

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210434

# 多功能并网变换器容量优化控制策略

王祺<sup>1</sup>, 赵兴勇<sup>1</sup>, 张庚午<sup>2</sup>

(1. 山西大学, 山西 太原 030006; 2. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

**摘要:** 随着“双高”电力系统的发展, 并网环境呈现薄弱、复杂态势。电网阻抗的存在使得并网点容易受谐波干扰及无功功率波动的影响, 恶化并网电能质量, 影响并网变换器友好并网, 仅以有功功率为传输目标的传统并网变换器已难以适应上述工况。基于现状提出一种具有谐波抑制功能的光伏逆变器控制策略。指令电流由谐波检测环节和直流侧稳压控制环节组成, 根据广义瞬时无功理论检测出并网电流的瞬时有功分量、基波正序无功分量、谐波分量, 通过电流跟踪控制环节实现光伏逆变器的抑制谐波、无功补偿的功能。随后, 考虑实况中逆变器容量有限, 提出一种基于复合功能光伏逆变器的容量匹配策略, 设计匹配系数。考虑并网变换器的外特性及实际工况中的谐波特性, 以输出有功功率、谐波抑制控制效果为最优控制级, 无功补偿控制效果为次优级进行策略的设计。最后, 进行仿真案例验证当光伏逆变器在正常并网运行时可以抑制并网点谐波电流, 并最大程度的补偿无功功率, 极大改善了并网点的电能质量, 提高了逆变器的利用率, 增强了并网变换器面向复杂并网工况时的鲁棒性。仿真结果验证了所提策略的有效性和可行性。

**关键词:** 光伏逆变器; 控制策略; 谐波抑制; 无功补偿; 容量匹配

## Capacity optimization control strategy of a multi-function grid-connected converter

WANG Qi<sup>1</sup>, ZHAO Xingyong<sup>1</sup>, ZHANG Gengwu<sup>2</sup>

(1. Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** With the development of the "double high" power system, the grid-connected environment is showing a weak and complex situation. The existence of grid impedance makes the grid-connected point susceptible to harmonic interference and reactive power fluctuations, deteriorates the quality of grid-connected power, and affects the friendly grid-connected converters. Traditional grid-connected converters that only use active power as the transmission target are already difficult to adapt to the above working conditions. Based on the status quo, a photovoltaic inverter control strategy with harmonic suppression function is proposed. The command current is composed of the harmonic detection link and the DC side voltage stabilization control link. According to the generalized instantaneous reactive power theory, the instantaneous active component, fundamental positive sequence reactive component, and harmonic component of the grid-connected current are detected, and the functions of suppressing harmonics and reactive power compensation of photovoltaic inverter are realized through the current tracking control link. Then, considering the limited capacity of the inverter in the actual situation, a capacity matching strategy based on the composite function photovoltaic inverter is proposed, and a matching coefficient is designed. Considering the external characteristics of the grid-connected converter and the harmonic characteristics in actual working conditions, a strategy is designed with the output active power and the harmonic suppression control effect as the optimal control level, and the reactive power compensation control effect as the sub-optimal level. Finally, a simulation case is carried out to verify that when the photovoltaic inverter is in normal grid-connected operation, it can suppress the harmonic current of the grid-connected point and compensate for the reactive power to the greatest extent. This greatly improves the power quality of the grid-connected point and improves the inverter. The utilization rate of the converter enhances the robustness of the grid-connected converter when facing complex grid-connected conditions. The simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed strategy.

This work is supported by Shanxi Province Higher Education Science and Technology Innovation Project (No. 2021L005).

**Key words:** photovoltaic inverter; control strategy; harmonic suppression; reactive power compensation; capacity matching

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目资助(2021L005); 山西省应用基础研究计划青年项目资助(20210302124553)

### 0 引言

随着新一代“双高”电力系统的发展，新能源并网变换系统的环境处于薄弱和不确定态势，新能源发电及其并网等技术成为近些年的研究热点<sup>[1-3]</sup>。微电网因具有分布式发电、储能功能等优越条件而得到广泛关注，微电网的出现改善了化石能源枯竭、环境污染的现状，同时也带来了相应控制技术方面的问题<sup>[4]</sup>。作为并网接口单元，并网变换器承担着新能源向电网功率传输的重要使命，重要性不言而喻。

LCL 型并网变换器因优异的高频谐波衰减特性、低廉的硬件成本等优势近年来引起了学者们的关注<sup>[5-6]</sup>，基于并网逆变器的本体功能，相关学者对其进行了改进和优化<sup>[7-8]</sup>。然而，受民用负荷、工业负荷的影响，电网中的大量非线性负荷、无功负荷等严重恶化了并网点的电压和电流质量。对于并网变换器而言，一般表现为电压控制型电流源的特性，当并网点出现谐波或畸变电流时，变换器可能无法正常并网及稳定运行。谐波治理方面，常规手段是利用有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)或增大交流侧的滤波电感，然而硬件成本会增加。瑕不掩瑜，APF 的谐波治理思路是非常有价值且值得借鉴的。同时，其与并网变换器的拓扑结构相通。因此，将两者结合，具有谐波治理的并网逆变器成为目前国内外研究的热点之一<sup>[9-15]</sup>。文献[9]研究了变换器拓扑，并提出一种组式三相含谐波治理功能的变换器拓扑结构，该结构由三组单相全桥逆变电路构成，可灵活控制相应的目标，但拓扑结构较复杂，可靠性要求较高。文献[10]对双向动态电压调节器(Dynamic Voltage Regulator, DVR)进行研究，设计了一种用于容量优化的集成辅助电容器，提高了 DVR 的补偿容量，然而补偿的功能较单一。文献[11]提出一种大规模风机并网的容量配置协调方案，但并未考虑并网点的电能质量。文献[12]研究了微网中交流子网和直流子网的功率问题，考虑两者的耦合特性，通过直流侧容量控制间接控制交流侧的电网容量。考虑到作为接口单元的并网变换器及其容量对电网的影响，文献[13]对并网过程中的电压稳定性问题开展了相应研究。

基于 LCL 型并网变换器的电路结构，文献[14]提出了一种具有无功补偿功能的光伏变换器控制方法，然而并不能同时滤除谐波。在文献[15-16]提出的多功能并网逆变器控制策略中，谐波检测采用的

$p-q$  或  $i_p-i_q$  法，需要两次矩阵变换运算。进一步通过利用 LCL 的结构特点，文献[17]采集了若干支路电流，分别进行权重评估，实现了多支路电流的协同控制。然而，该方法需要除实现本体并网功能外的额外若干传感器，硬件成本大大增加。同理，文献[18-19]借鉴上述思路，考虑微网及配网环境，分别制定了电能质量的分摊计划，并提出相应的协调控制策略。文献[20]提出了一种基于改进型重复控制器的多功能逆变器的设计方法，提高了谐波滤除性能。需要说明的是，该方法对控制参数及主电路参数的变化比较敏感，同时重复控制算法的思路是常规谐振控制算法思路的延伸，其本质仍然为控制器对控制目标的可选择性。

综上，以上文献都假设逆变器容量为无限大，并未考虑实际工程中逆变器容量有限的客观性。此外，当并网变换器兼顾其他功能时，电能质量与并网传输效率等控制效果的主次之分也是亟待研究的问题。基于上述研究现状，本文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，并考虑逆变器容量有限，提出一种根据功能优先级排序的容量匹配策略，以优化多功能并网变换器的控制效果，提高并网变换器的功率传输效率，具有一定的研究价值和工程实际意义。

### 1 光伏逆变器的控制策略

#### 1.1 光伏逆变器的拓扑结构

图 1 为一般的光伏发电及并网系统示意图，由光伏系统(Photovoltaic, PV)、基于 DC/DC 结构的 Boost 升压电路、并网逆变器、交流侧 LCL 滤波结构、电网、网侧阻抗  $Z_g$ 、非线性负载及无功负载组成。

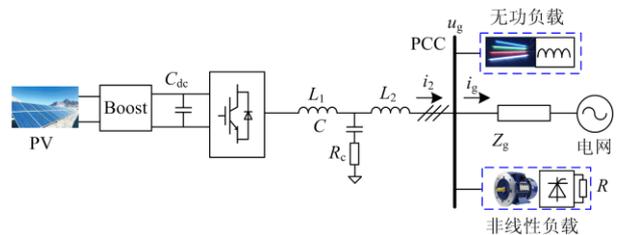


图 1 光伏并网逆变器的电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of photovoltaic grid-connected inverter

图中， $C_{dc}$  为直流侧电容， $L_1$  为逆变器侧电感， $L_2$  为网侧电感， $R_c$  为电容支路的阻尼电阻， $i_2$  为逆变器的输出电流， $i_g$  为并网电流， $u_g$  为公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)电压，网侧两端分别接有无功负载和非线性负载。

在光伏并网的模式下, 上述多功能逆变器在输出有功功率、实现变换器本体并网的同时, 针对电网侧的非线性负载、无功负载产生的谐波电流和无功电流, 也要进行抑制和补偿, 必要时还需对电网提供无功功率支撑。并网逆变器多功能实现的关键在于指令电流的合成及指令电流的跟踪控制, 相应的控制框图如图 2 所示。

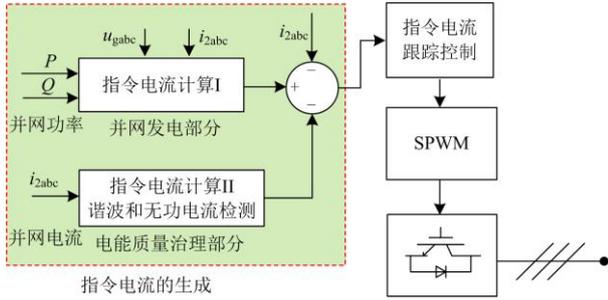


图 2 光伏并网逆变器的控制框图

Fig. 2 Control block diagram of photovoltaic grid-connected inverter

## 1.2 光伏逆变器的拓扑结构

由上述可知, 逆变器的控制电路由两部分组成, 即指令电流的合成与控制, 指令电流分为并网部分(指令电流 I)和电能质量治理部分(指令电流 II)。

一般有源电力滤波器的谐波电流检测法( $p-q$ 法和  $i_p-i_q$ 法)主要适应于三相对称负荷、正弦对称电压下电网中谐波电流的检测, 然而随着负载种类(如不平衡负载)的增多, 传统谐波检测法已无法精确地检测谐波电流, 文献[21]提出了广义瞬时无功理论谐波电流检测法, 优于传统检测法, 该方法在不平衡负载、电压畸变的工况下依然可精确获取谐波电流, 同时还可以分离出瞬时有功分量、基波正序无功分量和谐波分量, 而且仅需对谐波电流进行 Park 变换即可, 矩阵运算简单, 响应速度快<sup>[22]</sup>。假设电力系统的三相电流表达式为

$$\begin{cases} i_a = i_a^+ + i_a^- + i_0 + \sum_{n=2}^{\infty} (i_{an}^+ + i_{an}^-) \\ i_b = i_b^+ + i_b^- + i_0 + \sum_{n=2}^{\infty} (i_{bn}^+ + i_{bn}^-) \\ i_c = i_c^+ + i_c^- + i_0 + \sum_{n=2}^{\infty} (i_{cn}^+ + i_{cn}^-) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为并网的三相电流;  $i_a^+$ 、 $i_b^+$ 、 $i_c^+$  为三相电流的正序分量;  $i_a^-$ 、 $i_b^-$ 、 $i_c^-$  为三相电流的负序分量;  $i_{an}^+$ 、 $i_{bn}^+$ 、 $i_{cn}^+$  为三相谐波电流的正序分量;  $i_{an}^-$ 、 $i_{bn}^-$ 、 $i_{cn}^-$  为三相谐波电流的负序分量。

经 Park 变换后:

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{C} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} i_{an}^+ \\ i_{bn}^+ \\ i_{cn}^+ \end{bmatrix} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{C} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} i_{an}^- \\ i_{bn}^- \\ i_{cn}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$  如式(3)和式(4)所示。

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \begin{bmatrix} \cos[(n-1)\omega t + \phi_n^+] \\ \sin[(n-1)\omega t + \phi_n^+] \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \begin{bmatrix} \cos[(n+1)\omega t + \phi_n^-] \\ \sin[(n+1)\omega t + \phi_n^-] \end{bmatrix} \quad (6)$$

由上述公式可知, 在  $abc$  坐标系中, 第  $(n+1)$  次正序谐波分量经过矩阵运算, 换算成了  $dq0$  坐标系下第  $n$  次分量。同理, 第  $(n-1)$  次负序谐波分量在经过矩阵运算后, 变成了  $dq0$  坐标系下的第  $n$  次分量。换言之,  $dq0$  坐标系下的谐波分量的次数等于  $abc$  坐标系下的正序谐波次数减 1, 同时等于  $abc$  坐标系下的负序谐波次数加 1。如果在  $dq0$  坐标系下滤除  $n$  次谐波分量, 则同时滤除了  $abc$  坐标系下的  $(n+1)$  次正序谐波分量和  $(n-1)$  次负序谐波分量。

以上对指令电流中的谐波电流(即指令电流 II)及其检测机理进行了研究, 表征变换器的并网有功分量指令值(即指令电流 I)由直流侧电容的稳压环节生成, 谐波电流和瞬时有功电流的复合叠加即为最终指令电流, 相应控制框图如图 3 所示。

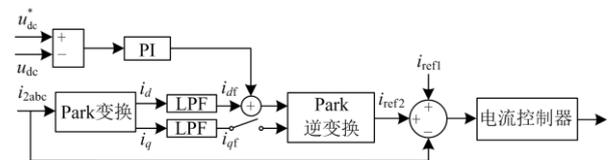


图 3 谐波电流检测框图

Fig. 3 Block diagram of harmonic current detection

图中, 谐波检测环节采用无谐波检测方法,  $u_{dc}^*$  和  $u_{dc}$  分别为电容电压的指令值和实际值,  $i_{dff}$  和  $i_{qf}$  分别为 Park 变换后网侧电流的基波电流  $dq$  轴分量,

$i_{ref1}$  和  $i_{ref2}$  分别为指令电流 I 和指令电流 II。

### 1.3 指令电流跟踪控制

图 3 中, 电流控制器采用的是准比例谐振控制器(Quasi-Proportional Resonant Controller, QPR)<sup>[23-24]</sup>, 其表达式为

$$G(s) = \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (7)$$

式中:  $k_r$  为准比例谐振控制器中的积分系数;  $\omega_c$  为准比例谐振控制器中的截止频率;  $\omega_0$  为准比例谐振控制器中的谐振频率。

相比于传统的比例积分控制器, QPR 在谐振频率点处可产生无穷大增益, 同时在谐振点附近的频率处的增益大幅衰减, 通过调节带宽系数可保证对谐振频率有较好的选择性, 有效减轻了非目标频率增益对谐振频率的影响。每个 QPR 都可以对某一特定频次的频率(即谐振频率)实现无静差跟踪。相应地, 通过对若个 QPR 控制器进行并联即可对一系列频率信号进行无静差的跟踪。由 1.2 节可知, 在  $dq0$  坐标系下, 控制第  $n$  次谐波分量即等效控制了三相静止坐标系下的  $(n+1)$  次正序谐波分量和  $(n-1)$  次负序谐波分量。实际工况中, 背景谐波往往集中在 5, 7, 11, 13, ... 次谐波上, 即在 abc 坐标系中的谐波次数为  $(6n \pm 1)$  次, 且随着谐波次数的升高, 谐波含量逐渐降低。故 QPR 得到谐振频率设置为  $6n$  次, 本文以  $n=1, 2, 3$  为例进行说明, 指令电流跟踪控制框图如图 4 所示。

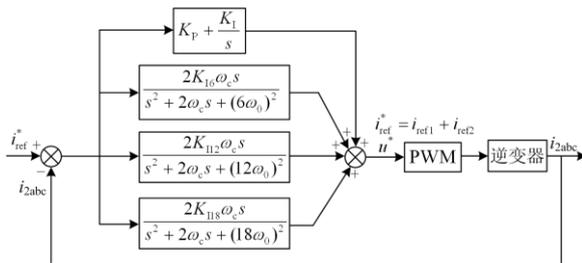


图 4 指令电流跟踪控制框图

Fig. 4 Block diagram of command current tracking control

图 4 中:  $K_{i_i}$  为  $i$  次谐波控制器的积分常数,  $i$  为正整数;  $K_i$  为积分系数;  $K_p$  为比例系数。

具体的参数参考文献[23], 相应的参数值已在本文中的第 4 节列出。

## 2 容量匹配策略

基于并网逆变器的国内外研究现状, 大多侧重于复合或多种功能的实现以及控制算法的改进和设计, 并未考虑逆变器容量有限的客观性及各种功能的协调控制、优先级折中选择等因素, 在实际工程

的应用中受到较大的局限。结合上一节的机理分析, 本节提出一种并网变换器的容量匹配策略。该策略考虑了实际工程中逆变器容量有限这一客观因素, 并设计了相关参数。

从功能的角度分析, 多功能并网逆变器可同时输出有功、无功(负载无功)、谐波分量(谐波无功)。需要说明的是, 相对有功分量, 谐波分量也属于无功, 因为在电路理论中将电压电流不同相时的情况所产生的功率, 称之为无功。在并网系统中, 无功分量更多指的是基波正序无功, 是由无功负载产生, 而且该无功含量远远高于谐波分量。从电能质量的角度分析, 谐波的危害高于传统的无功功率<sup>[19]</sup>, 因此, 考虑到需要治理谐波含量所需的并网变换器的容量较少, 不会过于影响正常有功功率的传输, 策略的思路应是优先治理谐波问题。

构造容量匹配的约束条件, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \sqrt{P^2 + Q^2} > S \\ i_{qt}^* = k \cdot i_{qt} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P$ 、 $Q$  分别为逆变器的实测有功功率和无功功率;  $S$  为逆变器的额定容量, 即视在功率;  $i_{qt}^*$  为采用策略后的基波无功电流分量;  $i_{qt}$  为采样的并网电流经谐波检测后得到的基波无功电流分量;  $k$  为匹配系数, 表示系统处于过载运行时, 以额定容量为基准, 逆变器的输出功率的收敛速度, 取值为  $(0, 1)$ ,  $k$  越小, 表示收敛速度越快。

容量匹配策略的思路如图 5 所示。

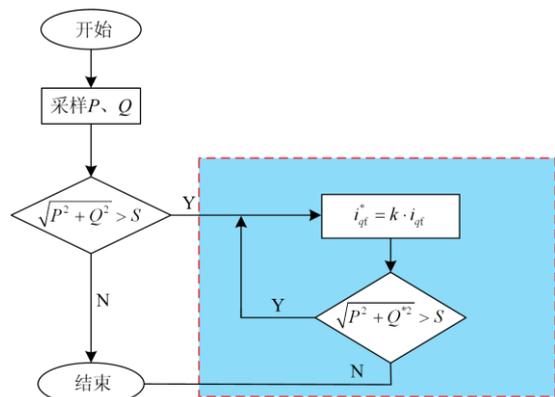


图 5 容量匹配策略示意图

Fig. 5 Schematic diagram of capacity matching strategy

图中,  $Q^*$  为采用策略后, 通过计算得到的逆变器无功功率的指令值。

本文所提策略考虑了逆变器容量有限等因素, 以逆变器输出的有功和谐波分量为最高优先级, 无功功率补偿为次优先级, 即面向复杂、非理想电网

情况时, 并网变换器的容量优先支配给并网有功功率和谐波抑制的控制效果, 当容量有冗余时, 利用剩余的容量进行无功补偿。若三者的所需容量大于逆变器额定容量时, 调节逆变器补偿的无功分量, 即容量匹配系数  $k$ , 使之降低, 直至逆变器输出的总功率低于或等于逆变器额定容量为止。这样既保证了逆变器输出的功率满足其额定容量, 同时最大程度地治理了并网点的谐波电流, 使得光伏并网逆变器处于最优、高效状态运行。

图 6 为采用所提控制策略前后的并网变换器运行工况示意图。

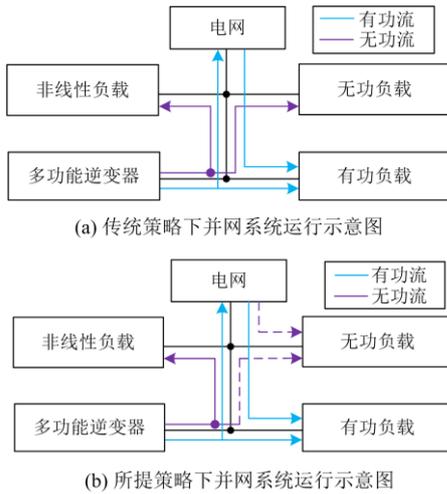


图 6 两种不同策略下并网系统的运行工况

Fig. 6 Operating conditions of grid-connected systems under two different strategies

### 3 仿真分析

基于 Matlab/Simulink+PLECS 仿真环境, 对本文所提策略进行分析。主电路置于 Simulink 环境中, 控制电路置于 PLECS 环境中。具体的相关参数, 见表 1。

表 1 并网系统的相关参数

Table 1 Related parameters of grid-connected system

参数	数值	参数	数值
$R_c/\Omega$	10	$P/kW$	20
$L_1/mH$	1.5	$Q/kvar$	4
$L_2/mH$	1.5	$C/\mu F$	10
$C_{dc}/\mu F$	470	$f_s/kHz$	8
$K_p$	0.1	$K_i$	0.5
$K_{16}$	0.07	$\omega_c$	15
$K_{112}$	0.06	$R/\Omega$	50

采用传统多功能并网策略进行仿真, 分别对多功能逆变器出口侧、网侧的相关电气量进行采样分

析, 如图 7 所示。其中, 0.08 s 时投入非线性负载, 在 0.16 s、0.22 s、0.28 s 分别模拟光照强度为强光、弱光、无光时的工况。图 7(a)为网侧的电压和电流的波形, 图 7(b)为网侧有功功率和无功功率的波形。图 8(a)为逆变器侧的电压和电流波形, 图 8(b)为逆变器输出的有功功率和无功功率。图 9(a)为逆变器输出的有功功率和无功功率的有效值, 图 9(b)为逆变器输出的实测容量, 即视在功率。

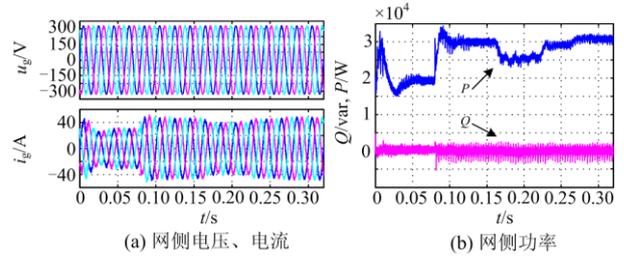


图 7 未采用容量匹配策略时网侧电压、电流和功率

Fig. 7 Grid-side current and power without the capacity matching strategy

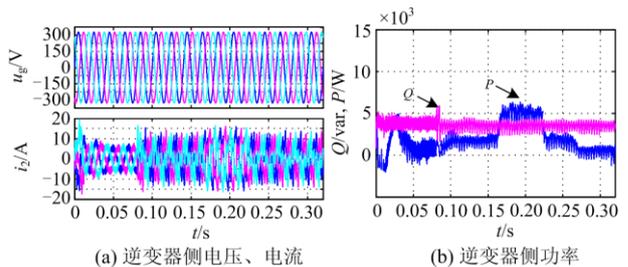


图 8 未采用容量匹配策略时逆变器侧电压、电流和功率

Fig. 8 Inverter-side current and power without the capacity matching strategy

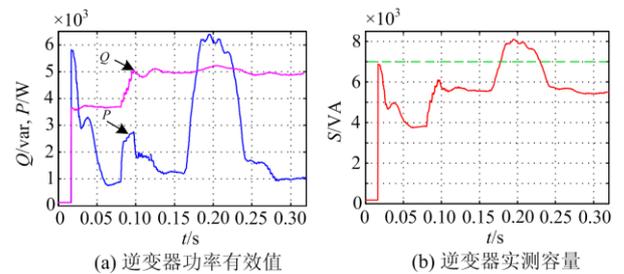


图 9 未采用容量匹配策略时逆变器功率有效值及容量

Fig. 9 Effective value and capacity of inverter power without the capacity matching strategy

在 0 s 时, 投入无功负荷, 在 0.06 s 再投入非线性负荷。从网侧电流波形可知(图 7(a)), 即使投入两类负荷后, 网侧电流仍能保持三相对称正弦波形。尤其在投入非线性负荷后, 畸变率为 3.63%, 说明文中所提多功能并网控制策略可行有效, 谐波

抑制效果良好。在逆变器运行至 0.08 s 时，逆变器侧输出有功功率为 1.2 kW，无功功率为 5 kvar，此时负载无功由逆变器提供，逆变器表现出多功能形态(图 8(b))。在图 7(b)中，网侧有功功率为 17.8 kW，为剩余有功负载提供有功功率。在 0.16 s、0.22 s、0.26 s 时改变光伏的光照强度，分别表示强光、弱光、无光，由图 8(b)知，逆变器输出有功功率先增大至 6.3 kW，后减小至 1.5 kW，再减小至 0 kW，无光时输出的有功功率为零，此时输出的无功功率用来补偿系统中无功负荷。此时，上述工况对应的并网有功功率分别为 23.7 kW、28.5 kW、30 kW，由功率守恒可知，网侧有功功率对应相反的变化趋势，无功功率为零，如图 7(b)所示。

从图 8(a)可以看出，在 0.06 s 前，即未投入非线性负荷时，逆变器输出电流为正弦波，说明当并网系统无需补偿非线性负荷的谐波时，多功能逆变器输出有功功率；在 0.06 s 以后，当系统中出现谐波时，多功能逆变器在输出有功功率的同时，输出与谐波电流等大反向的电流，抑制谐波。图 9 是表征逆变器容量的波形图，图 9(a)和图 9(b)分别为逆变器输出有功功率、无功功率的有效值和逆变器的实测容量(即视在功率)，最高为 8.1 kVA，此时为光照强度最高的工况。

实际工况中，逆变器容量是有限的，不会根据所需的各种功能的实现而无限的输出。本文设置的逆变器容量(7 kVA)。由上述工况知，在 0.16~0.22 s 时光照强度最大，此时逆变器的输出功率达到最大为 8.1 kVA，超过了并网逆变器的额定容量，长时间在此工况运行会影响设备的使用寿命和并网性能。采用本文所提策略后，可得相应的各电气量波形。图 10—图 12 为采用容量匹配策略后，与图 9—图 11 对应的工况。

由上述分析可知，当输出的有功功率和无功功率满足额定容量时，逆变器在并网运行时始终可实现多功能的效果；由图 9(b)可知，在 0.16~0.22 s 且未采用所提策略时，有功功率与无功功率的输出超过

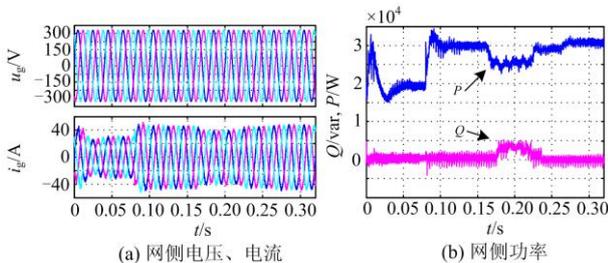


图 10 采用容量匹配策略后网侧电流和功率

Fig. 10 Inverter-side voltage, current and power with the capacity matching strategy

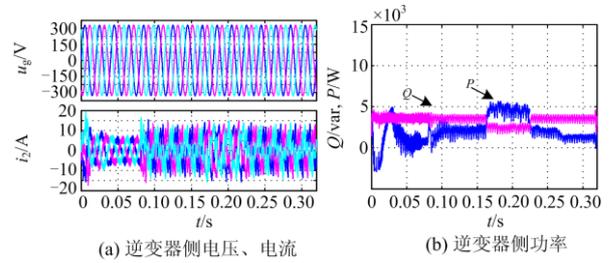


图 11 采用容量匹配策略后逆变器侧电压、电流和功率

Fig. 11 Inverter-side voltage, current and power with the capacity matching strategy

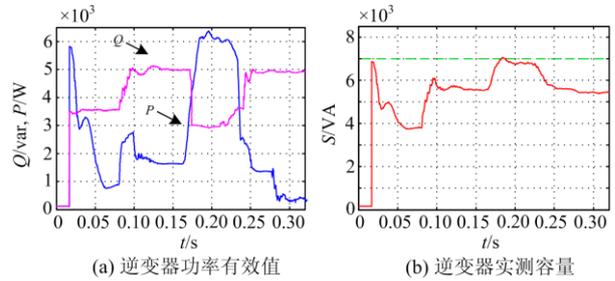


图 12 采用容量匹配策略后逆变器功率有效值及容量

Fig. 12 Effective value and capacity of inverter power with the capacity matching strategy

了并网系统的额定容量，系统处于过载运行。与传统多功能策略不同，采用文中所提策略后，在超额运行时，优先输出有功功率和谐波补偿电流，将无功功率补偿的能力限制在一定范围，使得整个并网逆变器的实时容量满足额定容量，正如图 10(b)和图 11(b)所示。由图 12(a)可知，有功功率仍以额定输出量运行，无功功率降低至 2.91 kvar，此时线路中的无功负载的差额无功功率由网侧提供。与图 7(b)不同，在该工况下网侧输出的无功功率约为 2.05 kvar。采用容量匹配策略后，逆变器的最大运行容量约为 6.94 kVA，基本以额定容量运行。

由于限制了逆变器的输出功率，当系统需要补偿无功功率时，逆变器受所提策略的影响，只能输出有限的无功功率，其余的无功功率需要网侧提供；由图 10(a)可知，由于未能完全治理系统的谐波电流，在逆变器容量受限的一段时间内，网侧电流的畸变率变为 4.1%。而由于优先输出有功和补偿谐波，仍能最大程度的抑制网侧谐波，改善了系统的电能质量。从图 11(b)可以看出，在 0.16~0.22 s 内，由于所需出力超过逆变器的额定容量，输出无功明显减小；图 12 显示了策略后的逆变器容量的相关信息。从图 12(a)可知，相比图 9(a)逆变器输出无功功率有效值在某一时刻受限制，相应的实测容量降低。

如图 12(b)所示, 视在功率基本保持在 7 kVA 以内, 保证了逆变器在额定容量下安全稳定运行, 验证了所提策略的有效性。

## 4 结论

1) 本文以微网电能质量为背景, 提出了光伏并网逆变器的控制策略, 谐波检测环节采用广义瞬时无功理论谐波检测法, 电流跟踪控制环节采用准比例谐振控制器, 随后结合逆变器实际容量有限, 又提出了一种简单有效的容量限制策略, 该策略简单有效, 逻辑清晰, 并通过仿真软件验证了该策略的有效性。

2) 该方法可推广至大容量、高耐压的并网场景中, 然而容量利用率的提升与开关频率的降低两者相互制约, 如何平衡这一矛盾将在下一步的工作中研究。

## 参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technical characteristics of China's new generation power system in energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 刘轶, 王景钢. 大型光伏电站并网暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 182-187.  
LIU Yi, WANG Jinggang. Study on transient characteristics of grid connected large photovoltaic power plants[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 182-187.
- [3] WANG Qi, QIN Wenping, DAI Wei, et al. Direct current control strategy of LCL-type converter for harmonic suppression under distorted grid condition[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(17): 3922-3930.
- [4] QI Wang, QIN Wenping, WANG Lei, et al. Enhanced robustness with damping interval widening strategy of LCL-type converter under weak grid condition[J]. Journal of Power Electronics, 2020, 20(2): 410-427.
- [5] WANG Qi, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Robustness evaluation for harmonic suppression of LCL-type converter based on converter-side current feedback strategy under weak and distorted grid[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(2): 166-177.
- [6] 杨龙月, 郭锐, 张乐, 等. 非理想电网下逆变器并网电流质量改善策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 10-18.  
YANG Longyue, GUO Rui, ZHANG Le, et al. Improvement strategy for grid connected current quality of inverters in non ideal power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 10-18.
- [7] 盘宏斌, 阮浩浩, 张佳乐. 基于参数化镇定控制器和误差信号  $H_2$  范数的 LCL 型并网逆变器电流控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 1-12.  
PAN Hongbin, RUAN Haohao, ZHANG Jiale. A parameterized stabilizing controller and  $H_2$  norm-based control scheme for LCL-filtered grid-tied inverters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 1-12.
- [8] 王祺, 秦文萍, 张宇, 等. 基于局部复阻抗模型的 LCL 型并网变换器相位重塑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4415-4425.  
WANG Qi, QIN Wenping, ZHANG Yu, et al. Phase reshaping control strategy for LCL grid connected converter based on local complex impedance model[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4415-4425.
- [9] 曾正, 杨欢, 赵荣祥, 等. 一种多功能并网逆变器拓扑及其控制[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 55-61.  
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang, et al. A multifunctional grid-connected inverter topology and its control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 55-61.
- [10] GUO Q, TU C, JIANG F, et al. Improved dual-functional DVR with integrated auxiliary capacitor for capacity optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9755-9766.
- [11] DONG Z, LI Z, DU L, et al. Coordination strategy of large-scale DFIG-based wind farm for voltage support with high converter capacity utilization[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1416-1425.
- [12] CHAUDHARY S K, GUERRERO J M, TEODORESCU R. Enhancing the capacity of the AC distribution system using DC interlinks—a step toward future DC grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1722-1729.
- [13] CHEN J, MILANO F, O'DONNELL T. Assessment of grid-feeding converter voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3980-3982.
- [14] 玄兆燕, 马振宇, 景会成, 等. 具有谐波和无功治理的 LCL 型并网逆变器研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(5): 106-111.  
XUAN Zhaoyan, MA Zhenyu, JING Huicheng, et al. Research on LCL grid-connected inverter with harmonic and reactive power control[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2018, 39(5): 106-111.
- [15] 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. Multifunctional grid-connected inverter and its application in microgrid connected to power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2649-2658.

[16] 汤胜清, 曾正, 程冲, 等. 微电网中多功能并网逆变器的无线协调控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 200-207.  
 TANG Shengqing, ZENG Zheng, CHENG Chong, et al. Wireless coordination control of multi-functional grid-tied inverters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 200-207.

[17] 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.

[18] 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. Power quality control strategy based on multifunctional grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 556-562.

[19] 曾正, 邵伟华, 赵伟芳, 等. 多功能并网逆变器与并网微电网电能质量的分摊控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4947-4955.  
 ZENG Zheng, SHAO Weihua, ZHAO Weifang, et al. Distribution control of multi-function grid-connected inverter and grid-connected microgrid power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4947-4955.

[20] 卜立之, 李永丽, 孙广宇, 等. 基于改进型重复控制算法的多功能并网逆变器设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 48-55, 69.  
 BU Lizhi, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Design of multifunctional grid-connected inverter based on improved repetitive control algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 48-55, 69.

[21] 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.

[22] 黄媛, 罗安, 王逸超. 一种无谐波检测的三相并网逆变器谐波灵活控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 213-222.  
 HUANG Yuan, LUO An, WANG Yichao. A flexible harmonic control method of three-phase grid-connected inverter without harmonic detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 213-222.

[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. Research on current coordinated control strategy of active power filter based on quasi-proportional resonance[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1614-1623.

[24] 刘建锋, 李美玉, 余光正, 等. 考虑 VSC 系统谐波稳定条件下的 LCL 滤波器参数优化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 80-90.  
 LIU Jianfeng, LI Meiyu, YU Guangzheng, et al. Parameter optimization design method of LCL filter considering harmonic stability of VSC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 80-90.

收稿日期: 2021-04-19; 修回日期: 2021-08-25

作者简介:

王 祺(1991—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网技术、电力电子化电力系统的运行与控制、微电网电能质量治理及装备制造等; E-mail: 343366922@qq.com

赵兴勇(1965—), 男, 教授, 研究方向为大规模风电及分布式发电并网、智能电网、微电网运行与控制、电压稳定性等。

(编辑 姜新丽)