

文章编号:0254-0096(2017)04-1045-10

孤岛微电网电压无功分布式分层协同控制

吴丽珍^{1,2}, 雷艾虎¹, 郝晓弘¹

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心, 北京 100044)

摘要: 由于受到微电网线路阻抗特性等因素的影响,传统的下垂控制难以按照下垂增益精确分配无功功率,为了提高无功功率的均分精度,提出一种分布式分层协同控制方法。基于通信技术和分层控制理论,建立分布式分层控制体系结构,包含一次控制层和分布式二次控制层。在一次控制层中,采用传统的下垂控制,虚拟阻抗控制和PR电压电流控制来实现功率分配。而在二次控制中,采用分布式一致性算法构造状态观测器,获取全局平均值,全局一致性调节电压和无功功率的偏差,以实现电压无静差控制和无功功率的精确分配,同时可降低系统对通信带宽的要求,使系统具有更高的可靠性和扩展性。最后,通过Matlab/Simulink仿真和实验分析分布式二次控制的动态性能和延时对系统鲁棒性的影响,验证所提控制方法的有效性和可行性。

关键词: 微电网; 一致性算法; 分布式二次控制; 协同控制; 延时; 即插即用

中图分类号: TM46; TM761 **文献标识码:** A

0 引言

微电网是目前分布式电源(distributed generation, DG)接入的有效途径^[1]。在容量较大的微电网中,常需要将多台逆变器并联组网;而含多逆变器的孤岛微电网系统功率分配是难点问题^[2]。目前用于改善无功出力分配精度的方法大多是针对下垂控制机理的改进^[3-5],改变了传统下垂控制的特性,而且多数方案较为复杂,难以应用于工程实践^[6]。为不改变传统的下垂控制特性,借鉴电力系统三次调频的经验,文献[7]提出分层控制结构,便于微电网实现标准化,逐渐受到业界的关注。文献[8]提出采用二次控制减小电压和频率偏差以及提高无功分配精度,但所采用的集中控制方式实现的微电网二次控制,要求微电网中央控制器(microgrid central controller, MGCC)与所有的DGs通信,导致系统对通信带宽要求较高,一旦中央控制器故障则导致整个系统的瘫痪,从而降低系统的可靠性。

本文在分层控制理论基础上,结合网络化控制技术,提出分布式分层协同控制方法,并建立分布式分层控制体系结构,包含一次控制和二次控制。在二次控制层中,采用分布式二次控制(distributed

secondary control, DSC)方法实现电压恢复控制和功率均分。其中,分布式二次控制器和本地控制器结合在一起,并嵌入在每个DG中,作为控制系统中的一个智能节点,通过通信链接构成网络化系统。为实现网络化系统的分布式分层协同控制,提出分布式一致性算法构造状态观测器,获取全局平均值,实现全局信息一致性。

1 微电网系统分布式协同控制方法

1.1 分布式二次控制的微电网系统控制结构

本文针对多逆变器并联组网的孤岛微电网系统,借鉴电力系统的分层分级协同控制理论与方法,综合电压和频率控制的特点,根据不同的时间尺度设计控制层次,合理划分各层实现的控制功能,提出了适宜于低压微电网的分布式分层协同控制体系结构,其结构如图1所示。

在该体系结构中,按照功能将微电网系统分为一次控制层(又称“本地控制层”)和二次控制层。一次控制使系统变量以最快的响应速度跟踪其设定值,而二次控制对无功功率、电压偏差进行修正^[9,10]。微电网分布式分层控制系统中,一次控

收稿日期: 2016-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51467009); 兰州市科技计划(2016-3-67)

通信作者: 吴丽珍(1973—),女,博士、副教授,主要从事分布式发电与微电网的运行与控制以及网络化控制方面的研究。2501280274@qq.com

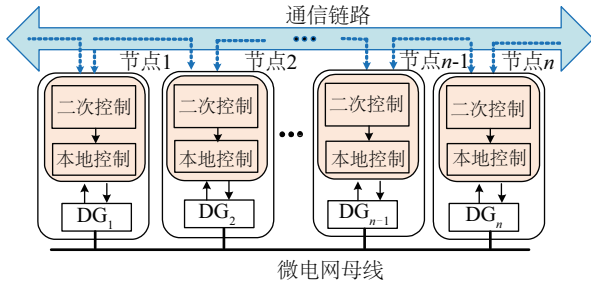


图1 分布式分层控制体系结构

Fig. 1 General architecture of distributed hierarchical control

制器和二次控制器结合在一起,并嵌入在每个DG中,且每个DG单元是独立控制的,所有的二次控制器通过网络连接在一起,使得微电网易于实现标准化和“即插即用”。但是,“即插即用”技术将使拓扑结构发生变化,为了控制这种网络化系统,需要一种鲁棒算法使得系统在通信受限情况下仍能够正常运行,关键是寻找有效的分布式控制算法嵌入在分布式二次控制器中以实现多智能体的协同控制。为此,本文采用分布式一致性算法,网络化控制系统中的每个节点单元只需要与其相邻的节点单元进行通信,即可得到全局平均值,实现全局信息一致性,减轻通信系统的负担。

1.2 通信网络拓扑结构

网络化通信系统的拓扑结构如图2所示。图2a为集中式通信网络拓扑结构,也称为星型拓扑结构,所有的节点与中央管理节点MGCC通信,以至于通信负担较重,一旦MGCC损坏,则系统瘫痪,整个系统的可靠性差。图2b为分布式通信网络拓扑结构,其中,每个DG仅与相邻的DG交换信息。根据文献[11],若采用分布式一致性算法,即使某个节点发生故障,系统仍能够收敛到一致,而不影响其他节点的稳定运行。相比于集中式通信网络拓

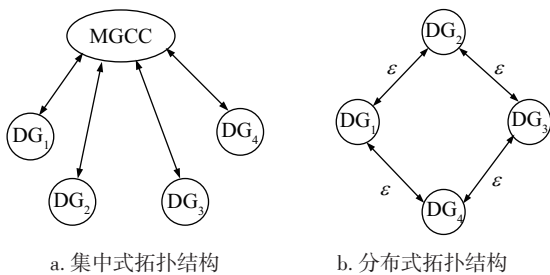


图2 两种网络拓扑结构

Fig. 2 Two kinds of network topology architecture

扑,分布式通信网络拓扑显然能降低通信负担,且对通信带宽的要求较低。因此,本文采用图2b所示的分布式通信网络拓扑结构。

1.3 分布式一致性算法

分布式一致性控制方法在协调控制、拥塞控制、群体控制、复杂动态网络等应用中取得了丰硕的成果^[12]。一致性算法形式多样,为满足工程设计需要,本文选择离散分布式一致性算法。为了便于分析下节所提的控制方法,本节先介绍分布式一致性算法。

令 x_i 代表节点*i*的状态变量,节点只与其相邻节点通信,状态变量 x_i 可以表示为实际系统的电压、电流、频率等物理量。当且仅当所有节点的状态变量相同时,系统达到一致收敛。连续时间一致性算法为^[13]:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, a_{ij} ——节点连接图的邻接矩阵中对应的元素,若节点*i*与节点*j*之间有通信链路,则 $a_{ij} = 1$,反之则为0。

式(1)可以写为:

$$\dot{X} = -L_n X \quad (2)$$

式中, L_n ——网络的拉普拉斯矩阵,与网络的拓扑链接结构有关。为了更好地分析一致性动态特性,式(1)对应的离散一致性算法可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= \sum_{j=1}^n w_{ij}(k) x_j(k) \\ &= x_i(k) + \sum_{j \neq i} w_{ij}(k) (x_j(k) - x_i(k)), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

写成矩阵形式为:

$$X(k+1) = W(k)X(k) \quad (4)$$

式中, $W(k) \in R^{n \times n}$ ——系统的状态转移矩阵, $W(k)$ 构造成一种随机矩阵,且满足矩阵行向量或列向量元素之和为1;最大特征值为单根1,其余特征值的模均小于1。若矩阵 $W(k)$ 构造为双随机对称矩阵,则系统一致收敛于平均值,即:

$$\bar{x}_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j(0), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

可见, $\bar{x}_i(k)$ 一致性收敛取决于系统的初始值 $x_i(0)$ 。但是无论取何初始值都将获得一个恰当的平均值。

实际网络控制系统的通信不可避免的存在延

时,具有延时的分布式一致性算法为^[14]:

$$U_i(k+1) = \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} U_j(k-\tau) + w_{ii} U_i(k) \quad (6)$$

$$L_i^*(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} L_j(k-\tau) + w_{ii} L_i(k) \quad (7)$$

式中, U ——电压状态量; L ——本地补偿量; τ ——通信延时,且为采样周期 T_s 的整数倍,当 τ 小于 T_s 时,对一致性收敛无影响;当 τ 较大时,一致性收敛特性由矩阵 $W(k)$ 决定。

根据文献[14],当矩阵 $W(k)$ 的对角元素不全为零时,含延时的分布式一致性算法仍能收敛。收敛的暂态和稳态性能由矩阵 Z 的 $esr(Z)$ 决定,矩阵 Z 的定义为:

$$Z = \begin{bmatrix} B & 0 & \cdots & 0 & F \\ I & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & I & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & I & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, B ——矩阵 $W(k)$ 的对角阵; $F = W(k) - B$ 。

$esr(Z)$ 是矩阵 Z 的第二大特征值,也即本质谱半径,且 $esr(Z)$ 对应的特征值在单位圆内的分布决定了收敛过程的暂态性能,若特征值为实根,则收敛过程按指数方式进行,若特征值为共轭复数根,则收敛过程按幅值衰减的振荡方式进行。

为保证系统收敛且对延时具有较强的鲁棒性,能自适应网络结构的变化,双随机矩阵 $W(k)$ 的构造方法非常重要。文献[13]指出,若 $W(k)$ 构造为非负双随机对称阵,且对角元素不为零,则点 $U_i(k)$ 的凸包将缩小或保持常数值,延时对一致性收敛影响很小。

由此可见,分布式二次控制方法中,采用离散的分布式一致性算法,可以全局一致性信息,以实现网络化系统的分布式分层协同控制。而且,还减轻了系统的通信负担,减少延时对系统鲁棒性的影响,避免了集中式控制过度依赖 MGCC 的情况,提高了微电网的可靠性。

2 电压无功的分布式分层协同控制

微电网中某 DG 节点的分布式分层协同控制原理如图 3 所示。图中,分布式发电单元主要由分布式直流电源,三相全桥逆变电路和 LCL 滤波器组成。其中,一次控制由传统的下垂控制、虚拟阻抗控制、电压控制和电流控制组成。分布式二次控制

主要采用离散的分布式一致性算法,获得全局平均值,并求取偏差值,传送到一次控制层,对一次控制中产生的电压/频率和无功功率偏差进行修正。

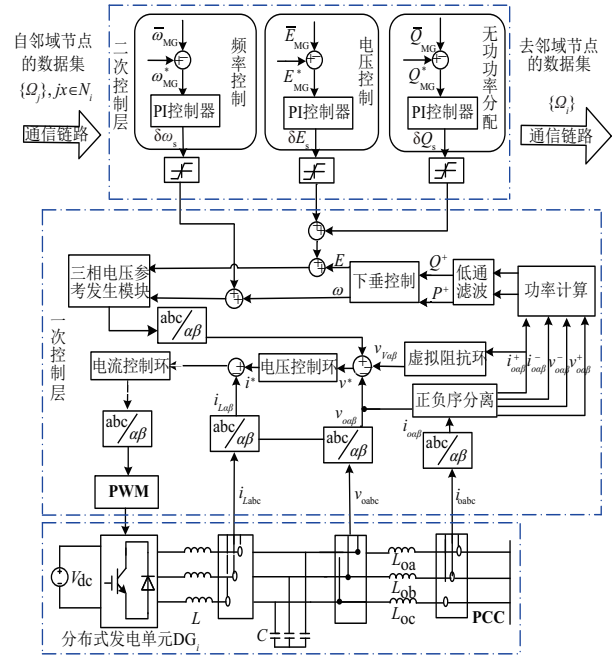


图3 DG_i的分布式分层控制原理图

Fig. 3 Scheme of distributed hierarchical control for a DG_i unit

2.1 一次控制器设计

图 3 所示的一次控制层中,首先,基于瞬时无功功率理论^[15]计算有功功率 p 和无功功率 q 的瞬时值:

$$p = v_{\alpha\alpha} i_{\alpha\alpha} + v_{\beta\beta} i_{\beta\beta} \quad (9)$$

$$q = v_{\beta\alpha} i_{\alpha\alpha} - v_{\alpha\beta} i_{\beta\beta} \quad (10)$$

式中, $v_{\alpha\alpha}$ 、 $v_{\beta\beta}$ —— $\alpha\beta$ 坐标系下的两相基波电压; $i_{\alpha\alpha}$ 、 $i_{\beta\beta}$ —— $\alpha\beta$ 坐标系下的两相基波电流。计算出的瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q 通过低通滤波器后可得到基波正序有功功率 P^* 和基波正序无功功率 Q^* ,且 P^* 和 Q^* 作为下垂控制计算中的正序有功功率和正序无功功率。

传统的下垂控制计算公式为:

$$\omega^* = \omega_0 - (k_p + k_d s) P^* \quad (11)$$

$$E^* = E_0 - k_q Q^* \quad (12)$$

式中, ω^* ——参考角频率; ω_0 ——额定角频率; k_p ——有功下垂系数; k_d ——有功微分系数; s ——微分算子; E^* ——参考电压幅值; E_0 ——额定电压幅值; k_q ——无功下垂系数。为了增加响应

速度,在下垂控制中增加微分响应系数 $k_d=0.00002$,有助于改善动态功率控制。

为实现有功无功功率的解耦控制,在 DG 逆变单元中加入虚拟阻抗环节,使下垂控制适用于阻性线路,但虚拟阻抗的增加会导致压降过大以及谐波放大^[16]。针对此问题,本文设计了只许正序电流通过虚拟负阻抗,形成正序电流的虚拟负阻抗控制环节,避免负序电流在虚拟阻抗上产生压降,造成输出电压的降低。其设计方程为:

$$v_{v\alpha} = R_v i_{\alpha}^+ - L_v \omega^* i_{v\beta}^+ \quad (13)$$

$$v_{v\beta} = R_v i_{\beta}^+ + L_v \omega^* i_{v\alpha}^+ \quad (14)$$

式中, R_v ——虚拟电阻; L_v ——虚拟电感; i_{α}^+ , i_{β}^+ ——输出基波正序电流; $v_{v\alpha\beta} = [v_{v\alpha}, v_{v\beta}]$ ——虚拟阻抗输出电压。

对于电压控制环和电流控制环则采用准比例谐振(proportional resonant, PR)控制器来进行电压、电流误差信号的控制,其传递函数为^[17]:

$$G_v(s) = k_{pv} + \frac{2k_{rv} \cdot \omega_{cv} \cdot s}{s^2 + 2\omega_{cv} \cdot s + \omega_0^2} \quad (15)$$

$$G_i(s) = k_{pi} + \frac{2k_{ri} \cdot \omega_{ci} \cdot s}{s^2 + 2\omega_{ci} \cdot s + \omega_0^2} \quad (16)$$

式中, k_{pv} , k_{pi} ——电压、电流比例项系数; k_{rv} , k_{ri} ——电压、电流谐振项系数; ω_{cv} , ω_{ci} ——电压、电流截止角频率; ω_0 ——谐振角频率。

2.2 基于分布式一致性算法的二次控制器设计

网络化分层控制系统的协同控制采用分布式一致性算法设计二次控制器。在二次控制中,采用分布式一致性算法构造状态观测器^[18],求取全局平均值,如图 4 所示。具体的设计以某分布式发电单元 DG_i 为例,若从邻域 j 中获取的数据集合为 Ω_j ,根据分布式一致性算法,见式(3)~式(5),若 $\mathbf{W}(k)$ 为双随机矩阵,对于任意的 $i \in [0, N]$, $\bar{\Omega}_i$ 收敛于全局平均值,即 $\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{\Omega}_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Omega_i(k)$ 。然后对每个 DG 输出电压的期望值和平均值求差,差值经过比例积

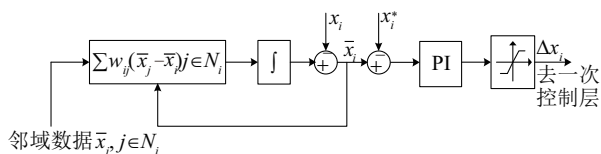


图 4 状态观测器与状态补偿量

Fig. 4 State observer and compensation value

分控制器(PI)和限幅后,得到补偿量 Δx_i 。其中, x_i 为 DG_i 输出量对应的幅值; \bar{x}_j , \bar{x}_i 为在节点 j 和节点 i 上求得的对应变量的平均值; x_i^* 为 DG_i 输出量的期望值; N 为总的分布式发电单元台数。

为保证系统的收敛,且对通信延时具有较强的鲁棒性, $\mathbf{W}(k)$ 矩阵可根据文献[19]中提出的 Metropolis 构造方法来设计:

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max(n_i, n_j) + 1}, & j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} w_{ij}, & i = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\max(n_i, n_j)$ ——本节点及相邻节点拥有邻居数目的较大值。

依据上述方法,系统中包括 4 个分布式发电单元采用图 2b 所示的低带宽通信网络拓扑结构,其通信链路是双向的,则邻接矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据图论可得拉普拉斯矩阵 \mathbf{L}_n 为:

$$\mathbf{L}_n = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

双随机矩阵 $\mathbf{W}(k)$ 可以通过下式计算得到:

$$\mathbf{W}(k) = \mathbf{I} - \varepsilon \mathbf{L}_n \quad (20)$$

式中, \mathbf{I} ——单位矩阵, ε ——边权且为一个常数。

为保证系统稳定和通信算法的快速收敛,应该合理地选取 ε 值为:

$$\varepsilon = \frac{2}{\lambda_1(\mathbf{L}_n) + \lambda_{n-1}(\mathbf{L}_n)} \quad (21)$$

式中, $\lambda_i(\mathbf{L}_n)$ ——拉普拉斯矩阵 \mathbf{L}_n 的第 i 个最大特征值,由式(19)可以计算出 \mathbf{L}_n 的特征值为 $[0 \ 2 \ 2 \ 4]^T$,因此可以求出最优的 $\varepsilon = 1/3$,最后可以得到双随机矩阵 $\mathbf{W}(k)$ 为:

$$\mathbf{W}(k) = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 0 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

根据图 3,二次控制层中每个 DG 的二次控制器通过网络获得全局的电压、角频率和无功功率的相应信息,并依据上述原理,求取电压、角频率和无

功率的平均值,具体计算公式为:

$$\bar{\omega}_{MG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{DG_i} \quad (23)$$

$$\bar{E}_{MG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{DG_i} \quad (24)$$

$$\bar{Q}_{MG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{DG_i} \quad (25)$$

分布式二次控制器的输出偏差参考值 $\delta\omega_s$ 、 δE_s 、 δQ_s 的求取分别为:

$$\delta\omega_s = k_{pf}(\omega_{MG}^* - \bar{\omega}_{MG}) + k_{if} \int (\omega_{MG}^* - \bar{\omega}_{MG}) dt \quad (26)$$

$$\delta E_s = k_{pE}(E_{MG}^* - \bar{E}_{MG}) + k_{iE} \int (E_{MG}^* - \bar{E}_{MG}) dt \quad (27)$$

$$\delta Q_s = k_{pQ}(Q_{MG}^* - \bar{Q}_{MG}) + k_{iQ} \int (Q_{MG}^* - \bar{Q}_{MG}) dt \quad (28)$$

式中, k_{pf} 、 k_{pE} 、 k_{pQ} ——比例系数; k_{if} 、 k_{iE} 、 k_{iQ} ——积分系数; ω_{MG}^* 、 $\bar{\omega}_{MG}$ ——参考角频率和平均角频率; E_{MG}^* 、 \bar{E}_{MG} ——参考电压和平均电压; Q_{MG}^* 、 \bar{Q}_{MG} ——参考无功功率和平均无功功率; N ——总的分布式发电单元数量。

最后,三相电压参考发生模块的输入 ω_i 和 E_i 计算公式为:

$$\omega_i = \omega^* + \delta\omega_s \quad (29)$$

$$E_i = E^* + \delta E_s + \delta Q_s \quad (30)$$

3 仿真与实验

3.1 仿真分析

为了验证上述所提控制方法的有效性,基于 Matlab/Simulink 软件平台搭建了如图 5 所示的微电网系统仿真模型。该仿真模型由 4 台容量相同的分布式发电单元(DG)和线性负载组成,各 DG 单元通过静态开关接至公共母线,公共母线通过静态开关接至配电网中。主电路和控制系统的仿真参数如表 1 所示。其中, DG_1 和 DG_3 到 PCC 的线路阻抗均为 $Z_1 = Z_3 = 0.16 + j0.105$, DG_2 和 DG_4 到 PCC 的线路阻抗均为 $Z_2 = Z_4 = 0.32 + j0.21$,即它们的比值为 2:1,逆变器的开关频率为 10 kHz。

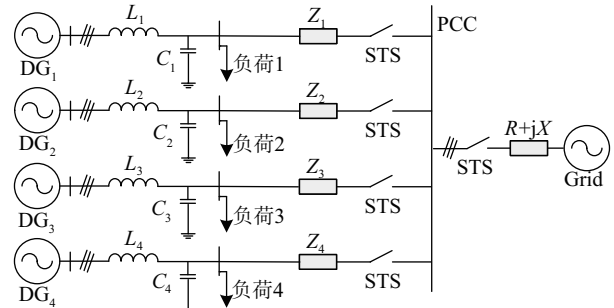


图5 仿真测试系统结构

Fig. 5 Structure of simulation-testing system

表1 主电路和控制系统的参数

Table 1 Power stage and control system parameters

参数	值	参数	值
额定电压 E/V	311	频率比例系数 k_{pf}	0.01
额定频率 $\omega \cdot (2\pi)^{-1}/\text{Hz}$	50	频率积分系数 k_{if}/s^{-1}	4
直流电压 V_d/V	650	电压比例系数 k_{pE}	0.01
输出电感 L_o/mH	1.8	电压积分系数 k_{iE}/s^{-1}	0.6
滤波电感 L/mH	1.8	无功比例系数 $k_{pQ}/\text{var} \cdot \text{V}^{-1}$	0.00001
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	25	无功积分系数 $k_{iQ}/\text{var} \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$	0.3
负载 R/Ω	200/400	PLL时间常数 λ/s	0.05
有功下垂系数 $k_p/\text{Ws} \cdot (\text{rd})^{-1}$	0.008	无功下垂系数 $k_q/\text{var} \cdot \text{V}^{-1}$	0.16
有功微分系数 k_d	0.00002	dSPACE采样频率 f_s/kHz	10

3.1.1 算例 1——系统“即插即用”性能

为了验证系统的“即插即用”特性,其仿真过程如下:首先,在 $t=0\text{ s}$ 时,将 3 kW 的有功负荷和 0.6 kvar 的无功负荷接入微电网中,且 4 个 DG 依次在 ($t=0, 0.1, 0.2, 0.3\text{ s}$) 投入微电网中,运行 0.2 s,在 $t=0.5\text{ s}$

时每隔 0.1 s 依次将各个 DG 切除,其输出功率仿真波形如图 6 所示。从图 6 可看出,在 DG 的投入和切除过程中,系统均能稳定运行,输出有功和无功功率均能精确分配。由此可知,系统可以实现“即插即用”。

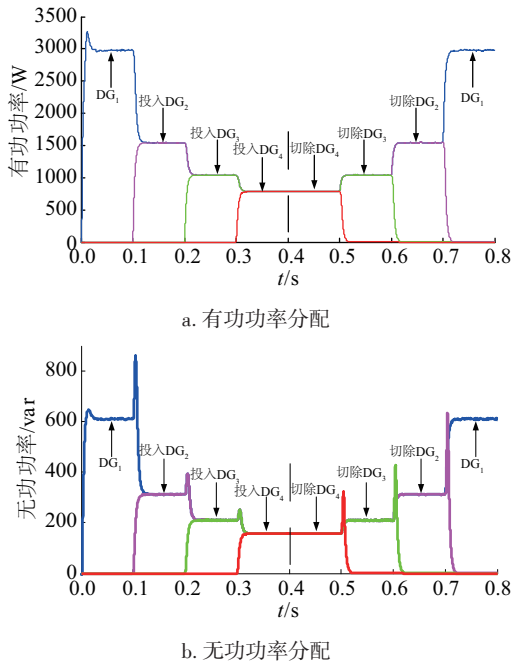
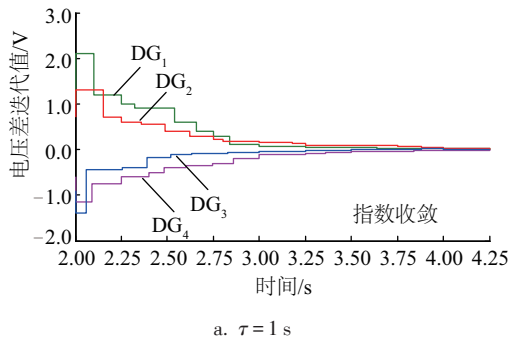


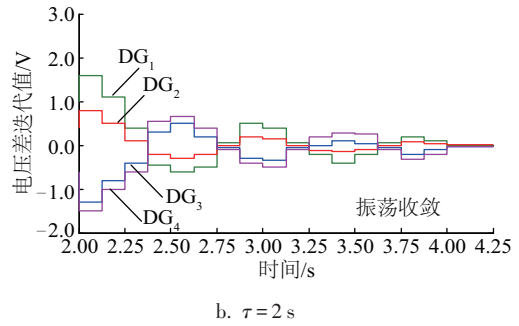
图6 基于分布式二次控制的系统即插即用性能评估
Fig. 6 Plug and play performance evaluation of system based on distributed secondary control

3.1.2 算例 2——系统延时的影响

根据式(8)和式(22)构造含延时网络的 Z 矩阵,计算不同延时下 Z 矩阵的本质谱半径 $esr(Z)$ 对应的特征值,分析在不同延时下系统的收敛情况。图 7 所示为在仿真平台上实现了延时 $\tau = 1s$ 和 $\tau = 2s$ 情况下电压的一致性迭代过程。当 $\tau = 1s$ 时,此时 $esr(Z) = 0.5386$,对应的特征值为实数 0.5386 。因此,其电压一致性迭代过程呈指数形式收敛,如图 7a 所示。而当 $\tau = 2s$ 时, $esr(Z) = 0.8679$,其对应的特征值为共轭复数根 $0.5248 \pm j0.688$,其电压一致性迭代过程呈振荡形式收敛,如图 7b 所示。因此,由图 7 分析可知,当延时较小时,一致性迭代过程平缓收敛,速度较快;而当延时变大后,一



a. $\tau = 1s$



b. $\tau = 2s$

图7 不同延时下的电压一致性迭代过程
Fig. 7 Voltage consensus iterative process under different delays

致性迭代过程按振荡形式收敛,并且随着延时的增大,波动减小,但是收敛时间变长,系统性能将变差。

3.2 实验验证

为了进一步对上述所提控制方法的有效性进行实验验证,搭建了一套基于 dSPACE1103 的两台逆变器并联的微电网实验平台。其中,每台逆变器的容量为 3 kW,其拓扑为在图 5 的仿真模型基础上去掉两个 DG,其余的一致,具体参数如表 1 所示。

3.2.1 算例 1:分布式二次控制系统动态性能分析

首先,测试采用所提的分布式二次控制方法,微电网的电压恢复控制和功率控制性能。在 $t=1s$ 之前,仅一次控制在微电网中运行,其实验结果如图 8a 和图 8b 所示。从图中可以看出,有功功率能够按所设定的比例 2:1 分配,而无功功率分配受阻抗影响而存在偏差,并没有按比例分配;且从图 8c 可看出, DG 端输出电压存在偏差,没有达到额定值。为此, $t=1s$ 时投入分布式二次控制,可以看出,在二次控制的作用下,无功分配偏差消除,基本上能够按照设定的比例 2:1 分配,且 DG 端输出电压偏差逐渐消除,基本达到额定值。

为进一步验证所提分布式二次控制(DSC)的动态性能,分析微电网在负荷突变时的功率分配效果以及电压变化情况。在 $t=2s$ 时,负载增加约为 1.5 kW 的有功负荷和 0.8 kvar 的无功负荷;在 $t=3s$ 时,负载减少约为 1.5 kW 的有功负荷和 0.8 kvar 的无功负荷。实验结果如图 8 所示,由图 8a 和图 8b 可知,由于负荷的突变导致无功分配存在偏差,在分

布式二次控制的作用下,偏差逐渐消除,DG间的无功功率按所设定的比例2:1分配,同样,有功分配基本不受影响。从图8c也可看出,负荷突变会导致DG端输出电压与额定值(311V)之间存在偏差,但DSC能够快速消除因负载的突变而带来的电压偏差,使输出电压恢复到额定值。可见,引入分布式二次控制后,实现了电压、无功功率偏差的修正,达到电压的稳定控制和功率均分的目的,且在负荷突变时,分布式二次控制仍能够保证良好的功率分配效果以及电压稳定,体现了DSC良好的动态性能。

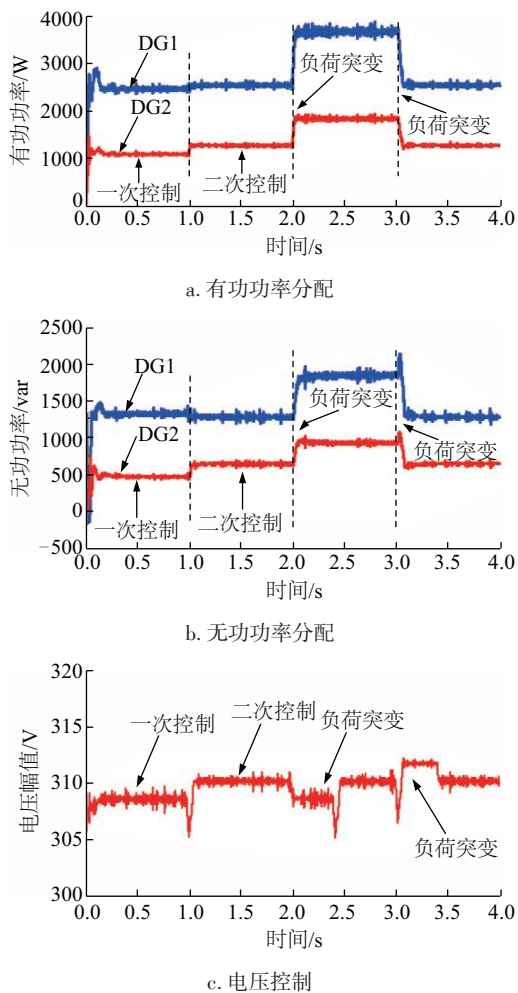


图8 基于分布式二次控制的微电网动态性能评估

Fig. 8 Dynamic performance evaluation of microgrid based on distributed secondary control

3.2.2 算例2——网络延时对系统稳定性影响分析
对于网络化控制系统,信号在传输过程中存在

各种延时,影响了系统的性能。为分析网络延时对系统稳定性影响,研究了3种不同延时对控制系统性能的影响。为了模拟二次控制层与一次控制层间的低带宽通信特性,在二次控制层的补偿信号送到一次控制层之间增加一个延迟环节,该延迟环节和二次控制PI控制器直接相连,其控制结构如图9所示。

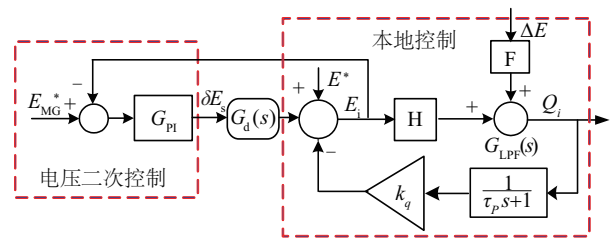


图9 具有延时分布式二次控制结构图

Fig. 9 Scheme of distributed secondary control with time delay

延时模块的传递函数为:

$$G_d(s) = \frac{1}{T_d s + 1} \quad (31)$$

式中, T_d ——每个模块的网络通信延迟时间,通过设置不同的延迟时间来模拟二次控制的通信延时。

为简单起见,仅仅分析延时对某个DG输出电压幅值的影响,其它DG情况类似。实验时负荷的突变设置和算例1相同。实验结果如图10所示,从图10a和图10b可看出,当延时在1s内,分布式二次控制能够很好的调节负荷突变引起的电压偏差,使DG端输出电压达到额定值,且超调量较小,体现系统具有较强的鲁棒性。从图10c可知,即使延时 $t=2.0$ s,分布式二次控制仍然能够缓慢但成功地调节负荷突变引起的电压偏差,使其达到额定值。而在长延时下(例如 $t=5.0$ s),如图10d所示,系统失去分布式二次控制对电压偏差的调整,仅存在一次控制,DG端输出电压产生的偏差越来越大,且并不能恢复到其额定值。

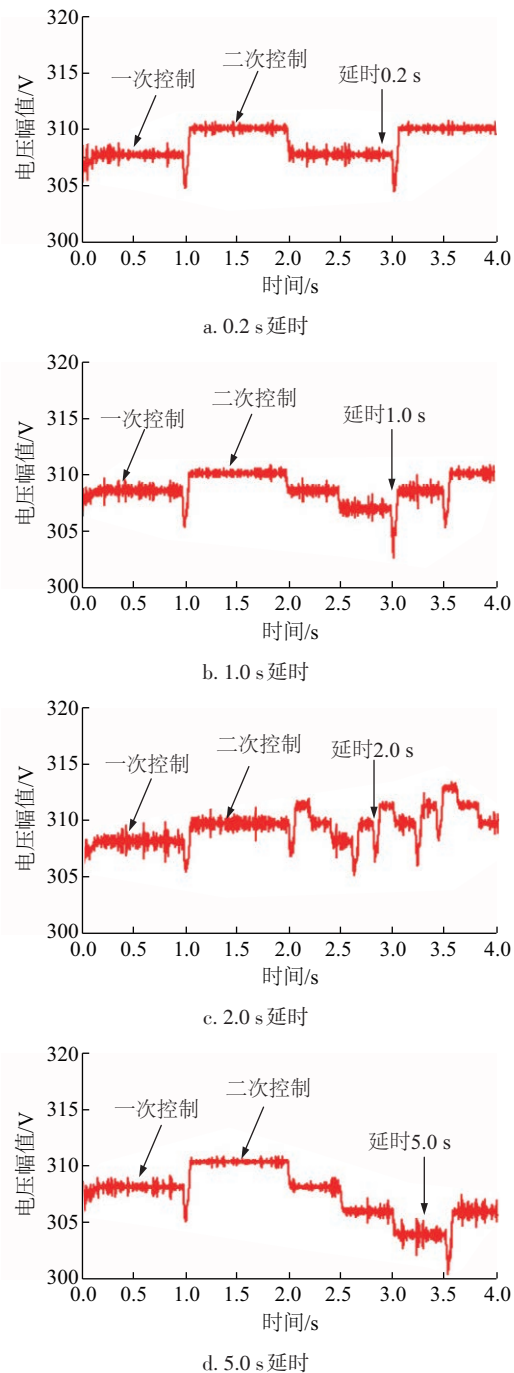


图10 考虑延时的分布式二次控制动态性能评估
Fig. 10 Dynamic performance evaluation of distributed secondary control under considering time delay

4 结 论

对微电网电压稳定性控制和功率分配问题提出了分布式分层协同控制方法。采用分布式一致性算法设计了分布式二次控制器,以消除采用传统

下垂控制产生的电压和无功功率偏差。通过一个含4个DG单元并联的微电网仿真模型和基于dSPACE的实验平台研究了系统的动态性能。仿真和实验结果表明所提出的分布式分层协同控制方法可以较好地控制系统的电压,即使在阻抗比 X/R 较小的情况下,功率分配也较为精确。并且,还研究了存在通信时延情况下,控制系统的鲁棒性。实验结果表明,通信延时较短时系统稳定性不受影响;但在较长延时的情况下系统将会不稳定。该结果证实了所提控制方法的有效性和可行性。本文研究可为微电网系统采用网络化控制方法提供理论依据。

[参考文献]

- [1] Cañizares C A, Palma-Behnke R. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (4): 1905—1918.
- [2] 王 鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 19—23.
- [2] Wang He, Li Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19—23.
- [3] Guerrero J M, de Vicuna L G, Matas J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5) : 1205—1213.
- [4] Guerrero J M, Matas J, de García V L, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (2): 994—1004.
- [5] Alfred E. Applicability of droops in low voltage grids [J]. DER Journal, 2005, 16(1): 1—5.
- [6] 金 鹏, 艾 欣, 王永刚, 等. 采用势函数法的微电网无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (25): 44—51.
- [6] Jin Peng, Ai Xin, Wang Yonggang. Reactive power control strategy of microgrid using potential function method [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25) : 44—51.
- [7] Guerrero J M, Vásquez J e Matas, Teodorescu R. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC

- microgrids—A general approach towards standardization [J]. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 2011, 58(1): 158—172.
- [8] Vasquez J, Guerrero J M, Savaghebi M, et al. 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.
- [9] Meng Lexuan, Savaghebi M, Vasquez J C, et al. Tertiary control of voltage unbalance compensation for optimal power quality in islanded microgrids [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, 29 (4) : 802—815.
- [10] Loh G J, Chandorkar P, Lee M T. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part I: Decentralized and hierarchical control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60 (4) : 1254—1262.
- [11] Zhang Z A, Chow M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27 (4) : 1761—1768.
- [12] Carli R, Fagnani F, Frasca P, et al. Gossip consensus algorithms via quantized communication [J]. *Automatica*, 2010, 46(1): 70—80.
- [13] 龙 慧, 樊晓平, 刘少强, 等. 多智能体系统分布式一致性算法研究现状[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(1): 36—42.
- [13] Long Hui, Fan Xiaoping, Liu Shaoqiang, et al. Review of distributed consensus problem in multi-agent system [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49 (1): 36—42.
- [14] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 自治直流微电网分布式下垂控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(4): 900—910.
- [14] Lyu Zhenyu, Wu Zaijun, Dou Xiaobo, et al. A distributed droop control scheme for islanded DC microgrid considering operation costs [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36 (4) : 900—910.
- [15] Ovalle A, Ramos G, Bacha S, et al. Decentralized control of voltage source converters in microgrids based on the application of instantaneous power theory [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(2): 1152—1162.
- [16] 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.
- [17] He Jinwei, Li Yunwei. An enhanced microgrid load demand sharing strategy [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(9): 3984—3995.
- [18] Meng Lexuan, Zhao Xin, Tang Fen, 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.
- [19] 李佩杰, 陆 镛, 白晓清, 等. 基于交替方向乘子法的动态经济调度分散式优化[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(10): 2428—2435.
- [19] Li Peijie, Lu Yong, Bai Xiaoqing, et al. Decentralized optimization for dynamic economic dispatch based on alternating direction method of multipliers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(10): 2428—2435.

DISTRIBUTED HIERARCHICAL COORDINATED CONTROL FOR VOLTAGE AND REACTIVE POWER IN ISLANDED MICROGRID

Wu Lizhen^{1,2}, Lei Aihu¹, Hao Xiaohong¹

(1. *College of Electrical and Information Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;*

2. *National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract: Due to the influence of line impedance and other factors in microgrid, the traditional sagging control is difficult to accurately distribute the reactive power according to the droop gain. A distributed hierarchical coordination control approach was presented to improve the sharing accuracy of reactive power. Based on the communication technology and hierarchical control theory, an architecture of distributed hierarchical control was constructed, which consisted of local control layer and distributed secondary control layer. The traditional droop control, virtual impedance control and PR voltage and current control were adopted in local control layer to achieve the power sharing. The distributed consensus algorithm was used in the secondary control to design the situation observer so as to get global average values and congruously adjust the deviation of voltage and reactive power, achieve the voltage without static error control and reactive power of the precise allocation, while reduce the system bandwidth requirements of the system, make the system have a higher reliability and scalability. Finally, the dynamic performance of distributed secondary control and the influence of delay on the system robustness were analyzed through Matlab/Simulink simulation and experiment, the validity and feasibility of the proposed method was further verified.

Keywords: microgrid; consensus algorithm; distributed secondary control; coordinated control; time delay; plug and play