

DOI: 10.7667/PSPC161825

# 微电网小区间的能量协作调度策略研究

陈奕斌<sup>1</sup>, 林基明<sup>1,2</sup>, 刘迪迪<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学, 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 梧州学院, 广西 梧州 543002)

**摘要:** 针对配备能量收集设备的多个微电网小区构成的能量管理系统。为充分利用多个微电网小区分布式能源, 研究微电网小区之间的能量调度与能量协作问题, 以最小化系统从传统电网购买的能量。本研究首先建立能量协作调度优化模型, 允许微电网小区之间共享各自收集的能量, 处理用户的弹性用电请求。在满足用户服务质量要求的前提下, 最大化系统能效。基于此模型和目标, 采用 Lyapunov 优化, 提出了微电网小区实时能量协作调度算法。仿真结果表明, 在该协作模型下所提算法能够以较低复杂度取得接近最优的性能和时延。

**关键词:** 能量收集; 微电网; 能量协作; 能量调度; Lyapunov 优化

## Research on energy cooperation scheduling strategy in residential micro-grids

CHEN Yibin<sup>1</sup>, LIN Jiming<sup>1,2</sup>, LIU Didi<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication and Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Wuzhou University, Wuzhou 543002, China)

**Abstract:** The energy management system composed of several residential micro-grids equipped with energy harvesting devices is discussed. In order to make full use of the micro-grid distributed energy and minimize the energy that the energy management system purchased from power grid, the problem of energy dispatch and cooperation between two residential micro-grids is studied. In order to handle the user's elastic energy demand and maximize energy efficiency of the energy management system, this paper firstly establishes energy cooperation scheduling optimization model which allows the residential micro-grids to share the harvested energy. This paper proposes a method of energy cooperation scheduling for micro-grids by employing the Lyapunov optimization. Simulation results show that the proposed algorithm can both achieve the best performance and a low delay at the cost of marginally increased complexity.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61362006 and No. 61371107), Natural Science Foundation of Guangxi Province (No. 2014GXNSFAA118387), and Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Ministry of Education (No. CRKL150204).

**Key words:** energy harvesting; micro-grids; energy cooperation; energy scheduling; Lyapunov optimization

## 0 引言

由于可再生能源(如风能、地热能和太阳能)可实现设备自给自足、永续经营的特性, 如何利用它已被列入世界主流研究的进程<sup>[1-2]</sup>。同时, 各国的电力系统也随着时代的发展面临着越来越大的挑战。我国政府也出台了《关于发挥价格杠杆作用促进光

伏产业健康发展的通知》等有关发电补贴扶持的政策。关于未来电网的发展趋势, 智能电网与微电网技术已成为近年来的热门话题<sup>[3]</sup>。

智能电网是指电力系统应用利用先进的技术, 在能源转换效率、电能利用率和供电质量等方面提高性能, 建设稳定、节能、高效的现代化电网<sup>[4]</sup>。微电网是指有效整合各种分布式电源, 由相互关联的分布式电源和负载组成并在本地正常运行的一个可控的实体与网络, 是智能电网的重要组成部分。微电网可与公共的固定电网相连, 并可以在并网运行和孤岛运行两种模式中切换<sup>[5-6]</sup>。微电网在军事基

**基金项目:** 国家自然科学基金(61362006, 61371107); 广西自然科学基金(2014GXNSFAA118387); 认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室开放基金(CRKL150204)

地、工业和商业都有不同程度的应用<sup>[7]</sup>。通常情况下微电网包括的模块有：公共耦合点、分布式电源、储能模块和微电网能量管理系统等<sup>[8-9]</sup>。

微电网小区是指应用先进的通信技术和多种智能电网技术于居民居住区，在通信网络支撑下由分布式电源、用电信息采集、微电网控制和能量管理系统、电动汽车充电系统、智能家居系统等模块相互关联构建住宅小区的。微电网小区的通信网络采用电力线载波或无线通信技术，并利用通信网络采集小区内用户的用电信息，控制分布式电源，进行电动汽车有序充电和小区配电自动化。文献[10]对微电网小区的分布式发电和微电网技术进行了研究，文中分布式电源主要指的是可再生清洁能源。而清洁能源的间歇性、能量存储设备的容量大小和复杂性等因素都是能量收集技术的约束，只依靠收集可再生能源的清洁能量难以保证微电网小区电量的供需平衡<sup>[2]</sup>。将微电网小区接入固定电网，实现清洁能源与常规能源联合交互供电，由智能电表来控制公共耦合点从传统电网购买获取能量。如此可以减少使用常规能源和相应的碳排放量，使环境受益。

文献[9]提到，在美国使用家用电器所带来的能量消耗占日常能量消耗的比例超过了 10%，比如热水器、空调、烘干机、洗碗机等。这些电器的能量需求是弹性的，即在一定的时间限制内满足它们的能量需求即可，称该类电器为弹性需求能量消费者。而电灯、电视、电脑等不可断电使用的电器称为非弹性需求能量消费者。根据微电网小区用电负荷的整体状态，将小区内用户的用电需求分为弹性与非弹性需求。已有研究利用弹性需求研究了住户间的能量收集与协作问题，提出需求方管理的一个方案，但是受限在于在微电网小区内部简单的能量收集与转移<sup>[11-12]</sup>。

本文的研究不同于以上的工作<sup>[10-14]</sup>，不仅是微电网小区内的用电调度，而且将多个微电网小区视为一个系统整体，关注微电网小区之间的能量协作。尽管微电网小区间的能量转移会产生一定的损失，但通过对每个微电网小区收集的能量进行分配优化以及微电网小区之间恰当地协作调度，提高了整体系统的性能，从而降低整体系统从传统电网的能耗。

### 1 微电网小区能量管理系统协作模型

本文提出了新型的微电网小区能量协作模型如图 1 所示，若干个地理邻近的微电网小区组成微电网小区能量管理系统，每个微电网小区视为一个节点，由系统管理中心控制节点之间的能量协作以及控制节点的智能电表从传统电网购买能量。节点之间的能量协作可通过利用微电网孤岛模式与并网模

式的平滑切换，使用下垂控制、滑模控制等方法，并借用公共电网的线路来实现<sup>[15-18]</sup>。例如当前时刻系统管理中心下发指令由微电网小区 1 调配 10 单位电量至微电网小区 2，具体的实现思想是：小区 1 接收指令，在并网模式下通过逆变器上传至公共电网，并由智能电表控制上传的电量；小区 2 接收指令，在并网模式下通过逆变器从公共电网获取能量，并由智能电表控制获取的电量。

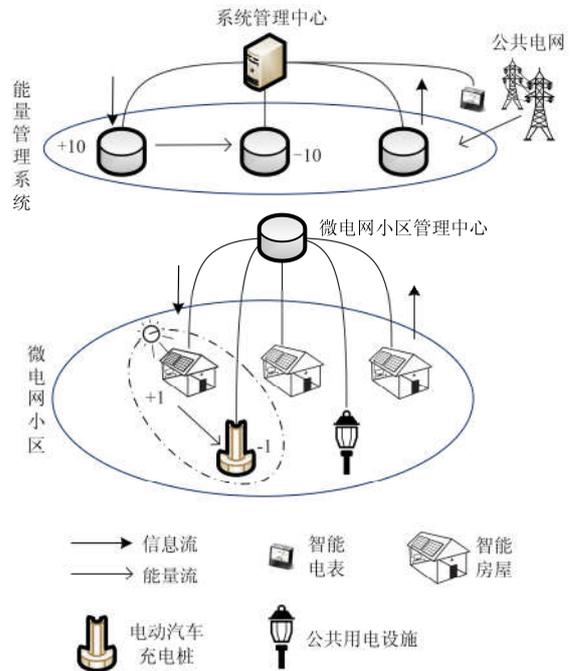


图 1 微电网小区能量协作模型

Fig. 1 Energy cooperation scheduling model of residential micro-grids

能量管理系统的每个微电网小区(节点)里包含住户、电动汽车充电桩、分布式发电设施与公共用电设施等用户。微电网小区内每个用户将不同的负载信息与收集信息通过无线传输实时上传给微电网小区管理中心。微电网小区管理中心通过分析用户上传的实时信息，可以获得电力消费信息和对电力需求信息，并对发电和配电进行安排调度，平衡电力的供求。

对于弹性用电需求，用户允许微电网小区管理中心处理其用电请求具有一定的时延，以此换取更便宜的电价。由此，本文采用排队论的方法，将用户的用电请求储存在队列之中。微电网小区管理中心负责汇总每一时隙该节点内所有用户的用电需求量，并根据缓急程度将之列入用电请求队列中，并进行处理。微电网小区管理中心在每一个时隙都需要将实时的队列状态上传至系统管理中心，系统管理中心对该时隙每个微电网小区的状态进行判断，

作出能量协作转移的决策, 下发至微电网小区管理中心执行。每个微电网收集到的能量都是优先在内部进行消纳调配的。

多个微电网小区的用电请求会形成多个积压队列, 但对能量转移判定算法不造成决定性的影响, 为简化系统分析, 本文只考虑由两个微电网小区构成的能量管理系统, 模型如图 2 所示。微电网小区用  $IC_i (i \in \{1, 2\})$  表示, 对于小区内的用户而言, 当用户发起用电请求时, 自动将需求加入到服务队列中, 由微电网小区管理中心来处理队列内的用电请求。当系统管理中心收到两个微电网小区的能量收集信息, 经过对队列的判断, 发出能量协作指令, 如若能量不足以处理当前时刻的用电请求时, 可发出指令至微电网小区的智能电表, 从传统电网购买能量来弥补空缺。

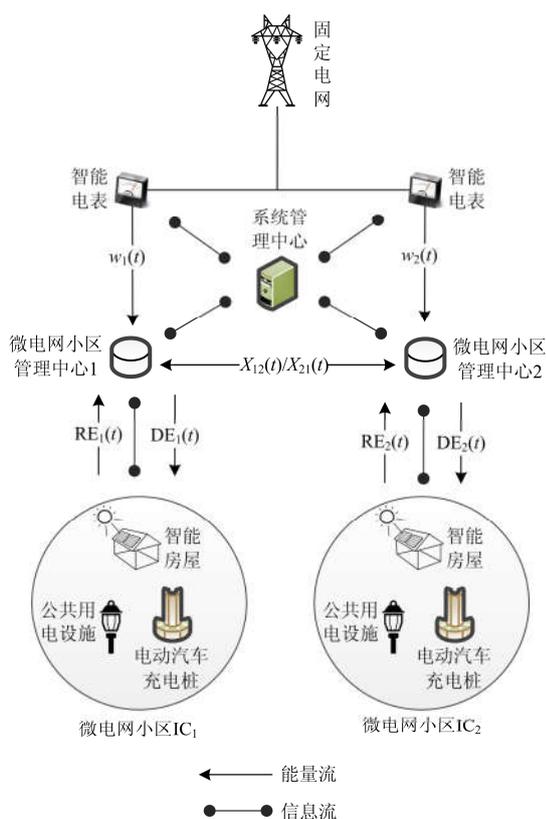


图 2 微电网小区能量管理系统

Fig. 2 Residential micro-grid energy management system

一天可分为  $T$  个时隙, 用  $t$  来表示时隙编号 ( $1 \leq t \leq T$ )。  $IC_i$  的清洁能源能量收集设备在时隙  $t$  收集的能量为  $RE_i(t)$ ,  $IC_i$  在时隙  $t$  的用电请求为  $DE_i(t)$ ,  $IC_i$  在  $t$  时隙从传统电网购买获取能量为  $w_i(t)$ , 其中都有  $i \in \{1, 2\}$ 。在本文中, 微电网小区管理中心不设有电量储存设备, 所以收集的能量若

不完全使用, 则剩余部分会被浪费掉, 但这能节省大量的设备成本与建造成本。此外, 微电网小区还与传统电网相连, 当两个微电网小区管理中心储存的电量都不足以供给用户时, 可从电网处购买获取能量。

于本系统内, 各节点在每个时隙向系统管理中心反馈本节点队列情况、能量收集情况, 系统管理中心据此作出决策——节点之间是否进行能量转移, 并决策转移多少能量。假设  $t$  时隙由  $IC_1$  转移到  $IC_2$  的能量为  $x_{12}(t)$ ; 且能量协作转移只能单向移动, 例如在  $t$  时刻能量只能从  $IC_1$  转移到  $IC_2$  或者  $IC_2$  从转移到  $IC_1$ , 则有  $x_{12}(t) \cdot x_{21}(t) = 0$ 。  $t$  时刻转移能量的大小受到收集的可再生能源  $RE_i(t) (i \in \{1, 2\})$  约束。

$Q_1(t)$  代表微电网小区管理中心 1 的用户能量请求积压队列, 则有:

$$Q_1(t+1) = \max[Q_1(t) - RE_1(t) - w_1(t) - \beta x_{21}(t), 0] + DE_1(t) \quad (1)$$

式中,  $\beta$  是传输因子, 代表能量从一个微电网小区传递到另一个微电网小区经过电阻损耗以及支付租用公共电网线路传输的费用之后所剩余的百分比电量, 且  $0 \leq \beta \leq 1$ 。当其值为 1 时, 表示传输协作无损耗的理想状态。  $DE_1(t)$  为  $IC_1$  的用户在  $t$  时隙的能量需求。  $RE_1(t)$  为  $IC_1$  在  $t$  时隙从可再生能源收集的能量,  $x_{21}(t)$  为由  $IC_2$  转移到  $IC_1$  的能量。  $w_1(t)$  是微电网小区管理中心 1 从传统电网购买能量。

同理, 对于微电网小区管理中心 2 的积压队列有:

$$Q_2(t+1) = \max[Q_2(t) - RE_2(t) - w_2(t) - \beta x_{12}(t), 0] + DE_2(t) \quad (2)$$

式中,  $w_i(t), \forall i \in \{1, 2\}$  是两个微电网小区从传统电网购买的能量, 本文的目标就是通过优化整个能量管理系统的能量协作控制, 最小化系统从传统电网购买的能量  $w_1(t) + w_2(t)$ 。

$$\text{令 } Q(t) = \sum_{i=1}^2 Q_i(t), \text{ 表示服务队列的整体情况。}$$

如图 2 所示, 微电网小区  $IC_i$  的能量来源有 3 项, 分别是: 从传统电网购买的能量  $w_i(t)$ 、微电网小区  $IC_i$  自身收集的能量  $RE_i(t)$ 、另一个微电网小区  $IC_j$  转移而来的能量  $\beta x_{ji}(t)$ 。而微电网小区  $IC_i$  的能量出口有两个: 供应小区内部的能量需求  $DE_i(t)$ 、传

输给另一个微电网小区  $IC_j$  的能量  $x_{ij}(t)$ , 其中  $i, j \in \{1, 2\}, i \neq j$ 。

## 2 问题规划

传统电网的电价一般分为两种: 1) 固定电价, 也就是电价不随时间改变; 2) 实时电价, 表现为电价围绕着一个数值上下波动。本文研究的是在固定电价的情况下, 以控制两个微电网小区从传统电网中购买获取的电量最少为目标, 实现绿色节能的目的。目标以及约束可以表达为

$$\begin{cases} \min & \limsup_{N \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (w_1(t) + w_2(t)) \right\} \\ \text{s.t} & 0 \leq w_i(t) \leq w_{\max}, \forall i \in (1, 2) \end{cases} \quad (3)$$

$$RE_i(t) \leq RE(t)_{\max}, \forall i \in (1, 2) \quad (4)$$

$$DE_i(t) \leq DE(t)_{\max}, \forall i \in (1, 2) \quad (5)$$

$$DE(t)_{\max} \leq w_{\max} \quad (6)$$

$$\bar{Q}_i < \infty, \forall i \in (1, 2) \quad (7)$$

式(3)是约束了从传统电网购买的最大电量, 且与  $RE(t)_{\max}$  联合约束了本时刻最大的消耗电量。式(4)~式(7)是为了保证所有的队列都能保持稳定, 而且其中  $\bar{Q}_i \triangleq \limsup_{T \rightarrow \infty} \sum_{\tau=0}^{T-1} E\{Q_i(\tau)\}$ 。

## 3 问题求解

### 3.1 虚队列

为避免小区内用电请求无限的等待, 需要在上述优化中加上用电请求等待时延的约束, 以使小区用电请求在一定时延内得到响应。在此, 引入虚队列  $Z(t+1)$ , 对  $IC_1$  的虚队列有

$$\begin{aligned} Z_1(t+1) = \\ \max \left[ Z_1(t) - RE_1(t) - w_1(t) - \beta x_{21}(t), 0 \right] + \varepsilon_1 1_{\{Q_1(t) > 0\}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $1_{\{Q_1(t) > 0\}}$  表示当  $Q_1(t) > 0$  时其值为 1, 否则为 0;  $\varepsilon_1$  表示常数  $\varepsilon_1$  对虚拟队列积压的惩罚, 用于调节虚拟队列  $Z_n(t)$  的增长速度, 且  $Z(0) = 0$ 。虚队列  $Z_1(t+1)$  有相同的服务过程: 当实队列的积压非空时, 虚队列的到达过程要加上  $\varepsilon_1$ 。当实队列积压未处理完毕时, 虚队列的积压同时在增长, 虚队列的积压越多可理解为时延越大。

同理, 对  $IC_2$  有:

$$\begin{aligned} Z_2(t+1) = \\ \max \left[ Z_2(t) - RE_2(t) - w_2(t) - \beta x_{12}(t), 0 \right] + \varepsilon_2 1_{\{Q_2(t) > 0\}} \end{aligned} \quad (9)$$

令  $Z(t) = \sum_{i=1}^2 Z_i(t)$ , 表示虚队列积压的整体情况。若能控制  $Q(t)$  和  $Z(t)$  的增长, 同时均有一个有限的上限值, 则能保证所有用电请求可在上限值对应的时延内被服务完成。

引理 1: 对  $IC_1$  而言, 假设系统控制两个队列  $Q_1(t)$  和  $Z_1(t)$ , 满足  $Q_1(t) \leq Q(t)_{\max}$  与  $Z_1(t) \leq Z(t)_{\max}$ , 则所有的用户请求可在  $D_{\max}$  个时隙内被完成服务。

$$D_{\max} \triangleq \left\lceil \frac{Q_{\max} + Z_{\max}}{\varepsilon} \right\rceil \quad (10)$$

### 3.2 Lyapunov 优化

根据参考文献[18], 定义 Lyapunov 函数  $L(\Theta(t))$  为

$$L(\Theta(t)) \triangleq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 [Q_i(t)^2 + Z_i(t)^2], \forall i \in \{1, 2\} \quad (11)$$

该函数是测量拥塞的标量, 并且定义 Lyapunov 漂移为

$$\Delta(\Theta(t)) \triangleq E \{ L(\Theta(t+1)) - L(\Theta(t)) | \Theta(t) \} \quad (12)$$

式中,  $\Theta(t)$  是队列  $Q(t)$  和  $Z(t)$  的级联矢量,  $\Theta(t) \triangleq (Z(t), Q(t))$ 。

使用漂移—加—惩罚算法, 观测队列  $Q(t)$  和  $Z(t)$  以及现行的  $\forall i \in \{1, 2\}, RE_i(t), DE_i(t)$  矢量, 作出决策  $w_i(t), \forall i \in \{1, 2\}$ , 来最小化边界:

$$\min \Delta(\Theta(t)) + VE \{ w_1(t) + w_2(t) | \Theta(t) \} \quad (13)$$

式中,  $V$  是一个正值的参数, 用以调节其性能与积压的折衷权衡。可以采取某些行为来最小化  $\Delta(\Theta(t))$ , 将积压推向一个更低的层次。然而, 这样做会带来更大的惩罚, 即需要向外界购买更多的能量。因此最终需要最小化的是漂移和惩罚的折衷加权和。

引理 2: (漂移边界)漂移—加—惩罚满足以下不等式。

$$\begin{aligned} \Delta(\Theta(t)) + VE \{ w_1(t) + w_2(t) | \Theta(t) \} \leq \\ B + VE \{ w_1(t) + w_2(t) | \Theta(t) \} + \\ \sum_{i=1}^2 Q_i(t) E \{ DE_i(t) - RE_i(t) - w_i(t) - \beta x_{ji}(t) \} + \\ \sum_{i=1}^2 Z_i(t) E \{ \varepsilon - RE_i(t) - w_i(t) - \beta x_{ji}(t) \} \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $i \in \{1, 2\}$ ,  $j \in \{1, 2\}$  且  $i \neq j$ 。而  $B$  定义为

$$B \triangleq \frac{\sum_{i=1}^2 \left[ (DE_i(t))^2 + (RE_i(t) + w_i(t) + \beta x_{ji}(t))^2 \right]}{2} + \frac{\sum_{i=1}^2 \max \left[ \varepsilon^2, (RE_i(t) + w_i(t) + \beta x_{ji}(t))^2 \right]}{2}$$

### 3.3 动态算法

公式(14)的左端被其右端公式严格限制住。若想要最小化式(14)的值, 可在每个时隙, 观察  $Q(t)$  和  $Z(t)$  和现行  $(RE(t), DE(t))$  矢量, 并根据以下的优化来选择决策变量以达到优化目的。

$$\begin{aligned} & \min \\ & V \sum_{i=1}^2 w_i(t) + \\ & \sum_{i=1}^2 Q_i(t) \{ DE_i(t) - RE_i(t) - w_i(t) - \beta x_{ji}(t) \} + \\ & \sum_{i=1}^2 Z_i(t) E \{ \varepsilon - RE_i(t) - w_i(t) - \beta x_{ji}(t) \} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq RE_i(t) \leq RE_{\max}, \forall i \in \{1, 2\} \\ 0 \leq w_i(t) \leq w_{\max}, \forall i \in \{1, 2\} \\ x_{12}(t), x_{21}(t) \geq 0 \text{ and } x_{12}(t) \cdot x_{21}(t) \geq 0 \end{cases}$$

并且根据  $Q(t)$  和  $Z(t)$  公式来更新。

$$\begin{aligned} & \min \\ & \sum_{i=1}^2 w_i(t) (V - Q_i(t) - Z_i(t)) - \beta \sum_{i=1}^2 x_{ji}(t) (Q_i(t) + Z_i(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

至此, 由优化过程可得出, 若最小化式(16), 其中的变量为  $w_i(t)$ 。则当  $\forall i, V \geq Q_i(t) + Z_i(t)$  时, 分配可再生能量以及调度其能量使这时刻的请求得到满足, 使  $w_i(t)$  为 0; 当  $V < Q_i(t) + Z_i(t)$ , 可使  $w_i(t)$  最大, 即设定从传统电网购买的电量达到最大。

因此通过求解以上优化目标, 得到微电网小区间的实时能量协作算法, 算法可分为以下几个步骤:

1) 在每个时隙的开始, 根据队列中的信息对  $Q_i(t) + Z_i(t) - V$  的值来作出判断;

2) 若  $\forall i \in \{1, 2\}, Q_i(t) + Z_i(t) - V > 0$ , 则在这一时隙, 从传统电网处购买最大的电量  $w(t)_{\max}$  来满足用电请求  $Q_i(t)$ ;

若  $\forall i \in \{1, 2\}, Q_i(t) + Z_i(t) - V \leq 0$ , 则在这一时隙, 以收集到的可再生的能量以及两个微电网小区

管理中心之间的互相传输来满足用电请求  $Q_i(t)$ , 此时从传统电网处购买的电量最小, 为 0。

3) 根据以上处理以及式(1)、式(2)、式(8)、式(9)来更新下一时隙的信息。然后返回 1) 进行下一时隙的处理。

### 3.4 性能分析

定理 1: 假设在时隙  $t \in \{0, \dots, T\}$  上,  $\forall i \in \{1, 2\}$ , 有  $DE_i(t)_{\max} \leq w_{\max}$ ,  $\varepsilon \leq w_{\max}$ 。而且有  $Q_i(0) = 0$ ,  $Z_i(0) = 0$ 。以传统的  $\varepsilon \geq 0$ ,  $V \geq 0$  来实现上述算法, 则有:

1) 在时隙  $t \in \{0, \dots, T\}$  上, 对所有  $\forall i \in \{1, 2\}$ , 队列  $Q_i(t)$  和  $Z_i(t)$  有其上限, 分别为  $Q_{i,\max}$  和  $Z_{i,\max}$ , 它们的定义为

$$Q_{i,\max} \triangleq V + DE_{i,\max} \quad (17)$$

$$Z_{i,\max} \triangleq V + \varepsilon_i \quad (18)$$

2) 队列  $i$ ,  $\forall i \in \{1, 2\}$  的最大延迟为

$$D_{\max} \triangleq \left\lceil \frac{2V + DE_{i,\max} + \varepsilon}{\varepsilon} \right\rceil \quad (19)$$

3) 假设在时隙上是独立同分布的, 且  $\varepsilon$  满足  $\varepsilon \leq E(DE_i + x_{i2})$ , 则购买电量代价的时间平均期望的上限由最优值与  $\frac{B}{V}$  确定。

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T E(w_1(t) + w_2(t)) \leq C_{\text{opt}} + \frac{B}{V} \quad (20)$$

由式(8)和式(18)可以看出,  $V$  和  $\varepsilon$  是控制参数, 影响虚队列的增长速度, 实队列与虚队列的长度和平均购电代价的上限。可以通过增加  $V$ , 降低  $\varepsilon$  来降低平均购电代价, 但这会导致用户等待时延的上限的增加。所以要根据定理 1 在服务延迟和购电代价中权衡, 找到一个平衡点。

## 4 数值仿真

本文建立的系统模型为包含两个微电网小区的能源管理系统, 接入传统电网, 并配备可再生能源收集设备, 对太阳能、风能等能源进行收集能量。微电网小区之间由系统管理中心来控制能量协作传输, 每个微电网小区各有一个微电网小区管理中心, 控制其联合收集而来的能量, 此收集能量的过程设为泊松分布(该算法本身并不需要其统计概率分布模型)。由于用户允许延迟其弹性需求用电, 则该类型用电请求被列入请求服务队列中, 并由微电网小区管理中心安排配电。本文设置用电需求的到达过程为均匀分布, 具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
时隙间隔 $\Delta t$	10 s	$RE_1$	$0.9059 \times 10^7$ kJ / 时隙
时隙个数	8000	$RE_2$	$0.9577 \times 10^7$ kJ / 时隙
传输因子 $\beta$	0.65	$DE_{max}, W_{max}$	$2 \times 10^7$ kJ / 时隙
需求达到过程	均匀分布	$DE_1$	$0.9917 \times 10^7$ kJ / 时隙
能量收集过程	泊松过程	$DE_2$	$1.0014 \times 10^7$ kJ / 时隙

为了评估该算法所取得的效果，本文将该算法与以下两种策略所取得的仿真效果作比较。第一种是“无能量协作”的策略：在每一个时隙，微电网小区管理中心检查用电请求队列，先使用收集的能量来服务队积压，若此刻收集的能量不足以供应队列积压，则将积压推迟到下一时隙。若某一时隙的用电请求在规定的最后期限内未被完成服务，则立即从传统电网购买能量来满足积压中余下的用电请求。另一种是“基于能量协作”的贪婪算法：在规定了最大时延的情况下，微电网小区管理中心在每个时隙的开始检查用电请求队列，使用收集的能量与从另一个微电网小区传输协作而来的能量来服务队积压，若该时隙的用电请求未得到满足，则等待一定的时隙，收集更多的能量。若直到时延的最后期限仍未得到满足该时隙的请求，才着手从传统电网购买获取能量。

本文分别对此三类算法进行仿真，设置为 8000 个时隙内， $V=50$ 。图 3 给出了在三种算法下，微电网小区能量管理系统从传统电网购买获取的电量随时间的累计数。从图中可分辨出随着时隙的增加，从传统电网中购买获取的能量也在以不同的速率增加，而且本文提出的算法购买的电量远低于上述两种贪婪算法所购买的电量，可以明显地看出本文提出的 Lyapunov 算法的效果远优于上述两种贪婪算法。

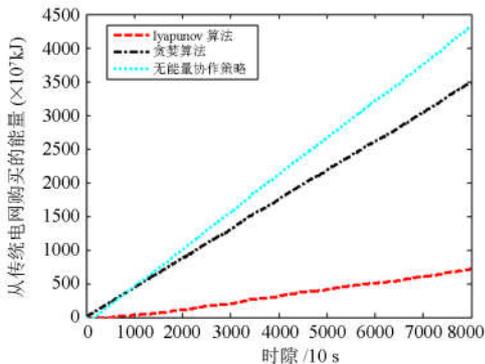


图 3 三类算法购买的能量

Fig. 3 Energy purchased by three algorithms

图 4 为两种算法的时延对比，显示出 Lyapunov 优化算法与“基于能量协作”贪婪算法之间对用电请求延迟时长和延迟数量的对比。图中可分辨出，“有协作有时延”贪婪算法在对请求的时延量方面，延迟的时隙在 0~80 个之间，但绝大多数集中在 80 个时隙附近上，而本文提出算法的时延效果则是集中在 0~20 个时隙这个区间，尤其以 10 个时隙内居多。反映出本文提出的优化算法在处理时延方面的优秀性能。

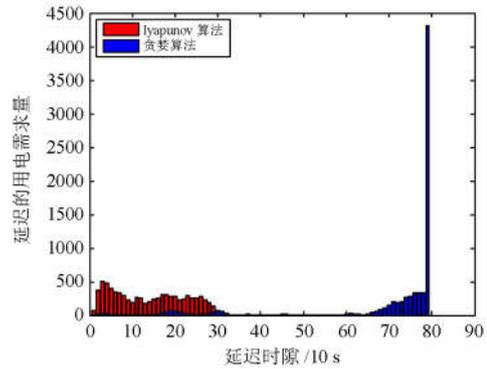


图 4 两种算法的时延对比

Fig. 4 Time delay comparison of two algorithms

$V$  作为一个决定参数，其作用是调节整个系统的性能与积压的关系。如何取一个合适的  $V$  值，对权衡系统的性能而言是非常重要的。图 5 是应用不同  $V$  值的 Lyapunov 算法所取得的效果。如图所示，该仿真取了不同的  $V$  值，分别为 30、60、100。当  $V=30$  时，算法的性能最差，从传统电网购买获取的能量最多；当  $V=60$  时，虽然最终该算法从传统电网购买获取的能量仅仅略低于  $V=30$  的情况，但是从总体来看，效果还是优于  $V=30$ ；当  $V=100$  时，算法取得的效果最优，从传统电网购买获取的能量最少。

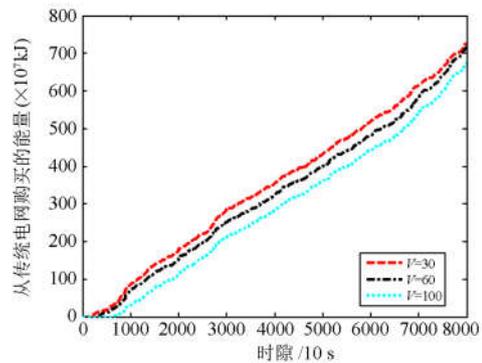


图 5 不同  $V$  值的 Lyapunov 算法的购买量对比

Fig. 5 Purchase comparison of Lyapunov algorithm with different  $V$  values

图 6 展示的是应用不同  $V$  值的 Lyapunov 算法对用户用电请求的延迟情况。当  $V=30$  时, Lyapunov 算法对用户用电请求造成的时延主要集中在 0~20 个时隙;  $V=60$  时, Lyapunov 算法对用户用电请求造成的时延主要集中在 20~40 个时隙;  $V=100$  时, Lyapunov 算法对用户用电请求造成的时延主要集中在 40~60 个时隙。以上可看出, 对本文提出的算法而言,  $V$  值越大, 算法所取得的效果越优秀, 但是对用户的用电请求而言, 时延就越大, 所以可以根据具体情况和用户的用电请求情况来制定合适的  $V$  值。

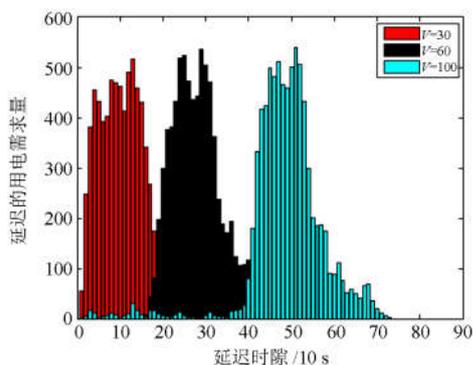


图 6 不同  $V$  值的 Lyapunov 算法的时延效果对比

Fig. 6 Delay comparison of Lyapunov algorithm with different  $V$  values

## 5 结论

在智能电网的大环境下, 微电网小区具有对可再生能源收集能量的设备, 并与传统电网相连接进行联合供能。针对该类微电网小区, 本文提出了一种全新的能量协作模型以及能量管理系统。能量管理系统运用 Lyapunov 算法对微电网小区内用户的弹性用电需求与分布式发电资源进行调度, 并在微电网小区之间进行能量协作调度。该算法的优势在于在未知能量收集过程以及负载消耗过程的情况下, 利用能量协作的优势, 把从传统电网获取的能量最小化。对于用户的弹性需求的时延和从传统电网获取的能量, 也可通过权重参数进行调节。最后再通过数值仿真, 验证了该算法是一种有效的传输调度算法, 在实际的环境中具有现实参考价值。

## 参考文献

- [1] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26. ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.
- [2] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, ULUKUS S, et al. Fundamental limits of energy harvesting communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 126-132.
- [3] IPAKCHI A, ALBUYEH F. Grid of the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2009, 7(2): 52-62.
- [4] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7. CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [5] VENKATRAMAN R, KHAITAN S K. A survey of techniques for designing and managing microgrids[C] // IEEE Pessgm, 2015.
- [6] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60. CHEN Ruchang, CHEN Fei, ZHANG Fan, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60.
- [7] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [8] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management[J]. Power & Energy Magazine IEEE, 2008, 6(3): 54-65.
- [9] HE M, GIESSELMANN M. Reliability-constrained self-organization and energy management towards a resilient microgrid cluster[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference, 2015.
- [10] WANG Q, LIN C, YANG X, et al. Scheme of intelligent community based on distributed generation and micro-grid[C] // International Conference on Power System Technology, 2010: 1-6.
- [11] 程宜风, 陈中伟, 安灵旭, 等. 智能小区用电的排队论模型及控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(7): 7-10. CHENG Yifeng, CHEN Zhongwei, AN Lingxu, et al. Queuing theory model and control strategy for electricity of intelligent community[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(7): 7-10.
- [12] IMAMURA A, YAMAMOTO S, TAZOE T, et al. Distributed demand scheduling method to reduce energy cost in smart grid[C] // Humanitarian Technology Conference, 2013: 148-153.
- [13] GURAKAN B, OZEL O, YANG J, et al. Energy cooperation in energy harvesting communications[J].

- IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(12): 4884-4898.
- [14] CHIAY K, SUN S, ZHANG R. Energy cooperation in cellular networks with renewable powered base stations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 6996-7010.
- [15] 王燕廷. 微电网并网与孤岛运行模式切换的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2011.  
WANG Yanting. Study on the switching of micro-grid grid-connected and autonomous modes[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2011.
- [16] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 17-24.  
ZHENG Jinghong, WANG Yanting, LI Xingwang, et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 17-24.
- [17] HAO Z, YAO Z, LI S, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [18] 米阳, 夏洪亮, 符杨, 等. 基于鲁棒下垂控制策略的微电网平滑切换[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2309-2315.  
MI Yang, XIA Hongliang, FU Yang, et al. Smooth switching of microgrid operation states based on robust droop control strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2309-2315.
- [19] NEELY M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems[J]. Synthesis Lectures on Communication Networks, 2010, 3(1): 211.
- [20] CAMMARANO A, PETRIOLI C, SPENZA D. Pro-Energy a novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks[C] // IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc & Sensor Systems, 2012: 75-83.
- [21] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution[C] // Power Electronics Specialists Conference, 2004, 6: 4285-4290.
- [22] GUO Y, PAN M, FANG Y. Optimal power management of residential customers in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2012, 23(9): 1593-1606.
- [23] JIN C, SHENG X, GHOSH P. Optimized electric vehicle charging with intermittent renewable energy sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(6): 1063-1072.
- [24] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.

---

收稿日期: 2016-11-03; 修回日期: 2017-01-25

作者简介:

陈奕斌(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合能源微电网间的能量协作调度; E-mail: cyb2000@foxmail.com

林基明(1970—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、移动通信。E-mail: zhang\_linjm@163.com

(编辑 姜新丽)