具有功率精确分配能力的逆变器电压谐波分频下垂控制方法研究

刘海涛[1]，吕志鹏[1]，苏 剑[1]，吴 鸣[1]，张昌华[2]，陈 昕[2]，廉静如[2]

(1.配电变压器节能技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院)，北京 100192;
2.电子科技大学能源科学与工程学院，四川 成都 611731)

摘要：微网中有可能存在电压谐波问题。设计具有能量转换和电压谐波治理的复合型逆变器有助于降低微网的成本。同时当多逆变器并联时，希望各逆变器能在基波和谐波域依照各自容量分配功率。现有方法是采用下垂控制和虚拟阻抗技术。首先建立包含谐波域的逆变器并网模型，阐述了谐波抑制的基本原理。然后讨论了设计逆变器的输出阻抗为阻性的方法。随后应用下垂控制策略，提出了逆变器基波和谐波的分频下垂控制器设计方法。最后通过PSCAD验证了该方法不仅能有效地抑制电压谐波，而且也能依照容量合理分配基波域和谐波域的功率。

关键词：微网；逆变器；下垂控制；功率分配；谐波抑制

Inverter's frequency dividing droop controller with accurate load sharing ability

LIU Haitao[1], LÜ Zhipeng[1], SU Jian[1], WU Ming[1], ZHANG Changhua[2], CHEN Xin[2], LIAN Jingru[2]

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Because there possibly lies voltage harmonics pollution in microgrids, it benefits to reduce system cost if inverters have compound functions of voltage harmonics suppression and electrical energy conversion. Moreover, when multi inverters operated parallel in the mircogrids, they are expected to share the power proportionally according to their capacities. In this respect, frequency dividing droop control strategy and inverter's virtual output impedance shaping technology are quite attractive methods to achieve this goal. In this paper, firstly inverter grid-connected model containing the harmonics components is built and voltage harmonics suppression principle is introduced. Then, the method of making inverters' output impedance resistive is discussed. Subsequently, with droop control theory, design of frequency dividing droop controller within fundamental and harmonic frequencies fields is presented out. At the last part of this paper, with PSCAD simulation tool, validity of proposed method is proved and satisfied performances are obtained in the respects of not only harmonics suppression but also proportional load sharing according to its capacity.

This work is supported by the "Thousands of People Plan" Special Support Project of the China State Grid Corp. (No. PD71 -12-017) & Science and Technology Project of the China State Grid Corp.

Key words: micro-grid; inverters; droop control; load sharing; harmonics suppression

中图分类号： TM71 文章编号： 1674-3415(2015)19-0009-06

0 引言

近年来随着可再生能源的迅猛发展，分布式发电成为传统电力系统兼容可再生能源的关键技术和有效途径。由于分布式电源一般具有容量低、地理分布分散的特点，因此相当一部分分布式发电装置选择直接或者与负荷组成微电网的形式接入配电网。大量的电力电子设备和非线性负载的引入，使得配电网/微电网内部存在电压、电流谐波的问题。逆变器(整流器)作为连接可再生能源(直流负荷)与

基金项目：国家电网公司“千人计划”专项支持项目(PD71-12-017)；国家电网公司科技项目“高密度分布式逆变系统自适应控制关键技术研究”

微电网的接口设备，不仅是直流-交流能量变换的中枢，也具有进行谐波治理的硬件基础[1]。设计兼具能量变换和谐波治理功能于一身的复合型逆变器控制器，可避免配置专门的谐波治理设备，对于降低设备成本，提高电能质量具有明显意义[2]。

围绕使逆变器谐波治理的问题，国内外学者进行了大量研究。在抑制电流谐波方面，文献[3]使用重复控制器对电流谐波进行跟踪抑制；文献[4]采用比例谐振算法设计控制器跟踪电流谐波。这两种方法在控制器的设计上均采用了基波控制环与各次谐波控制环并行的结构。类似有源滤波器的控制，但增加了基波功率控制的功能。在抑制电压谐波方面，文献[5]应用数字正弦观察器检测谐波后，设计前馈补偿环节抑制电压谐波；文献[6]通过基于空间矢量分析与调制的方法对谐波进行抑制。以上这几种方法在抑制电流、电压谐波上均取得了良好的效果，但都只考虑了单台逆变器的运行，忽略了多逆变器并联运行时功率分配的控制问题。当考虑多个逆变器无互连线并联运行时，往往希望各逆变器能够依照各自的容量均匀分配有功和无功功率[7-8]。基于虚拟阻抗的逆变器输出阻抗控制技术[9-12]和下垂控制理论[12-14]是解决这类问题的有效手段。基于此，文献[15-16]从治理电压谐波的角度出发，同时考虑到多逆变器的功率分配控制问题，提出了一种分频下垂控制器的设计方法。但该方法只考虑到了基波域的功率分配，未考虑到谐波域功率的分配问题，且只是验证了分频下垂控制方法具有对电压谐波的抑制能力，其抑制效果还有待提高。

在现有研究基础上，本文提出了一种改进的电压谐波分频下垂控制器，实现了各并联逆变器在基波与各谐波域内功率的精确分配，并提高了谐波抑制的效果。本文首先提出了计及谐波的逆变器并网模型，介绍了电压谐波抑制的原理；然后讨论了虚拟阻抗技术；随后给出了改进的电压谐波分频下垂控制策略，并通过仿真验证所提策略有效性；最后对研究工作予以了总结。

1 计及谐波的逆变器并网模型

包含基波及各次谐波的单相并网逆变器的数学模型如图 1 所示[16]。其中电压源 v 表示分布式电源，$Z_o(s)$表示逆变器的输出阻抗，v_o 为逆变器的输出电压。它们之间的关系为

$$v_o = v - Z_o(s)i \tag{1}$$

负荷用串联的电压源 $v_{o1}, \cdots, v_{oh}$ 及并联的电流源 $i_1, \cdots, i_h$ 表示。

根据叠加定理，整个逆变器系统可以由基波部分及谐波部分叠加组成。当系统进入稳态之后，抽象出 h 次谐波电路进行分析，如图 2 所示。

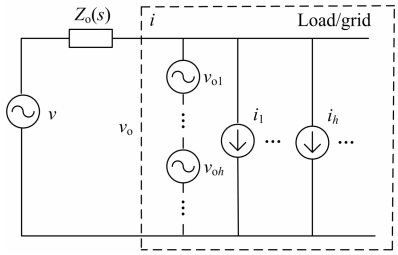

图 1 含各次谐波的逆变器并网等效电路

Fig. 1 Schematic of grid-connected inverter containing all harmonics

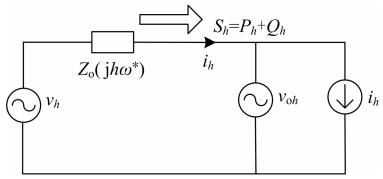

图 2 h 次谐波电路

Fig. 2 Circuit at the h-th harmonic frequency

假设逆变器输出电流的 h 次谐波分量 i_h 在输出阻抗 $Z_o(\mathrm{j}h\omega^*)$上的电压降等于 h 次谐波电压补偿分量 v_h，那么根据基尔霍夫电压定律可知，逆变器输出电压中谐波分量 v_{oh} 为零。即当逆变器输出满足

$$E_h = I_h \left| Z_o\left(\mathrm{j}h\omega^*\right) \right| \tag{2}$$

$$\delta_h = \varphi_h + \angle Z_o\left(\mathrm{j}h\omega^*\right) \tag{3}$$

式中：E_h 为谐波电压补偿分量 v_h 的有效值；I_h 为谐波电流 i_h 有效值；δ_h 为 v_h 的相位；φ_h 为 i_h 的相位。逆变器输出电压谐波可以得到明显抑制。

2 虚拟阻抗设计

当多个逆变器无互连线并联运行的时，由于各个逆变器自身容量不同以及其各自输出阻抗不同且难以准确测定，也就无法对各逆变器功率分配进行理想的控制。虚拟阻抗设计方法使得逆变器的输出阻抗不再仅仅取决于所接滤波器和传输线的物理参数，明显削弱物理阻抗等因素的影响，提高功率分配控制效果[12]。因此，可运用虚拟阻抗技术对各逆变器进行阻抗重塑。

如图 3 为逆变器的一般结构。u_f 为滤波器前端逆变电路输出电压，v_o 为输出电压，i 为输出电流，u 为调制电压。

理想情况下忽略逆变电路内阻，则有：

$$u \approx u_f = sLi + v_o \tag{4}$$

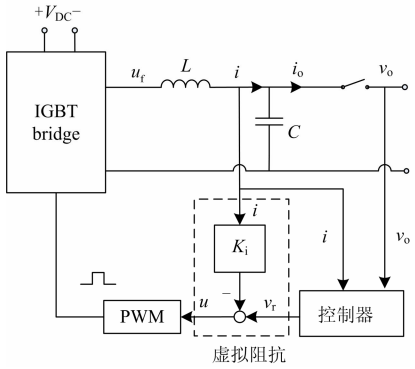

图 3 单相逆变器拓扑结构与虚拟阻抗

Fig. 3 Single-phase inverter topology and virtual impedance

构造一个虚拟阻抗如图 3 中虚线框部分所示，其输入输出满足：

$$u = v_r - K_i \cdot i \tag{5}$$

则由式(4)和式(5)可以得到：

$$v_o = v_r - (sL + K_i)i = v_r - Z_o(s)i \tag{6}$$

如果比例系数 K_i 足够大，那么电感项 sL 的影响可以忽略，逆变器输出阻抗可近似为阻性：

$$Z_o(s) \approx R_o = K_i \tag{7}$$

上式在谐波域也近似成立。

3　电压谐波分频下垂抑制策略

3.1 分频下垂控制策略

由第 2 节分析可知，通过虚拟阻抗技术将逆变器基波域输出阻抗重塑为阻性，可以淡化逆变器物理参数对输出阻抗影响，有利于多个逆变器并联时功率分配的控制。当逆变器输出阻抗为阻性时，输出阻抗角为 0，基波有功功率 P_1 和无功功率 Q_1 可表示为

$$P_1 = \frac{E_1 V_{o1}}{Z_o}\cos\delta - \frac{{V_{o1}}^2}{Z_o} \tag{8}$$

$$Q_1 = -\frac{E_1 V_{o1}}{Z_o}\sin\delta \tag{9}$$

式中，δ 为功角。由于 δ 很小，基波下垂特性可表示为

$$E_1 = E^* - n_1 P_1 \tag{10}$$

$$\omega_1 = \omega^* + m_1 Q_1 \tag{11}$$

基于上述分析，文献[15]设计了具有基波功率精确分配的鲁棒下垂控制器，如图 4 中基波下垂控制器虚线框所示。该方法通过引入电压比例系数和积分，提高了控制器适应系统参数变化和不同工况运行的能力，有助于电压的稳定和环流抑制。将其推广到谐波域，承担能量控制功能的基波鲁棒下垂控制器和本文所提出的承担抑制谐波功能的改进的谐波下垂控制器合在一起，采用并行结构设计，就构成了如图 4 所示的分频下垂控制器。

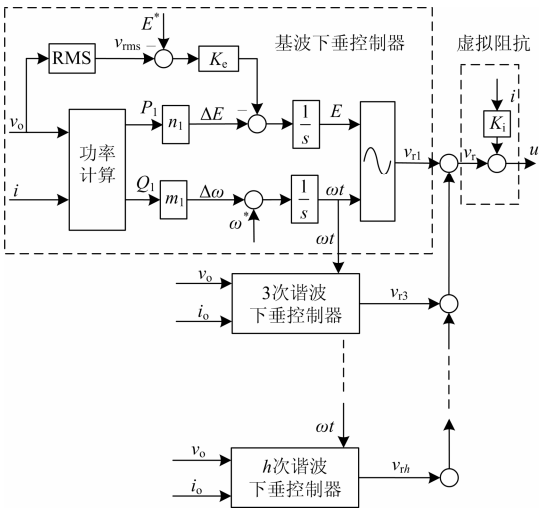

图 4 分频下垂控制器

Fig. 4 Frequency dividing droop controller

3.2 电压谐波分频下垂控制器

由第 1 节分析可知，当逆变器输出电压中谐波分量 v_{oh} 为零时，图 2 谐波电路中负载部分可以等效为一个电流源。则各次谐波的有功功率 P_h 和无功功率 Q_h 可以表示为

$$P_h = E_h I_h \cos\delta - Z_o {I_h}^2 \cos\theta \tag{12}$$

$$Q_h = E_h I_h \sin\delta - Z_o {I_h}^2 \sin\theta \tag{13}$$

若 δ 很小，则无论谐波电路输出阻抗呈感性、容性、阻性，谐波下垂特性均可表示为[16]

$$E_h = {E_h}^* - n_h P_h \tag{14}$$

$$\omega_h = {\omega_h}^* - m_h Q_h \tag{15}$$

理想情况下，希望谐波完全抑制为 0。若设 ${E_h}^*$=0，式(14)可简化为 E_h=−$n_h P_h$。但下垂控制本质上为有差调节，虚拟阻抗的加入更增加了输出阻抗上的压降。因此实际电路中，谐波电压无法彻底抑制为 0，否则对应的 P_h=0，失去谐波抑制作用。为此，若设 ${E_h}^*$≠0，式(14)表示为

$$E_h - {E_h}^* = -n_h P_h = \Delta E_h \tag{16}$$

类似基波处理方法，谐波电压控制信号 E_h 通过 ΔE_h 积分获得。并在有功电压环节引入一个比例反馈环节 $K_{eh}({E_h}^*-v_{hrms})$，提高控制器的鲁棒性。一般可设 ${E_h}^*$等于 5%额定输出电压，表明输出电压中 h 次谐波含量的上限。根据以上分析设计 h 次电压谐波下垂控制器如图 5 所示。

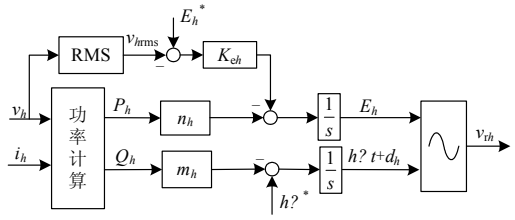

图 5 *h* 次电压谐波下垂控制器

Fig. 5 *h*th-harmonic droop controller

3.3 不同额定容量的逆变器并联功率精确分配

根据传统下垂控制可知，并联运行的逆变器要实现功率与逆变器容量成比例分配必须满足以下两式。

$$m_{1i}P_{1i} = m_{2i}P_{2i} \tag{17}$$

$$n_{1i}Q_{1i} = n_{2i}Q_{2i} \tag{18}$$

式中：m_{1i}、n_{1i}指逆变器 1 的下垂控制参数；m_{2i}、n_{2i}指逆变器 2 的下垂控制参数，i=1,3,5…，下同。P、Q 下标 i=1 时表示基波域功率，i=3,5…时表示谐波域功率。

从环流的角度考虑，由式(8)和式(14)可得：

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{E^*\cos\delta_1 - V_\mathrm{o}}{\cos\delta_1 + \dfrac{Z_{1\mathrm{o}}}{n_{1i}V_\mathrm{o}}} - \frac{E^*\cos\delta_2 - V_\mathrm{o}}{\cos\delta_2 + \dfrac{Z_{2\mathrm{o}}}{n_{2i}V_\mathrm{o}}} \tag{19}$$

为抑制环流电压差 ΔE 应该为零。由式(17)~式(19)可得，逆变器功率精确分配必须满足：

$$\frac{Z_{1\mathrm{o}}}{Z_{2\mathrm{o}}} = \frac{m_{1i}}{m_{2i}} = \frac{n_{1i}}{n_{2i}} \tag{20}$$

因此，在设计逆变器时，下垂系数和虚拟阻抗要满足式(20)，这样基波部分及谐波部分功率均能实现精确分配。

4　仿真实验

采用 PSCAD 构造包含四个逆变器及负荷的系统，结构如图 6 所示。

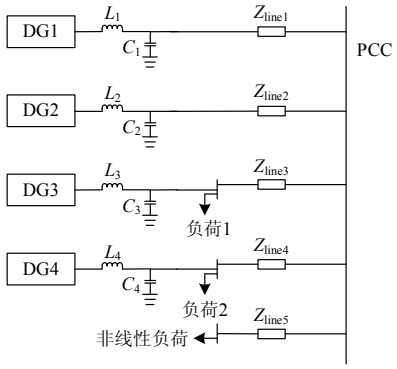

图 6 系统结构

Fig. 6 System structure

其中 DG1、DG2 使用分频下垂控制策略，承担治理电压谐波的责任；DG3、DG4 只使用基波下垂控制策略，对负荷 1、2 以及非线性负荷提供功率。各逆变器直流侧 350 V，输出采用 LC 型滤波器，非线性负荷为不控整流桥连接 4.5Ω 电阻负载。DG1-4 容量比为 1:2:1:2，系统容量为 18.2 kVA，功率因数为 0.9，额定电压 230 V，LC 滤波器及 DG1、DG2 控制参数如表 1 所示，DG1 和 DG2 的 LC 滤波器的电感、虚拟阻抗参数以及下垂系数满足式(20)，呈 2 倍关系。DG3、DG4 控制参数无谐波下垂系数部分，其余参数分别与 DG1、DG2 对应的系数相同。本文仿真条件为孤岛。

表 1 LC 滤波器及逆变器控制参数

Table 1 Parameter of LC filter and inverter's controller

	逆变器 1	逆变器 2
LC 滤波器	L_1=4.7 mH	L_2=2.35 mH
	C_1=22 μF	C_2=22 μF
虚拟阻抗	K_{i1}=4	K_{i2}=2
基波部分	m_{11}=7.84×10^{-4}	m_{21}=3.92×10^{-4}
	n_{11}=0.05564	n_{21}=0.02782
三次谐波	m_{13}=0.0342	m_{23}=0.0171
	n_{13}=2.5	n_{23}=1.25
五次谐波	m_{15}=0.0342	m_{25}=0.0171
	n_{15}=2.5	n_{25}=1.25
七次谐波	m_{17}=0.00342	m_{27}=0.00171
	n_{17}=5	n_{27}=2.5

1) 工况 1−四台逆变器并联运行，DG1、DG2 不使能各次电压谐波下垂控制器，仅使能基波下垂控制器。图 7(a)为公共耦合点(Point of common coupling, PCC)处电压波形，图 7(c)为工况 1 下 PCC 处电压谐波含量。

2) 工况 2−四台逆变器并联运行，DG1、DG2 使能基波与电压谐波下垂控制器，进行电压谐波治理。图 7(b)为 PCC 处电压波形，图 7(d)为工况 2 下 PCC 处电压谐波的含量。

比较图 7(a)和图 7(b)电压波形可以看出：工况 1，四台逆变器都采用基波下垂控制为负荷供能，由于非线性负荷的存在，PCC 处电压谐波畸变严重；工况 2 有两台逆变器加入了谐波下垂控制，在为负荷供能同时治理电压谐波，PCC 处电压谐波畸变减小，更接近正弦波。比较图 7(c)和图 7(d)也可以看出，工况 2 使能电压谐波下垂控制器后，总谐波含量从 14.39%减少到 3.84%。仿真结果说明了多逆变器并联运行的情况下，接入采用分频下垂控制的逆变器可以有效抑制电压谐波。

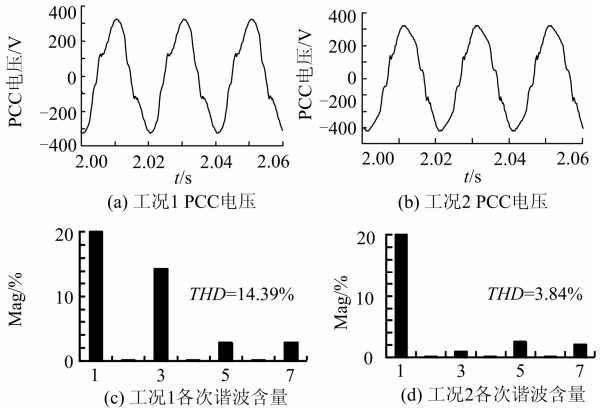

图 7 仿真电压波形及谐波含量

Fig. 7 Simulation waveforms of voltage and THD

3) 工况 3−四台逆变器并联运行，在工况 2 的运行条件下下，在 3 s 到 4 s 时突然增加负荷功率。

图 8 为工况 3 下四台逆变器基波及 DG1 与 DG2 的 3、5、7 次谐波有功功率和无功功率波形。从图 8(a)、图 8(b)可以看出 DG1-4 在负荷变化前后，基波有功功率和无功功率均按照 1:2:1:2 比例进行分配，实现了按照四台逆变器容量分配功率。从图 8(c)~图 8(h)可以看出，DG1 与 DG2 在负荷变化前后，在 3 次与 5 次谐波域内，有功功率均按照 1:2 比例进行分配，无功功率则均在 0 附近波动；而在

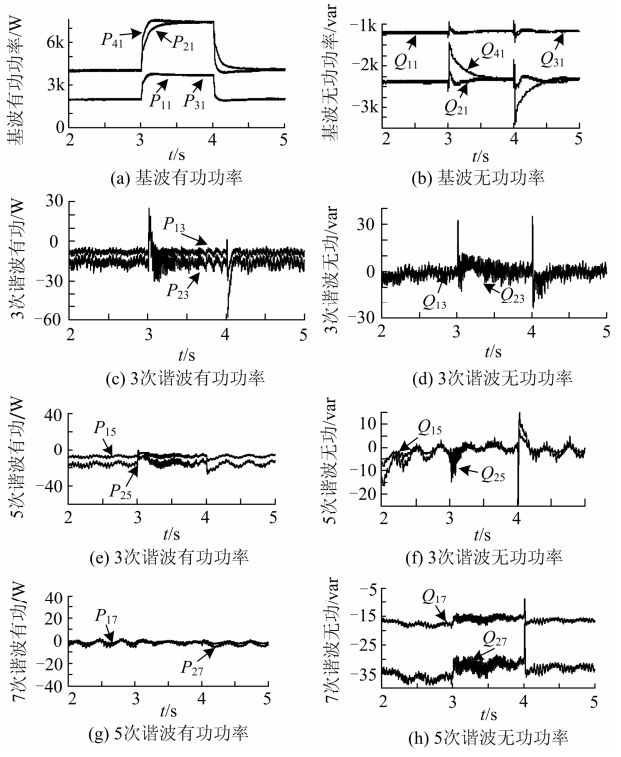

图 8 各频域功率波形

Fig. 8 Power waveforms at each frequency

7 次谐波域内，无功功率按照 1:2 的比例分配，有功功率在 0 附近波动。实现了谐波域内按照逆变器容量进行功率分配。结果表明，按式(20)关系选取下垂系数和虚拟阻抗，不同额定容量逆变器并联可实现基波及各次谐波域内的功率精确分配。

5　结论

本文针对采用分频下垂控制策略对逆变器并联运行时只考虑到基波功率准确分配、忽略谐波域功率的问题。结合阻抗重塑技术，并在谐波域引入下垂控制和电压负反馈，提出了一种在基波和各谐波域内均具有功率精确分配能力的电压谐波分频下垂控制策略。通过 PSCAD 进行仿真，验证了所提控制策略抑制电压谐波效果明显，且可以实现基波及各次谐波域内功率的精确分配。下一步将研制样机，进行有关的物理实验，探索下垂系数的选取方法。

参考文献

[1] 胡铭, 陈珩. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 27(5): 66-70.
HU Ming, CHEN Heng. Active power filter technology and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 27(5): 66-70.

[2] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-13.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, TANG Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-13.

[3] 乔鸣忠, 夏益辉, 梁京辉, 等. 基于重复-PI 的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 54-59.
QIAO Mingzhong, XIA Yihui, LIANG Jinghui, et al. Research on PI control based compound controller applying to shunt active filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 54-59.

[4] 牟龙华, 张大伟, 周伟. 基于并联谐振的新型混合有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 162-166, 173.
MU Longhua, ZHANG Dawei, ZHOU Wei. Research on a novel hybrid active power filter based on shunt resonance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 162-166, 173.

[5] PADMAVATHI L, JANAKIRAMAN P A. Self-tuned feed-forward compensation for harmonic reduction in single-phase low-voltage inverters[J]. IEEE Transactions

on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4753-4762.

[6] MOHAPATRA K K, GOPAKUMAR K, SOMASEKHAR V T, et al. A harmonic elimination and suppression scheme for an open-end winding induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(6): 1187-1197.

[7] 王立建, 王明渝, 刘洋, 等. 一种新型的电压源逆变器并联控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 51-55.
WANG Lijian, WANG Mingyu, LIU Yang, et al. A novel control strategy for parallel operation of voltage source inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 51-55.

[8] 李依璘, 王明渝, 梁慧慧, 等. 基于分布式控制的不同容量逆变器并联技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 123-128.
LI Yilin, WANG Mingyu, LIANG Huihui, et al. Study on distribution controlled inverter parallel system with different power ratings[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 123-128.

[9] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.

[10] CHIANG S J, YEN C Y, CHANG K T. A multimodule parallelable series-connected PWM voltage regulators[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2001, 48(3): 506-516.

[11] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.

[12] ZHONG Qingchang. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1281-1290.

[13] 刘喜梅, 赵倩, 姚致清. 基于改进下垂算法的同步逆变器并联控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 103-108.
LIU Ximei, ZHAO Qian, YAO Zhiqing. Research on control strategy of parallel synchronous inverters based on improved droop algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 103-108.

[14] MOHAMED Y, EL-SAADANY E. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.

[15] 吕志鹏, 盛万兴, 蒋雯倩, 等. 具备电压稳定和环流抑制能力的分频下垂控制器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 1-9.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, JIANG Wenqian, et al. Frequency dividing droop controllers with the function of voltage stabilization and circulation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 1-9.

[16] ZHONG Qingchang. Harmonic droop controller to reduce the voltage harmonics of inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 936-944.

收稿日期：2014-12-12； 修回日期：2015-04-11

作者简介：

刘海涛(1978-)，男，高级工程师，研究方向为微网运行与控制、新能源并网与电能质量控制、配网自动化与运行；

吕志鹏(1984-)，男，博士，高级工程师，研究方向为微网运行与控制、新能源并网与电能质量控制、配电网电气节能技术；E-mail: dkylzp@126.com

苏 剑(1971-)，男，教授级高级工程师，研究方向为微网运行与控制、新能源并网、配电网运行与管理。

(编辑 姜新丽)