

文章编号: 1673-5196(2016)05-0077-07

基于一致性算法的孤岛微电网协同控制

王晓兰, 曲利民, 张晓英, 包广清, 宫玮丽

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对交流微电网中接入不平衡负荷导致的公共连接点(point of common coupling, PCC)电压不平衡,下垂控制所产生的频率和电压幅值的偏差,以及电压变化引起的无功功率难以均分等问题,提出了基于一致性算法的分布式分层控制方法.通过与邻近单元之间实时的数据交换,采用一致性算法获得全局变量的平均值,并产生补偿量发送到一次控制进行调节,即使在各分布式电源(distributed generation, DG)初始状态不同的情况下,也能获得良好的控制性能.在 MATLAB 平台上,对一个低压交流微电网系统进行了仿真实验.结果表明,基于一致性算法的分布式分层控制,可有效补偿 PCC 的不平衡电压,恢复频率和电压幅值的偏差,均匀分配系统的无功功率,全面改善微电网的电能质量.

关键词: 协同控制; 一致性算法; 孤岛微电网; 二次控制

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A

Cooperative control of islanded microgrids based on consensus algorithm

WANG Xiao-lan, QU Li-min, ZHANG Xiao-ying, BAO Guang-qing, GONG Wei-li

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the problems such as voltage unbalance at the point of common coupling (PCC), induced by connecting unbalanced loads into AC-microgrid, deviation of frequency and voltage amplitude produced by droop control, and the reactive power sharing becoming difficult due to voltage variation, a distributed hierarchical control method was proposed based on consensus algorithm. By means of realtime data exchange with adjacent units, the average value of global variable was obtained by using the consensus algorithm and was used to generate compensation quantity to adjust the primary control. Thus, a fine control performance of the microgrid can be obtained even when the initial state of distributed generation (DG) is various. The MATLAB was used to conduct simulative experiment on a low-voltage AC-microgrid system. The result showed that the distributed hierarchical control based on consensus algorithm can compensate the unbalanced voltage of PCC, restore the deviation of frequency and voltage amplitude, distribute evenly the reactive power of system, and improve overall the power quality in microgrid.

Key words: cooperative control; consensus algorithm; islanded microgrid; secondary control

微电网(microgrid, MG)是可再生能源并网和就地消纳的有效途径,其控制方法是保证微电网稳定运行的关键^[1-2].由于不平衡负荷引起的 PCC 电压不平衡,以及下垂控制导致的频率和电压幅值的偏差,电压变化引起的无功功率难以均分等问题,严重影响系统的供电质量.

针对电压不平衡问题, Graovac 等^[3]采用有

源电力滤波器,通过注入负序电压来实现电压不平衡补偿. Savaghebi 等^[4]在 $\alpha\beta$ 坐标下,通过减少负序电压,实现逆变器出口电压的不平衡补偿. Savaghebi 等^[5]在 $\alpha\beta$ 坐标下通过注入补偿参考,实现了 PCC 电压的不平衡补偿.上述文献均未考虑各分布式电源之间的通信问题,因此,不能实现系统的协同控制.针对频率和电压幅值偏差以及功率均分问题,为了获得更好的电压和频率调节能力, Guerrero 等^[6]采用中央控制器(MG central controller, MGCC)计算电压恢复项来补偿偏差,但假定了所有逆变器的输出电压均相等,这种假设很难达到. Dragicevic

收稿日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(50967001),甘肃省自然科学基金(1107RJZA272)

作者简介: 王晓兰(1963-),女,甘肃天水人,教授.

等^[7]提出自适应下垂控制来改善系统性能,但忽略了线路阻抗.吕振宇等^[8]在考虑线路阻抗的情况下,提出了变虚拟电阻的自适应下垂控制策略,能够同时满足均流和调压要求.艾欣等^[9]提出将负荷侧电压幅值作为参考量引入下垂控制的方案,即使在下垂增益较小的情况下依然能够保证无功出力的分配精度.陆晓楠等^[10]针对交直流混合微电网提出了直流分层控制系统,采用了具有低带宽通信特点的公共控制器,实现了直流负荷的合理分配,并补偿了下垂控制带来的直流母线电压跌落. Shafiee 等^[11]提出了一种能够有效恢复频率和电压偏差,同时保证无功功率均分的二次控制策略,但其通信网络较复杂,通信负担较大,任何两个单元之间均需进行数据交换,如果某个链路出现故障,将导致整个系统的补偿量不能准确得到. Nasirian 等^[12]在稀疏的通信网络中采用一致性算法,有效实现了直流微电网的电压调节和比例负荷分配.但上述文献均未考虑系统中接入不平衡负荷导致的 PCC 电压不平衡的补偿问题.传统的二次控制采用 MGCC,是一种集中式二次控制,控制器对 MGCC 有很强的依赖性.而分布式控制具有扩展性强、通信负担小等优点^[11-13],是克服上述集中式二次控制缺点的主要手段.

目前,将分布式一致性算法应用于交流微电网的研究较少,同时考虑 PCC 电压不平衡补偿的研究则更少.本文针对交流微电网中一次控制存在的不足,

提出了基于一致性算法的分布式二次控制策略.首先针对不平衡负荷引起的 PCC 电压不平衡问题,设计了电压不平衡补偿控制器.其次针对一次控制产生的频率、电压幅值偏差,以及无功功率不能均分的问题,设计了基于一致性算法的频率、电压恢复算法,以及无功功率补偿算法.通过仿真验证了所提控制策略的有效性.

1 微电网的分布式分层控制

图 1 是微电网分层控制的结构图,一次控制负责调节逆变器的输出电压,二次控制负责恢复由一

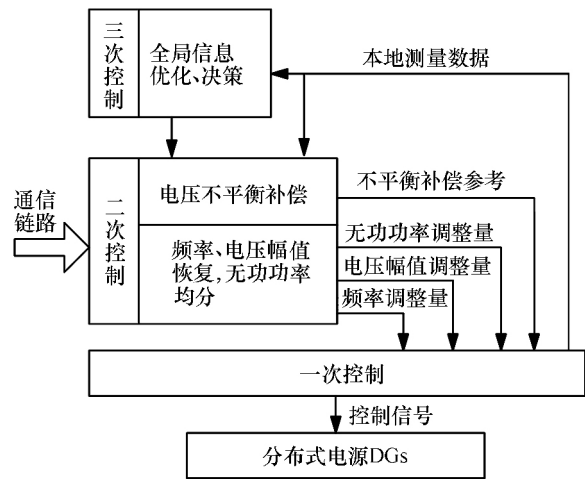


图 1 微电网分层控制结构

Fig. 1 Microgrid hierarchical control structure

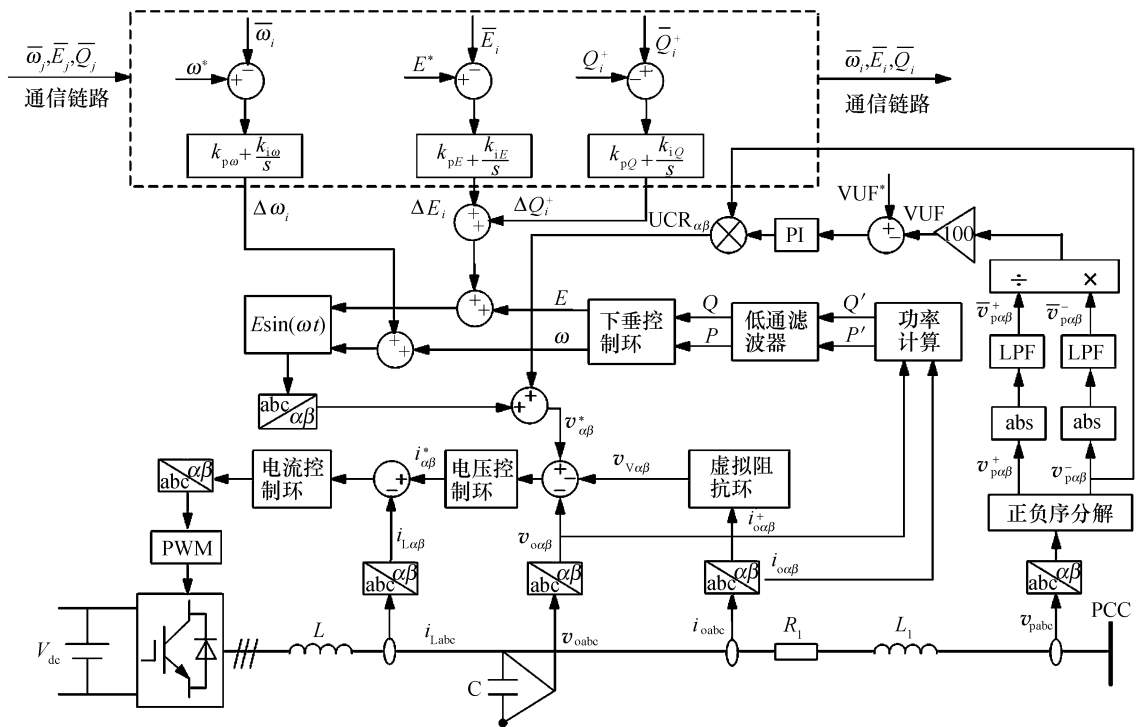


图 2 微电网一次/二次控制结构

Fig. 2 Microgrid primary/secondary control structure

次控制产生的频率、电压、无功功率的偏差,三次控制负责全局信息的优化和决策.本文主要针对一次/二次控制进行研究,详细的控制结构如图 2 所示.其中,一次控制包括有功-频率和无功-电压下垂控制器、虚拟阻抗环、电压和电流控制器.在 $\alpha\beta$ 坐标下,电压控制器的参考值由功率控制器、虚拟阻抗环以及二次控制共同产生.电流控制器的输出转换到 abc 坐标下,按脉冲宽度调制生成触发脉冲,完成对逆变器的控制.

系统的有功功率和无功功率控制由 DG 输出的电压幅值和相角来控制,在孤岛微电网中利用下垂控制特性,按下式实现对有功功率和无功功率的无互联线控制^[14]:

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_0 - mP \\ E &= E_0 - nQ\end{aligned}\quad (1)$$

式中: E_0 、 ω_0 分别为额定电压幅值和角频率; P 、 Q 分别为有功功率和无功功率; m 、 n 分别为有功和无功功率的下垂控制系数; E 、 ω 分别为电压的幅值和角频率的参考.

基于瞬时功率理论,计算包含直流分量和交流分量的有功功率和无功功率的瞬时值,其直流分量可以采用一阶低通滤波器获得,因此有

$$\begin{aligned}P &= \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (v_{\alpha\alpha} i_{\alpha\alpha} + v_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta}) \\ Q &= \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (v_{\alpha\beta} i_{\alpha\alpha} - v_{\alpha\alpha} i_{\alpha\beta})\end{aligned}\quad (2)$$

式中: s 为拉普拉斯变量; ω_c 为截止频率; $v_{\alpha\alpha}$ 、 $v_{\alpha\beta}$ 和 $i_{\alpha\alpha}$ 、 $i_{\alpha\beta}$ 分别为机端电压和电流的 $\alpha\beta$ 分量.

为了减小线路阻感比对下垂控制器的影响,提高因逆变器个体差异而引起的系统内阻抗不同时,下垂控制器的功率分配效果,这里增加了虚拟阻抗环.与实际阻抗不同,虚拟阻抗没有功率损耗,可以保证有功功率和无功功率的解耦,改善传统下垂控制的性能^[15].虚拟阻抗环按下式设计:

$$\begin{aligned}v_{v\alpha} &= R_v i_{\alpha\alpha}^+ - \omega L_v i_{\alpha\beta}^+ \\ v_{v\beta} &= R_v i_{\alpha\beta}^+ + \omega L_v i_{\alpha\alpha}^+\end{aligned}\quad (3)$$

式中: $v_{v\alpha}$ 、 $v_{v\beta}$ 为虚拟阻抗环的输出电压; R_v 、 L_v 分别为虚拟电阻和虚拟电感;上标“+”和“-”分别表示正序和负序分量.这里仅考虑正序电流通过虚拟阻抗环,避免了负序电流在虚拟阻抗上的压降引起电压不平衡的增加^[5].

在静止参考坐标下,比例谐振控制器能够更好地控制电压和电流^[15],因此,本文选用比例谐振电压和电流控制器:

$$\begin{aligned}G_V(s) &= k_{pv} + \frac{2k_{rv}\omega_{cv}s}{s^2 + 2\omega_{cv}s + \omega_0^2} \\ G_I(s) &= k_{pi} + \frac{2k_{ri}\omega_{ci}s}{s^2 + 2\omega_{ci}s + \omega_0^2}\end{aligned}\quad (4)$$

式中: k_{pv} 、 k_{pi} 和 k_{rv} 、 k_{ri} 分别是电压和电流控制器的比例和谐振系数; ω_{cv} 、 ω_{ci} 分别是电压和电流控制器的截止频率.

2 分布式系统的一致性算法

由于微电网一次控制中存在频率和电压幅值偏差以及无功功率难以均分的问题,需要二次控制对其进行补偿(如图 2 所示).为了获取频率、电压幅值和无功功率的补偿量,本文采用分布式一致性算法来求取微电网的全局一致值,从而获得合适的补偿量.

分布式二次控制器中,为了获得一致的频率、电压幅值和无功功率,在文献[11]提出的方法中,每个微源都需要与其他所有微源通信,以实现数据交换.随着微源数量的增多,数据交换量也会增加,这样可能造成通信阻塞,任何通信链路故障都可能造成很大误差.这里采用分布式一致性算法来减轻通信系统的负担,即每个单元只需要与其邻近的单元进行通信,即可得到全局的平均值.通信网络如图 3 所示,每个单元与其邻域单元之间均有通信链路 E .

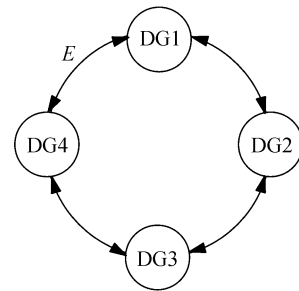


图 3 通信网络

Fig. 3 Communication network

2.1 基于多智能体的微电网描述

微电网由多个分布式电源组成,可将其视为一个分布式的多智能体系统,多智能体系统实现一致性意味着,所有智能体通过彼此间信息的交换和计算,最终使得它们的状态都达到同一个值.多智能体系统可视为一个图 $G = \{N, E\}$,包括一系列的节点 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 和一系列的边 E ,所有与节点 i 相邻的节点集合为 $N_i = \{j \mid (j, i) \in E\}$, $i, j \in N$.邻接矩阵是 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$, a_{ij} 表示数据从 j 传送到 i 的权重,假设 A 是时不变的,如果 $(j, i) \in E$ 则 $a > 0$,否则为零,若通信链路是双向的,则

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ji} \quad (5)$$

定义拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 其中

$$l_{ii} = \sum_{j \neq i} a_{ij}, \quad l_{ij} = -a_{ij} < 0 \quad (6)$$

拉普拉斯矩阵满足

$$\sum_{j=1}^n l_{ij} = 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

如果图中存在一个根节点可以通过一条路到达任意其他节点, 可以认为这个图含有生成树. 由以上分析可知, 双向图的 L 是对称的, 当图 G 存在生成树时, 0 是 L 的一个特征值, $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T$ 为对应的特征向量^[17-18].

2.2 基于动态一致性协议的全局一致值和补偿量求取算法

这里以第 i 个分布式电源为例, 从其邻近单元 j 中获得所需的数据 x_j 以及它的平均值 \bar{x}_j . x_i 为本地的测量值, N_i 为与第 i 个单元相邻的集合, 根据分布式一致性算法, 可以得到当前单元数据 x_i 的全局一致值 \bar{x}_i :

$$\dot{\bar{x}}_i(t) = x_i(t) + \int_0^t \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{x}_j(\tau) - \bar{x}_i(\tau)) d\tau \quad (8)$$

由文献[17~19]可知, 对任意的 $i \in [1, N]$, \bar{x}_i 收敛于全局的一致值, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{x}_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad (9)$$

收敛速度取决于代数连通度, 即拉普拉斯矩阵的第二小特征值 $\lambda_2(L)$. 相应的, 全局的动态为

$$\dot{\bar{x}} = \dot{x} - L\bar{x} \quad (10)$$

式中: $x = [x_1, \dots, x_n]^T$, $\bar{x} = [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n]^T$. 在本文中 $x_i = \{\omega_i, E_i, Q_i^+\}$, 即得到全局的频率、电压幅值和正序无功功率的一致值. 本文通过正序无功功率的均分实现与线路阻抗无关的无功功率均分.

图 4 为基于动态一致性协议的全局一致值和补偿量求取算法. 由一致性算法得到的一致值与全局的参考值求差, 经比例-积分控制器和限幅后, 得到 x_i 的补偿量 Δx_i , 该补偿量送入一次控制中, 实现电压/频率恢复和正序无功功率的均分. 图中, $x^* = \{\omega^*, E^*, Q_i^+\}$ 为全局的频率和电压幅值的参考值, 以及第 i 个单元的正序无功功率参考值.

2.3 一致性算法的实现

以图 3 所示的含四个分布式电源的微电网为例, 可知其通信链路是双向的, 其邻接权重均为 1, 则邻接矩阵为

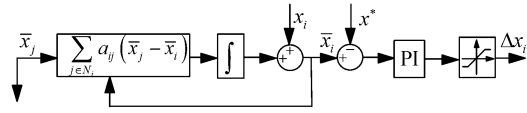


图 4 基于动态一致性协议的全局一致值和补偿量求取算法
Fig. 4 Global consistent value and compensation amount calculation algorithm based on dynamic consensus protocol

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据图论可得拉普拉斯矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

此时, 式(9)中 $n=4$, 假设智能体系统(10)的初始状态为 $x(0) = [0.2 \quad 0.4 \quad 0.6 \quad 0.8]^T$, 通过计算可得网络的代数连通度为 2. 系统(10)的状态轨迹如图 5 所示, 因为 L 是平衡的, 所以各状态量均能收敛到一致的值, 从图中可以看到, 这个一致值即是它们的平均值.

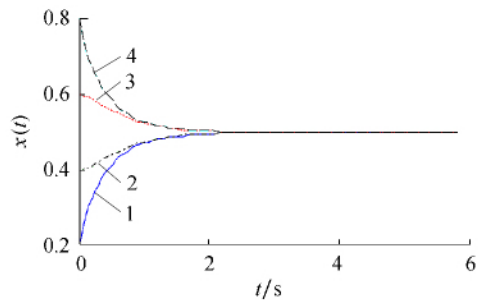


图 5 多智能体系统的状态轨迹
Fig. 5 State locus of multi-agent systems

3 微电网的分布式二次控制

如图 1 所示, 二次控制主要完成 PCC 点的不平衡电压补偿, 频率、电压幅值偏差的恢复, 以及无功功率的均分.

3.1 PCC 的电压不平衡补偿

为了补偿由不平衡负荷的接入导致的 PCC 电压不平衡, 这里在图 2 右侧增加了补偿环节. 在 $\alpha\beta$ 坐标下获取 PCC 点电压的正负序分量, 分别将正负序分量取绝对值并通过下式的二阶低通滤波器进行滤波:

$$LPF = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} \quad (13)$$

滤波后负序电压分量与正序电压分量之比称为电压不平衡度 (voltage unbalance factor, VUF)^[5], 计算公式为

$$VUF = 100 \cdot \frac{\bar{v}_{pq\beta}^-}{v_{pq\beta}^+} \quad (14)$$

进而根据下式即可得到电压不平衡补偿参考 (unbalance compensation reference, UCR_{αβ}):

$$UCR_{\alpha\beta} = (\zeta VUF^* - VUF) \cdot \text{PI} \cdot v_{pq\beta}^- \quad (15)$$

式中: ζ 为阻尼比; $v_{pq\beta}^-$ 为 PCC 点电压在 $\alpha\beta$ 坐标下的负序分量; $\bar{v}_{pq\beta}^+$, $\bar{v}_{pq\beta}^-$ 分别为经过低通滤波器后的正负序分量。

3.2 频率、电压偏差恢复和无功功率均分

为了补偿由一次下垂控制所产生的频率和电压幅值偏差, 这里提出基于一致性算法的频率/电压恢复算法, 由动态一致性算法得出全局的频率和电压幅值的平均值, 通过与参考值比较, 得到补偿量, 发送到一次控制进行补偿, 消除频率和电压幅值的偏差。频率和电压幅值的补偿量由下式决定:

$$\Delta\omega_i = k_{p\omega} (\omega^* - \bar{\omega}_i) + k_{i\omega} \int (\omega^* - \bar{\omega}_i) dt \quad (16)$$

$$\Delta E_i = k_{pE} (E^* - \bar{E}_i) + k_{iE} \int (E^* - \bar{E}_i) dt \quad (17)$$

式中: $k_{p\omega}$, $k_{i\omega}$ 和 k_{pE} , k_{iE} 分别是频率和电压幅值的 PI 控制器参数; ω^* , E^* 分别是微电网频率和电压幅值参考; $\bar{\omega}_i$, \bar{E}_i 分别是全局频率和电压幅值的平均值; $1 \leq i \leq n$, n 是微电网中微源的个数。

图 6 是包括二次控制的频率和电压的下垂特性。从图中可以看到, DGs 正常运行时, 工作在 A 点, 当负载功率增加时, 一次控制将工作点移到 B 点, 因此产生了频率和电压幅值偏差, 而二次控制将工作点移到了 C 点, 使频率和电压幅值达到参考值, 由一次控制产生的频率和电压幅值偏差得到了恢复。

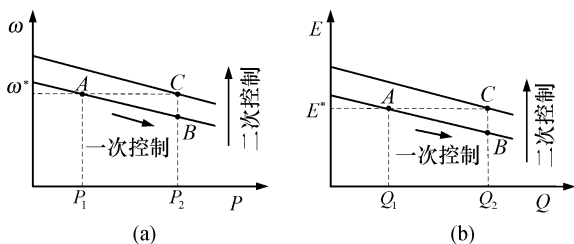


图 6 具有二次控制的频率和电压下垂特性

Fig. 6 Droop characteristics of the frequency and voltage with secondary control

由于各微源与公共耦合点之间的线路阻抗不同, 导致分布式电源输出的电压不同, 因此, 在较低 R/X 的微电网中, 很难实现无功功率的准确均分。

为此, 这里通过二次控制产生的补偿量来实现无功功率的均分^[10], 其补偿量如下:

$$\Delta Q_i^+ = k_{pQ} (\bar{Q}_i^+ - Q_i^+) + k_{iQ} \int (\bar{Q}_i^+ - Q_i^+) dt \quad (18)$$

式中: k_{pQ} , k_{iQ} 为无功功率的 PI 控制器参数; \bar{Q}_i^+ , Q_i^+ 分别为全局无功功率的平均值和第 i 个分布式电源的无功功率的正序分量。

4 仿真分析

为了验证所提出的分布式分层控制策略的有效性, 本文在 MATLAB/Simulink 搭建了图 7 所示的逆变型孤岛微电网模型。逆变器的直流侧由 650 V 的直流源供电, 交流侧通过不同阻值的连线阻抗在 PCC 相接, 并接有 $50 + j12.57 \Omega$ 的三相平衡负荷 Z_B 和 20Ω 的单相不平衡负荷 Z_{UB} , 系统在 380 V/50 Hz 情况下运行。系统参数见表 1。下面给出含三个分布式电源时的仿真结果。

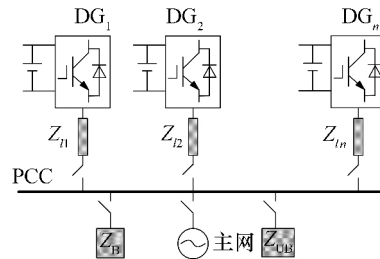


图 7 微电网仿真结构

Fig. 7 Simulation structure of microgrid

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	650	$E_0/V, \omega_0/(\text{rad/s})$	$380, 2\pi \times 50$
L/mH	1.8	$R_c/\Omega, L_c/\text{mH}$	1, 4
$C/\mu\text{F}$	1 500	$k_{p\omega}, k_{r\omega}, \omega_{c\omega}$	0.35, 25, 2
Z_{11}/Ω	$0.6 + j1.6965$	$k_{pi}, k_{ri}, \omega_{ci}$	0.7, 500, 2
Z_{12}/Ω	$0.2 + j0.5655$	k_p, k_i	0.5, 7
Z_{13}/Ω	$0.1 + j0.2826$	$k_{pE}, k_{p\omega}, k_{pQ}$	0.001
Z_B/Ω	$50 + j12.57$	$k_{iE}, k_{i\omega}, k_{iQ}$	0.6
Z_{UB}/Ω	20	ζ	0.707
m, n	$1 \times 10^{-5}, 3 \times 10^{-4}$	$\omega_c/(\text{rad/s})$	4π

图 8 所示是 PCC 和 DG_1 、 DG_2 的输出电压波形, 其中图 8a 分别给出了 PCC 电压波形及局部放大后的波形。图 8b 和图 8c 分别为 DG_1 、 DG_2 的输出电压波形及局部放大后的波形。从图中可以看出, 在 0.6 s 前, PCC 的 b 相电压略低于 a、c 两相电压, 而 DG_1 和 DG_2 输出的电压基本平衡。在 0.6 s 时加入本文提出的电压不平衡补偿控制, 在 0.6 s 后, PCC 的 abc 三相电压变得基本平衡, 而 DG_1 和 DG_2

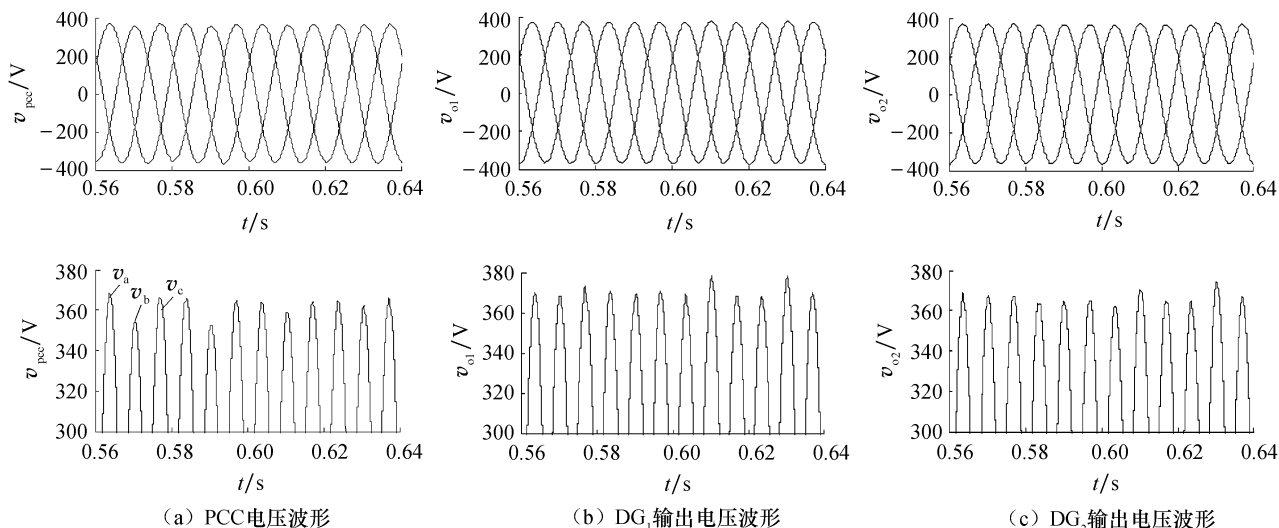


图 8 PCC 和 DGs 的输出电压
Fig. 8 Output voltage of PCC and DGs

输出的 b 相电压则略高于 a、c 两相电压. 由于 DG₃ 与 DG₁、DG₂ 同理, 考虑到篇幅限制, 所以这里没有给出 DG₃ 的波形.

根据式(14), 得到 PCC 和 DGs 的 VUF 值的变化情况, 如图 9 所示. 从图 9 中可以看到, 在 0.6 s 前 PCC 处的 VUF 在 1.0 左右, DGs 出口端的 VUF 值在 0.8 左右. 而 0.6 s 后, PCC 处的 VUF 开始下降, 最终稳定在 0.7 处, 但分布式电源出口端的 VUF 上升到 1.3 左右, 由于 DG₃ 和 PCC 之间的线路阻抗较小, 因此它的 VUF 更高一点^[20]. 而 DG₁ 和 DG₂ 输出的 b 相电压则略高于 a、c 两相开展深入的研究.

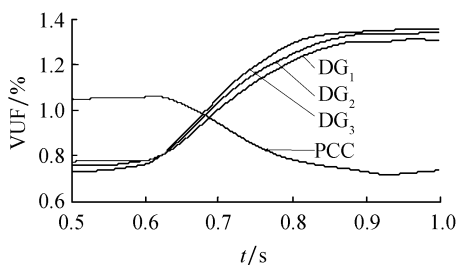
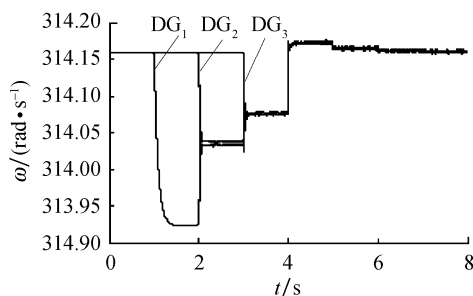
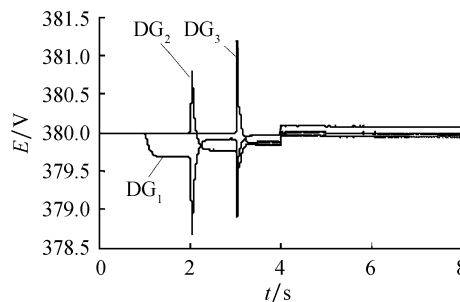


图 9 PCC 和 DGs 出口端的 VUF
Fig. 9 VUF at PCC and DGs terminal

图 10 所示是微电网孤岛运行的启动过程. 在 1 s 时 DG₁ 启动, 在 2 s 时 DG₂ 启动, 在 3 s 时 DG₃ 启动, 运行稳定后, 可以从图 10a 中看到频率与给定值(314.16)之间存在较大偏差, 图 10b 中电压幅值与给定值(380)之间也存在较大偏差. 在 4 s 时, 加入本文提出的基于一致性算法的分布式二次控制后, 微电网的频率和电压幅值逐渐恢复到给定值, 消除了下垂控制所产生的偏差.



(a) 频率偏差恢复



(b) 电压幅值偏差恢复

图 10 频率和电压幅值偏差恢复
Fig. 10 Deviation recovery of frequency and voltage amplitude

图 11 是微电网的有功/无功功率的变化情况, 从图中可以看出, 在启动分布式二次控制之前, 有功功率已经实现了平均分配, 说明了加入虚拟阻抗的 P-f 下垂控制能够准确均分有功功率. 而正序无功功率在 4 s 前并没有实现很好的均分, 在 4 s 后正序无功功率逐渐实现均分, 同时, 不影响有功功率的均分. 说明所提的分布式二次控制能够在线路阻抗不同的情况下, 实现与线路阻抗无关的无功功率均分.

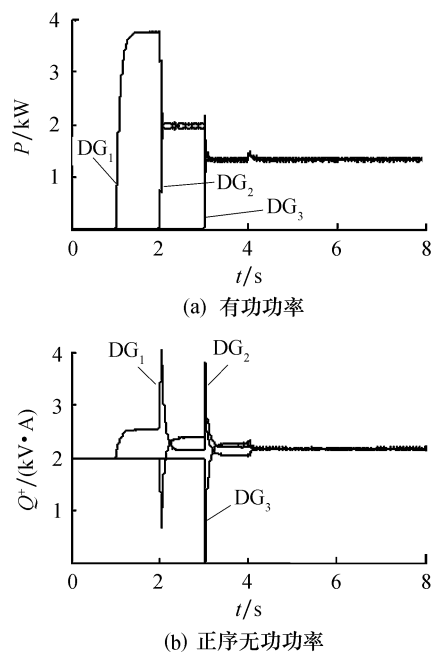


图 11 微电网的功率均分

Fig. 11 Power sharing of microgrid

5 结论

本文研究了交流微电网孤岛运行的分布式分层控制策略. 采用多智能体系统的动态一致性算法, 仅与相邻的单元进行数据交换, 就可获得所需变量的平均值, 并产生补偿量发送到一次控制, 实现 PCC 电压不平衡的补偿和频率、电压幅值偏差的恢复以及无功功率的均分. 该控制策略是一种多层的分布式结构, 二次控制是利用一致性算法的频率、电压、无功功率的调节层, 一次控制为本地控制层, 控制系统不需要传统的中央控制器, 就可以达到分层控制的目的. 典型算例验证了所提的分布式分层控制的有效性.

参考文献:

[1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
 [2] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
 [3] GRAOVAC D, KATIC V A, CHANDRA A. A review of active filters for power quality improvement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 968-976.
 [4] SAVAGHEBI M, VASQUEZ J C, GUERRERO J M. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1390-1402.

[5] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, *et al.* Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 797-807.
 [6] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
 [7] DRAGICEVIC T, GUERRERO J, VASQUEZ J C. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
 [8] 吕振宇, 吴在军, 袁晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4397-4407.
 [9] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.
 [10] 陆晓楠, 孙凯, GUERRERO J, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.
 [11] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids-a novel approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
 [12] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A. Distributed cooperative control of DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2288-2303.
 [13] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙. 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 125-134.
 [14] 张明光, 张义娜, 孙慧丽, 等. 微电网系统中多种逆变器的并联组网控制策略 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(4): 86-91.
 [15] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 独立型微电网中基于虚拟阻抗的改进下垂控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 7-13.
 [16] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, SAVAGHEBI M. Modeling, analysis, and design of stationary reference frame droop controlled parallel three-phase voltage source inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1271-1280.
 [17] REN W. Information consensus in multivehicle cooperative control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 71-82.
 [18] 曹倩, 宋永端, 王磊. 基于比率一致性算法的飞轮储能矩阵系统分布式双层控制 [J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3024-3029.
 [19] WU Dan, DRAGICEVIC T, VASQUEZ J C. Secondary coordinated control of islanded microgrids based on consensus algorithms [C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh: [s. n.], 2014: 4290-4297.
 [20] 张玮亚, 李永丽. 面向多分布式电源的微电网分区电压质量控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4827-4838.