

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 10. 002

基于一致性的微电网分布式不对称功率分配控制

金胜赫^{1,2}, 张化光¹, 孙秋野¹, 周建国¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819 ; 2. 金策工业综合大学 电气工程系, 平壤 999093)

摘 要 : 微电网中分布式发电可使微电网的电能质量增强 , 但线路阻抗不匹配时传统功率下垂控制方法不能保证负荷不对称功率的精确分配. 针对此问题 , 提出了一种基于一致性和自适应虚拟阻抗的分布式负序功率均分控制方法. 该方法通过引入负序虚拟阻抗使分布式发电单元按容量精确分配不对称负荷. 设计了多智能体一致性算法 , 自适应调整负序虚拟阻抗 , 消除线路阻抗不匹配带来的影响 , 实现了不对称功率准确分配. 仿真实验结果验证了该控制方案的正确性和有效性.

关 键 词 : 分布式发电 ; 微电网 ; 一致性控制 ; 负序虚拟阻抗 ; 不对称功率分配

中图分类号 : TM 76 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1005 - 3026(2016)10 - 1374 - 05

Consensus-Based Distributed Asymmetric Power Sharing Control in Microgrids

KIM Sung-hyok^{1,2}, ZHANG Hua-guang¹, SUN Qiu-ye¹, ZHOU Jian-guo¹

(1. School of Information Science & Engineering , Northeastern University , Shenyang 110819 , China ;
2. Department of Electrical Engineering , Kim Chaek University of Technology , Pyongyang 999093 , DPRK.
Corresponding author : KIM Sung-hyok , E-mail : kimsunghyok@ 163. com)

Abstract : Distributed generations (DGs) can be used for the power quality enhancement of microgrids. However , load imbalance power cannot be shared accurately among the DGs by using the conventional droop control method for considering the mismatched line impedance. To solve this problem , a novel distributed negative-sequence power sharing method was proposed based on both consensus and adaptive virtual impedance. The negative sequence virtual impedance of each DG was used by this method to achieve accurate negative-sequence power sharing. A multi-agent consistency algorithm was designed to adjust adaptively the negative-sequence virtual impedance , to eliminate the imbalance power sharing error among the DGs , and to implement accurately asymmetric power sharing. The simulation results verified the correctness and validity of the proposed method.

Key words : distributed generation (DG) ; microgrids ; consensus control ; negative-sequence virtual impedance ; imbalanced power sharing

微电网中分布式发电(distributed generation , DG)把高可靠性、高质量的电力提供给分布式负荷^[1]. 微电网中不对称电压导致电能质量问题 , 比如不稳定、额外的功率损耗、对异步电机的负面影响. 不对称电压可以在不对称负荷连接在微电网的情况下发生. 近年来 , 出现了一些电能质量补偿的控制方法. 传统的串联/并联型有源电力滤波器是通过注入负序电压/电流来补偿电压不对

称^[2] , 但当存在严重的负载不对称时 , 通过有源滤波器注入的电流超过滤波器的额定容量. 微电网中 DG 用来充当分布式有源滤波器 , 通过基于下垂控制的有功、无功功率控制补偿不对称电压. 文献[3]通过多个 DG 间的准确控制补偿电压不对称. 文献[4]在逆变单元中采用了不对称功率 - 电纳下垂控制实现不对称、谐波功率分配控制方法. 另一方面 , 微电网中各 DG 到负荷的线路

阻抗不等,影响了不对称功率的精确分配.所以,传统的下垂控制难以直接实现不对称、谐波负荷分配.文献[5]采用了正负序虚拟阻抗调整 DG 的等效阻抗.文献[6]利用低频宽通信的集中式控制方法补偿不对称电压,实现不对称功率的精确分配.但是,集中式的控制方法存在灵活性不足、低可靠性等缺点.近年来,基于一致性的分布式控制方法在各种研究领域成为热点之一^[7],包括应用于微电网^[8].文献[9]采用分布式电压不对称补偿实现各 DG 间的负序电流的精确分配.

综上所述,大多数方法针对线性、不对称负荷功率的精确分配不能完全克服微电网线路阻抗特性的影响.因为集中式控制方法降低系统的灵活性和可靠性,难以应用于含多个 DG 的复杂微电网.为此,在微电网中存在不对称负荷的情况下,提出了基于分布式自适应虚拟阻抗的不对称功率分配方法.在传统的下垂控制基础上,基于分布式控制的自适应负序虚拟阻抗控制策略在准确分配不对称负荷的同时也改善了公共连接点(point of common coupling, PCC)的电压不对称,提高了系统的灵活性和可靠性.仿真结果表明了所提控制方案的正确性和有效性.

1 微电网无功功率分配控制

图 1 为 3 个 DG、负荷构成的微网系统结构图.负荷由位于 PCC 的线性对称负荷、不对称负荷或者两种负荷的结合构成.各 DG 单元通过本地控制器维持稳定的电压和频率,同时实现负荷功率分配.为了改善负荷功率分配精度,有必要建立和利用 DG 间的通信系统.

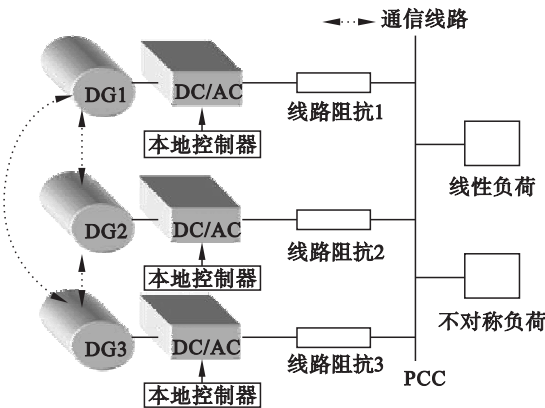


图 1 含线性、不对称负荷的微网结构图
Fig. 1 Diagram of microgrid with linear and imbalanced loads

1.1 无功功率分配控制

为了满足无互联线通信功率分配的要求,模仿同步发电机下垂控制被广泛地应用于微电网.传统有功-频率和无功-电压下垂控制可表示为

$$\omega_i = \omega^* - m_i P_i, \quad (1)$$

$$E_i = E^* - n_i Q_i. \quad (2)$$

其中 ω^* 、 E^* 分别为 DG 在空载下输出电压的角频率和幅值; ω_i 、 E_i 分别为 DG 实际输出电压的角频率和幅值参考值; m_i 、 n_i 分别为频率和电压的下垂系数; P_i 、 Q_i 分别为第 i 个 DG 的输出有功和无功功率.线路阻抗的不匹配影响传统下垂控制的稳定性和动态性能.为了实现解耦有功和无功功率,减少线路阻抗的影响,文献[5]提出了虚拟阻抗:

$$V_{\text{ref } i} = V_{\text{droop } i} - I_{oi} Z_{vi}. \quad (3)$$

其中: $V_{\text{ref } i}$ 为修改的参考电压; $V_{\text{droop } i}$ 为下垂控制器的输出电压; I_{oi} 为分布式发电的基波正序电流; Z_{vi} 为虚拟阻抗.

1.2 不对称功率分配控制

在微电网孤岛运行模式时不精确分配不对称负荷功率可能会导致 DG 的过电流保护动作^[8].为了实现不对称功率精确分配,应使等效基波负序阻抗可按照 DG 单元容量实现反比例分配:

$$X_{\text{Neg } 1} Q_{\text{Neg } 1} = X_{\text{Neg } 2} Q_{\text{Neg } 2} = \dots = X_{\text{Neg } N} Q_{\text{Neg } N}. \quad (4)$$

其中: $X_{\text{Neg } 1}$ 到 $X_{\text{Neg } N}$ 为 1 到 N 个 DG 单元的等效基波负序阻抗; $Q_{\text{Neg } 1}$ 到 $Q_{\text{Neg } N}$ 为 1 到 N 个 DG 单元的额定负序功率.根据式(4),在同等容量 DG 存在的情况下,不对称功率不均分分配通过相等的等效基波负序阻抗实现.

2 不对称功率分配控制

2.1 负序虚拟阻抗控制

根据 1.2 节的分析,为了实现负荷功率精确分配,可通过调整虚拟阻抗使等效基波负序阻抗成恰当比例实现.实际上,由于不匹配线路阻抗的存在,式(4)难以满足.为了得到各 DG 相匹配的等效基波负序阻抗,采用基波负序虚拟阻抗:

$$X_{\text{Neg } i} = X_{\text{Negline } i} + X_{\text{NegV } i}, \quad (5)$$

$$X_{\text{NegV } i} = X_{\text{NegV } i}^* + \Delta X_{\text{NegV } i}. \quad (6)$$

其中: $X_{\text{Negline } i}$ 、 $X_{\text{NegV } i}$ 分别为在基波负序上第 i 个 DG 线路上的电抗和虚拟电抗; $X_{\text{NegV } i}^*$ 为静态虚拟电抗,保证实现等效电抗为电感性的; $\Delta X_{\text{NegV } i}$ 为基波负序虚拟电抗修正项.通过自适应调整

$\Delta X_{\text{Neg}V_j}$,使各 DG 单元的等效基波负序阻抗相匹配 ,实现不对称功率准确分配.

2.2 不对称功率控制

当各 DG 单元到负荷的线路阻抗不等时 ,为了得到相匹配的等效基波负序阻抗 ,微电网内部各 DG 间的无功功率分配要求已知各 DG 的线路阻抗^[8] ,但实际上难以获得. 为减少线路阻抗不匹配因素对负荷精确分配的不利影响 ,无功功率分配需提出合理的功率控制方法. 因此 ,本文通过设计一致性算法来自适应调整虚拟阻抗. 为实现不对称功率精确分配 ,设计了基于一致性的不对称功率分配控制算法 ,充分利用本地和邻居的负序无功功率信息. 当 DG 的额定容量不等时 ,利用基于一致性的负序无功功率误差 ,不对称负荷功率按照 DG 容量实现比例分配. 为简化讨论 ,本文考虑微电网内部各 DG 有相等的额定容量 ,利用实值表示不对称功率精确分配.

3 分布式自适应负序虚拟阻抗控制

近年来 ,一致性问题用于促进微网中多个 DG 的协调. 为实现不对称功率精确分配 ,本节设计了基于一致性算法的虚拟阻抗自适应控制方法 ,该方法提出基于一致性算法的负序虚拟阻抗修正项. 分布式不对称功率控制是基于一阶线性多智能体系统的调节同步化问题^[13] :

$$\dot{Q}_{\text{Neg}j} = u_{Q_{\text{Neg}j}}. \tag{7}$$

基于一致性的不对称功率分配环发现不对称功率不匹配 :

$$u_{Q_i} = -C_{Q_{\text{Neg}}} \sum_{j=N_i} a_{ij} (Q_{\text{Neg}j} - Q_{\text{Neg}i}). \tag{8}$$

其中 , $C_{Q_{\text{Neg}}}$ 为耦合增益. 整体系统表示为

$$\dot{Q}_{\text{Neg}} = u_{Q_{\text{Neg}}}. \tag{9}$$

$$u_{Q_{\text{Neg}}} = -C_{Q_{\text{Neg}}} \mathbf{L} Q_{\text{Neg}}. \tag{10}$$

其中 : $Q_{\text{Neg}} = [Q_{\text{Neg}1} \ Q_{\text{Neg}2} \ \cdots \ Q_{\text{Neg}N}]^T$; $u_{Q_{\text{Neg}}} = [u_{Q_{\text{Neg}1}} \ u_{Q_{\text{Neg}2}} \ \cdots \ u_{Q_{\text{Neg}N}}]^T$ \mathbf{L} 为拉普拉斯矩阵.

把不对称功率不匹配注入到比例积分 (proportional integral ,PI) 控制器 ,负序虚拟阻抗修正项 NQB_i 为

$$NQB_i = -(k_{\text{pNQ}} + \frac{k_{\text{iNQ}}}{s}) C_{Q_{\text{Neg}}} \sum_{j=N_i} a_{ij} (Q_{\text{Neg}j} - Q_{\text{Neg}i}). \tag{11}$$

其中 $k_{\text{pNQ}} \ k_{\text{iNQ}}$ 为 PI 控制器的比例和积分增益.

如果第 i 个 DG 分配的不对称功率比需要的不对称功率少 ,那么 NQB_i 通过一致性算法的不对称功率分配环增大 ,负序虚拟阻抗自适应减少.

当通过式 (8) 使不对称功率不匹配自然等于零时 ,微网各 DG 均分配不对称负荷功率. 负序虚拟电感、电阻表示为

$$L_{V\text{Neg}j} = L_{V\text{Neg}j}^* - k_{L\text{Neg}} \cdot NQB_i, \tag{12}$$

$$R_{V\text{Neg}j} = R_{V\text{Neg}j}^* - k_{R\text{Neg}} \cdot NQB_i. \tag{13}$$

其中 : $L_{V\text{Neg}j}^* \ R_{V\text{Neg}j}^*$ 为静态虚拟电感、电阻 ; $k_{L\text{Neg}} \ k_{R\text{Neg}}$ 为比例增益. 负序电阻用于增强控制系统的阻尼.

4 控制结构

4.1 DG 的有功、无功功率计算

利用双二阶广义积分器锁频环 (DSOGI - FLL) 检测^[6] 各 DG 的三相电压和电流的正序和负序. 通过 DSOGI - FLL 检测的正负序电压、电流计算通过低宽滤波器的三相输出功率 :

$$P_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (V_{\alpha f}^+ I_{\alpha f}^+ - V_{\beta f}^+ I_{\beta f}^+), \tag{14}$$

$$Q_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (V_{\beta f}^+ I_{\alpha f}^+ - V_{\alpha f}^+ I_{\beta f}^+), \tag{15}$$

$$Q_{\text{Neg}} = \frac{3}{2} V^+ \sqrt{(I_{\alpha f}^-)^2 + (I_{\beta f}^-)^2}. \tag{16}$$

其中 $P_f \ Q_f$ 分别为分布式发电输出的有功、无功功率 ; Q_{Neg} 为分布式发电输出不对称功率^[5] ; $V_{\alpha f}^+ \ V_{\beta f}^+$ 为静止参考坐标系下的基波正序电压 ; $I_{\alpha f}^+ \ I_{\beta f}^+$ 为静止参考坐标系下的基波正序电流 ; $I_{\alpha f}^- \ I_{\beta f}^-$ 为静止参考坐标系下的基波负序电流 ; V^+ 为基波正序电压的幅值.

4.2 虚拟阻抗环

该方法得到基波负序虚拟阻抗后 ,在静止参考坐标系下计算相应的虚拟电压降落. 计算正负序电压降落的框图如图 2 所示.

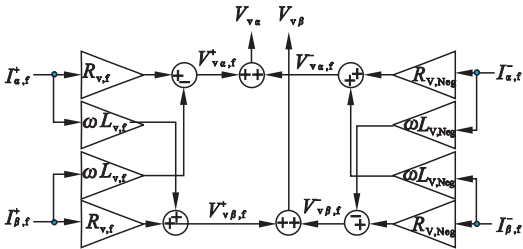


图 2 正负序虚拟阻抗图
Fig. 2 Virtual impedance at fundamental positive/negative-sequence

4.3 基于比例谐振器的双环控制器

为确保准确的电压跟踪 ,采用基于比例谐振 (proportional resonant ,PR) 控制器的电压、电流控制器 :

$$G_v(s) = k_{pv} + \frac{2k_{rv}\omega_b s}{s^2 + 2\omega_b s + \omega_0^2} \quad (17)$$

$$G_i(s) = k_{pi} + \frac{2k_{ri}\omega_b s}{s^2 + 2\omega_b s + \omega_0^2} \quad (18)$$

其中 k_{pv} k_{rv} 分别为电压控制器的比例、谐振增益 k_{pi} k_{ri} 分别为电流控制器的比例、谐振增益；

ω_0 ω_b 分别为基波频率和谐振控制器的带宽。

图 3 为提出的线性和不对称无功功率分配控制策略框图。可以看出，所提出的方法是完全分布式的控制方法，有效避免了集中控制器的使用，增强了系统的灵活性和可靠性，同时保证不对称功率的准确分配。

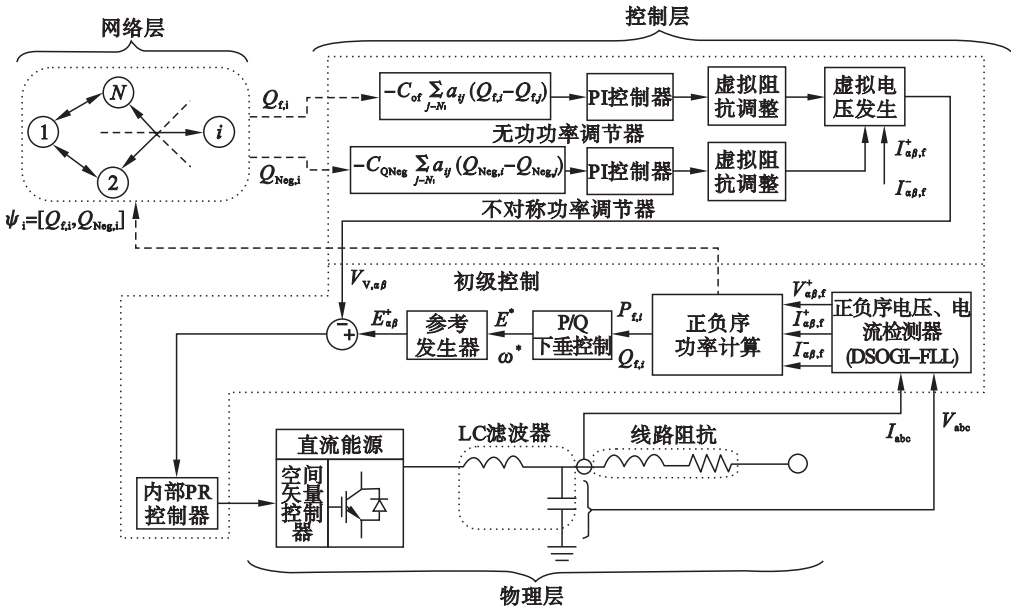


图 3 微电网分布式控制图
Fig. 3 Distributed control scheme of microgrid

5 仿真分析

5.1 仿真参数

以图 1 所示的含 3 台 DG 的微电网系统为例验证所提出的分布式不对称功率控制方法的正确性和有效性。3 台 DG 的额定容量相等，三相对称负荷连接于公共接线，不对称负荷连接于 a 相。DG 的额定功率为 20 kW，额定电压和频率分别为 120 V 和 60 Hz，DG 滤波电感和电容分别为 1.8 mH 和 50 μ F，线路阻抗 $Z_1 = 0.3 + j0.131$ ， $Z_2 = 0.2 + j0.226$ ， $Z_3 = 0.1 + j0.358$ 。下垂控制参数 $m = 2 \times 10^{-5}$ Hz/W， $n = 0.001$ V/Var。电压电流控制器参数 $k_{pv} = 1$ $k_{rv} = 100$ $k_{pi} = 5$ $k_{ri} = 500$ 。

5.2 有功、正负序无功功率分配控制

图 4 为传统下垂控制和本文提出的有功、无功功率分配曲线。由图 4 可知，通过在本文方法中引入自适应虚拟阻抗使负荷正负序无功功率的分配误差得到补偿，实现均分分配，同时也没影响负荷有功功率的分配精度。

5.3 分布式发电的输出电压、电流

图 5 为采用传统和本文方法后各分布式发电的电流曲线。经对比可知，分布式自适应负序虚拟

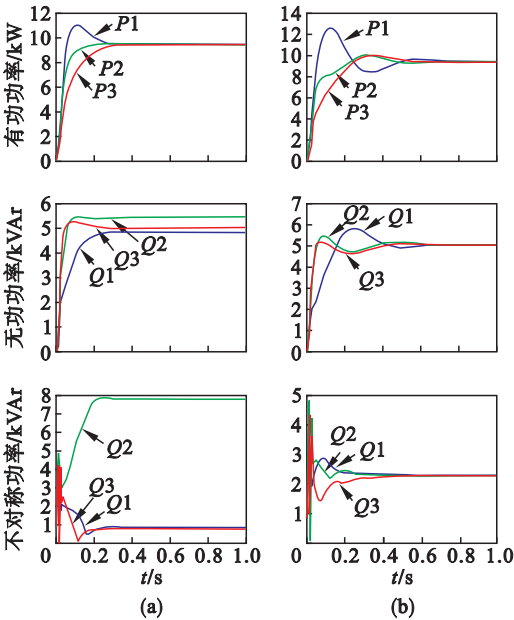


图 4 功率分配控制仿真实验结果
Fig. 4 Simulated results of power sharing control
(a) —传统方法；(b) —本文方法。

阻抗控制较传统下垂控制可使 DG 输出电流均等。采用所提出的分布式不对称功率分配控制后 DG1 和 PCC 的电压曲线如图 6 所示。由图 6 可知，PCC 的电压不对称率减少到 1.38%，改善了电压不对称，满足低于 2% 的国际电工委员会

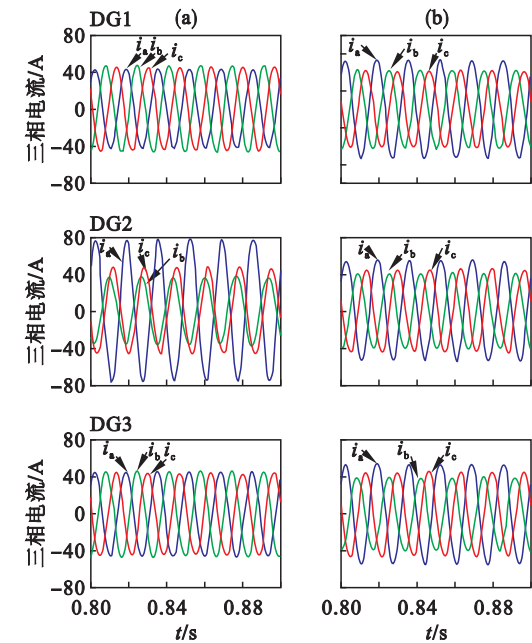


图 5 DG 的三相输出电流的放大波形
Fig. 5 Enlarged waveforms of DG output three-phase current
(a)—传统方法 ; (b)—本文方法.

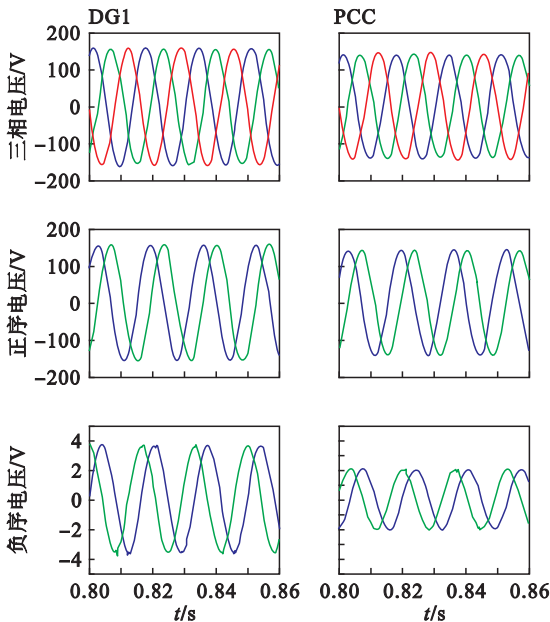


图 6 DG1 ,PCC 的电压波形
Fig. 6 DG1 and PCC voltage waveforms

(IEC) 的电压不对称率 ,但 DG1 的电压不对称率增加到 2.45% . 也就是说 DG1 的输出电压牺牲使 PCC 的电压减少到满足 IEEE 的标准.

6 结 论

1) 在考虑线路阻抗的情况下 ,通过无功功率

精确分配的分析 ,基于一致性理论和虚拟阻抗提出了分布式负序虚拟阻抗控制方法 ,可精确地均分线性、不对称负荷无功功率.

2) 在不对称负荷存在的情况下 ,本文方法能实现多个 DG 的输出电流精确分配 ,可改善微电网 PCC 电压的质量.

3) 本文方法通过调整虚拟阻抗 ,不受未知线路阻抗的影响 ,在 DG 多智能体网络拓扑结下 ,仅需要邻居的信息 ,避免了集中控制器的使用 ,具有较好的灵活性和可靠性 ,适用于复杂的微电网结构.

参考文献 :

[1] Ramanarayanan V. Decentralized parallel operation of inverters sharing unbalanced and nonlinear loads[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics* , 2010 , 25 (12) : 3015 – 3025.

[2] Graovac D , Katic V , Rufer A. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 2007 , 22 (2) 968 – 976.

[3] Savaghebi M , Jalilian A , Vasquez J C , et al. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2013 60(4) 1390 – 1402.

[4] Cheng P T , Chen C A , Lee T L , et al. A cooperative imbalance compensation method for distributed generation interface converters [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2009 45(2) 805 – 815.

[5] He J , Li Y W , Guerrero J M , et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2013 28(11) 5272 – 5282.

[6] Savaghebi M , Jalilian A , Vasquez J C et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droopcontrolled microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid* 2012 3(2) 797 – 807.

[7] Zhang H , Zhang J , Yang G , et al. Leader-based optimal coordination control for the consensus problem of multi-agent differential games via fuzzy adaptive dynamic programming [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* , 2015 , 23(1) : 152 – 163.

[8] Sun Q , Han R , Zhang H , et al. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid* 2015 6(6) 3006 – 3019.

[9] Meng L , Zhao X , Teng F et al. Distributed voltage unbalance compensation in islanded microgrids by using a dynamic consensus algorithm [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2016 31(1) 827 – 838.