DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.184 **中图分类号**：TM743 **文献标志码**：A

基于超短期电能质量评估的微网群电能质量控制策略

师洪涛(中国电源学会会员)，锁忠梅，蒙欣欣(中国电源学会学生会员)，
张 白，朱嘉豪
(北方民族大学电气信息工程学院，银川 750021)

摘要：针对如何通过微网群电能质量评估与多变流器协同来实现电能质量有效控制这一问题，提出1种新的基于超短期电能质量评估的微网群电能质量控制策略。首先，采用超短期电能质量评估方法，实时评估并定位微网群中的电能质量问题。然后，根据定位结果，采用分布式共识算法对多变流器进行协同控制，以实现电能质量任务分配及治理；治理完成后，再进行评估验证，确保治理效果并形成微网群系统级的闭环治理体系。最后，算例表明所提策略相较于传统方法能在微网群层面上实现电能质量问题的识别、评估和治理的闭环控制，谐波畸变率有效降低，实现了微网群电能质量的有效评估与治理。

关键词：微网群；电能质量评估；多变流器；协同控制；闭环治理

Power Quality Control Strategy for Microgrid Cluster Based on Ultra-short-term Power Quality Assessment

SHI Hongtao, *Member*, *CPSS*, SUO Zhongmei, MENG Xinxin, *Student Member*, *CPSS*,
ZHANG Bai, ZHU Jiahao
(School of Electrical and Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To realize the effective control of power quality (PQ) in microgrid cluster (MGC) by means of PQ assessment of MGC and the cooperation with multiple converters, a novel strategy for MGC based on ultra-short-term PQ assessment is proposed. First, an ultra-short-term PQ assessment method is employed to evaluate and locate the PQ problems in MGC in real time. Then, according to the positioning results, a distributed consensus algorithm is utilized to coordinate the control of multiple converters, thus achieving the PQ task allocation and governance. After the completion of governance, the assessment and verification are performed again to ensure the governance effect and further form a closed-loop governance system at the level of MGC. Finally, the results of an example show that compared with the traditional method, the proposed strategy can realize the closed-loop control of PQ problems from the perspectives of identification, assessment and governance at the level of MGC while effectively reducing the harmonic distortion rate, thereby realizing the effective assessment and governance of PQ in MGC.

Keywords: Microgrid cluster (MGC); power quality (PQ) assessment; multi-converter; cooperative control; closed-loop governance

随着分布式电源在配电网中的大规模接入，配电网的电能质量面临着极大挑战。分布式电源的波动性和间歇性使传统电网运行模式复杂化。微网技术是解决此问题的重要技术之一[1]，能够实现分布式电源的有效整合和利用[2]。然而，面对多元化能源互补需求，单一微网的抗干扰能力和运行容量有限。为此，微网群概念被提出，即由地理位置毗邻

收稿日期：2024-12-04；**修回日期**：2025-01-23；**录用日期**：2025-02-15；**网络首发日期**：2025-04-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52267013)；宁夏回族自治区重点研发计划资助项目(2022BEE03004)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52267013；Key Research and Development Program Projects of Ningxia under the grant 2022BEE 03004

的微网组成的集群发电系统[3-4]。通过多微网的协调运行，构建更大规模的供用电网络，从而满足多元化需求[5-6]。微网群的结构和运行方式更为繁复，所引起的电能质量问题也更为复杂，因此，对微网群电能质量问题进行有效地评估与治理非常重要。

目前，针对微网群电能质量评估与治理，国内外专家学者从多方面进行了研究。一方面，可以采用类似传统配电网络评估技术[7-8]。文献[9-10]分别从概率角度和权重特性出发，对电能质量进行评估；在此基础上，考虑到微网特性，文献[11]提出了 1 种基于动态系数与 CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)的综合评估方法，以客观权重揭示了指标间内在联系，实现了微网电能质量的评估。另一方面，一些专家学者从治理角度出发，利用传统静止无功发生器 SVG(static var generator)、有源电力滤波器 APF(active power filter)等治理装置及优化算法对电能质量进行优化治理[12-14]。然而，传统治理装置在实际应用中需要额外的维护成本。为降低成本，研究者们探索了经济高效的解决方案，发现多功能逆变器与电能质量治理装置结构相似。因此，有研究者提出利用多功能并网逆变器来治理电能质量问题。文献[15]中提出 1 种并网多功能逆变器的电能质量控制与多目标优化补偿策略，通过谐波检测在逆变器输出中加入补偿电流，抵消谐波和无功电流分量，并采用基于突变理论的综合电能质量评价方法对微网电能质量进行评估。通过多目标粒子群算法优化多功能并网逆变器的参考电流，旨在最小化输入补偿容量的同时优化电能质量指标，从而在有限补偿容量下最优地改善配电网区域的电能质量。

综上所述，国内外专家学者在微网群电能质量评估与治理方面已取得诸多显著成果。但考虑到微网群结构的复杂性和运行方式的多样性，如何快速识别与评估电能质量问题，并将评估结果与多功能逆变器协调配合，以实现最佳治理效果，构建微网群系统级的闭环治理体系，还有待进一步展开研究。为此，本文提出 1 种基于超短期评估的微网群电能质量控制策略。该策略采用越限核密度分析法，对超短期电能质量进行实时评估与定位。基于评估定位结果，利用分布式共识算法对多变流器进行协同控制，实现了电能质量任务的分配与治理。治理后，通过再次评估验证治理效果，形成“评估-治理-再评估”的闭环模式，从而在整体系统层面实现了微网群电能质量的闭环有效治理。

1　微网群的结构及电能质量等级划分方法

1.1　微网群的结构及原理

微网群作为多微网互联系统，虽满足多元能源需求，但是面临运行复杂、非线性显著等挑战，导致电能质量恶化，如电压波动、谐波污染，影响系统运行[16]。微网间互联使能量流动复杂，电能质量问题产生与传导也更复杂，治理更困难。此外，随着多微网接入，微网群节点数增多，运行模式复杂化，电能质量随机性和不确定性增加。微网群的具体结构如图 1 所示，包括长期、短期和超短期评估，分别关注治理规划方向、当前电能质量状况和实时动态变化。本文主要进行电能质量的动态治理，因此采用超短期评估方法，以“s”级分辨率和“min”级时间尺度对电能质量进行实时评估，并通过评估结果来指导电能质量治理，从而实现微网群电能质量的闭环治理。

1.2　微网群电能质量等级划分

为了有效评估电能质量并消除因量纲差异导致的评估偏差，本文依据国际与国家电能质量标准[17]，采用概率统计方法，对电能质量指标进行了等级划分，见表 1。该划分将电能质量分为 6 个等级，其中Ⅰ~Ⅳ级为合格范围，包括Ⅰ级(90~100 分)的优质，Ⅱ~Ⅲ级(80~90 分)的良好，以及Ⅳ级(70~80 分)的合格。若电能质量评分低于 70 分，即被归为不合格范围，需采取治理措施进行改善。此分级涵盖了电压偏差、频率偏差、三相不平衡、谐波失真及电压波动等 5 项典型指标。

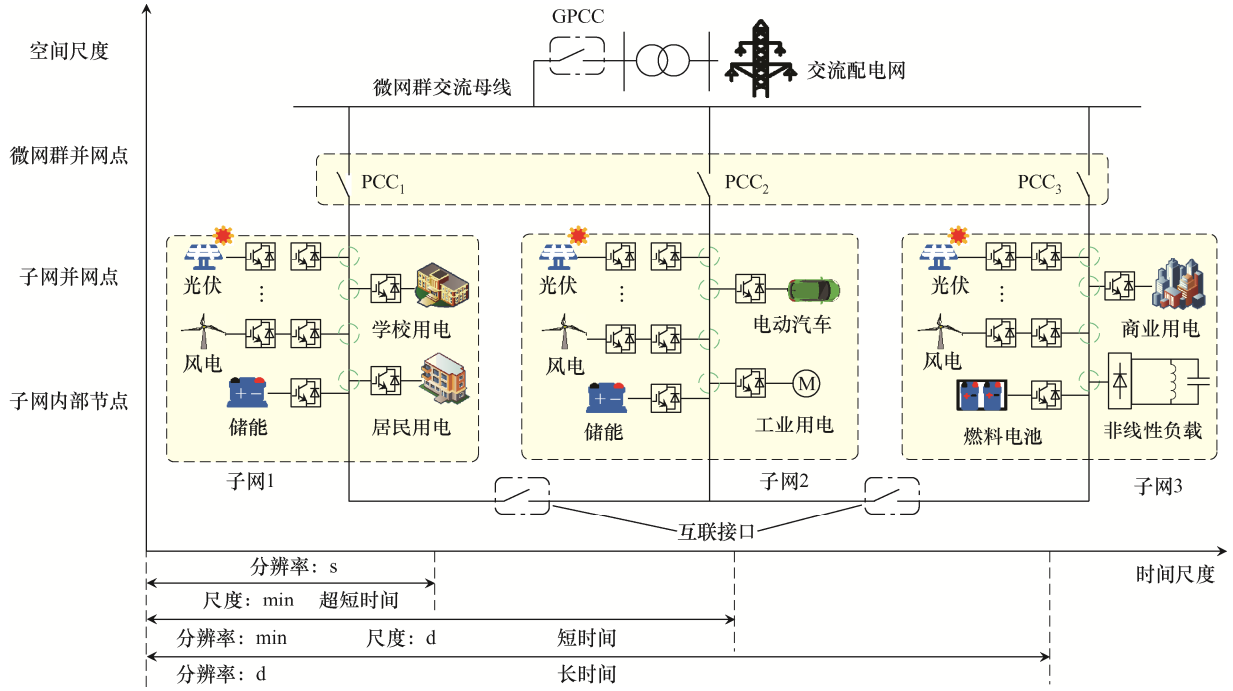


图 1 微网群的结构示意

Fig. 1 Schematic of structure of microgrid cluster

表 1 电能质量指标的等级划分

Tab. 1 Level classification of power quality indicators

等级/分	电压偏差/%	频率偏差/Hz	三相不平衡/%	THD/%	电压波动/%
Ⅰ [90, 100]	[0, 0.8)	[0, 0.03)	[0, 0.3)	[0, 0.5)	[0, 0.5)
Ⅱ [85, 90)	[0.8, 2.0)	[0.03, 0.05)	[0.3, 0.5)	[0.5, 1.0)	[0.5, 1.5)
Ⅲ [80, 85)	[2.0, 3.5)	[0.05, 0.10)	[0.5, 1.0)	[1.0, 2.0)	[1.5, 2.5)
Ⅳ [70, 80)	[3.5, 5.0)	[0.10, 0.15)	[1.0, 1.5)	[2.0, 3.0)	[2.5, 3.5)
Ⅴ [60, 70)	[5.0, 7.0)	[0.15, 0.20)	[1.5, 2.0)	[3.0, 4.0)	[3.5, 5.0)
Ⅵ [50, 60)	≥7.0	≥0.20	≥2.0	≥4.0	≥5.0

2 所提基于超短期电能质量评估的微网群电能质量控制策略

为有效应对微网群中存在的电能质量问题，本文提出了 1 种基于超短期评估的微网群电能质量闭环控制体系，如图 2 所示。该体系紧密围绕“评估-治理-验证”的闭环逻辑，确保电能质量问题的及时发现、治理与效果验证。

图 2 中，采用越限核密度分析法对超短期电能质量进行实时评估，通过捕捉电能质量指标的越限

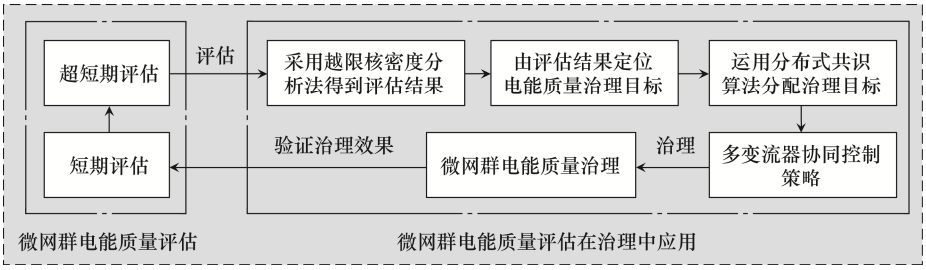


图 2 超短期电能质量评估下的微网群电能质量闭环控制体系

Fig. 2 Closed-loop control system of power quality for microgrid cluster under ultra-short-term power quality assessment

行为，结合核密度估计的非参数统计特性[18]，能够准确反映各子网节点电能质量的实时状态及其分布情况。同时，通过指标与空间维度的定位，识别电能质量较为严重的子网节点及指标。进一步，基于电能质量评估结果，采用分布式算法协同控制多变流器，促进变流器之间的信息交换。通过调整变流器的电压、电流输出参数，优先对电能质量较差的子网及关键指标进行治理，并对治理效果进行评估验证，实现了微网群电能质量的闭环治理。

2.1 所提新型超短期电能质量评估方法

针对微网群中超短期电能质量问题，本文采用越限核密度分析法来捕捉电能质量的瞬时变化。以表 1 中不合格等级(Ⅴ级)范围为一次阈值，初步筛选出潜在的电能质量问题。为进一步提高评估的准确性和可靠性，本文采用了非参数估计法中的核密度估计法对各电能质量指标进行深入评估。此方法无需预设数据分布形式，能够灵活地反映数据的分布特性。通过密度曲线的分布位置与分布形态直观反映微网群电能质量的整体分布特征及各子网间的差异。其中，曲线的位置反映微网群电能质量的平均水平，形态则反映电能质量的差异程度，这种差异由曲线的波峰高度及数量直观体现。

此外，以各指标核密度分布的标准差作为二次评估的阈值，来量化电能质量指标的严重程度。标准差反映了数据分布的离散程度，通过计算各指标核密度分布的标准差，能够更深入地理解各项指标在一段时间内的波动特性。标准差越大，表示数据波动越大，即微网群电能质量指标的波动特性越显著；反之，微网群电能质量指标的波动特性越平稳。在二次评估中，若某指标值虽未超过一次阈值但偏离二次阈值，则同样视为潜在问题。超短期电能质量的评估原理如图 3 所示，能够更全面地捕捉电能质量的细微变化，减少因单一阈值设置不当而导致的误判或漏判。具体评估步骤如下。

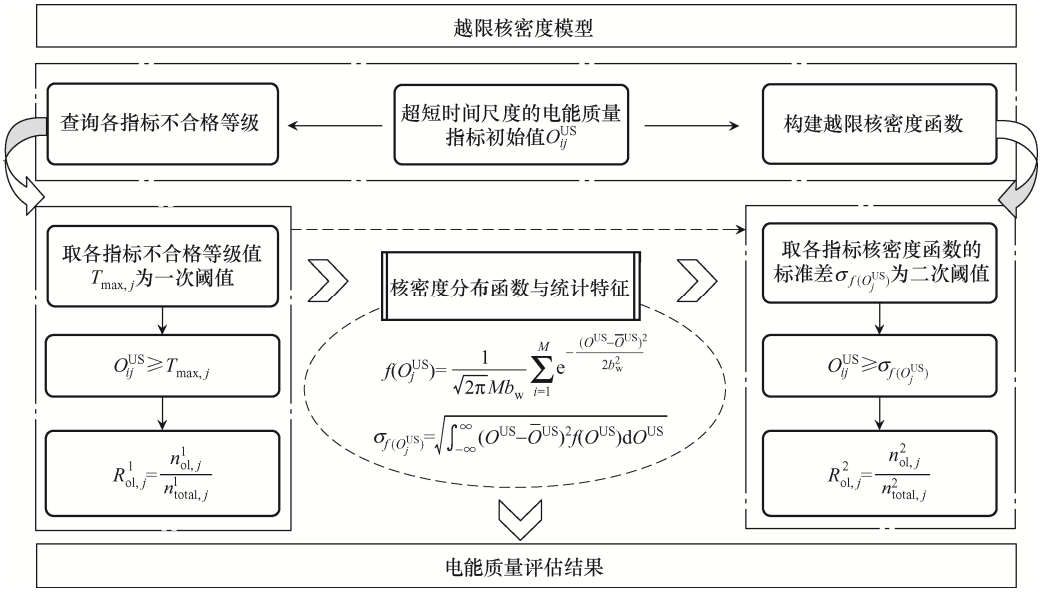


图 3　超短期电能质量的评估原理

Fig. 3 Schematic of assessment on ultra-short-term power quality

(1)假设微网群超短期的电能质量指标初始值为 O_{ij}^{US}(i=1, 2, …, p; j=1, 2, …, n)，将其与各项指标的一次阈值 $T_{\max,j}$ 作比较，初步判断各指标的越限情况，并计算其所对应的越限率 $R_{\mathrm{ol},j}^{1}$，可分别表示为

$$O_{ij}^{\mathrm{US}}\geqslant T_{\max,j} \tag{1}$$

$$R_{\mathrm{ol},j}^{1}=\frac{n_{\mathrm{ol},j}^{1}}{n_{\mathrm{total},j}^{1}} \tag{2}$$

式中：$n_{\mathrm{ol},j}^{1}$ 为第 j 个指标第 1 次越限数；$n_{\mathrm{total},j}^{1}$ 为第 j 个指标样本总数。

(2)构建越限核密度模型，计算各电能质量指

标的核密度函数 $f(O_j^{\mathrm{US}})$ 为

$$f(O_j^{\mathrm{US}})=\frac{1}{\sqrt{2\pi}Mb_{\mathrm{w}}}\sum_{i=1}^{M}\mathrm{e}^{-\frac{(O^{\mathrm{US}}-\bar{O}^{\mathrm{US}})^2}{2b_{\mathrm{w}}^2}} \tag{3}$$

$$b_{\mathrm{w}}=\left(\frac{4}{3M}\right)^{1/5}S^{\mathrm{US}}\approx 1.06S^{\mathrm{US}}M^{-1/5} \tag{4}$$

式中：M 为各指标的样本量；b_{w} 为核函数的带宽；O^{US} 为各指标样本值；$\bar{O}^{\mathrm{US}}$、S^{US} 分别为各指标样本均值及样本标准差。

(3)计算各指标核密度函数的标准差 $\sigma_{f(O_j^{\mathrm{US}})}$，将其作为二次优化阈值，以此判断各指标的越限情况，并计算优化后的越限率 $R_{\mathrm{ol},j}^2$，可分别表示为

$$\sigma_{f(O_j^{\mathrm{US}})}=\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty}(O^{\mathrm{US}}-\bar{O}^{\mathrm{US}})^2 f(O^{\mathrm{US}})\mathrm{d}O^{\mathrm{US}}} \tag{5}$$

$$O_{ij}^{\mathrm{US}}\geqslant\sigma_{f(O_j^{\mathrm{US}})} \tag{6}$$

$$R_{\mathrm{ol},j}^2=\frac{n_{\mathrm{ol},j}^2}{n_{\mathrm{total},j}^2} \tag{7}$$

式中：$n_{\mathrm{ol},j}^2$ 为第 j 个指标优化后的越限数；$n_{\mathrm{total},j}^2$ 为第 j 个指标优化后的总数。

(4)取优化后阈值为电能质量评估的最终结果 E_{result}，同时，将 2 次越限情况的结果作为电能质量的预警提示 R_{warning}，表征公式分别为

$$E_{\mathrm{result}}=\sigma_{f(O_j^{\mathrm{US}})} \tag{8}$$

$$R_{\mathrm{warning}}=R_{\mathrm{ol},j}^1\bigcup R_{\mathrm{ol},j}^2 \tag{9}$$

式中，$\bigcup$ 表示 2 次越限结果的并集。

2.2 基于电能质量超短期评估的多变流器协同控制策略

在微网群系统中，多变流器协同控制是确保系统稳定运行和提升电能质量的重要手段。为了有效管理和利用这些变流器的剩余容量以治理微网群的电压波动、谐波污染等电能质量问题，本文引入分布式共识的思想[19]，其能通过允许系统中的每个节点(即每个多变流器)与其邻居节点进行通信，建立信息交换规则，从而在多个变流器之间就电能质量治理的目标和策略达成共识。同时，需要通过功率约束条件来确定变流器是否可以用于电能质量的治理，并将电能质量治理任务分配给剩余容量合适的变流器。进一步，若变流器不满足治理条件则需调动 APF 来协助参与剩余的任务治理。通过此策略可以避免治理任务过度集中于某 1 台变流器，导致其容量不足的情况。该控制策略的原理及结构分别如图 4 与图 5 所示。具体步骤如下。

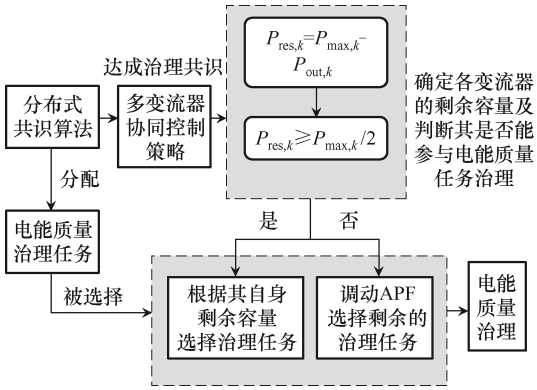


图 4 多变流器协同控制策略的原理

Fig. 4 Schematic of cooperative control strategy for multi-converter

(1)计算变流器的剩余容量，假设变流器 k 的最大额定功率为 $P_{\mathrm{max},k}$(k=1, 2, ⋯, m)，当前实际输出功率为 $P_{\mathrm{out},k}$，则剩余容量可表征为

$$P_{\mathrm{res},k}=P_{\mathrm{max},k}-P_{\mathrm{out},k} \tag{10}$$

式中，$P_{\mathrm{res},k}$ 为第 k 个变流器的剩余容量。

(2)确定变流器是否可以用于电能质量治理，为此，需要制定满足治理条件的功率约束条件，其公式为

$$P_{\mathrm{res},k}\geqslant P_{\mathrm{max},k}/2 \tag{11}$$

图 5 展示了微网群中多变流器的控制结构。首先，系统根据超短期评估的定位结果确定电能质量的治理任务。随后，利用分布式共识算法向多变流器执行与控制系统发出统一指令。各变流器在接收到指令后，会根据自身的剩余容量和治理能力来选择合适的治理任务。如果一个变流器选择处理最严重的电能质量问题后仍有剩余容量，它可能会同时考虑治理其他次要问题；若其剩余容量不足，则其他变流器会结合剩余容量和治理能力，选择性地承担其他治理任务。通过变流器间的通信，各变流器

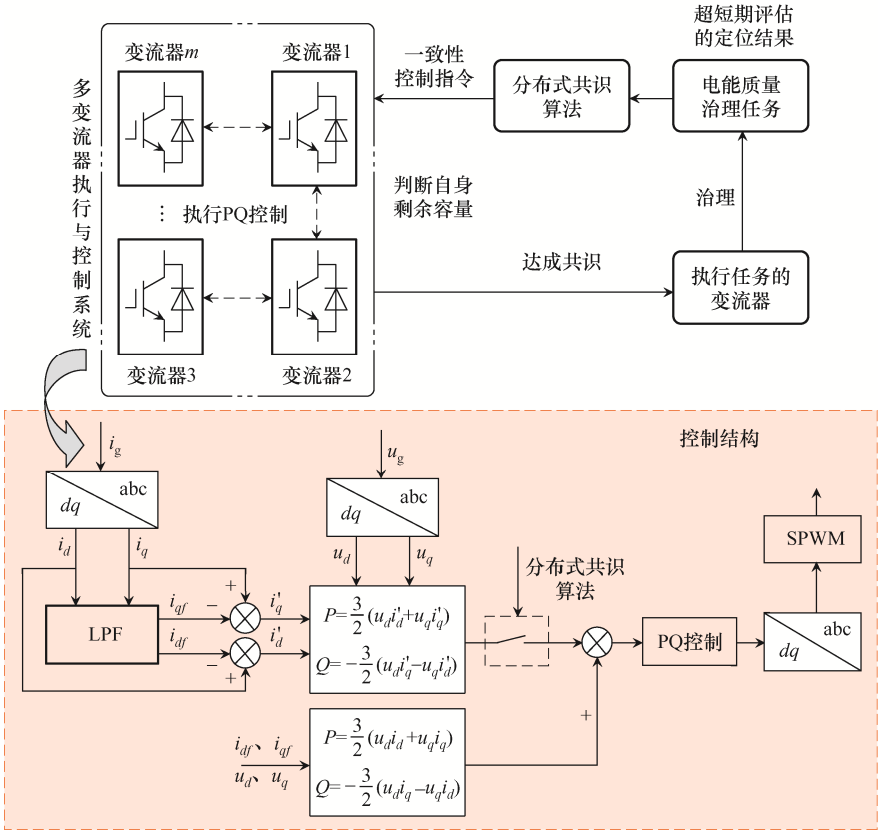


图 5　多变流器的控制结构

Fig. 5 Control structure of multi-converter

最终就治理任务达成一致并执行。图中：i_g、u_g 分别为微网群交流母线的电流与电压；i_d、i_q、u_d、u_q 分别为坐标系变换后 dq 轴电流与电压；i_{df}、i_{qf} 分别为 dq 轴电流经低通滤波器后的基波电流；i'_d、i'_q 为交流母线电流与基波电流差值，即 dq 轴谐波电流与负序电流。

2.3　电能质量闭环治理的算法流程

首先，基于超短期电能质量评估结果，定位出微网群中最为严重的电能质量问题，并将其作为多变流器的协同治理任务。然后，运用分布式共识算法，将治理任务分配给剩余容量充裕的变流器，确保每台变流器能根据自身容量状况选取最合适的治理对象，并在治理后对治理效果进行评估验证，以此实现微网群电能质量的闭环治理。此算法流程如图 6 所示，实现了电能质量评估与治理策略及效果验证的闭环反馈。在任务分配过程中，遵循“优先级+容量匹配”原则，即将最严重的电能质量问题优先分配给剩余容量最大的变流器，以确保治理

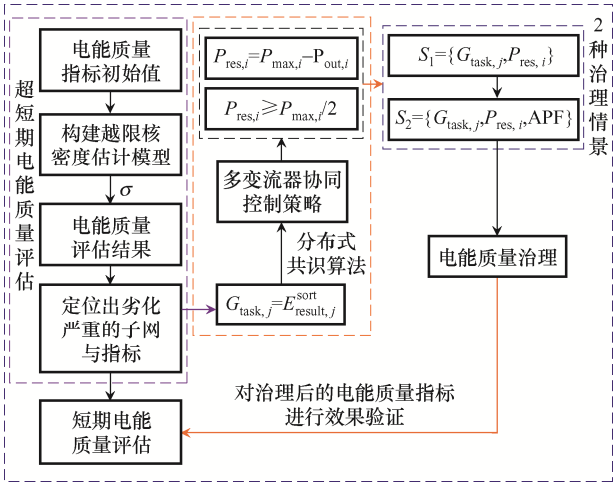


图 6　微网群电能质量闭环治理流程

Fig. 6 Flow chart of closed-loop governance for power quality in microgrid cluster

效果与效率。如果某个变流器的剩余容量不足以完成分配的电能质量治理任务，则需要通过迭代过程来灵活调整策略，将治理任务分配给其他变流器或调动微网群中所有变流器与专门治理装置 APF 协同进行补充治理，使电能质量波动控制在国家标准

范围内。此外，还需及时对治理结果进行评估，根据评估结果灵活调整微网群内电能质量装置的设置，并视情况增添新的治理设备，以有效应对可能出现的更严重的电能质量问题，并为微网群的后续建设提供有力的理论指导。具体步骤如下。

(1)根据超短期电能质量评估结果 E_{result}，确定多变流器的治理任务，即

$$G_{\text{task},\,j}=E_{\text{result},\,j}^{\text{sort}} \tag{12}$$

式中：$G_{\text{task},j}$ 为第 $j(j=1, 2, \cdots, n)$个治理对象；$E_{\text{result},j}^{\text{sort}}$ 为微网群电能质量的严重程度。

(2)运用分布式共识算法合理分配电能质量治理任务，此过程中，需要考虑 2 种情况，分别表示为

$$S_1=\left\{G_{\text{task},\,j},\,P_{\text{res},i}\right\} \tag{13}$$

$$S_2=\left\{G_{\text{task},\,j},\,P_{\text{res},i},\,\text{APF}\right\} \tag{14}$$

式中：S_1 为多变流器的剩余容量充足的情况；S_2 为剩余容量不足，需要协调 APF 来治理电能质量的情况。

3 算例验证

为验证融合电能质量评估与多变流器协同控制的微网群电能质量闭环控制策略的有效性，本文设计了贴近实际工况的微网群仿真模型。在构建该模型时，充分参考了现有微网运行工况的数据及其他可获取的相关数据，并考虑了微网群的复杂度、算例的可信度及占用的计算机资源，以此确保所构建的模型能够尽可能贴近实际的运行工况。该模型由 3 个各具特色的子网及多个变流器组成，每个子网承载着不同的功能和负载类型。其中，子网 1 额定容量为 100 kW，主要用于模拟稳定的电力需求场景，由 1 台主变流器和 1 台从变流器协同工作，并接入线性负载；子网 2 额定容量为 200 kW，用于模拟谐波问题，通过 2 台从变流器与非线性负载的组合，来展现谐波污染场景；子网 3 额定容量为 110 kW，针对微网群中常见的三相不平衡问题，配置了 1 台从变流器与 1 组三相不平衡负载，以真实反映其不平衡现象。同时，各子网间通过断路器灵活互联，模拟了实际微网群中子网间的动态交互与能量交换。所有子网连接至共同交流母线，形成统一调控系统，全面模拟并验证整体电能质量治理策略在复杂环境下的效果。模型的主要参数设置见表 2。

表 2 微网群仿真模型的主要参数设置

Tab. 2 Setting of main parameters of microgrid cluster simulation model

参数	数值
输入电压/V	800
额定输出电压/V	311
开关频率/kHz	10
额定频率/Hz	50
阻性负载/Ω	20
三相整流器(非线性)	R=10 Ω、C=10 μF、L=10 mH
三相不平衡负载/Ω	5、10、20

3.1 微网群电能质量治理前的量化结果分析

根据所搭建的模型，首先在 0.08 s 前，切入线性负载以模拟实际的电力消耗情况。在 0.08 s 和 0.16 s 时分别单独切入不同组的非线性负载与不平衡负载，以监测多变流器的输出电压变化。为了模拟非线性与不平衡同时存在的问题，在 0.08 s 与 0.16 s 分别同时切入非线性负载与不平衡负载，本文主要对同时切入负载的工况进行量化分析。根据式(1)~式(9)可得出各指标的越限情况及微网群电能质量的最终评估结果(标准差)，见表 3 与表 4，其直观展示如图 7 所示。此外，电能质量治理前的电压波形、THD 的波动趋势及电压波形的 FFT 分析波形分别如图 8 和图 9 所示。

表 3 超短期下微网群的电能质量越限率

Tab. 3 Power quality off-limit rates of microgrid cluster in ultra-short-term

越限次数	电压偏差	频率偏差	三相不平衡	THD	电压波动
第 1 次	0.01	0	0	0	0.69
第 2 次	0.24	0	0.99	0	1.00

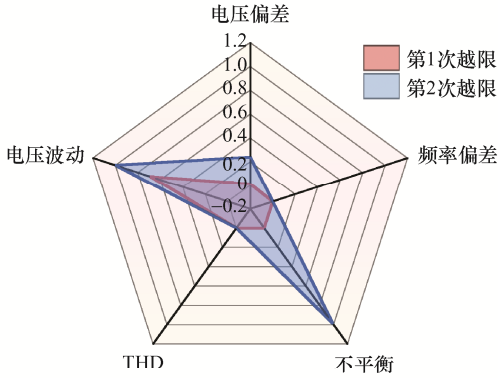
由表 3 数据可见，在一次越限时，仅观察到电压波动和偏差，但经过二次优化后，不平衡指标也发生波动，表明电能质量评估的严格性得到了显著

提升。某些实际上已经越限的指标并未被及时识别，经过核密度优化后，原本被忽视的越限指标被及时地捕捉，有效降低了漏判与误判的风险，动态展现了微网群电能质量的变化情况。表 4 展示了微网群电能质量指标的核密度分布，进一步揭示了子网间电能质量波动的差异性，其中子网 2 波动性最大，评估值 0.853 7 高于子网 1 的 0.828 1 和子网 3 的 0.839 0。同时，从表 4 可以看出，THD 是子网 2 电能质量波动的主要因素，电压偏差与三相不平衡问题也不容忽视。因此，在改善电能质量时，应优先处理超过国家电能质量标准的指标，重点消除谐波，并对电压偏差和不平衡问题给予同等重视和治理。

表 4　超短期下微网群的电能质量评估结果

Tab. 4 Power quality assessment results of microgrid cluster in ultra-short-term

区域	电压偏差	频率偏差	三相不平衡	THD	电压波动	最大值
子网 1	0.393 1	0.139 2	0.274 6	0.828 1	0.047 4	0.828 1
子网 2	0.367 6	0.133 6	0.271 3	0.853 7	0.046 7	0.853 7
子网 3	0.379 5	0.133 6	0.297 0	0.839 0	0.047 7	0.839 0



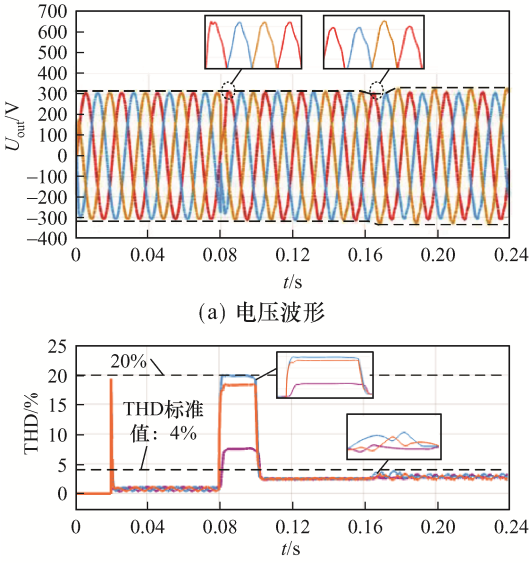
(a) 微网群电能质量指标的2次越限对比

(b) 微网群电能质量评估结果的核密度分布

图 7　微网群电能质量指标的越限对比与核密度分布

Fig. 7 Comparison of off-limits of power quality indicators for microgrid cluster, and kernel density distribution

此外，图 7(a)通过对比优化前后的越限情况，验证了二次评估的全面性；图 7(b)直观展示了评估结果的波动性，其中 THD 曲线波动显著且呈现多峰特征，这充分反映了微网群电能质量的复杂性与不确定性，为治理提供了有力依据。

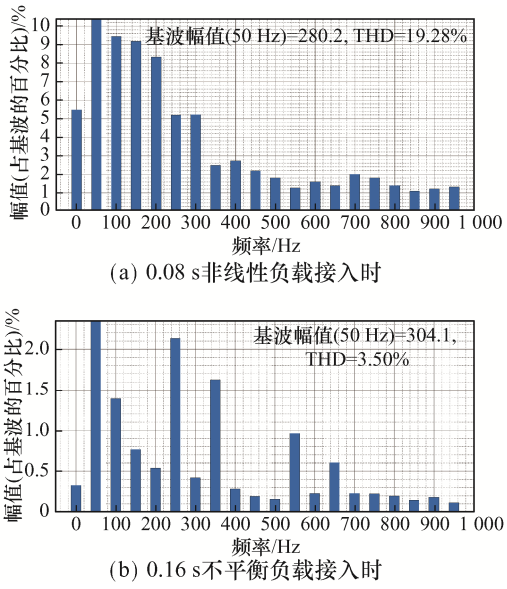


(a) 电压波形

(b) THD趋势

图 8　微网群电能质量治理前的波形

Fig. 8 Waveforms before power quality governance of microgrid cluster



(a) 0.08 s非线性负载接入时

(b) 0.16 s不平衡负载接入时

图 9　微网群电能质量治理前电压波形的 FFT 分析

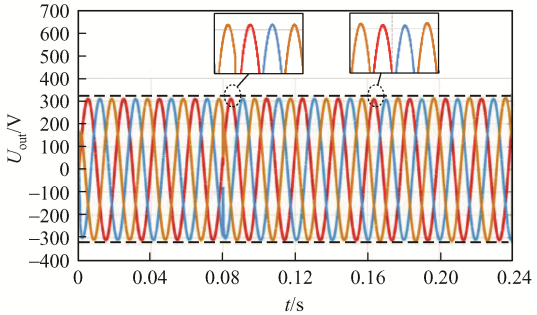
Fig. 9 FFT analysis of voltage waveforms before power quality governance of microgrid cluster

由图 8(a)可见，0.08 s 时，电压波形明显畸变，偏离了正常的正弦波形，此变化揭示了非线性负载

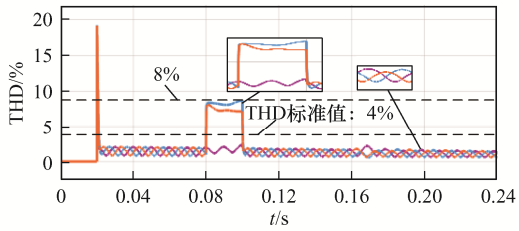
接入对电能质量的影响；0.16 s 时，波形畸变加剧并呈现不平衡特征，此现象凸显了微网群中非线性与不平衡负载共存的复杂工况，导致电压的波动性和不确定性显著增加。由图 8(b)可见，0.08 s 时，畸变最严重一相的 THD 逼近 20.00%，远超国家电能质量标准所规定的范围，表明在非线性负载接入的瞬间，微网群的电能质量受到了极大的冲击；0.16 s 时，虽然 THD 值有所下降，在 4.00%附近波动，但这种波动和不平衡状态如果持续时间较长，仍然会对电能质量产生严重影响。此外，图 9 的 FFT 分析进一步指出，0.08 s 时，非线性负载接入瞬间，THD 高达 19.28%；0.16 s 时，电压不平衡加剧，尽管 THD 为 3.50%，但其逐渐逼近国家标准值，此波动状态若持续存在，仍然会对微网群电能质量构成潜在威胁。因此，需要采取有效措施来监测和改善这种电能质量变化，以确保微网群电能质量符合国家标准。

3.2 微网群电能质量治理后的量化结果分析

根据式(10)~式(14)，采用分布式共识算法对微网群中多变流器进行电能质量治理任务的选择与分配，治理后的电压波形、THD 波形及电压波形的 FFT 分析分别如图 10 和图 11 所示，直观展示了微网群电能质量的提升。由图 10(a)可见，电压波形较治理前显著平滑，畸变明显减少；由图 10(b)可见，THD 值在 0.08 s 时刻降低，表明谐波得到了有效控制，0.16 s 时的三相不平衡也得到明显改善。图 11 进一步量化展示了治理成果，0.08 s 瞬间电压谐波畸变率从治理前的19.28%降低至8.26%，0.16 s 时 THD 值也远低于国家标准值。这些变化充分展示了电能质量治理措施的有效性和显著成果。



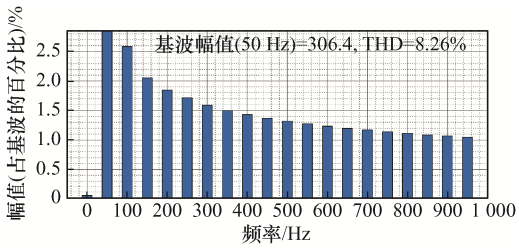
(a) 电压波形



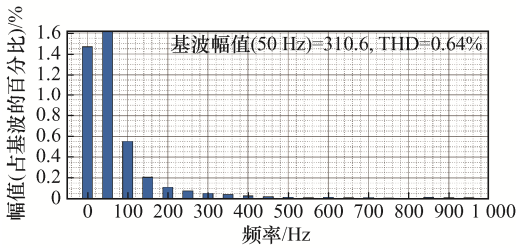
(b) THD趋势

图 10 微网群电能质量初步治理后的波形

Fig. 10 Waveforms after initial power quality governance of microgrid cluster



(a) 0.08 s非线性负载接入时



(b) 0.16 s不平衡负载接入时

图 11 微网群电能质量初步治理后电压波形的 FFT 分析

Fig. 11 FFT analysis of voltage waveforms after initial power quality governance of microgrid cluster

电能质量治理前后各子网中变流器的剩余容量变化见表 5，其直观显示如图 12 所示。APF 的出力会随着变流器剩余容量的变化而变化，在治理前，可能由于负荷分布不均和谐波污染严重，微网群中变流器的容量分配不均衡，导致电能质量下降，从而 APF 的出力也较高。采用分布式共识算法对变流器进行协同控制后，变流器的容量分配更加均衡，电能质量得到显著提高，从而使 APF 出力减弱。

表 5 电能质量治理前后变流器的剩余容量变化

Tab. 5 Changes in residual capacity of converter before and after power quality governance

%

变流器	1	2	3	4	5
治理前	0.22	0.35	0.16	0.59	0.17
治理后	0.84	0.58	0.64	0.73	0.75

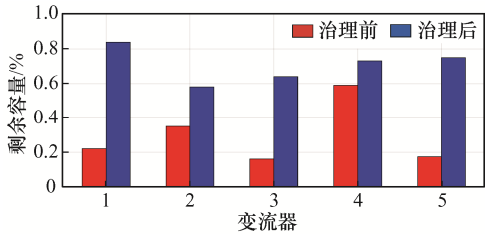


图 12　电能质量治理前后变流器的剩余容量变化

Fig. 12 Changes in residual capacity of converter before and after power quality governance

3.3 传统方法对比及电能质量治理效果分析

在微网群电能质量治理初期，准确识别与定位其电能质量问题至关重要，其直接影响到后续治理措施的有效性。本文采用传统电能质量评估方法(即限值判断)与本研究方法进行对比验证。其中，限值判断中采用各指标的国家标准限值，具体评估结果见表 6。

表 6　超短期电能质量评估方法对比结果

Tab. 6 Result of comparison of ultra-short-term power quality assessment method with traditional method

方法	电压偏差	频率偏差	三相不平衡	THD	电压波动
传统评估方法	0	0	0	0	0.49
本文评估方法	0.24	0	0.99	0	1.00

为进一步验证电能质量的迭代治理效果，本文将运行 2 周的电能质量数据进行采样评估，通过改进 CRITIC 法对短期的电能质量治理前及治理后的工况进行评分。该方法充分考虑了指标的离散性与指标间的冲突性和变异性，同时在数据采集过程中考虑了相数对电能质量指标的影响。通过此方法确定了各项电能质量指标的权重，并依据表 1 各电能质量指标的等级划分，对各指标进行等级量化处理，以此反映这些指标的概率特性。微网群电能质量治理效果评估验证原理如图13所示。最终，采用加权计算方式得出了微网群的电能质量评价分数，见表 7，直观显示如图14所示。此外，为了更有效地将电能质量控制在国家标准范围内，充分调用所有变流器对电能质量进行综合治理。治理效果如图 15 所示。

表 6 数据显示，改进方法在电能质量评估中揭

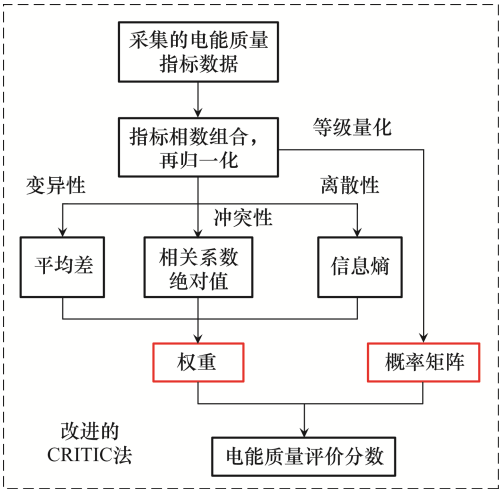


图 13　微网群电能质量治理效果评估验证原理

Fig. 13 Schematic of assessment and verification of power quality governance effect on microgrid cluster

表 7　微网群电能质量治理前后的评估分数

Tab. 7 Assessment scores before and after power quality governance of microgrid cluster

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
治理前	50	63	73	72	72	70	68	70	70	70
治理后	60	80	80	80	80	82	85	86	89	90

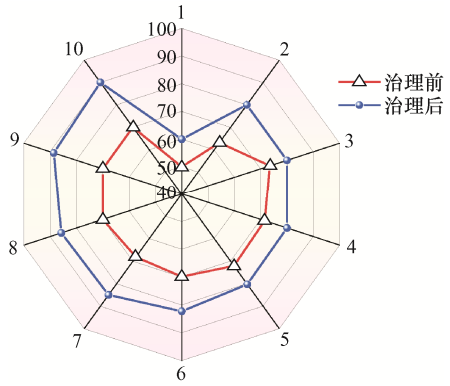
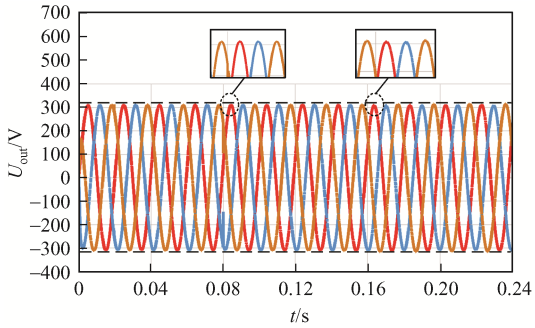


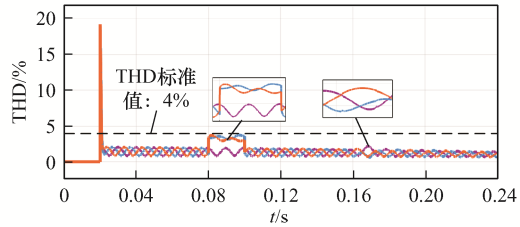
图 14　微网群电能质量治理前后的评价分数

Fig. 14 Assessment scores before and after power quality governance of microgrid cluster

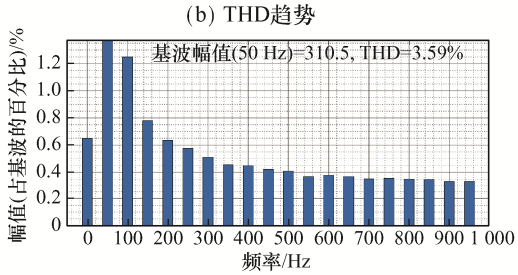
示了更多指标越限，表明改进方法在捕捉电能质量的波动性方面更具优势；相比之下，传统方法仅指出了电压波动越限，对于接近但未超出限值的情况，可能无法充分反映实际运行中的潜在问题。表 7 数据显示，治理前微网群电能质量评分集中在60~70 分，电能质量水平较低，存在明显的质量问题；经过针对性治理后，评分跃升至 80~90 分区间，电



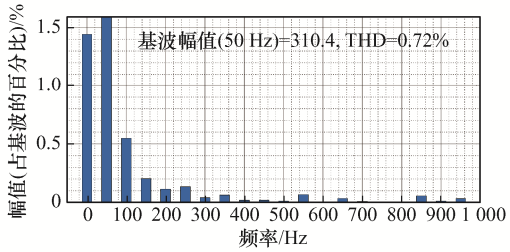
(a) 电压波形



(b) THD趋势



(c) 0.08 s非线性负载接入时



(d) 0.16 s不平衡负载接入时

图 15 微网群电能质量深入治理的效果

Fig. 15 Effect of in-depth power quality governance of microgrid cluster

能质量显著改善，达到良好状态。由图 14 可见，治理后曲线显著提升，远超治理前曲线，直观地证明了电能质量治理策略的有效性，验证了本文治理方案对提升微网群电能质量的显著作用。

4 结语

本文提出了 1 种基于超短期评估的微网群电能质量控制策略，构建了“评估–治理–再评估”的闭环框架。通过超短期电能质量实时评估与定位，采用分布式共识算法协同控制多变流器，实现了电能质量任务分配及治理。治理后，经评估验证，微网群电能质量分数可从约 60 分提升至 80 分，谐波畸变率有效降低。与传统方法相比，该策略能快速地捕捉到电能质量的变化趋势，在微网群系统层面量化、定位与治理电能质量问题，为微网群稳定运行提供有力支持。此外，本研究目前暂未探讨配电网工况对微网群电能质量的影响，同时，鉴于微网群在地理范围上相对较小，通讯延迟与误差影响可能不显著，所构建模型为即时通讯研究。在未来研究中，会进一步引入配电网工况因素，并探索将采样、计算、通讯等环节中的延时与误差融入模型，以期更全面地评估和优化微网群的电能质量，深化其治理效果。

参考文献：

[1] Hatziargyriou N. Microgrids: Architectures and Control [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2014: 1-24.

[2] Zhou Jianguo, Xu Yinliang, Sun Hongbin, et al. Distributed power management for networked AC-DC microgrids with unbalanced microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3): 1655-1667.

[3] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 107-115.
Zhi Na, Xiao Xi, Tian Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 107-115. (in Chinese)

[4] Zhao Zhuoli, Guo Juntao, Luo Xi, et al. Distributed robust model predictive control-based energy management strategy for islanded multi-microgrids considering uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 2107- 2120.

[5] 董雷, 杨子民, 乔骥, 等. 基于分层约束强化学习的综合能源多微网系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1436-1453.
Dong Lei, Yang Zimin, Qiao Ji, et al. Optimal scheduling of integrated energy multi-microgrid system based on hierarchical constraint reinforcement learning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1436-1453. (in Chinese)

[6] 蔡瑶, 卢志刚, 潘尧, 等. 计及多重差异的交直流混合多能微网多时间尺度优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3392-3410.
Cai Yao, Lu Zhigang, Pan Yao, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of AC-DC hybrid multi-energy micro-

grid considering multiple differences [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3392-3410. (in Chinese)

[7] Mishra N, Singh B, Cheng K W E. Power quality assessment of CPUC based solar photovoltaic system with NLMS for grid-tied applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 655-665.

[8] 赵洪山, 李静璇, 米增强, 等. 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 1-8.
Zhao Hongshan, Li Jingxuan, Mi Zengqiang, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese)

[9] Chen Yinyu, Chen Minwu, Cui Mingjian, et al. Voltage unbalance probability pre-assessment of electrified railways with uncertain traction load [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1509-1520.

[10] Zhang Yutian, Gu Danzhen, Huang Ruanming, et al. A power system adequacy evaluation method based on tiered indicators and AHP-entropy-TOPSIS [C]// 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin, China, 2023: 1334-1340.

[11] Shi Hongtao, Li Yifan, Jiang Zhongnan, et al. Comprehensive power quality evaluation method of microgrid with dynamic weighting based on CRITIC [J]. Measurement and Control, 2021, 54(5-6): 1097-1104.

[12] Rao S N V B, Kumar Y V P, Pradeep D J, et al. Power quality improvement in renewable-energy-based microgrid clusters using fuzzy space vector PWM controlled inverter [J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4663.

[13] Golla M, Chandrasekaran K, Simon S P. PV integrated universal active power filter for power quality enhancement and effective power management [J]. Energy for Sustainable Development, 2021, 61: 104-117.

[14] 付勉, 刘志涵, 宋振浩, 等. 配电网络电能质量综合治理设备优化配置策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 336-344.
Fu Mian, Liu Zhihan, Song Zhenhao, et al. Optimal allocation strategy for comprehensive control equipment of power quality in distribution area [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 336-344. (in Chinese)

[15] Li Xiaotong, Wang He, Li Jinling. Power quality control and multi-objective optimization compensation strategy for grid-connected multi-functional inverters [C]// 2024 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Hangzhou, China, 2024: 969-974.

[16] 韦斌，隋宇，邓小玉，等. 多微网解列运行模式切换控制方法研究[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 100-105.
Wei Bin, Sui Yu, Deng Xiaoyu, et al. Research on switching control method for splitting operation mode of multi-microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 100-105. (in Chinese)

[17] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量标准应用指南[M]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
National Voltage and Current Level and Frequency Standardization Technical Committee. Power Quality Standard Application Guide [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018. (in Chinese)

[18] 饶志, 王科, 谭俊丰, 等. 基于最优带宽的广东海上风电出力非参数核密度估计与分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 274-282.
Rao Zhi, Wang Ke, Tan Junfeng, et al. Non-parametric kernel density estimation and analysis of Guangdong offshore wind power output based on optimal bandwidth [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(12): 274-282. (in Chinese)

[19] Burgos-Mellado C, Llanos J J, Cárdenas R, et al. Distributed control strategy based on a consensus algorithm and on the conservative power theory for imbalance and harmonic sharing in 4-wire microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1604-1619.



师洪涛

作者简介：

师洪涛(1984—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：新能源发电与并网技术。E-mail：peneg@sina.com。

锁忠梅(1997—)，女，通信作者，硕士研究生。研究方向：微网群电能质量评估与治理。E-mail：18295087044@163.com。

蒙欣欣(1999—)，女，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：新能源发电与并网技术。E-mail：m2899103361@163.com。

张白(1981—)，男，博士，副教授。研究方向：智能装备研发与电气测量技术。E-mail：zhangbai6402@163.com。

朱嘉豪(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电与并网技术。E-mail：owlxiaogui@163.com。

(责任编辑：耿越)