DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.132 **中图分类号**：TK514 **文献标志码**：A

多功能光伏并网逆变器优化控制策略

江周鹏，郝武帮，李 琰
(云南民族大学电气信息工程学院，昆明 650504)

摘要：随着对传统电网的安全稳定性提出更高要求，能源危机和环境污染问题日益加剧，“绿色”“低碳”成为电力系统发展的迫切需求，基于此现状提出一种含有电能质量治理的多功能光伏并网逆变器。根据改进自适应谐波检测法检测出并网电流中的谐波分量，随后通过准比例谐振对指令电流进行跟踪控制。通过主客观CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)博弈论组合赋权法，建立电能质量综合评估模型，对谐波分量、无功分量进行综合评估，然后考虑到实际中逆变器容量有限的情况下，构建容量匹配系数，对突出问题进行重点补偿。最后，通过仿真验证并网逆变器在并网过程中对谐波分量和无功分量进行优化补偿，改善了并网点的电能质量，大大提高了逆变器的利用率。因此，验证了所提策略的有效性和可行性。

关键词：光伏并网逆变器；电能质量；主客观赋权法；最优补偿；容量匹配

Optimal Control Strategy for Multi-functional Grid-connected Photovoltaic Inverter

JIANG Zhoupeng, HAO Wubang, LI Yan
(School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China)

Abstract: With the higher requirements for the safety and stability of traditional power grids, the energy crisis and environmental pollution problems are increasing. As a result, “Green” and “Low carbon” have become the urgent needs of the development of power systems. Based on the current situation, a multi-functional photovoltaic grid-connected inverter with power quality control is proposed. First, according to an improved adaptive harmonic detection method, the harmonic component in the grid-connected current is detected. Second, the command current is tracked and controlled by quasi-proportional resonance. Through the subjective and objective criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) game theory combination weighting method, a comprehensive evaluation model of power quality is established to evaluate the harmonic and reactive components. Third, considering the limited capacity of the inverter in practice, a capacity matching coefficient is formulated to compensate the dominating problems. Finally, simulation results show that the harmonic and reactive components are optimized and compensated in the grid-connection process of the inverter, which improves the power quality at the grid-connected point and greatly increases the utilization rate of the inverter. Therefore, the effectiveness and feasibility of the proposed strategy are verified.

Keywords: Grid-connected photovoltaic inverter; power quality; subjective and objective weighting method; optimal compensation; capacity matching

随着“双碳”目标的推行，大力发展可再生能源是推动绿色低碳发展、加快生态文明建设的重要保障。在微电网技术中，逆变器作为可再生能源的并网接口，起到了重要的作用[1-2]。然而用电负载中由于含有非线性负载、无功负载，对电能质量产生了巨大影响[3]。

由于传统并网逆变器不参与电能质量管理，现有学者提出多功能并网逆变器。多功能并网逆变器

收稿日期：2023-03-14；**修回日期**：2023-05-12；**录用日期**：2023-07-17；**网络首发日期**：2023-08-17
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62062068)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 62062068

复合了传统并网逆变器并网的功能，还能对电能质量进行治理[4-6]。因此，在多功能并网逆变器中对电网中产生的谐波、无功、不平衡分量进行检测、跟踪、控制成为了关键。LCL 型并网逆变器具有优越的高频谐波抑制能力而受到广泛重视，三相并网逆变器采用 LCL 滤波器，具有更优的高频谐波衰减性，滤波效果更佳[7-10]。目前，谐波的治理和无功补偿方面主要采用有源滤波器 APF(active power filter)和静止无功发生器 SVG(static var generator)。文献[11]通过研究分析 APF 结构，建立等效电路模型，简化了电流检测，既不需要分离正、负序电流，也不需要提取无功电流和各次谐波电流；文献[12]提出在两相静止坐标系下基于改进的功率理论 CPT(conservative power theory)，实现了对负荷电流补偿分量跟踪输出，以及在畸变电压干扰下的输出电流控制；文献[13]针对传统光伏并网逆变器跟踪交流信号在静态误差及抗干扰性差的缺点，设计了一种电流准比例谐振 QPR(quasi-proportional resonance)控制器，克服了传统比例积分 PI(proportional integral)控制以及比例谐振 PR(proportional resonance)控制的缺点。

针对微电网电能质量问题，文献[14]提出了当微电网存在非线性负载时，通过虚拟谐波阻抗对微电网谐波功率进行分配，并对逆变器虚拟谐波阻抗调节范围和影响因素进行分析，主要研究了一种以改善电压质量为目标的微电网谐波功率分配；文献[15]提出了开环和闭环 2 种谐波电流补偿的动态饱和技术，通过分析这 2 种技术在提高逆变器额定电流容量的同时，也提高了电网的电能质量；文献[16]针对配电网络电能质量治理设备缺乏全局统筹配置的现状，提出一种基于多目标粒子群优化算法对谐波、无功及三相不平衡治理设备的综合优化配置策略；文献[17]在考虑容量限制的情况下，提出了一种熵 Shapely 赋权法，对并网点电能质量中的突出问题进行重点补偿；文献[18]基于 G1 法和混合变权原理，建立微电网电能质量综合评估模型，利用非支配排序遗传算法进行求解，实现在最小补偿容量下，对电能质量指标进行优化；文献[19]采用主客观变异系数法，兼顾了主观评估和客观评估；文献[20]提出了一种基于广义瞬时无功功率谐波检测法的光伏逆变器控制策略，同时根据逆变器容量有限的情况下，提出了一种根据功能优先级排序的容量匹配策略。

综上所述，对电能质量进行评估是将每项指标权重反馈给并网点并进行补偿优化[21]。目前权重评估方法有主观赋权法、客观赋权法、主客观赋权法，其中主观赋权法由专家对各属性重要程度进行评估，但缺乏实际数据带来的客观性；客观赋权法依靠实际数据进行权重计算，但忽略了专家对各项指标重要性的主观判断；主客观赋权法兼具了主观性、客观性。本文利用主客观 CRITIC 博弈论组合赋权法建立电能质量综合评估模型，提出一种以电能质量综合指标最优为目标的算法。然后考虑逆变器容量有限，提出一种拉格朗日乘子法最优补偿匹配策略，其不仅能够实现微电网中逆变器的灵活控制，还能提高电能质量。

1　多功能光伏逆变器控制策略

1.1　光伏逆变器的系统结构

图 1 为多功能光伏并网逆变器系统结构，其中：直流端由光伏发电系统和并联的母线电容 C_{dc}、并网逆变器组成；交流侧为 LCL 滤波结构；L_1 为逆变器侧电感，L_2 为电网侧电感，C 为滤波器的电容，电阻 R 用来抑制 LCL 中的固定谐振；u_g 为公共耦合点 PCC(point of common coupling)的电压；网侧端分别接有非线性负荷及无功负荷。

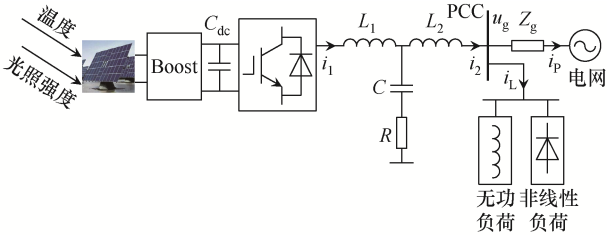


图 1　光伏并网逆变器系统结构

Fig. 1 Structure of grid-connected photovoltaic inverter system

在光伏多功能并网逆变器中，不仅需要并网，还需要完成电能质量调节，对谐波进行抑制和补偿、无功功率补偿，因此，要对指令电流进行跟踪、检测。多功能光伏并网控制策略如图 2 所示。图 2 中，通过对并网功率电流 i_{sabc} 和谐波电流 i_{habc}、无功电流 i_{qabc} 进行复合叠加，得到指令电流 i_{ref}，然后对指令电流进行跟踪控制。

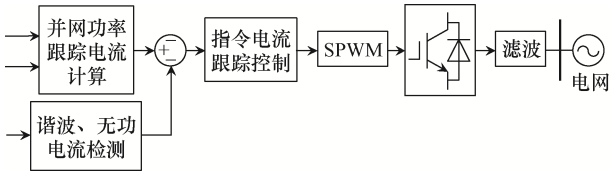


图 2 多功能光伏并网控制策略

Fig. 2 Grid-connected control strategy for multi-functional photovoltaic

1.2 指令电流的检测

目前，广泛采用的是瞬时无功功率理论的谐波检测方法(p-q，i_{p}-i_{q})，但是有一定的局限性，即：p-q 检测方法在电网电压畸变和三相电网不对称时，不能正确地检测出谐波电流；i_{p}-i_{q} 检测方法虽然克服了电网电压问题，但会受到低通滤波器 LPF(low- pass filter)结构和参数的影响。文献[22]提出了一种自适应的谐波检测方法，采用误差信号作为自变量对步长进行更新，当误差较大时增大步长，提高检测的动态性能，当误差较小时减小步长，保证检测的稳态精度。其中并网逆变器三相电流的表达式为

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}} = i_{\mathrm{af}} + i_{\mathrm{ah}} \\ i_{\mathrm{b}} = i_{\mathrm{bf}} + i_{\mathrm{bh}} \\ i_{\mathrm{c}} = i_{\mathrm{cf}} + i_{\mathrm{ch}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：i_{a}、i_{b}、i_{c}为并网逆变器的三相电流；i_{af}、i_{bf}、i_{cf}为基波电流；i_{ah}、i_{bh}、i_{ch}为谐波电流。

首先利用 Clark 变换，将三相电流由三相静止坐标系(abc)变为两相静止坐标系($\alpha\beta$)，有

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{32} \begin{bmatrix} i_{\mathrm{a}} \\ i_{\mathrm{b}} \\ i_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{C}_{32}$为 Clark 变换矩阵，表示为

$$\boldsymbol{C}_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{-1}{2} & \dfrac{-1}{2} \\ 0 & \dfrac{\sqrt{3}}{2} & \dfrac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

再利用 park 变换，由两相静止坐标系($\alpha\beta$)变为旋转坐标系(dq)，有

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \boldsymbol{C} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{C}$为 park 变换矩阵，表示为

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \tag{5}$$

最后，得出

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sum\limits_{j=1}^{\infty} \pm i_j \cos[(n \mp 1)\omega t - \theta_n] \\ \sum\limits_{j=1}^{\infty} \pm i_j \sin[(n \mp 1)\omega t - \theta_n] \end{bmatrix} \tag{6}$$

在三相交流系统中，dq 坐标系分离出 n 次谐波的分量，则同时就滤除 abc 坐标系下 j=n−1 次谐波的三相负序交流变量和j=n+1 次谐波的三相正序交流变量，而在系统中主要滤除的是 5、7、11、13、17、19、…次谐波，得出

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum\limits_{j=1}^{\infty} \pm i_j \cos(\mp 6n\omega t - \theta_n) \\ \sum\limits_{j=1}^{\infty} \pm i_j \sin(\mp 6n\omega t - \theta_n) \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中，当 j=6n+1 时取上符号，j=6n−1 时取下符号。由式(7)可知，则 dq 坐标系分离出 6n 次谐波的分量，就同时滤除了 abc 坐标系下 6n 次谐波的正、负序分量。

谐波电流检测如图 3 所示。图 3 中，通过锁相环对 U_{A} 进行锁相，利用正余弦(sin-cos)发生器产生与 A 相相同频率、相位的信号，再通过 park 变换、Clark 变换得到有功电流分量 i_d 和无功电流分量 i_q，然后通过自适应滤波器 SAF(self adapting filter)得到有功直流分量 i_d 和无功直流分量 i_q，再然后经过 park 和 Clark 的逆变换，得到基波三相电流 i_{af}、i_{bf}、i_{cf}，最后就能分离出谐波电流 i_{ah}、i_{bh}、i_{ch}。

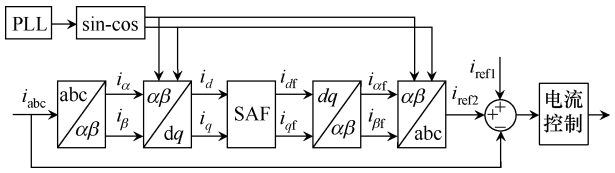


图 3　谐波电流检测

Fig. 3 Harmonic current detection

1.3 指令电流的跟踪控制

在电流控制环节中，PI 控制器比较简单，对高频信号的增益较低，对低频信号有放大的作用，所以对交流信号控制效果较差。PR 控制器通过在该频率引入理想的增益、其他频率实现零增益，对系统实现零稳态误差，但是各频率会产生相互干扰。文献[23]提出了一种 QPR 控制环节，对系统中的基波和多次谐波分别进行控制，来实现对负荷基波正序无功电流、基波负序电流、谐波电流进行综合补偿。通过 1.2 节可知，只需要通过 n 次准谐振控制器来控制 $n-1$ 次的三相负序交流和 $n+1$ 次的三相正序交流。然而在实际情况中，背景谐波主要出现在 5、7、11、13、17、19、…次谐波上，并且随着背景谐波次数的升高，背景谐波含量会逐渐降低，因此本文只考虑了 5、7、11、13、17、19 次谐波。

准比例指令电流控制如图 4 所示。图 4 中：K_p 为比例增益系数；$K_{R(6n\pm1)}$为谐振控制增益系数；ω_c 为截止频率；ω_0 为谐振频率。

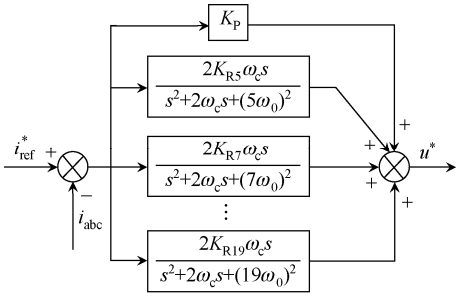


图 4　准比例指令电流控制

Fig. 4 Quasi-proportional command current control

2　电能质量容量评估策略

2.1 层次分析法

根据专家的主观经验，构造一个比较矩阵 $\boldsymbol{A}_{ij}$，表示与 j 相比，指标 i 的重要性，其中元素 $a_{ij}a_{ji}=1$，在层次分析法中，所构造的判断矩阵都是正互反矩阵，规则见表 1。

表 1　层次分析比较规则

Tab. 1 Comparison rules in analytic hierarchy process

标度	含义
1	2 个因素相比，具有同样的重要性
3	2 个因素相比，一个因素比另一个因素稍显重要
5	2 个因素相比，一个因素比另一个因素明显重要
7	2 个因素相比，一个因素比另一个因素强烈重要
9	2 个因素相比，一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 i 与 j 比较判断 a_{ij}，则因素 j 与 i 比较的判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

构造完判断矩阵后，要对矩阵进行一致性检验。一致性指标(consistency index) δ_{CI} 公式为

$$\delta_{CI}=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{8}$$

式中：λ_{max} 为最大特征根；n 为矩阵的阶数。

对应于平均随机一致性指标(random index) δ_{RI}，一致性比例(consistent ratio) δ_{CR} 为

$$\delta_{CR}=\frac{\delta_{CI}}{\delta_{RI}} \tag{9}$$

若由式(9)计算出来的判断矩阵满足 $\delta_{CR}<0.1$，那么就满足了一致性，否则就要对判断矩阵进行修改，直到满足 $\delta_{CR}<0.1$。

经过一致性检验后，对比较矩阵进行权重计算，最后由算术平均公式求得主观权重 ω_i 为

$$\omega_i=\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{j=1}^{n}\left(\prod_{i=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}} \tag{10}$$

式中：i，j=1,2,…,n；$\prod_{j=1}^{n}a_{ij}$ 为矩阵 $\boldsymbol{A}_{ij}$ 中第 i 行所有元素的乘积。通过层次分析法求得各项指标的主观权重 $\boldsymbol{\omega}_i=[\omega_{i1},\omega_{i2},\cdots,\omega_{in}]$。

2.2 CRITIC 客观赋权法

不同于熵权法，CRITIC 客观赋权法克服了所测指标的波动性，通过指标差异波动情况来分配给

各个指标权重。

1)数据标准化处理

由于每个指标量纲不同，这样会对评价结果造成影响，所以要对各个指标进行无量纲处理，处理后得到新的标准化矩阵 $\boldsymbol{X}'_{ij}$。

若使用的指标越大越好(正向指标)，则有

$$x'_{ij}=\frac{x_j-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{11}$$

式中：x_j 为指标矩阵的列数据指标；$x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为指标的最大值和最小值。

若使用的指标越小越好(逆向指标)，则有

$$x'_{ij}=\frac{x_{\max}-x_j}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{12}$$

2)指标变异性

通过指标内的取值差异波动情况来分配权重，标准差越大，反映数值的差异就越大，就应该给指标分配更多的权重，具体表示为

$$\begin{cases}\overline{x}_j=\dfrac{1}{n}\displaystyle\sum_{i=1}^{n}x_{ij}\\ S_j=\sqrt{\dfrac{\displaystyle\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\overline{x}_j)^2}{n-1}}\end{cases} \tag{13}$$

式中：$\overline{x}_j$ 为第 j 个指标的均值；S_j 为 j 个指标的标准差。

3)指标冲突性

通过相关系数来反映指标的冲突性，冲突性越小，反映的信息就越少，就应该减少指标的权重。

$$\begin{cases}R=\dfrac{\displaystyle\sum_{j,k=1}^{n}(x_{ij}-\overline{x}_j)(x_{ik}-\overline{x}_k)}{\sqrt{\displaystyle\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}-\overline{x}_j)^2\sum_{k=1}^{n}(x_{ik}-\overline{x}_k)^2}}\\ R_j=\displaystyle\sum_{i=1}^{n}(1-r_{ij})\end{cases} \tag{14}$$

式中：r_{ij} 为第 i 个指标和第 j 个指标的相关系数；R_j 为指标的冲突性。

4)权重计算

通过式(13)和式(14)，得到第 j 个指标的信息量 C_j 为

$$C_j=S_jR_j \tag{15}$$

根据信息量 C_j 的大小来进行分配权重，客观权重 ω_j 的计算公式为

$$\omega_j=\frac{C_j}{\displaystyle\sum_{j=1}^{n}C_j} \tag{16}$$

最后，通过 CRITIC 客观赋权法得到了各个指标的客观权重 $\boldsymbol{\omega}_j$=[ω_{j1}, ω_{j2}, ⋯ , ω_{jn}]。

2.3 主客观 CRITIC 博弈论组合赋权法

对主观层次法和 CRITIC 客观赋权法进行组合赋权，使得组合赋权法更具有客观性和科学性。本文采用线性加权法进行组合赋权，组合权重 $\boldsymbol{\omega}$ 为

$$\boldsymbol{\omega}=\lambda_1\boldsymbol{\omega}_i+\lambda_2\boldsymbol{\omega}_j \tag{17}$$

式中：λ_1 为主观分析的权重系数；λ_2 为客观分析的权重系数。

根据博弈论的思想，建立目标函数和约束条件分别为

$$\begin{cases}\min(\|\boldsymbol{\omega}-\boldsymbol{\omega}_i\|_2+\|\boldsymbol{\omega}-\boldsymbol{\omega}_j\|_2)=\\ \quad\min(\|\lambda_1\boldsymbol{\omega}_i+\lambda_2\boldsymbol{\omega}_j-\boldsymbol{\omega}_i\|_2+\|\lambda_1\boldsymbol{\omega}_i+\lambda_2\boldsymbol{\omega}_j-\boldsymbol{\omega}_j\|_2)\\ \text{s.t.}\ \ \lambda_1+\lambda_2=1,\lambda_1\geqslant 0,\lambda_2\geqslant 0\end{cases} \tag{18}$$

通过组合权重 $\boldsymbol{\omega}$ 与 $\boldsymbol{\omega}_i$ 和 $\boldsymbol{\omega}_j$ 离差之和为最小目标，寻找最优的 λ_1 和 λ_2，此时得到的就是最优组合权重 $\boldsymbol{\omega}^*$。对式(18)求导，取得最小值的条件为

$$\begin{cases}\lambda_1\boldsymbol{\omega}_i\boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}+\lambda_2\boldsymbol{\omega}_i\boldsymbol{\omega}_j^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{\omega}_i\boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}\\ \lambda_1\boldsymbol{\omega}_j\boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}+\lambda_2\boldsymbol{\omega}_j\boldsymbol{\omega}_j^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{\omega}_j\boldsymbol{\omega}_j^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{19}$$

然后对组合系数 λ_1、λ_2 进行归一化，得到最优组合权重为

$$\boldsymbol{\omega}^*=\lambda_1^*\boldsymbol{\omega}_i+\lambda_2^*\boldsymbol{\omega}_j \tag{20}$$

通过上面的分析，就能对谐波分量、无功分量进行综合评估。

2.4 多功能逆变器补偿匹配策略

基于 2.1 节的电能质量进行综合评价，考虑到实际中逆变器容量有限，在有限的容量下，对谐波分量、无功分量进行治理，以寻求最优的补偿匹配策略。

根据补偿策略建立的目标函数为

$$M=\omega_1 k_1 I_{\mathrm{h}}+\omega_2 k_2 I_{\mathrm{q}} \tag{21}$$

式(21)需满足

$$\begin{cases} S=\sqrt{P^2+Q^2}=3U\sqrt{I_0^2+k_1^2 I_{\mathrm{h}}^2+k_2^2 I_{\mathrm{q}}^2} \\ \text{s.t.}\quad 0\leqslant k_i\leqslant 1 \quad i=1,2 \end{cases} \tag{22}$$

式中：k_1、k_2分别为谐波分量、无功分量的补偿系数；I_0、I_{h}、I_{q}分别为逆变器输出的有功电流分量、谐波电流分量、无功电流分量。通过拉格朗日乘子法，求出最优的补偿系数，构造拉格朗日函数为

$$L=\omega_1 k_1 I_{\mathrm{h}}+\omega_2 k_2 I_{\mathrm{q}}+\lambda(I_0^2+k_1^2 I_{\mathrm{h}}^2+k_2^2 I_{\mathrm{q}}^2-A) \tag{23}$$

式中，$A=\dfrac{S^2}{9U^2}$。求偏导得到

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial k_1}=\omega_1 I_{\mathrm{h}}+2\lambda k_1 I_{\mathrm{h}}^2=0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial k_2}=\omega_2 I_{\mathrm{q}}+2\lambda k_2 I_{\mathrm{q}}^2=0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda}=I_0^2+k_1^2 I_{\mathrm{h}}^2+k_2^2 I_{\mathrm{q}}^2-A=0 \end{cases} \tag{24}$$

由式(24)求得各补偿系数和组合系数为

$$\begin{cases} k_1=\dfrac{\omega_1}{I_{\mathrm{h}}}\sqrt{\dfrac{A-I_0^2}{\omega_1^2+\omega_2^2}} \\ k_2=\dfrac{\omega_2}{I_{\mathrm{q}}}\sqrt{\dfrac{A-I_0^2}{\omega_1^2+\omega_2^2}} \\ \lambda=\sqrt{\dfrac{\omega_1^2+\omega_2^2}{4(I_0^2-A)}} \end{cases} \tag{25}$$

当所需要补偿的各个分量超过逆变器的剩余容量时，通过构造容量匹配模型，使得所需补偿的各个分量要小于逆变器的容量，约束条件为

$$\begin{cases} \sqrt{P^2+Q^2}>S \\ I_{\mathrm{h1}}^*+I_{\mathrm{q1}}^*=\alpha(I_{\mathrm{h1}}+I_{\mathrm{q1}}) \\ 0<\alpha<1 \end{cases} \tag{26}$$

式中：I_{h1}、I_{q1}分别为通过补偿系数得到的谐波电流分量、无功电流分量；I_{h1}^*、I_{q1}^*分别为采用匹配系数后得到的谐波电流分量、无功电流分量；α为匹配系数。通过逆变器额定容量的大小来进行收敛，使得补偿匹配过后的容量小于等于逆变器额定容量。

多功能并网补偿匹配策略框图如图 5 所示。

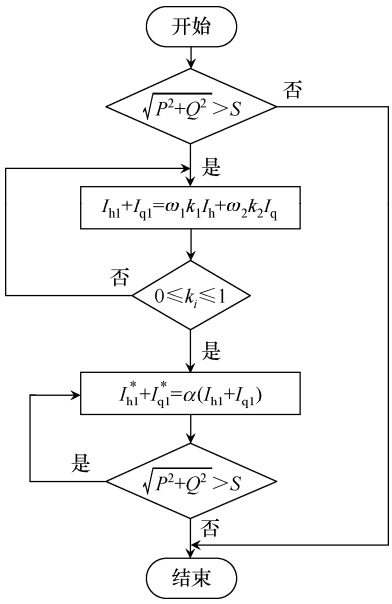


图 5　容量补偿策略框图

Fig. 5 Block diagram of capacity compensation strategy

3　仿真分析

本文基于 Matlab/Simulink 对所提控制策略进行仿真分析，具体相关仿真参数见表 2。

表 2　相关仿真参数

Tab. 2 Related simulation parameters

参数	数值
逆变器功率/kW	20
直流侧母线电压/V	750
网侧电压/V	380
开关频率f_{s}/kHz	10
电网电压频率f_{N}/Hz	50
不可控整流电阻/Ω	50
交流侧滤波电感L_{f}/mH	2.5
负荷电阻/Ω	5
负荷电感/mH	2
负荷电容/μF	15

本文对多功能光伏并网逆变器控制策略进行仿真分析，分别对谐波电流检测、跟踪控制和并网点功率进行采样分析。并网点电流仿真波形如图 6 所示。

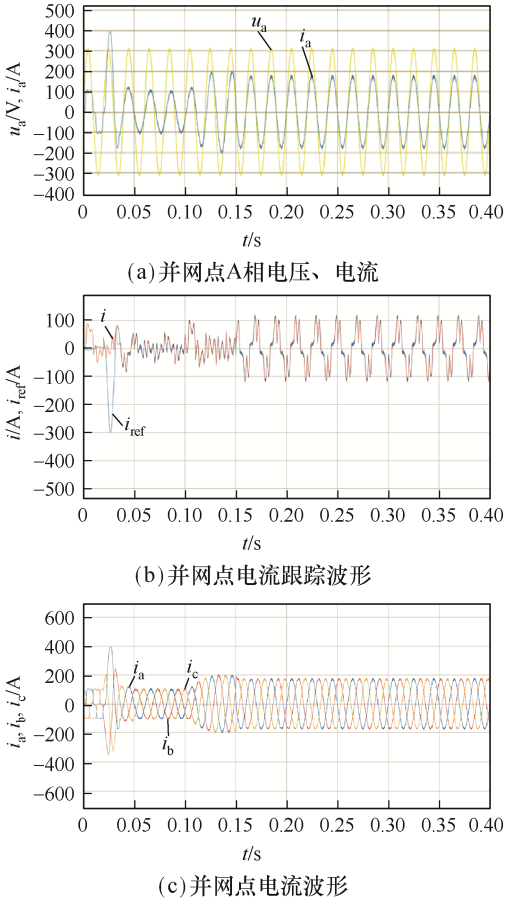


图 6 并网点电流仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of current at grid-connected point

图 6(a)为并网点 A 相电压 u_a、电流 i_a 的波形，在 0 s 时接入非线性负荷和无功负荷，此时电流呈现畸变状态；在 0.02 s 时接入多功能并网逆变器，先对谐波分量进行补偿，当谐波分量补偿完成后，并网点的电流呈现正弦波，但是由于无功分量的存在，并网点的电流相位不一致；然后对无功分量进行补偿，在 0.15 s 可以看到，电压和电流相位基本保持一致。图 6(b)为指令电流 i_{ref} 和实际输出电流 i 的波形，可以看到，即使并网电流中加入了谐波分量，多功能并网逆变器也能快速、实时地跟踪指令电流。图 6(c)为并网逆变器输出电流波形，在 0 s 时由于非线性负荷，并网点电流波形呈现为畸变状态，在接入并网逆变器后对并网点谐波电流进行补偿，在 0.10 s 后对并网点谐波和无功分量进行全补偿，最后使其变成无畸变的三相正弦波。

并网点完全补偿波形如图 7 所示。由图 7 看出，在 0.02 s 之前多功能并网逆变器没有投入补偿，由于并网点电流含有谐波分量和无功分量，此时并网点的功率呈现振荡状态；在 0.02 s 之后对并网点电流进行谐波分量补偿；在 0.15 s 之后再对并网点电流进行无功补偿，此时谐波分量和无功分量全部补偿。图 8 为在容量有限情况下的最优补偿控制波形，在 0.02 s 之前并网逆变器没有投入补偿，0.02 s 后，根据补偿系数，先对危害比较大的谐波进行补偿；0.15 s 后再对无功分量进行补偿，由于并网逆变器容量有限，其中的谐波分量、无功分量没有完全补偿，存在一定的畸变。

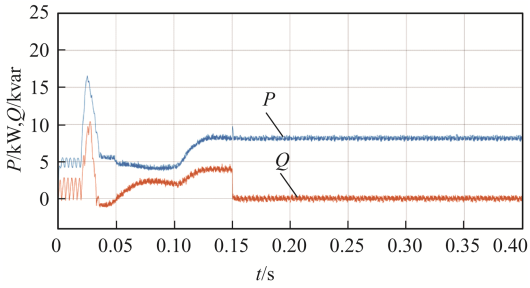


图 7 并网点完全补偿波形

Fig. 7 Fully-compensated waveforms at grid-connected point

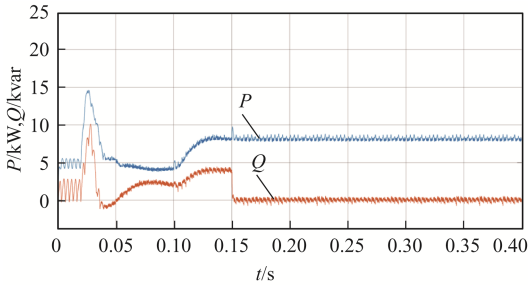


图 8 并网点优化补偿波形

Fig. 8 Optimized and compensated waveforms at grid-connected point

不同阶段并网点电流畸变率谐波分析如图 9 所示。由图 9(a)可以看出，逆变器未进行补偿时，谐波畸变率比较大；当逆变器容量比较大时，对谐波和无功分量进行全补偿；当逆变器的容量有限时，采用主客观博弈论赋权法得到谐波和无功变量的权重分别为 0.593、0.407，再通过容量优化匹配策略计算，使需要补偿的谐波分量和无功分量小于逆变器的容量，此时完全补偿时需要投入容量 14.43 kV·A，而

优化补偿时需要投入容量 11.96 kV·A，优化补偿比完全补偿节约了 2.47 kV·A 的容量，保证了逆变器在有限容量下也可以运行，减小了开发的运行成本，并验证了所提策略的可行性。

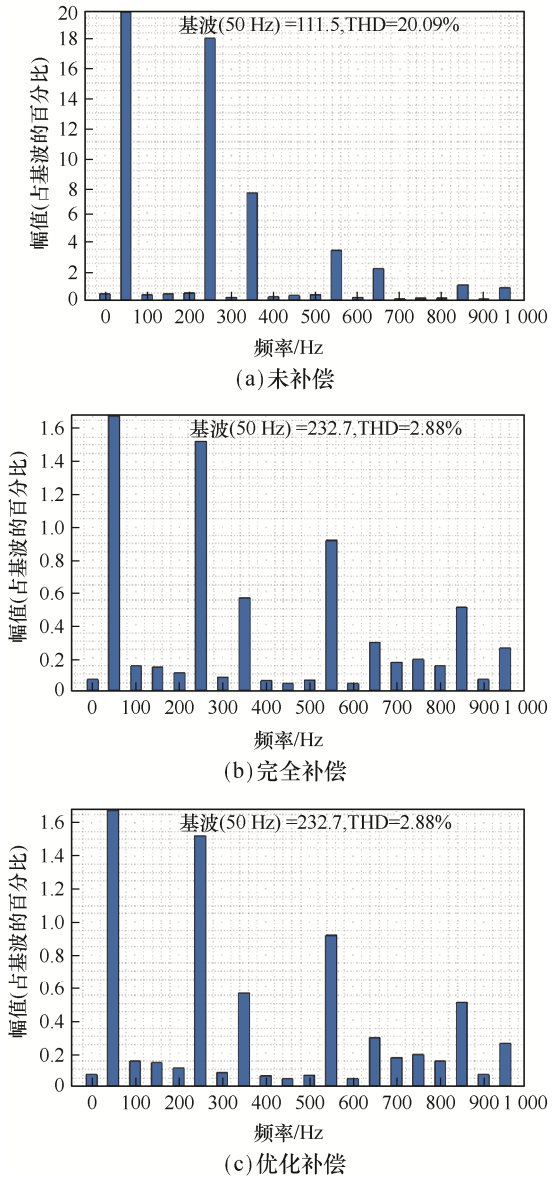


图 9　并网点电流谐波分析

Fig. 9 Harmonic analysis of current at grid-connected point

4　结语

针对微电网的电能质量问题，利用自适应滤波法对谐波电流进行检测，采用准比例谐振控制器对电流进行跟踪控制。基于现状，本文提出了主客观 CRITIC 博弈论优化容量匹配策略，针对谐波分量和无功分量赋予不同的权重，对突出问题进行重点补偿。该方法简单有效，能有效地利用微电网中分布式电源的特点，对于改善微电网的电能质量有很好的实用性。

参考文献：

[1] Ehsan A, Cheng Ming, Yang Qiang. Scenario-based planning of active distribution systems under uncertainties of renewable generation and electricity demand [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 56-62.

[2] Xu Tao, Ren Yi, Guo Lingxu, et al. Multi-objective robust optimization of active distribution networks considering uncertainties of photovoltaic [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107197.

[3] 黄鹏, 戴威, 张莹, 等. 兼具有源电力滤波器功能的多功能并网逆变器控制[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 107-114.
Huang Peng, Dai Wei, Zhang Ying, et al. Multi-function grid-connected inverter control with APF function [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 107-114. (in Chinese)

[4] 刘宏达, 周磊. 多功能并网逆变器及其在接入配电系统的微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2649-2658.
Liu Hongda, Zhou Lei. A multi-functional grid-connected inverter and its application in micro-grid access to distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2649-2658. (in Chinese)

[5] 曾江, 冯健磊, 陈书樑, 等. 具有谐波治理功能的虚拟谐波电阻型储能逆变器控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 86-91.
Zeng Jiang, Feng Jianlei, Chen Shuliang, et al. Control strategy of virtual harmonic resistance-type energy storage inverter with harmonic governance function [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 86-91. (in Chinese)

[6] Hashempour M M, Lee T L, Savaghebi M, et al. Real-time supervisory control for power quality improvement

of multi-area microgrids [J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 864-874.

[7] 辛征, 孙树敏, 何晋伟, 等. 基于复合电流调节的单相 LCL 并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 123-129.
Xin Zheng, Sun Shumin, He Jinwei, et al. A composite current regulation based single-phase LCL grid-connected inverter control strategy [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 123-129. (in Chinese)

[8] Wang Bin, Zhao Peibin, Wang Shiwei. Research on control of photovoltaic grid vonnected inverter based on filter of LCL[M]. Berlin: Springer Nature Singapore, 2022: 821-827.

[9] 樊刚强, 杨勇. 基于 LCL 参数优化的新能源微电网并网逆变器控制方法[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 70-76.
Fan Gangqiang, Yang Yong. Control method for grid-connected inverter in new energy microgrid based on LCL parameter optimization [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 70-76. (in Chinese)

[10] 周鹏, 张新燕, 岳家辉, 等. 三相 LCL 并网逆变器自带低通滤波功能的复合控制方法[J]. 电源学报, 2022, 20(2): 98-107.
Zhou Peng, Zhang Xinyan, Yue Jiahui, et al. Composite control method for three-phase LCL grid-connected inverter with low-pass filtering function [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(2): 98-107. (in Chinese)

[11] 李佳, 王群京, 张茂松, 等. LCL 型三相四线制 APF 的准比例谐振控制研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 4-7, 77.
Li Jia, Wang Qunjing, Zhang Maosong, et al. Research on quasi-proportional resonance control of LCL three-phase four-wire APF [J]. Power Electronics, 2021, 55(5): 4-7, 77. (in Chinese)

[12] 靳伟, 李永丽, 卜立之, 等. 基于 CPT 理论和重复控制的多功能并网逆变器研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4345-4356.
Jin Wei, Li Yongli, Bu Lizhi, et al. Research on multi-functional grid-connected inverters based on conservative power theory and repetitive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4345-4356. (in Chinese)

[13] 赵涛, 朱爱华, 季宁一, 等. 准比例谐振与电压前馈控制的并网系统研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 96-100.
Zhao Tao, Zhu Aihua, Ji Ningyi, et al. Research on grid connected system based on quasi proportional resonance and voltage feed-forward control [J]. Power Electronics, 2021, 55(5): 96-100. (in Chinese)

[14] 李卓城, 王杨, 唐俊苗, 等. 基于逆变器剩余容量及自适应虚拟谐波阻抗控制的孤岛微电网谐波功率分配策略[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1169-1185.
Li Zhuocheng, Wang Yang, Tang Junmiao, et al. Harmonic power allocation strategy in islanded microgrid based on remaining capacity and adaptive virtual harmonic impedance control of inverter [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1169-1185. (in Chinese)

[15] Xavier L S, Cupertino A F, Pereira H A, et al. Partial harmonic current compensation for multifunctional photovoltaic inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11868-11879.

[16] 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)

[17] 李小叶, 李永丽, 张玮亚, 等. 基于多功能并网逆变器的电能质量控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 556-562.
Li Xiaoye, Li Yongli, Zhang Weiya, et al. A power quality control strategy based on multi-functional grid-connected inverter [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 556-562. (in Chinese)

[18] Zhang Jiaan, Lei Huilin, Li Zhijun, et al. Variable weight comprehensive evaluation of power quality and multi-objective optimization for multifunctional grid-connected inverter [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(6): 3119-3131.

[19] 张明, 夏若平, 徐诗露, 等. 主客观变异系数组合赋权的电能质量综合评估方法[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 441-447.

Zhang Ming, Xia Ruoping, Xu Shilu, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on variation coefficient synthetic weighting of subjective and objective weights [J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 441-447. (in Chinese)

[20] 王祺, 赵兴勇, 张庚午. 多功能并网变换器容量优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 85-92.
Wang Qi, Zhao Xingyong, Zhang Gengwu. Capacity optimization control strategy of a multi-function grid-connected converter [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 85-92. (in Chinese)

[21] 师洪涛, 锁忠梅, 蒙欣欣, 等. 基于超短期电能质量评估的微网群电能质量控制策略[J]. 电源学报. 2025, 23(3): 184-195.
Shi Hongtao, Suo Zhongmei, Meng Xinxin, et al. Power quality control strategy for microgrid cluster based on ultra-short-term power quality assessment [J]. Journal of Power Supply. 2025, 23(3): 184-195. (in Chinese)

[22] 张建忠, 耿治, 徐帅, 等. 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4323-4333.
Zhang Jianzhong, Geng Zhi, Xu Shuai, et al. An improved adaptive harmonic detection algorithm for active power filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4323-4333. (in Chinese)

[23] 张茂松, 池帮秀, 李家旺, 等. 有源电力滤波器基于准比例谐振的电流协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1614-1623.
Zhang Maosong, Chi Bangxiu, Li Jiawang, et al. Study on quasi-PR current coordinated control for active power filter [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1614-1623. (in Chinese)



江周鹏

作者简介：

江周鹏(1998—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：光伏发电并网和微电网电能质量治理。E-mail：jiangzhoupeng@126.com。

郝武帮(1971—)，男，硕士，高级实验师。研究方向：新能源技术、分布式电源。E-mail：ayesurmt@139.com。

李琰(1977—)，女，博士，副教授。研究方向：电力信息物理融合系统、新能源发电并网等。E-mail：yan.li@ymu.edu.cn。

(责任编辑：陈国珍)