调节，平抑其随机波动性对电网电压的影响，但该方法控制复杂、成本高[47]。还可以利用上文提到的 SOP 装置，合理调度不同配电台区之间的有功潮流，优化配电网整体电压分布，避免电压越限现象的发生。各个集群通过协调控制器进行信息交互，使整体系统控制方案达到最优。

2.2 三相不平衡问题治理方案

对于用电侧发生的三相电流不平衡问题，解决措施有负荷相序平衡，配网重构和负荷补偿，对于供电侧发生的三相电压不平衡问题，并网逆变器需要优化自身控制策略，降低三相电压不平衡带来的负面影响。本文从上几个方面展开对三相不平衡问题治理方案的综述。

2.2.1 负荷相序平衡

负荷相序平衡指的是通过换相操作，将原本不平衡的负荷按照科学合理的方法平均分配到各相上。目前常用的方法就是通过人工换相装置或者自动换相装置执行换相操作，人工换相装置在很大程度上依赖于人工经验，加上负荷本身的随机性和波动性，存在误操作的可能。随着配电系统的不断完善，很多智能化的换相装置被研发，如图 9 所示，这些装置基于量测的数据，通过控制算法做出换相决定，利用自动化设备对负荷进行自动换向[48]。但是总体来说，负荷相序平衡的调整对象是分立负荷，因此其治理精度受限，而且不适用于治理波动性较大的不平衡负荷。

2.2.2 配网重构

配网重构是指改变网络中联络开关和分段开关的状态，调整网络结构，达到负荷均衡的方法。这个方法的优点是不需要对原有配电网进行额外投资，利用已有设备就可以改善系统的三相不平衡度，而缺点是配电网结构复杂，拥有众多的开关组合方案，需要复杂的数学算法优化出最优的重构方案，这无疑增加了配网重构的难度[49]。除此之外，对于随机性强的负荷波动，配网重构方案需要频繁的执行开关动作，这会影响系统的稳定运行。

2.2.3 负荷补偿

负荷补偿是指利用无功补偿装置对三相不平衡负荷进行补偿，使其外特性三相对称。美国工程师 Steinmetz 提出，三相电网电压对称的三相三线制系统，可以通过并联补偿导纳，将三相不对称的负载完全补偿至三相对称。负荷补偿的控制策略分为两种，一种是根据不对称负载的电压、电流信息计算补偿导纳，再控制补偿装置，使其外特性等效为所计算的导纳[50-52]，这类控制方案适用于半控器件的电力电子补偿装置。另一种方法如图 10 所示，i_{La}，i_{Lb}，i_{Lc} 为三相不对称负载的输出电流；u_a，u_b，u_c 为公共连接点的三相电压；首先控制器提取三相不对称负载电流的负序分量 $\bar{i}_{La}$，$\bar{i}_{Lb}$，$\bar{i}_{Lc}$，再利用坐标变换得到补偿装置的输出电流参考，最后利用电流闭环控制逆变器输出电流 i_a，i_b，i_c 为负序电流的反向电流，保证流向电网的电流是三相对称的[53]，这种方法适用于全控器件的电力电子补偿设备。对于第 1 种方案，考虑到电网阻抗，三相不平衡电流会引起三相不平衡电压，此时如果按照理想三相电压源电势作为 PCC 节点电压，则不能完全实现三相不平衡补偿，可以用戴维南等效电路，将三相电网等效为三相对称电压源与三相对称电网阻抗，通过

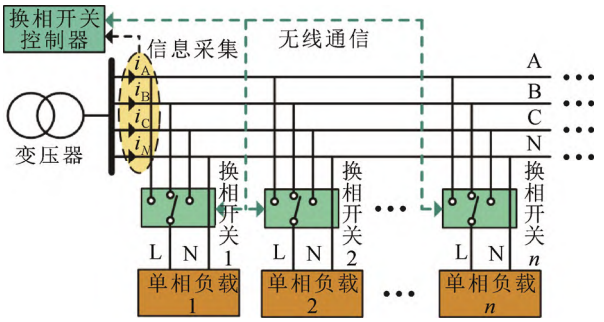


图 9 智能化换相装置示意图

Fig.9 Diagram of intelligent commutation switch

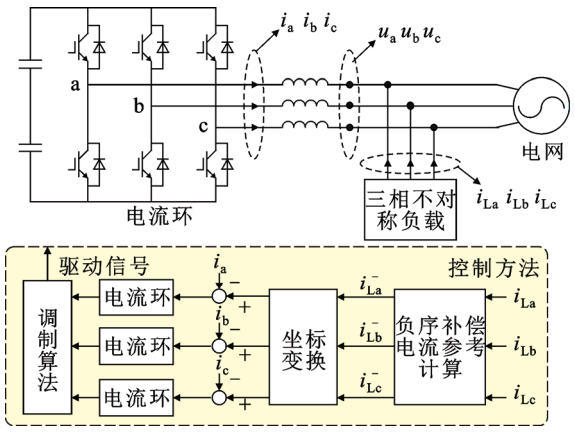


图 10 三相不平衡负荷补偿电路与控制框图

Fig.10 Diagram of three-phase unbalanced load compen-sation circuit and control block

测量 PCC 节点电压以及负载电流，得到电网等效电路的具体参数，再进行负荷补偿导纳的计算[54]。

2.2.4　逆变器三相电压不平衡穿越

鉴于三相电压不对称工况下，传统控制算法控制的并网逆变器会发生输出电流畸变，直流母线电压异常，输出功率波动的情况，因此，需要对并网逆变器的控制模式进行改进，保证逆变器持续稳定向系统出力，该方向近年来成为国内外研究的热点。

在面对电网电压三相不对称跌落时，分布式电源需要保证不脱网，并为电网提供持续稳定的有功功率[55]。这就要求分布式电源既要保证输出电流不能越限，又要保证有功功率振荡尽可能小。然而研究发现，这两个优化目标是相互矛盾的。三相不平衡电网下，并网逆变器有功功率振荡只能通过在并网电流中引入负序和谐波分量来降低，但是负序电流，谐波电流和基波电流相互叠加，会造成电流幅值越限的风险。因此，根据不同的应用场景，人们制定了不同的控制方案。比如，文献[56]根据几种不平衡电压降落的严重程度不同，提出了 6 种不同的逆变器控制方案，依次按照并网规范要求、电流幅度限制、有功功率要求、有功功率振荡消除 4 个优先级进行控制；上海大学汪飞针对有功功率和无功功率的振荡，提出可以通过自适应参数独立控制，调节振荡功率的相对振幅以及三相电网电流的峰值[57]，该方法的效果如图 11 所示，可以看出在三相电网电压 U_{abc} 不对称时，随着自适应参数 k_{pq} 的变化，逆变器输出的三相电网电流 I_{abc} 的不平衡可以被消除，有功功率 p 和无功功率 q 的振荡可以被平滑的抑制。其中有功功率振荡在自适应参数取−1 时消除，无功功率振荡在自适应参数取 1 时消除；基于该研究基础，文献[58]考虑了包括低阶谐波分量的情况下，自适应参数对于有功功率振荡幅值与逆变器输出电流峰值的协调作用。这些控制方案总体上都是基于瞬时功率理论，首先利用公共连接点的电压矢量信息 u 以及新能源电源的有功功率参考信息 P^*，根据功率控制策略得到电流控制环路的参考电流矢量 i^*，再利用电流闭环控制变流器的输出电流矢量 i，使得新能源并网输出功率满足要求，其简化控制框图如图 12 所示。

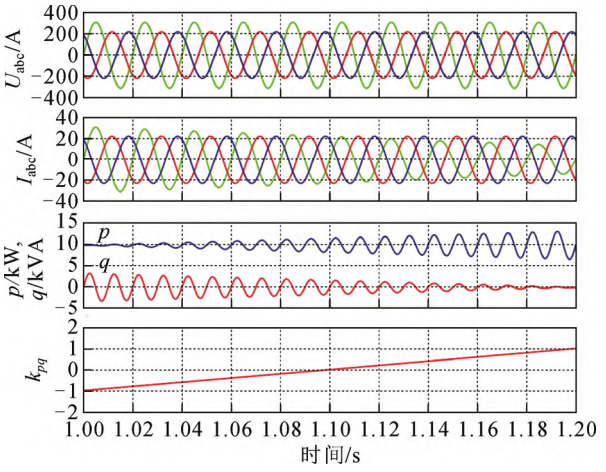


图 11　功率振荡自适应参数控制效果图

Fig.11　Results of adaptive parameter control of power oscillation

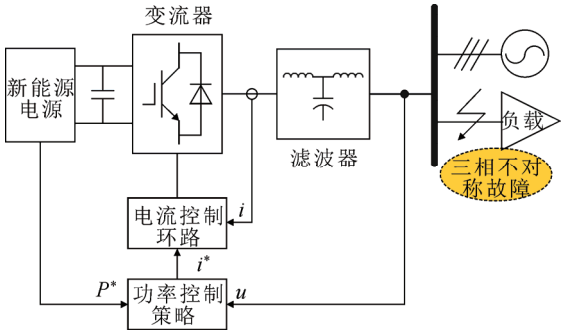


图 12　并网逆变器三相不平衡故障穿越简化控制框图

Fig.12　Diagram of three-phase unbalance fault of grid-connected inverter traversing control

2.3　谐波谐振问题治理方案

关于新能源配电网谐波谐振问题的治理方案，既可以从谐波的传输路径着手，在配电馈线上装设有源电力滤波器(active power filter，APF)，对线路谐波电流进行补偿。也可以从谐波源着手，消除并网逆变器接口 LCL 滤波器的谐振尖峰，具体做法包括无源阻尼，有源阻尼和协调阻尼。下面依次对每种方案进行介绍。

2.3.1　有源电力滤波器(APF)

利用 APF 进行谐波补偿是工程上最为常用的方法。APF 的电路拓扑结构与简化控制框图如图 13 所示，控制器对非线性负载输出电流 i_{load} 进行采样，并提取谐波成分 i_{load}^{h}，之后取反作为 APF 输出电流的谐波分量参考 i_{ref}^{h}，另外，为了维持直流母线电压 u_{dc} 稳定，给定电压参考 u_{dc}^{*}，利用直流母线电压闭环控制，得到 APF 输出电流基波分量参考 i_{ref}^{f}，最后通过电流闭环，控制逆变器输出电流 i_{inv} 与负载谐波电流反相，以此来治理电网的谐波问题。然而研究发现，这种控制方案不适合应用于长距离配电馈线。长距离馈电线路需要等效为分布参数电路，

当馈线长度大于四分之一波长时，在馈线上安装 APF 虽然会使安装点母线电压谐波降低，而其他一些母线上的电压谐波反而增加，这种现象文献称之为“whack-a-mole”[59]。为此，日本科学家赤木泰文提出阻尼型 APF 的概念。阻尼型 APF 将自身等效为谐波阻抗 $Z_{ref.h}$，根据公共连接点电压信息 u_{PCC}，控制输出电流 i_{inv}，使得自身等效的谐波阻抗与长馈线特征阻抗匹配，那么就可以消除在长馈线中谐波的传输，其简化控制框图如图 14 所示。

在实际工程应用中，APF 不仅仅补偿谐波电流，还会起到向系统内注入无功功率的功能。然而用 APF 对系统进行无功补偿是极不经济的，相比于其他的无功补偿装置，APF 单位容量的经济成本更高。为此，可以将传统的无功补偿装置与 APF 联合使用，比如电容投切装置，利用相对廉价的电容投切进行无功补偿，利用 APF 进行谐波补偿，从而提高补偿设备的经济效益。

2.3.2 分布式有源电力滤波器

针对未来 APF 在新能源配电网中大量接入的前景，如何规划配电系统 APF 的装配位置，使得谐波治理的效果最佳，成为一个值得研究的课题。文献[60]基于配电网首端含有来自上级电网背景电压谐波，末端含有来自非线性负载注入电流谐波的应用场景，研究了有源电力滤波器安装在线路上的不同位置所带来的效果的变化规律。文献[61]从规划的角度，以全网各个节点电压畸变整体最优为目标，提出一种基于电压检测型有源电力滤波器的分布式全局优化治理方案，在长时间尺度内确定分布式治理系统的最优运行点。

针对安装在新能源配电网内不同位置的多个有源电力滤波器单元组成的分布式有源电力滤波系统，如果各自独立控制，可能会出现有的 APF 容量过剩，有的 APF 容量不足的现象。为了解决这一问题，中国台湾学者程博泰等人提出，每个独立的滤波单元都看作是谐波电导 G，根据设计好的等效谐波电导 G 与所需补偿容量 S 之间的下垂关系，制定每个滤波单元的出力，实现多个滤波单元可以在无需任何通信的情况下分担谐波治理的工作量[62]。其中下垂斜率由滤波单元的额定容量决定。如图 15 所示，配电线路上安装了几个 APF，包括 APF_x，APF_y，APF_z。其中 $I_{APF,x}$ 为 APF_x 的输出电流；$U_{PCC,x}$ 为 APF_x 公共连接点电压。由此计算得到 APF_x 的补偿容量 S_x，再根据容量−电导下垂曲线，计算得到

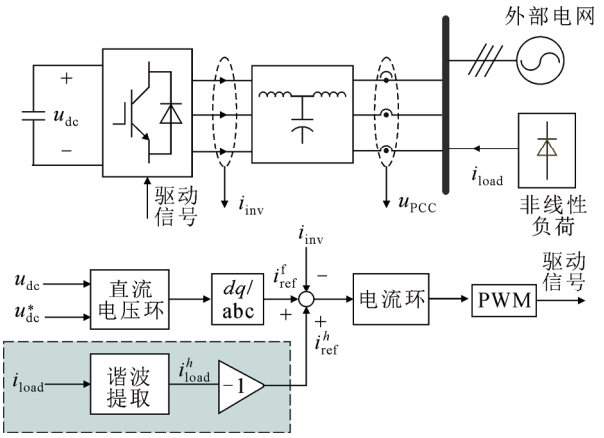


图 13 APF 电路结构及其简化控制框图

Fig.13 APF circuit structure and its control block diagram

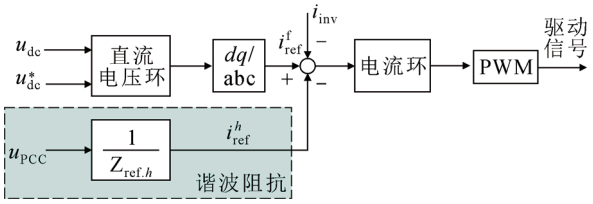


图 14 阻尼型 APF 简化控制框图

Fig.14 Control block diagram of resistive-active power filter

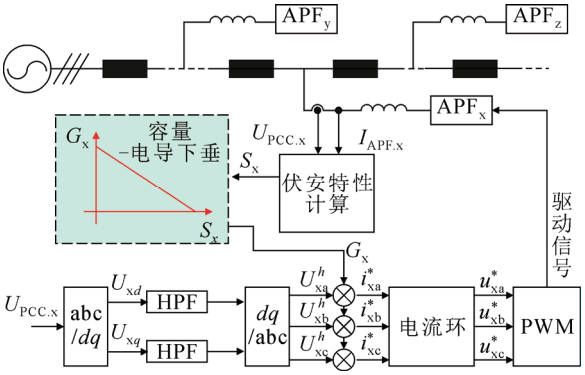


图 15 分布式有源电力滤波器控制框图

Fig.15 Control block diagram of distributed active power filter

APF_x 的谐波电导命令 G_x。另外，将 $U_{PCC,x}$ 转化为同步参考系中的 U_{xd}，U_{xq}，由于同步坐标系下基波分量为直流，因此利用高通滤波器(high-pass filter，HPF)提取 $U_{PCC,x}$ 的谐波分量，并通过坐标变化转回到三相坐标系，得到 U^h_{xa}，U^h_{xb}，U^h_{xc}，再乘以电导命令 G_x，生成电流命令 i^*_{xa}，i^*_{xb}，i^*_{xc}，最后经过电流环生成电压参考 u^*_{xa}，u^*_{xb}，u^*_{xc}，调制后得到 APF_x 的驱动信号。

2.3.3 无源阻尼法

无源阻尼法消除 LCL 滤波器谐振尖峰，是指在

滤波电感上或者滤波电容上串联或并联电阻，达到破坏谐振条件目的的方法。这种方法简单可靠，但是会带来额外的损耗，降低整个系统的运行效率。研究表明，在滤波电容上串联电阻的无源阻尼方法损耗相对较小，因此在实际应用中最为常见。

2.3.4　有源阻尼法

有源阻尼是指对滤波电感或者滤波电容的电流或电压增加额外的反馈回路，通过合理的控制方法使得滤波电容或者滤波电感并联或串联一个虚拟电阻，达到抑制系统谐振的目的[63-64]。有源阻尼以其实现灵活、无额外功耗得到了国内外众多学者的研究。近年来，有源阻尼法的研究方向主要聚焦于增加系统的稳定裕度，如文献[65]提出了一种基于逆变器侧电感电流反馈有源阻尼控制策略。与传统的阻尼策略相比，该策略可以实现 LCL 滤波器的共振抑制、更大的稳定裕度以及在弱电网中更好的抗干扰能力。

有源阻尼的实现方案多种多样，其中基于单一滤波器变量反馈的有源阻尼方法已被证明是最经济有效的。在单一变量反馈方案中，根据 LCL 滤波器的结构，利用 4 个常用的滤波器变量中的任意一个，均可以等效为 3 个无源器件的并联电阻或串联电阻，因此一共可以设计出 24 种不同的有源阻尼控制器。西安交通大学刘进军团队对这 24 个控制器方案进行比较，通过考虑实现复杂性、测量传感器的数量以及控制器对功率阶段的影响，得出采用电网侧电流作为反馈量，控制为滤波电容并联等效阻抗是最优方案[66]。

3　结论

1）新能源配电网引入的电能质量问题，从以光伏、风电为代表的可再生能源出力随机波动性导致的电压质量问题，到以单相分布式光伏为代表的单相电源无序接入导致的三相不平衡问题，再到以光伏并网逆变器为代表的电力电子并网装置大量接入引起的谐波谐振问题，究其原因，都可以归结为电力电子技术的大量应用。

2）新能源配电网电能质量治理方法多种多样，但不论何种治理方式，电力电子化补偿装置都扮演着重要角色，并且随着功率半导体制造技术和电力电子控制技术的日益进步，电力电子技术在未来电能质量治理方面扮演的角色会愈加重要。

3）综上，从配电网电能质量的角度看，电力电子技术的应用是一把双刃剑，一方面会引入电能质量问题，另一方面只要控制得当，又可以治理所引入的电能质量问题。因此总体来说利大于弊。

参考文献　References

[1] 曾　正，赵荣祥，汤胜清，等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报，2013，33(24)：1-12.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, TANG Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-12.

[2] ZHAO B, XU Z C, XU C, et al. Network partition-based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4087-4098.

[3] SRINIVAS V L, SINGH B, MISHRA S. Fault ride-through strategy for two-stage grid-connected photovoltaic system enabling load compensation capabilities[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8913-8924.

[4] 董旭柱，华祝虎，尚　磊，等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[5] WEI B Y, QIU Z F, DECONINCK G. A mean-field voltage control approach for active distribution networks with uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1455-1466.

[6] GHATAK S R, SANNIGRAHI S, ACHARJEE P. Multiobjective framework for optimal integration of solar energy source in three-phase unbalanced distribution network[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 3068-3078.

[7] 肖湘宁，廖坤玉，唐松浩，等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报，2018，33(4)：707-720.
XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.

[8] HE J W, DU L Y, YUAN S, et al. Supply voltage and grid current harmonics compensation using multi-port interfacing converter integrated into two-AC-bus grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3057-3070.

[9] 赵争鸣，雷　一，贺凡波，等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化，2011，35(12)：101-107.
ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.

[10] LU M H, YANG Y H, JOHNSON B, et al. An interaction-admittance model for multi-inverter grid-connected systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7542-7557.

[11] 盛戈皞，钱　勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key Technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.

[12] JI H R, WANG C S, LI P, et al. Robust operation of soft open points in active distribution networks with high penetration of photovoltaic in-

tegration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 280-289.

[13] LIU Z Y, YOU S L, ZHOU X Y, et al. Signal-anticipation in local voltage control in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 233-246.

[14] 王 颖，文福拴，赵 波，等. 高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J]. 中国电机工程学报，2016，36(5)：1200-1206.
WANG Ying, WEN Fushuan, ZHAO Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206.

[15] WANG Z G, WANG Y Z, LIU G W, et al. Fast distributed voltage control for PV Generation clusters based on approximate newton method[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 612-622.

[16] BEDAWY A, YORINO N, MAHMOUD K, et al. Optimal voltage control strategy for voltage regulators in active unbalanced distribution systems using multi-agents[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1023-1035.

[17] ZOU K, MOHY-UD-DIN G, AGALGAONKAR A P. Distribution system restoration with renewable resources for reliability improvement under system uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8438-8449.

[18] 陈众励，许维胜. 电压中断与电压暂降的成因其及防治[J]. 电工技术学报，2015，30(增刊 1)：518-520.
CHEN Zhongli, XU Weisheng. Reason and prevention of voltage interruption and voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(Supplement1): 518-520.

[19] ZHENG Y, HILL D J, MENG K, et al. Critical bus voltage support in distribution systems with electric springs and responsibility sharing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3584-3593.

[20] VARMA R K, SIAVASHI E M. PV-STATCOM: a new smart inverter for voltage control in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1681-1691.

[21] 林 波，王 斌，程启明，等. 不对称故障下向无源网络供电的 MMC-HVDC 微分平坦控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4023-4032.
LIN Bo, WANG Bin, CHENG Qiming, et al. Differential flatness controller strategy of MMC-HVDC to supply power to passive network under asymmetric faults[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4023-4032.

[22] NEJABATKHAH F, LI Y W, SUN K, et al. Active power oscillation cancelation with peak current sharing in parallel interfacing converters under unbalanced voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10200-10214.

[23] NEJABATKHAH F, LI Y W, WU B. Control strategies of three-phase distributed generation inverters for grid unbalanced voltage compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5228-5241.

[24] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[25] 孙振奥，杨子龙，王一波，等. 光伏并网逆变器集群的谐振原因及其抑制方法[J]. 中国电机工程学报，2015，35(2)：418-425.
SUN Zhen'ao, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. The cause analysis and suppression method of resonances in clustered grid-connected photovoltaic inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 418-425.

[26] HE J W, LI Y W, WANG R Q, et al. A measurement method to solve a problem of using DG interfacing converters for selective load harmonic filtering[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 1852-1856.

[27] 王喜莲，程 迪，王 顺. 基于输出阻抗建模的并网系统低次谐波预测模型[J]. 电机与控制学报，2019，23(6)：18-26.
WANG Xilian, CHENG Di, WANG Shun. Low harmonics prediction model of grid-connected system based on output impedance modeling[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(6): 18-26.

[28] ZHOU L M, ZHOU X P, CHEN Y D, et al. Inverter-current-feedback resonance-suppression method for LCL-Type DG system to reduce resonance-frequency offset and grid-inductance effect[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7036-7048.

[29] HE J W, LI Y W, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.

[30] 钟 庆，冯俊杰，王 钢，等. 含多电压源型换流器配电网高频谐振特性分析[J]. 电力系统自动化，2017，41(5)：99-105.
ZHONG Qing, FENG Junjie, WANG Gang, et al. Analysis on high frequency resonance characteristics of distribution network with multiple voltage source converters[J]. Automation of Electric power Systems, 2017, 41(5): 99-105.

[31] LU M H, WANG X F, LOH P C, et al. Resonance interaction of multiparallel grid-connected inverters with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 894-899.

[32] YU C Z, ZHANG X, LIU F, et al. Modeling and resonance analysis of multiparallel inverters system under asynchronous carriers conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 3192-3205.

[33] 刘 洋，帅智康，李 杨，等. 多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(14)：4156-4164.
LIU Yang, SHUAI Zhikang, LI Yang, et al. Harmonic resonance modal analysis of multi-inverter grid-connected systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4156-4164.

[34] 李建文，阮筱菲，李永刚，等. 弱电网下多 LCL 型并网逆变器谐振模态分析[J]. 太阳能学报，2021，42(2)：346-355.
LI Jianwen, RUAN Xiaofei, LI Yonggang, et al. Resonance modal analysis for multiple LCL-type grid-connected inverters in weak grid[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 346-355.

[35] MOLINA-GARCÍA Á, MASTROMAURO R A, GARCÍA-SÁNCHEZ T, et al. Reactive power flow control for PV inverters voltage support in LV distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 447-456.

[36] 柴园园，郭 力，王成山，等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术，2018，42(3)：738-746.
CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738-746.

[37] HAFEZI H, FARANDA R. Dynamic voltage conditioner: a new concept for smart low-voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7582-7590.

[38] LU Y, XIAO G C, WANG X F, et al. Control strategy for single-phase transformerless three-leg unified power quality conditioner based on space vector modulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2840-2849.

[39] 黄晓明，范志华，苗世洪，等. 含储能单元的统一电能质量调节器功率协调控制策略[J]. 高电压技术，2018，44(10)：3390-3398.
HUANG Xiaoming, FANG Zhihua, MIAO Shihong, et al. Coordinat-

ed power control strategy of unified power quality conditioner with energy storage unit[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3390-3398.

[40] 马　茜，王文立，许　倩. 储能式统一电能质量控制器负载电压全补偿容量配置策略[J]. 电力系统自动化，2019，43(20)：90-96.
MA Qian, WANG Wenli, XU Qian. Capacity allocation strategy for full compensation of load voltage in unified power quality controller with energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 90-96.

[41] 崔学深，张自力，王泽忠，等. 基于固态切换开关的感应电机类负荷电源快速切换新策略及参数计算[J]. 电工技术学报，2016，31(18)：21-28.
CUI Xushen, ZHANG Zili, WANG Zezhong, et al. Novel rapid power switching strategy and its parameter calculation of induction motor-load based on solid state transfer switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 21-28.

[42] 苗振林. 基于 IGBT 的快速切换开关研究及保护系统设计[D]. 南京：东南大学，2015.
MIAO Zhenlin. Research on IGBT-based quick transfer switch and design of protection system[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2015.

[43] 胡若男，王　玮，吴学智，等. 含智能软开关的主动配电网 3 阶段鲁棒电压控制方法[J]. 高电压技术，2020，46(11)：3752-3761.
HU Ruonan, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Three-stage robust voltage control method for active distribution network with soft open points[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3752-3761.

[44] 吕知彼，裴雪军，王朝亮，等. 基于柔性多状态开关的配电网电压波动越限抑制方法[J]. 电力系统自动化，2019，43(12)：150-157.
LYU Zhibi, PEI Xuejun, WANG Chaoliang, et al. A voltage over-limit suppression method based on soft normally-open point in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 150-157.

[45] 孙充勃，李敬如，原　凯，等. 基于区间优化的配电网智能软开关与储能系统联合优化方法[J]. 高电压技术，2021，47(1)：45-54.
SUN Chongbo, LI Jingru, YUAN Kai, et al. Two-stage Optimization method of soft open point and energy storage system in distribution network based on interval optimization[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 45-54.

[46] 柴园园，刘一欣，王成山，等. 含不完全量测的分布式光伏发电集群电压协调控制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(8)：2202-2212.
CHAI Yuanyuan, LIU Yixin, WANG Chengshan, et al. Coordinated voltage control for distributed PVs clusters with incomplete measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2202-2212.

[47] LONG Y, ELLIOTT R T, KIRSCHEN D S. Adaptive coalition formation-based coordinated voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2005-2018.

[48] 赵云龙，车仁飞，张牧烨，等. 基于无缝切换技术的三相不平衡换相开关研究与设计[J]. 电力自动化设备，2022，42(9)：176-182.
ZHAO Yunlong, CHE Renfei, ZHANG Muye, et al. Research and design of three-phase unbalanced commutation switch based on seamless commutation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 176-182.

[49] ZHOU A P, ZHAI H F, YANG M, et al. Three-phase unbalanced distribution network dynamic reconfiguration: a distributionally robust approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 2063-2074.

[50] 韦　钢，陈森环，蔡　阳，等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备，2010，30(2)：59-63.
WEI Gang, CHEN Senhuan, CAI Yang, et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive power theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 59-63.

[51] 李兰芳，刘开培，李建奇. 点焊机三相不平衡负荷的静止无功补偿[J]. 高电压技术，2010，36(3)：810-815.
LI Lanfang, LIU Kaipei, LI Jianqi. SVC for three-phase unbalanced load of spot welding machine[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 810-815.

[52] 胡应宏，王建赜，任佳佳，等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报，2012，32(34)：98-104.
HU Yinghong, WANG Jianze, REN Jiajia, et al. Balance component decomposition and compensation method for unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 98-104.

[53] 游建章，郭谋发. 含四桥臂 H 桥变流器的不对称配电网综合补偿方法[J]. 电工技术学报，2022，37(11)：2849-2858.
YOU Jianzhang, GUO Moufa. Comprehensive compensation method for asymmetric distribution network with four-Arm H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2849-2858.

[54] 廖坤玉，陶　顺，姚黎婷，等. 不平衡负荷负序加权等效模型及其平衡化补偿方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(19)：5594-5603.
LIAO Kunyu, TAO Shun, YAO Liting, et al. Negative sequence weighted equivalent model of unbalanced load and its balance compensation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5594-5603.

[55] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A R. Asymmetrical ride-through and grid support in converter-interfaced DG units under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1130-1141.

[56] LÓPEZ M A G, DE VICUÑA J L G. Control strategy for grid-connected three-phase inverters during voltage sags to meet grid codes and to maximize power delivery capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9360-9374.

[57] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1511-1521.

[58] MOHAPATRA S R, AGARWAL V. Model predictive control for flexible reduction of active power oscillation in grid-tied multilevel inverters under unbalanced and distorted microgrid conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1107-1115.

[59] WADA K, FUJITA H, AKAGI H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(4): 1123-1130.

[60] 孙孝峰，蔡　瑶，韩瑞静，等. I-APF 在基于末端微电网结构的配电网中的应用[J]. 太阳能学报，2018，39(9)：2624-2632.
SUN Xiaofeng, CAI Yao, HAN Ruijing, et al. Study on application of infinite active power filter in power distribution feeder based on end microgrid structure[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(9): 2624-2632.

[61] 石磊磊，贾清泉，林丽娟，等. 电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9)：2914-2923.
SHI Leilei, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Distributed global optimal harmonic mitigation strategy for power electronics high penetrated distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2914-2923.

[62] CHENG P T, LEE T L. Distributed active filter systems (DAFSs): a new approach to power system harmonics[J]. IEEE Transactions on

Industry Applications, 2006, 42(5): 1301-1309.

[63] 汪 颖，孙建风，肖先勇，等. 扩大等效虚拟阻尼正区间的逆变侧电流双环反馈控制方法[J]. 高电压技术，2021，47(11)：3981-3991.
WANG Ying, SUN Jianfeng, XIAO Xianyong, et al. Double-loop feedback control method of inverter side current improved by extending the positive range of equivalent virtual damping[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3981-3991.

[64] 马 明，廖 鹏，蔡雨希，等. LCL 并网逆变器的自抗扰控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2223-2231.
MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. Active disturbance rejection control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2223-2231.

[65] GUAN Y P, WANG Y, XIE Y X, et al. The dual-current control strategy of grid-connected inverter with *LCL* filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5940-5952.

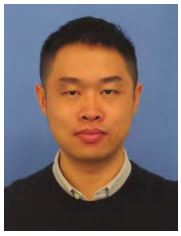
[66] LIU T, LIU J J, LIU Z, et al. A study of virtual resistor-based active damping alternatives for LCL resonance in grid-connected voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 247-262.

何晋伟(通信作者)
1983—，男，博士，教授，博导
主要从事微电网和分布式发电、电能质量、大功率电力电子变流器技术的研究工作
E-mail: jinwei.he@tju.edu.cn

HE Jinwei
Ph.D., Professor
Corresponding author

孟维奇
1999—，男，硕士生
主要研究方向为低压配电网电能质量问题治理
E-mail: weiqi_meng@tju.edu.cn

MENG Weiqi



蒋 玮
1982—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电力储能技术、电力系统状态估计技术、智能配用电技术
E-mail: jiangwei@seu.edu.cn

JIANG Wei
Ph.D., Professor

殷晓华
1982—，男，高工
主要研究方向为电能质量，新能源发电工程
E-mail: 18906270512@163.com

YIN Xiaohua
Senior engineer

收稿日期 2022-11-21 修回日期 2023-03-24 编辑 陈 蔓