DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.79　　**中图分类号**：TM464　　**文献标志码**：A

提升光伏逆变器运行范围的新型控制策略

黄烈钢，周建萍，杨　浩，周靖涛
(上海电力大学自动化工程学院，上海 200090)

摘要：级联 H 桥光伏 PV(photovoltaic)逆变器易发生光伏组件被遮挡、器件老化等问题，这会导致 H 桥各单元之间输出功率的不均衡，部分单元由于功率过大则可能会发生过调制，导致并网电流的性能变差和引发逆变器系统整体的不稳定。针对此问题，提出 1 种分段式提升光伏逆变器运行范围的改进控制策略。对部分过调制单元进行 3 次谐波补偿和多次谐波补偿；对严重过调制单元先降低其输出功率，然后进行多次谐波补偿。该策略扩大了逆变器的运行范围，保证了严重功率不均衡时所有单元均不发生过调制，且并网电流波形良好。理论分析和仿真结果证明了新型控制策略的可行性和有效性。

关键词：光伏逆变器；过调制；谐波补偿；严重功率不均衡

Novel Control Strategy for Enhancing Operating Range of PV Inverter

HUANG Liegang, ZHOU Jianping, YANG Hao, ZHOU Jingtao
(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Cascaded H-bridge photovoltaic (PV) inverters are susceptible to problems such as shading of PV modules and aging of devices. As a result, an imbalance in the output power between H-bridge units will appear, and over-modulation may occur in some units due to excessive power, resulting in a poor performance of grid-connected current and triggering the instability of the inverter system as a whole. Aimed at this problem, a segmented improved control strategy for enhancing the operating range of the PV inverter is proposed. This method compensates the third-order harmonic and multiple harmonics for some of the overmodulated units. For the severely overmodulated units, their output power are reduced at first, and then the multiple harmonics are compensated. This strategy expands the operating range of the inverter, and it ensures that no overmodulation occurs in all the units under severe power imbalance. In addition, the waveform of grid-connected current is good. The theoretical analysis and simulation results prove the feasibility and effectiveness of the novel control strategy.

Keywords: Photovoltaic (PV) inverter; overmodulation; harmonic compensation; severe power imbalance

21 世纪能源短缺和环境污染严重的问题一直是世界关注的重点，发展低碳经济和可持续性能源产业是各国共同的选择[1]。太阳能由于其易于获取和转换的特点，目前已成为增长最快、研究最广泛的可再生能源[2]。多电平逆变器因其开关应力小、滤波电感小、系统效率高等优点而受到世界各国的广泛关注[3-5]。应用较多的多电平逆变器主要有 3 种：二极管钳位型、飞跨电容型和级联 H 桥型 CHB(cascaded H-bridge)[6]。其中，在输出电平相同的情况下，CHB 光伏 PV(photovoltaic)逆变器使用的器件数量最少，其输出的电网电流谐波含量低，并且易于模块化。它每个功率单元的直流侧均由 PV 模块独立供电，可实现独立的最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)和系统的最大发电输出。因此 CHB 光伏逆变器是

收稿日期：2023-08-25；**修回日期**：2023-10-04，2023-10-25；
录用日期：2023-11-06；**网络首发日期**：2024-01-24
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61905139)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 61905139

伏并网发电系统的最佳选择[7-9]。

CHB 光伏逆变器的关键问题之一是各个单元之间的输出功率不均衡。由于光伏自身的特点，其易于老化、损坏和被遮挡。发生以上情况时，部分单元会出现输出功率严重下降的现象，由于 CHB 逆变器是 1 个整体，流过每个单元的电流相同，故输出功率较大的光伏单元对应的 H 桥单元可能会发生过调制的情况，导致电网电流发生严重畸变，使得系统不能正常运行[10-11]。

针对上述问题，国内外已经提出了几种控制策略。文献[12]提出了混合调制策略 HMS(hybrid modulation strategy)，该策略将低频方波与高频脉宽调制波形相结合，扩大了逆变器的线性调制范围，可以较好地抑制电网电流的谐波，并将线性调制范围扩大到 4/π 左右。HMS 将直流链路测量电压与相应参考电压的差值按升序排序，然后根据系统的工作状态，对差值高的单元放电、差值低的单元充电。与使用比例积分 PI(proportional integral)控制器精确调节直流电压的正弦脉冲宽度调制 SPWM (sinusoidal pulse width modulation)相比，HMS 会加剧直流侧的电压波动，从而降低 MPPT 的效率。文献[13]提出了 1 种改进的 MPPT 算法，其使输出功率较高的光伏组件退出 MPPT 操作来平衡输出功率，但这会降低整个系统的输出功率；文献[14]提出 1 种无功补偿策略，其可以在不加剧直流电压波动的情况下降低电网电流的总谐波失真 THD(total harmonic distortion)，然而这种方法会降低系统的功率因数，从而限制这种策略的应用；文献[15-16]采用 3 次谐波补偿策略 THCS(third-order harmonic compensation strategy)，其有效地解决了 CHB 光伏逆变器功率不平衡的问题，弥补了之前方法的不足。然而，THCS 的最大线性调制范围仅扩展到 1.155，因此处理功率不平衡的能力相对较弱。随着 PV 模块之间输出功率差距进一步加大，某些模块的调制度可能会超过 1.155，从而导致 3 次谐波补偿策略失效。文献[17]提出了 1 种新型的谐波补偿控制策略 NHCS(novel harmonic compensation strategy)，通过引入 3、5 次谐波至过调制单元中，并将反向的谐波引入剩余的各单元中，可将逆变器调制度提升至 1.270，而调制波方波最大调制度为 4/π，因此该方法还有进一步提升的空间；文献[18]提出 1 种谐波补偿的控制，并设置补偿谐波的分配方法，这提升了 CHB 逆变器的运行范围，并满足了并网电流的要求。文献[19]提出 1 种广义 Z 源逆变器空间矢量调制策略，并通过分析直通电流的分布特性优化开关器件电流的相对位置，从而实现功率因数小于 1 时的开关损耗最优。

为解决 CHB 光伏逆变器在功率严重不均衡时部分单元发生过调制的情况，本文提出了 1 种分段式扩大 CHB 光伏逆变器运行范围的改进控制策略。当某些 CHB 光伏逆变器单元调制度大于 1.270 时，通过降低光伏单元的输出功率使其调制度固定为 1.270，再使用多次谐波的补偿策略；当部分单元的调制度在 1.155 到 1.270 之间时，直接采用多次谐波补偿策略；当部分单元的调制度在 1.155 以下时，则采用 3 次谐波补偿策略。该方法不但可以使光伏系统在各单元功率严重不均衡时稳定运行，保证并网电流的 THD 值满足要求；且由于多次谐波补偿与 3 次谐波同属于谐波补偿方法，可以较好地保留 3 次谐波补偿的所有优点。

1 光伏逆变器系统配置及分析

单相级联 H 桥光伏逆变器如图 1 所示，它由 n 个 H 桥单元组成，每个单元由 4 个开关管组成，直流侧由 PV 模块独立供电，交流侧通过电感连接到电网。每个单元都可以有−1、1 和 0 的 3 个输出电平，整个逆变器可以输出 $2n$+1 个电平。图中：I_{pvn} 和 V_{dcn} 分别为第 n 个 H 桥单元直流侧的光伏输出电流和电容电压；I_{Hn} 和 V_{Hn} 分别为第 n 个 H 桥单元直流侧电流和交流侧输出电压；L、R 和 C_n 分别为滤波电感、线路等效电阻和第 n 个单元直流母线电容；V_{grid} 和 I_{grid} 分别为电网电压和电流；S_{ij} 为逆变器的第 i 个单元的第 j 个开关。

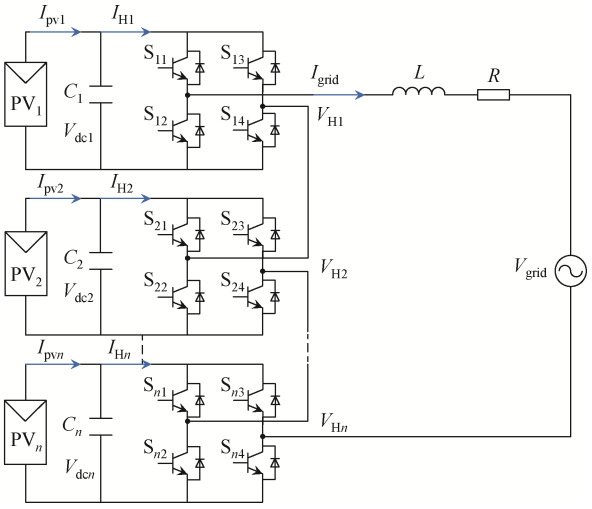


图 1　单相级联 H 桥光伏逆变器

Fig. 1 Single-phase cascaded H-bridge PV inverter

对于 H 桥光伏逆变器，第 x 个单元的调制波 m_x 可以表示为

$$m_x = \frac{V_{Hx}}{V_{dcx}} \tag{1}$$

根据图 1 的拓扑结构，H 桥光伏逆变器的动态特性可以表示为

$$I_{Hx} = m_x I_{grid} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}V_{dcx}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{C_n}(I_{Hx} - I_{pvx}) \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}I_{grid}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L}\left(\sum_{x=1}^{n} m_x V_{dcx} - RI_{grid} - V_{grid}\right) \tag{4}$$

P_x 和 P_T 分别为 H 桥光伏逆变器第 x 个单元对应光伏组件的输出功率和系统输出总功率。忽略等效电阻和开关器件的功率损耗则有

$$P_x = m_x V_{dcx} I_{grid} = V_{dcx} I_{pvx} \tag{5}$$

$$\sum_{x=1}^{n} P_x = P_T \tag{6}$$

过调制的机理如图 2 所示，其中，V_i 和 S_i (i=1, 2, ⋯, x)分别为 V_{Hx} 和 m_x 的幅值。当某时刻光伏系统的部分单元组件发生遮挡、器件老化、光照不足等情况导致 $P_{x+1} \sim P_n$ 突然急剧下降，而 $P_1 \sim P_x$ 保持不变，由于 V_{grid} 保持不变，导致 I_{grid} 变小，因此输入功率较大的单元的调制波幅值增大，当功率相差过大时，部分单元会发生过调制。根据文献[17]，单位功率因数下，各单元调制波峰值需要保持在 1 以下，即 $\sqrt{2}S_x \leqslant 1$，光伏逆变器所有单元不会过调制需满足

$$S_x \leqslant \sqrt{2}/2 \tag{7}$$

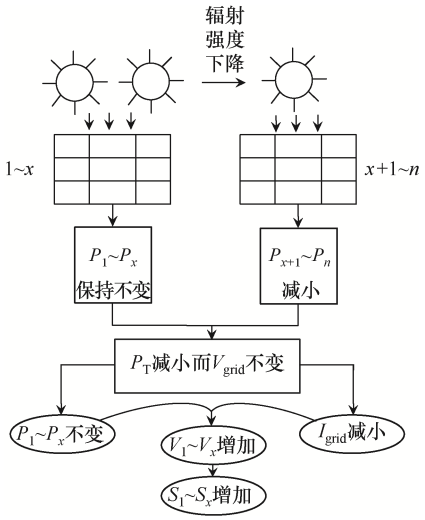


图 2　过调制的机理

Fig. 2 Mechanism of overmodulation

2　光伏逆变器运行范围扩大策略

2.1　3 次谐波补偿策略和多次谐波补偿策略

对于单相光伏逆变器的过调制问题，通常采用的是 3 次谐波补偿策略，如文献[12]所提出的 3 次谐波补偿策略，能将逆变器系统的调制度提升至 1.155，此调制策略不仅可以扩大系统的运行范围，还可以在保证发电效率高效的前提下使逆变器以单位功率因数运行，且并网电压电流的波形良好，综合性能最佳。

参考文献[12]中 3 次谐波补偿策略的主要思想是，当光伏逆变器系统出现功率不平衡的情况，部分单元的调制度升高，当其调制度处于 1.000~1.155 之间时，对其调制波补偿一定量的 3 次谐波，使得其调制波的幅值保持在 1。由于谐波的注入，导致并网电流出现 3 次谐波分量；因此，对于未发生过调制的单元注入反向的 3 次谐波来抵消总输出电压中出现的 3 次谐波分量。

由文献[15-16]可知，3 次谐波补偿策略的最大线性调制范围仅能扩展到 1.155，因此处理功率不

平衡的能力相对较弱。对于这一点，文献[17]提出了 1 种新型谐波补偿策略，对于过调制的单元进行多次谐波的注入，将过调制波形转换成幅值为 1 的准方波。为了保证光伏逆变器系统中不存在注入的谐波分量，在非过调制的单元中注入等效的反向多次谐波。多次谐波的补偿是基于方波的基波幅值为 4/π 的特性，此方法可以将线性调制范围扩展到约 1.270。3 次谐波补偿策略和多次谐波补偿策略均为谐波补偿的方法，其中多次谐波补偿策略可以保留 3 次谐波补偿策略的优点，并且线性调制范围优于 3 次谐波补偿策略。

当调制度处于 1.000~1.155 之间时，可以直接采用 3 次谐波补偿策略；当调制度位于 1.155~1.270 之间时，需要计算得到多个多次谐波并叠加形成补偿波。由于多次谐波补偿策略的计算量比 3 次谐波补偿策略大，因此分段式控制策略较直接采用多次谐波补偿策略计算量更小。

并网控制策略如图 3 所示，由电压外环、电流内环、控制策略 3 个部分组成。单相光伏逆变器系统由多个 H 桥单元组成，每个单元均有 1 个独立控制的控制器，主要负责 MPPT 控制，控制每个单元直流侧的输出电压。由于直流侧电压工频波动，用 100 Hz 陷波器滤除电压纹波并将直流侧输出功率传到主控制器，主控制器接受所有单元直流侧的输出功率 P_n，并将它们求和得到总有功功率 P_{T}，可表示为

$$P_{\mathrm{T}}=\frac{1}{2}V_{\mathrm{M}}I_{\mathrm{M}} \tag{8}$$

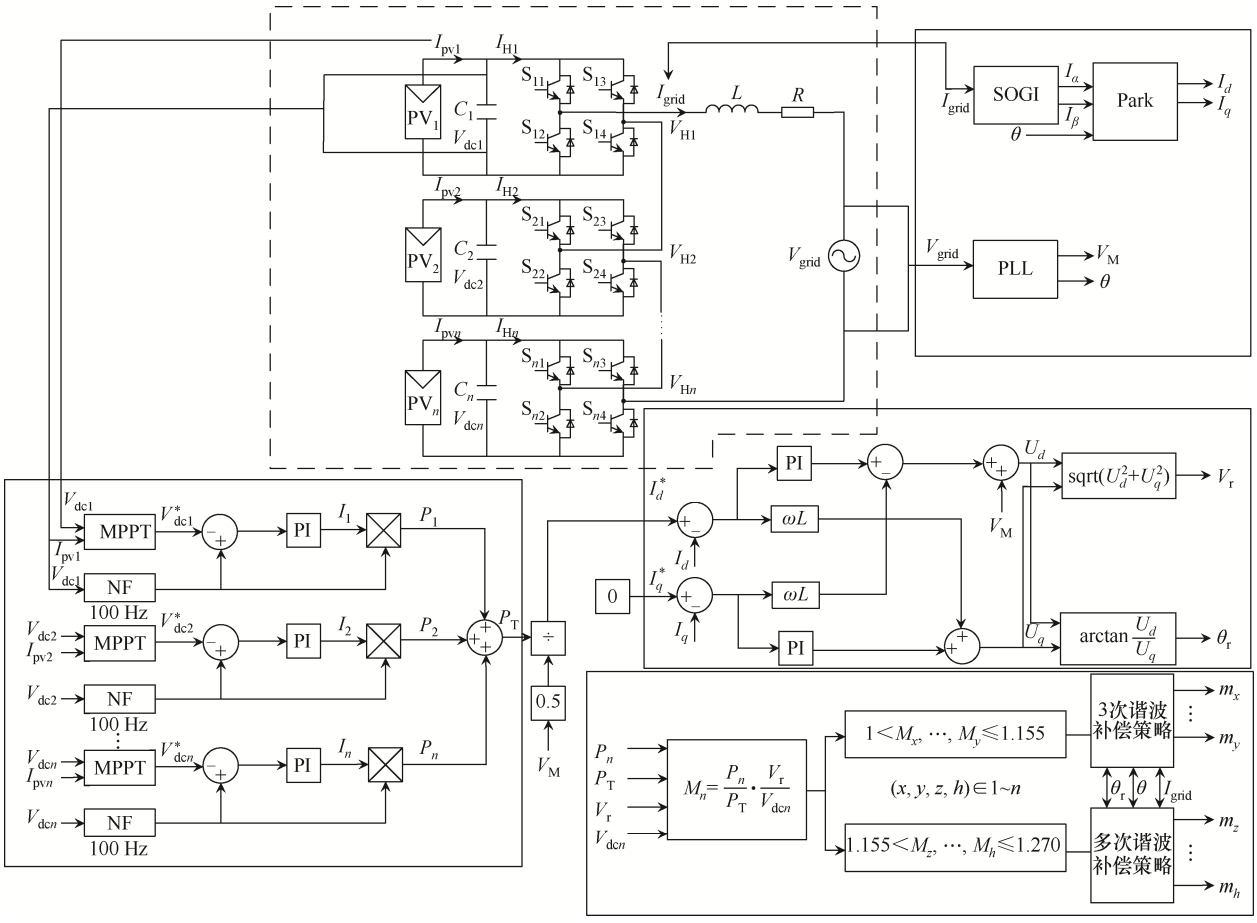


图 3 并网控制策略框图

Fig. 3 Block diagram of grid-connected control strategy

式中，V_{M} 和 I_{M} 分别为电网电压和电流的幅值。参考电流 I_d^* 由 P_{T} 除以 $V_{\mathrm{M}}/2$ 得到，电网电压幅值 V_{M} 和电网电压相位角 θ 由锁相环得到。由于缺少 1 个自由度来实现交流量坐标的旋转变换，通过二阶广

义积分变换得到正交信号 I_α 和 I_β，其中的 I_α 和 I_{grid} 具有相同的频率和相位，I_β 相较于 I_α 滞后 90°。由于获取了 2 个正交信号 I_α、I_β 和相位角 θ，对它们进行派克变换得到 I_d 和 I_q。通常情况下，无功电流参考值 I_q^* 设为 0。电流内环部分，通过 PI 控制器调节后得到输出电压信号 U_d 和 U_q，则输出总调制电压幅值 V_{r} 和电网电压夹角 θ_{r} 的计算式分别为

$$V_{\text{r}}=\sqrt{U_d^2+U_q^2} \tag{9}$$

$$\theta_{\text{r}}=\arctan\left(\frac{U_d}{U_q}\right) \tag{10}$$

对于 H 桥各单元，其在交流侧为串联连接，即流过各单元的电流相同，因此各单元交流侧的功率与输出电压之比相同，即

$$\frac{V_1}{P_1}=\frac{V_2}{P_2}=\cdots=\frac{V_n}{P_n}=\frac{V_{\text{r}}}{P_{\text{T}}} \tag{11}$$

各 H 桥模块的调制度 M_n 为

$$M_n=\frac{P_n}{P_{\text{T}}}\cdots\frac{V_{\text{r}}}{V_{\text{dc}n}} \tag{12}$$

根据文献[12]和文献[20]可知，若所有 H 桥模块均未发生过调制，则直接计算其调制波；若部分 H 桥模块发生了过调制，则通过式(12)计算其调制度。如果 $1.000<M_n\leqslant 1.155$，则根据图 3 直接采用 3 次谐波补偿策略，且对并网电流进行谐波抑制；如果 $1.155<M_n\leqslant 1.270$，则根据图 3 直接采用多次谐波补偿策略，且对并网电流进行谐波抑制。

2.2 改进后的谐波补偿策略

当系统各单元之间发生输入功率严重不均衡现象时，部分单元的调制度超过 1.270，超过了多次谐波补偿策略可以补偿的范围。为此本文提出了 1 种改进的谐波补偿策略，对于光伏逆变器系统中调制度超过 1.270 的单元，降低其光伏输出功率，使其调制度维持在 1.270，然后使用多次谐波补偿策略进行补偿。此策略虽然降低了系统可以达到的最大输出功率，但是保证了系统的安全稳定运行，并使并网电流波形良好，达到并网要求。如图 1 所示，光伏逆变器系统共有 n 个单元，当系统的输入功率严重不均衡时，假设第 h+1~n 个单元 $M_n>1.270$、第 z~h 个单元 $1.155<M_n\leqslant 1.270$、第 x~y 个单元 $1.000<M_n\leqslant 1.155$、其余单元 $M_n\leqslant 1.000$。

由于第 h+1~n 个单元 $M_n>1.270$，超过了多次谐波补偿策略的最大补偿范围，对这些单元降低其输出功率，使其调制度限定为 1.270。由于调制度的限定，调制度超过 1.270 的单元实际输入功率为

$$PX_i=1.27P_{\text{T}}V_{\text{pv}i}/V_{\text{r}} \tag{13}$$

式中，$V_{\text{pv}i}$ 为第 i 个单元电压。

光伏系统的总功率需重新计算，具体为

$$P_{\text{T}}=\sum_{i=1}^{h}P_i+\sum_{i=h+1}^{n}PX_i \tag{14}$$

根据式(12)和式(14)改进后光伏逆变器系统的调制度可表示为

$$M_i=\begin{cases}\dfrac{P_i}{P_{\text{T}}}\dfrac{V_{\text{r}}}{V_{\text{dc}i}} & i=1,2,\cdots,h\\ 1.270 & i=h+1,h+2,\cdots,n\end{cases} \tag{15}$$

光伏系统总功率计算如图 4 所示。由图可知，第 h+1~n 个 H 桥单元计算得到的功率未使用，通过降低输出功率，使得这些单元的调制度维持在 1.270，然后根据式(13)，重新计算功率 PX_i。根据式(15)，所有单元的调制度均不大于 1.270，调制度在 1.155~1.270 之间的采用多次谐波补偿策略，调制度在 1.000~1.155 之间的采用 3 次谐波补偿策略，最终，整个光伏逆变器系统的所有单元均不会发生过调制。

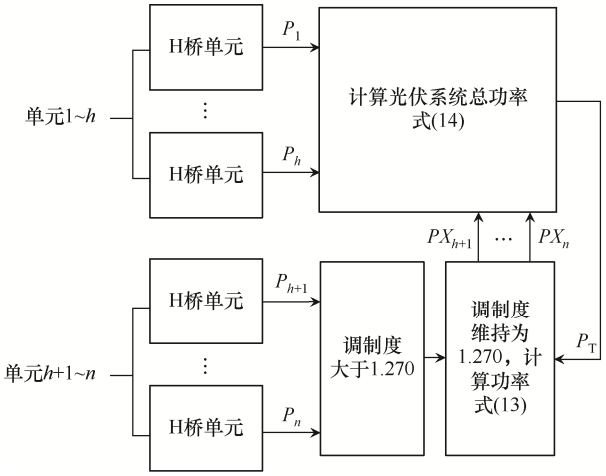


图 4　光伏系统总功率计算

Fig. 4 Calculation of total system power for PV system

3 仿真分析

为了验证所提控制策略的有效性，在 MATLAB/Simulink 仿真中搭建三单元级联 H 桥光伏逆变器系统，光伏组件参数见表 1，逆变器和电网参数见表 2。

表 1 光伏组件参数

Tab. 1 Parameters of PV module

参数	数值
最大功率 P_{max}/W	213.15
开路电压 V_{oc}/V	36.3
短路电流 I_{oc}/A	7.29
最大功率点电压 V_{MPP}/V	29
最大功率点电流 I_{MPP}/A	7.35

表 2 逆变器和电网参数

Tab. 2 Parameters of inverter and grid

参数	数值
直流母线电容 C_i/mF	213.15
滤波电感 L/mH	36.3
电网电压峰值 V_M/V	7.29
电网电压频率 f_{grid}/Hz	29
开关频率 f_{car}/Hz	7.35

图 5 为 3 个 H 桥单元的辐照度，初始设定 3 个 H 桥单元的光照强度均为 1 000 W/m^2，环境温度为 25 ℃，3 个 H 桥单元的最大输出功率相同，均为 213.15 W。在 1.00 s 之前设定 3 个单元的光照强度不变，1.00 s 之后将单元 2 的光照强度降为 300 W/m^2、单元 3 的光照强度降为 200 W/m^2，此时，单元 1 不符合式(7)的条件，单元 1 严重过调制。传统控制策略下电网电压和电流输出波形如图 6 所示。由图可知，光照强度改变前并网电流 I_{grid} 的 THD 值为 2.33%，并网电流的波形良好；光照强度改变后，单元 1 发生严重过调制，并网电流 I_{grid} 严重畸变，其 THD 值变为 26.60%，严重不符合并网要求。

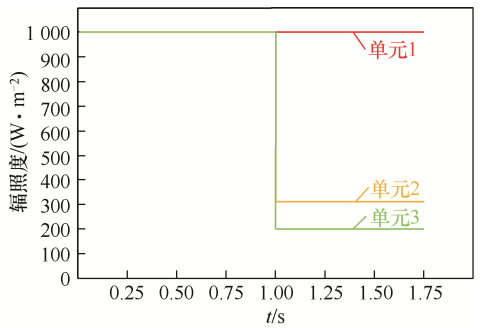


图 5 3 个 H 桥单元辐照度

Fig. 5 Irradiance of three H-bridge units

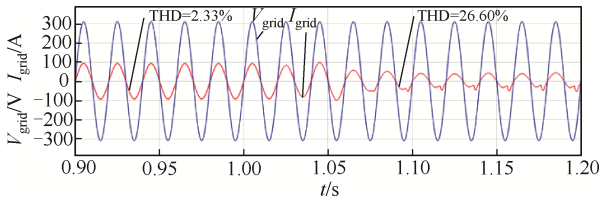


图 6 传统控制策略下电网电压和电流输出波形

Fig. 6 Grid voltage and current output waveforms under conventional control strategy

采取改进控制策略后 3 个 H 桥单元的输入功率如图 7 所示。由图可知，1.0 s 之后，由于单元 1 发生严重过调制，所提控制策略将单元 1 的调制度控制为 1.270，然后再采用文献[18]所提的多次谐波控制策略，此时单元 1 的输出功率会略微降低；单元 2 和单元 3 由于光照强度的降低，输出功率也有所降低。

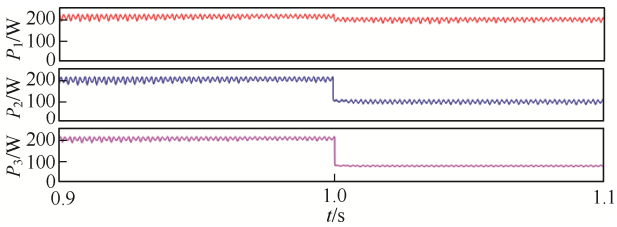


图 7 3 个 H 桥单元输入功率

Fig. 7 Input power of three H-bridge units

3 个 H 桥单元的调制波如图 8 所示，采取所提控制策略后所有单元均未发生过调制。单元 1 在调制度控制为 1.270 后注入多次谐波，另外 2 个单元注入反向的多次谐波，其调制波波形发生了改变，但各单元均未发生过调制。

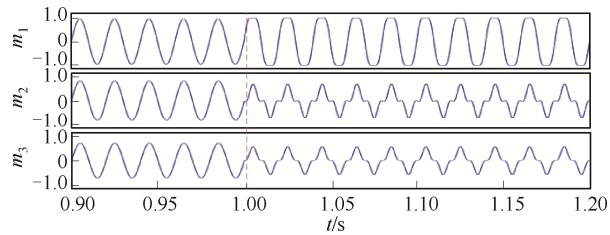


图 8 3 个 H 桥单元的调制波

Fig. 8 Modulated waveforms of three H-bridge units

采取改进控制策略后电网电压和电流输出波形如图 9 所示，当光伏逆变器系统发生严重的功率不均衡时，采取改进的控制策略可以使系统的并网电流 THD 降低为 3.26%，达到并网要求。

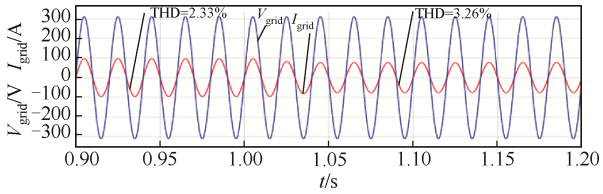


图 9　改进控制策略下电网电压和电流输出波形

Fig. 9 Grid voltage and current output waveforms under improved control strategy

3 个 H 桥单元直流侧的电压如图 10 所示，单元 1 由于调制度超过 1.270，因此进行了功率限制，其直流侧电压被稳定在某个偏离最大功率点电压值，单元 2 和单元 3 的直流侧电压在 1.0 s 处发生了波动，但最终稳定在最大功率点电压附近。

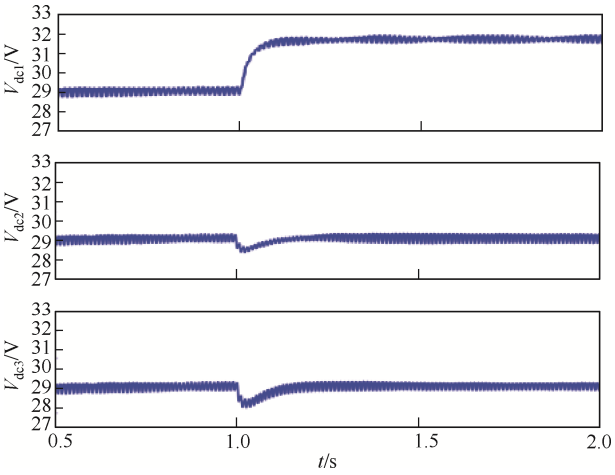


图 10　3 个 H 桥单元直流侧电压

Fig. 10 DC-side voltage of three H-bridge units

单元 1 调制度为 1.050 时采用不同控制策略后电网电压和电流输出波形如图 11 所示。如图可知，0.90~1.00 s 之间不使用谐波补偿策略，并网电流发生轻微畸变；1.00~1.10 s 之间采用 3 次谐波补偿策略，由于单元 1 调制度为 1.050<1.155，3 次谐波补偿策略可以解决单元 1 的过调制问题，并网电流波形良好；1.10~1.20 s 之间采用多次谐波补偿策略，单元 1 的过调制问题也得到了解决。但是由于多次谐波补偿需要多个谐波的叠加，需要额外计算各谐波的补偿系数，在补偿调制度小于 1.155 的单元，多次谐波补偿策略的计算较 3 次谐波补偿策略更加复杂。

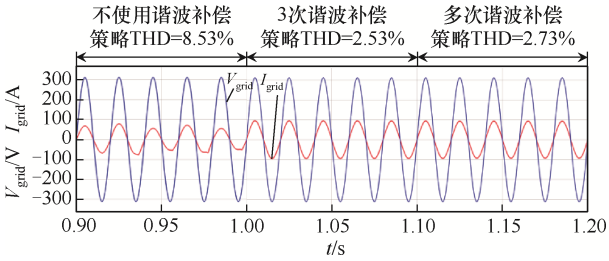


图 11　单元 1 调制度为 1.050 时不同控制策略下电网电压和电流输出波形

Fig. 11 Grid voltage and current output waveforms under different control strategies when modulation degree of unit 1 is 1.050

单元 1 调制度为 1.200 时采用不同控制策略后电网电压和电流输出波形如图12所示。由图可知，在 0.90~1.00 s 之间不使用谐波补偿策略，并网电流发生严重畸变；1.00~1.10 s 之间采用 3 次谐波补偿策略，并网电流畸变率变低，但并网电流仍未达到并网要求；1.10~1.20 s 之间采用多次谐波补偿策略，单元 1 的过调制问题得到了解决，并网电流的 THD 也达到了并网要求。

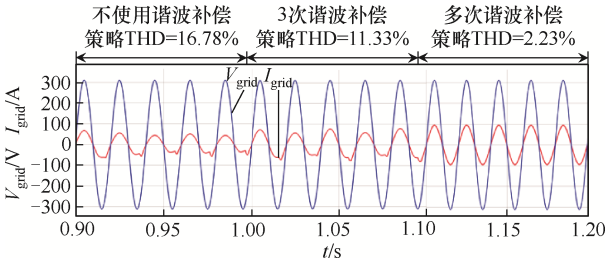


图 12　单元 1 调制度为 1.200 时不同控制策略下电网电压和电流输出波形

Fig. 12 Grid voltage and current output waveforms under different control strategies when modulation degree of unit 1 is 1.200

4　结语

本文所提的提升光伏逆变器运行范围的新型控制策略，对光伏逆变器系统各单元进行分段式控制。当光伏 H 桥单元调制度大于 1.270 时，降低光

伏单元的输出功率，使其调制度固定为 1.270，再采用多次谐波补偿策略进行补偿；当光伏 H 桥单元调制度在 1.155 到 1.270 之间时，直接采用多次谐波补偿策略进行控制；当光伏 H 桥单元调制度在 1.000 到 1.155 之间时，采用 3 次谐波补偿策略进行控制。该策略扩大了光伏逆变器系统可以运行的调制度范围，且在各单元输出功率严重不均衡时保证了各单元的稳定运行，并使并网电流的 THD 达到了并网要求。

参考文献：

[1] Zhang Xing, Zhao Tao, Mao Wang, et al. Multilevel inverters for grid-connected photovoltaic applications: Examining emerging trends [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2018, 5(4): 32-41.

[2] Ebrahimi J, Babaei E, Gharehpetian G B. A new topology of cascaded multilevel converters with reduced number of components for high-voltage applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3109-3118.

[3] Chamarthi P K, El Moursi M S, Khadkikar V, et al. Novel step-up transformerless inverter topology for 1-Φ grid-connected photovoltaic system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2801-2815.

[4] 盘宏斌, 朱鸿章, 肖志勇, 等. 级联 H 桥整流器的新型直流电压与无功平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3565-3573.
Pan Hongbin, Zhu Hongzhang, Xiao Zhiyong, et al. A novel DC voltage and reactive power balance control strategy for cascaded H bridge rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3565-3573. (in Chinese)

[5] 张枫鑫, 叶远茂. 基于改进型粒子群优化算法的非对称级联开关电容多电平逆变器[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 51-59.
Zhang Fengxin, Ye Yuanmao. Asymmetric cascaded switched capacitor multi-level inverter based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 51-59. (in Chinese)

[6] Xiao Bailu, Hang Lijun, Mei Jun, et al. Modular cascaded H-bridge multilevel PV inverter with distributed MPPT for grid-connected applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1722-1731.

[7] 张鸿博, 蔡晓峰. 直流电压含二次纹波条件下并网逆变器输出谐波抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 119-128.
Zhang Hongbo, Cai Xiaofeng. Output harmonic suppression of a grid-connected inverter with secondary ripple in DC voltage [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 119-128. (in Chinese)

[8] 游云峰, 李媛, 肖先勇, 等. 单相级联准 Z 源逆变器有限集模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 1-8.
You Yunfeng, Li Yuan, Xiao Xianyong, et al. Finite control set-model predictive control of single-phase quasi-Z-source cascaded multilevel inverter [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 1-8. (in Chinese)

[9] Vazquez S, Leon J I, Carrasco J M, et al. Analysis of the power balance in the cells of a multilevel cascaded H-bridge converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2287-2296.

[10] Ali Rezaei M, Farhangi S, Iman-Eini H. Extending the operating range of cascaded H-bridge based multilevel rectifier under unbalanced load conditions [C]// 2010 IEEE International Conference on Power and Energy. Kuala Lumpur, Malaysia, 2011: 780-785.

[11] 朱晶菁, 陈敏, 任昇, 等. 并网逆变器二次谐波电流的抑制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 69-78.
Zhu Jingjing, Chen Min, Ren Sheng, et al. Method for suppressing second-order harmonic current of grid-connected inverter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 69-78. (in Chinese)

[12] Zhao Tao, Zhang Xing, Mao Wang, et al. A modified hybrid modulation strategy for suppressing DC voltage fluctuation of cascaded H-bridge photovoltaic inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 3932-3941.

[13] Eskandari A, Javadian V, Iman-Eini H, et al. Stable operation of grid connected Cascaded H-bridge inverter under unbalanced insolation conditions [C]// 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. Istanbul, Turkey, 2014: 1-6.

[14] Liu Liming, Li Hui, Xue Yaosuo, et al. Decoupled active and reactive power control for large-scale grid-connected

photovoltaic systems using cascaded modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 176-187.

[15] Ko Y, Andresen M, Buticchi G, et al. Power routing for cascaded H-bridge converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9435-9446.

[16] Zhao Tao, Zhang Xing, Mao Wang, et al. An optimized third harmonic compensation strategy for single-phase cascaded H-bridge photovoltaic inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8635-8645.

[17] 袁义生, 朱启航, 吕森, 等. 一种基于谐波补偿的级联 H 桥光伏并网逆变器控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 94-100.
Yuan Yisheng, Zhu Qihang, Lü Sen, et al. Control strategy for cascaded H-bridge photovoltaic grid-connected inverter based on harmonic compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 94-100. (in Chinese)

[18] 吴孟泽, 张兴, 王明达, 等. 扩大级联光伏逆变器运行范围的谐波补偿控制[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 90-98.
Wu Mengze, Zhang Xing, Wang Mingda, et al. Harmonic compensation control for extending operation range of cascaded photovoltaic inverter [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 90-98. (in Chinese)

[19] 姜翼展, 张经纬, 何凤有, 等. 一种开关损耗优化的 Z 源逆变器调制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4312-4323.
Jiang Yizhan, Zhang Jingwei, He Fengyou, et al. A switching loss optimization modulation strategy for Z-source inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4312-4323. (in Chinese)

[20] Wang Mingda, Zhang Xing, Zhao Tao, et al. Harmonic compensation strategy for single-phase cascaded H-bridge PV inverter under unbalanced power conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10474-10484.



黄烈钢

作者简介：

黄烈钢(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子光伏逆变器。E-mail：1075560510@qq.com。

周建萍(1978—)，女，通信作者，博士，副教授。研究方向：分布式发电与微电网技术。E-mail：zhoujianping@shiep.edu.cn。

杨浩(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：MMC-PET。E-mail：953780994@qq.com。

周靖涛(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：MMC。E-mail：1332816619@qq.com。

(责任编辑：耿越)