

Microgrid Economic Dispatch Considering Outage Costs of Controllable Load

Lin Yang¹, Lei Yang², Zhiqiang Yao³

¹Nanjing Power Feed Section of Shanghai Railway Bureau, Nanjing Jiangsu

²College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

³Electric Power Automation Research Institute, China Electric Power Research Institute, Nanjing Jiangsu

Email: 912481341@qq.com, getbacker5@sina.cn, yaozhiqiang@epri.sgcc.com.cn

Received: Sep. 7th, 2015; accepted: Sep. 21st, 2015; published: Sep. 28th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The loads in microgrid are flexible and easy to control. The economical operation of microgrid would become more economic by loads actively participating in. A cost model of controllable load was built based on factors affecting the outage costs. Combining it and the traditional microgrid operating model, a multi-time scale microgrid operating model was constructed, engaging controllable loads in the operation effectively. By simulation analysis, the rationality and validity of the model were proved.

Keywords

Mircogrid, Controllable Load, Economic Dispatch

考虑可控负荷停电成本的微电网经济调度策略

杨 林¹, 杨 磊², 姚志强³

¹上海铁路局南京供电段, 江苏, 南京

²东南大学电气工程学院, 江苏 南京

³中国电力科学研究院电力自动化研究所, 江苏 南京

Email: 912481341@qq.com, getbacker5@sina.cn, yaozhiqiang@epri.sgcc.com.cn

收稿日期: 2015年9月7日; 录用日期: 2015年9月21日; 发布日期: 2015年9月28日

摘要

微电网中的负荷具有灵活而易于控制管理的特点。将负荷积极参与到微电网调度计划中,可以有效提高微电网运行的经济性。本文根据影响可控负荷停电成本的各要素,建立可控负荷停电成本模型,并将其与常见的微电网调度模型结合,制定了多时间尺度下的考虑可控负荷停电成本的微电网经济调度方案,有效地将可控负荷参与到微电网经济调度中。通过对其进行仿真分析,验证了该方法的合理性和有效性。

关键词

微电网, 可控负荷, 经济调度

1. 引言

微电网的经济运行是微电网能量管理的重要组成部分[1] [2]。常见的微电网经济运行优化集中于利用对负荷和风光资源的预测,调度微电网的各类分布式电源,达到经济性最优等目标[3] [4]。对于需求侧的经济管理,文献[5]讨论了建设阶段的投资成本最小化,而未讨论其经济运行策略。文献[6]提出了基于负荷响应的微电网经济优化策略,但并未优化微电网中的分布式电源。文献[7]采取考虑实时电价来评估负荷经济效益的方法,而未针对负荷特性对其经济性进行分析。

综合上述文献可以看出,微电网中负荷并未能够如分布式电源及储能设备一般,通过建立经济性模型和利用能量管理系统而进行集中式控制,因而未能有机融入微电网整体运行调度过程。目前研究中主要采取的利用实时电价而进行的需求侧管理方法由于我国电力市场尚不完善,现实中往往通过峰谷电价对用户进行引导,其效果很大程度上受到限制。

本文的研究目的在于实现并网状态下包含可控负荷停电成本在内的微电网整体经济性优化。利用在大电网中已有的对可控负荷停电成本的研究成果,建立考虑提前通知时间、停电持续时间和缺电比例在内的停电成本模型,将其融入微电网经济运行优化模型之中。同时制订在并网状态下的微电网调度策略,根据该策略对微电网的运行进行经济调度优化。

本文的工作主要集中于两点。首先,针对影响可控负荷停电成本的几大要素,建立其停电成本模型。其次,考虑可控负荷参与调度时机,制订多时间尺度的经济优化策略,达到微电网运行效益最优的目标。

2. 微电网供电单元成本模型

2.1. 分布式电源

分布式电源包含风机、光伏电池、燃气轮机、燃料电池等多种类型。其运行成本包含燃料成本、折旧成本、运行维护成本及治污成本,其成本模型如式(1)所示:

$$C_{CG} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_{Fit} + C_{DDit} + C_{OMit} + C_{PLit}) \quad (1)$$

其中 C_{CG} 为参与调度的分布式电源总成本, T 为计划时段数, N 为分布式电源数。 C_{Fit} 为第 i 个分布式电源在 t 时间的燃料成本, C_{DDit} 为其折旧成本, C_{OMit} 为其运行维护成本, C_{PLit} 为其治污成本。

燃气轮机和燃料电池的燃料成本可写为:

$$C_{F(MT/FC)} = c_n \frac{P_{CG} \Delta t}{\eta L} \quad (2)$$

c_n 为燃料价格, η 为发电单元效率, L 为燃料热值, P_{CG} 为其此时发电功率, Δt 为发电时间。
发电机组的折旧成本为:

$$C_{DD} = \frac{C_{ACC}}{8760P_{ri}f_{cf}}P_{CG}\Delta t \quad (3)$$

P_{ri} 为机组额定功率, f_{cf} 为其容量因子。 C_{ACC} 为机组安装成本年平均费用, 其表达式如下:

$$C_{ACC} = C_{INS} \frac{d(1+d)}{(1+d)^n - 1} \quad (4)$$

其中 C_{INS} 为设备安装成本, d 为利息率, n 为折旧年限。

设备的运行维护成本可以近似看作与发电功率成正比:

$$C_{OM} = K_{OM}P_{CG} \quad (5)$$

K_{OM} 为该设备的运行维护系数。

电源的治污成本为:

$$C_{PL} = \sum_{j=1}^M \alpha_j \beta_j P_{CG} \quad (6)$$

α_j 为第 j 种污染物的单位治理成本, β_j 为第 j 种污染物的排放系数, M 为需治理的污染物数量。

2.2. 大电网网交互功率

微电网在并网运行模式下分为购电与售电两种状态。其成本可以写为:

$$C_{GRID} = r_{GRID}P_{GRID} \quad (7)$$

P_{GRID} 为微电网与大电网的交换功率, 购电时 $P_{GRID} > 0$, 售电时 $P_{GRID} < 0$ 。 r_{GRID} 为此时刻的购电或售电电价。

3. 微电网可控负荷停电成本模型

微电网中的可控负荷是指, 在微电网能量管理系统的要求下可以限制一段时间用电的负荷。而对于其他负荷, 由于不参与微电网经济调度, 因而统称为不可控负荷。

在可控负荷参与调度过程中, 因能量管理系统发布对负荷的停电计划而对用户造成的损失, 称为可控负荷停电成本。部分负荷的停电对电力需求的下降也将导致电源发电成本下降。因此权衡可控负荷停电成本与电源成本, 是决定可控负荷是否削减及削减量的关键因素。

3.1. 影响可控负荷停电成本的因素

影响可控负荷停电成本的因素主要包括用户类型、停电持续时间、提前通知时间、停电发生时间、缺电比率、停电频率等。根据其总结, 本文对于可控负荷停电成本主要考虑以下影响因素。

1) 缺电比例

缺电比例是停电量占全部负荷用电量的比例。在实际运行中发现, 停电损失与缺电比例非简单线性关系。当缺电比例较低时, 可以对重要性最低的可控负荷停止供电, 停电损失较小, 当缺电比例升高时, 可能导致重要的敏感负荷停电, 造成单位停电损失更高。

实验研究中, 缺电比例与停电损失的关系可采用二次型进行模拟[6], 关系式为:

$$y_x(x, \theta) = k_1(xP_L)^2 + k_2(xP_L)(1-\theta) \quad (8)$$

其中 k_1 、 k_2 是缺电成本函数的系数，与负荷性质和负荷状态相关。 θ 为负荷停电能力， $0 \leq \theta \leq 1$ ，其值越小，意味着用户边际停电成本越高。 P_L 为负荷功率值， x 为负荷缺电比例。

2) 提前通知时间

提前通知时间对用户的停电损失有非常大的影响。在可控负荷的运营中，往往将其提前通知时间作为重要参数并加以规定。通过提前通知停电时间，促进用户合理安排生产用电，能有效降低用户的停电损失。

表 1 为文献[8]给出的 1998 年希腊和 1993 年加拿大地区的大电网有关调查结果。其中停电损失减少率表示在有提前通知时间时，用户及时对停电做出反应而降低的停电损失百分比。

在较长时间尺度($1 \text{ h} \leq t \leq 1 \text{ d}$)上，停电损失减少率和提前通知时间成线性关系，随提前通知时间的延长而增加。而在较短时间尺度($t \leq 1 \text{ h}$)上，停电损失减少率和提前通知时间成指数关系，随提前通知时间的缩短而减少。这是因为提前通知时间增加时，用户可以对停电做出的反应和准备越充分，因而停电所造成的损失就越少。由此可知微电网可控负荷参与调度时，应尽量避免较短提前通知时间的负荷停电，提前通知时间的影响将在 5.2 节中多时间尺度优化策略仿真中将加以分析。

3) 停电持续时间

停电持续时间是指用户部分或全部停电的连续停电时间。文献[9]给出持续停电时间与停电损失的数据，如表 2 所示。

此外通过对两者相互关系进行分析[8]，得出结论：随着停电时间延长，总停电损失增加，而单位时间内的停电损失以指数形式减少。

在微电网调度中，多时间尺度的调度计划在制定后即会告知用户，向负荷侧通知其停电持续时间。而用户在已知将要停电的持续时间后可以对此进行生产计划和营业安排的调整，从而降低停电对其生产经营的影响。

4) 停电补偿成本

在与用户签订可中断负荷合同时，往往需给予用户一定停电补偿，以充分体现可控负荷的激励作用，保障用户的利益，并引导用户积极参与微电网的负荷管理。

Table 1. Power loss reduction rate with advance notice of the time

表 1. 停电损失减少率与提前通知时间

用户	提前通知时间			
	<1 h	1 h~4 h	5 h~16 h	17 h~24 h
希腊	26.48	31.46	41.21	52.24
加拿大商业	25.70	37.80	48.90	53.40
加拿大工业	26.80	36.30	47.30	56.20

Table 2. The industry outage duration corresponding power loss

表 2. 各行业停电持续时间对应停电损失

停电损失	持续断电时间		
	20 分钟	1 小时	4 小时
工业	6.29	13.93	29.94
商业	4.74	12.87	44.37
民用	0.03	0.15	1.64
交通	8.91	16.42	45.95
加权平均	3.59	8.76	24.9

可中断负荷的补偿机制，必须解决补偿费用来源和具体定价补偿费用问题，通过合理的补偿费用激励负荷参与可中断负荷管理。可以对电力市场中可中断负荷合同的研究加以借鉴[10]。

一般而言，停电补偿与停电量成正比，即按照合同规定系数以总停电量的一定比例给予补偿。其系数可结合用户的停电成本、历史数据和效用等因素得出。

3.2. 可控负荷成本模型

在 t 时刻下，削减单位可控负荷的成本 C_{IL} 可以写为：

$$C_{IL}(t) = (c_x \beta L - k) \Delta P \Delta t \quad (9)$$

其中， c_x 为缺电比例系数， $\beta(\%)$ 为提前通知时间系数， L 为停电持续损失系数， k 为停电补偿系数， L 和 k 的单位为 ¥/kWh ， ΔP 为负荷削减功率值， Δt 为停电时间。

1) 缺电比例系数

微电网中的缺电比例 x 为

$$x = \frac{\Delta P}{P_L} \quad (10)$$

式中 P_L 为负荷功率值。

在本文中，令式(8)中 $\theta = 0$ ，即忽略负荷用户的停电能力[11]，即为：

$$y_x = k_1 (x P_L)^2 + k_2 (x P_L) \quad (11)$$

此时，缺电比例系数可以写为削减部分可控负荷所产生停电成本与完全停电所产生成本之比，即为：

$$c_x = \frac{k_1 x^2 P_L + k_2 x}{k_1 P_L + k_2} \quad (12)$$

表 3 为文献[11]所给出的负荷缺电成本函数参数。

2) 提前通知时间系数

本文提前通知时间系数与持续停电损失采用表 1 中数据，将数据取平均值，进行一次函数拟合得到提前通知时间 ($t_N > 1$) 与停电损失减少率 α 的关系，对应的提前通知时间系数 β 即 $(100 - \alpha)\%$ 。

在提前通知时间 $t_N < 1$ 时，可近似模拟为指数衰减，此时 $t_N = 0$ 对应 $\beta = 100$ 。以此可写出提前通知时间系数：

$$\beta(t_N) = \begin{cases} 70.95 - 1.32t_N & t_N > 1 \\ 100e^{-0.362t_N} & t_N < 1 \end{cases} \quad (13)$$

对应的提前通知时间系数如图 1 所示。

3) 停电持续损失系数

本文对文献[9]中给出的单位时间损失按汇率修正得到停电持续损失系数的公式：

$$L(t_L) = 22.1t_L^{-0.53} \quad (14)$$

t_L 为停电持续时间，表示在计算停电损失时该负荷已经投入削减的持续时间。

模型同时考虑到停电时间与次数的关系，即使继续削减可控负荷可以提高微电网的整体效益，但基于保证用户供电质量的原则，可控负荷的停电次数和每次停电的持续时间须考虑在内。即在调度计划的每个周期中，可控负荷必须遵循停电次数和停电持续时间约束，使集中控制的能量管理系统对用户侧的管理和控制在有条件的情况下进行。

Table 3. Power shortage factor parameters
表 3. 缺电系数参数

用户类型	k_1	k_2
机械	0.0005	1.5
电子	0.0002	1.0
食品医药	0.0004	1.3
建材	0.0001	0.6
纺织	0.0003	1.2

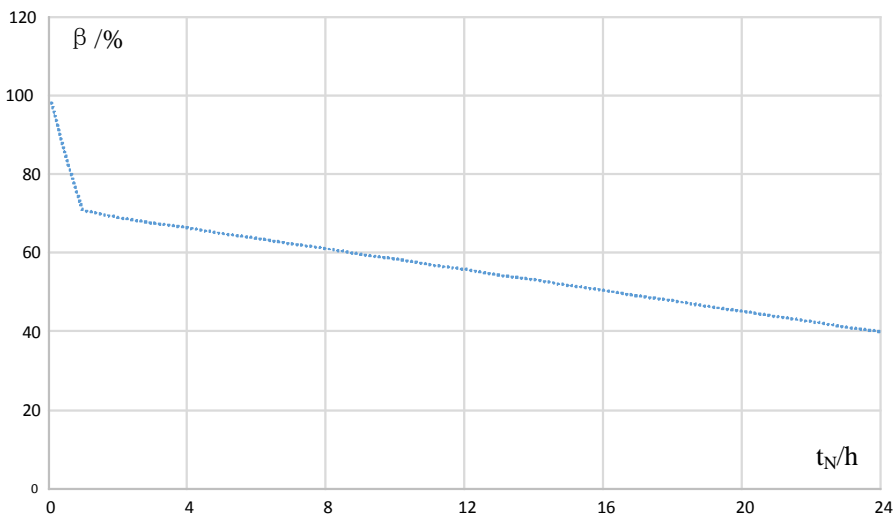


Figure 1. Advance notice of the time factor
图 1. 提前通知时间系数曲线图

4) 停电补偿系数

停电补偿系数 k 需结合用户的停电成本、历史数据和效用等因素得出。文献[12]给出了杭州地区五大行业的负荷停电补偿系数，如表 4 所示。

4. 微电网经济优化调度策略及模型

4.1. 微电网多时间尺度调度策略

微电网的多时间尺度调度主要包括日前计划阶段，滚动优化阶段及超短期调度阶段。

日前计划阶段是以经济性为目标，通过负荷和可再生资源预测数据对下一日的发用电计划进行规划的阶段。

滚动计划阶段是在当天每小时不断实时更新当日剩余负荷和风光的预测数据，对当天剩余时段的发电计划进行滚动修正，从而减少日前预测误差对于日前计划的影响。

超短期调度阶段是以利用 5 min 至 10 min 的超短期预测数据，通过调度可控分布式电源、可调节负荷及储能设备，优化超短期内微电网经济性的调度阶段，需要满足计算速度快，精度高等要求。

4.2. 含可控负荷的微电网经济优化调度策略

在本文中，微电网与主网系统间的交互运行控制策略为微电网内分布式电源、可控负荷与主网共同参与系统的运行优化，并且可以双向交换功率。

Table 4. Load power factor compensation
表 4. 负荷停电补偿系数

用户类型	k (¥/kWh)
机械	0.05
电子	0.14
食品医药	0.08
建材	0.20
纺织	0.11

风力及光伏发电属于可再生能源，在本文中不参与经济调度。对于运行成本较高的燃气轮机和燃料电池，采取综合成本最低的调度策略。

由于可控负荷的停电损失与提前通知时间相关，因此在调度时，需按不同时间尺度而制定不同策略。

一，在日前计划阶段，按较长时间尺度提前通知时间计算提前通知时间系数，同时考虑持续停电损失。

二，在滚动计划阶段，按较长时间尺度提前通知时间计算提前通知时间系数。对于削减已在日前计划阶段或之前的滚动计划进行过通知的负荷，其提前通知时间按最早的提前通知时间计算，对于削减尚未进行过通知的负荷，其提前通知时间按滚动计划进行时的提前通知时间计算，同时更新其停电持续时间。

三，在超短期调度阶段，任何停电行为均视为临时停电，以短时间尺度提前通知时间进行计算，同时忽略停电持续时间改变对单位停电损失的影响。这是由于超短期调度的时间尺度已经非常接近实时调度，其提前通知时间很短，因此任何停电行为都可能影响到用户的用电稳定。

4.2.1. 目标函数

在考虑负荷参与的日前计划中，其计算目标为全日内 24 小时运行总成本最低，即：

$$\min \pi_C^{daily} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M C_{CGit} + \sum_{t=1}^T C_{GRIDt} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N C_{ILjt}^{daily} \quad (15)$$

其中 M 为 t 时刻参与调度的分布式电源数量， N 为 t 时刻进行削减的可控负荷数量， T 为全调度周期中的调度时段数量，在本文中 $T=24$ 。其中分布式电源成本和大电网交换功率成本模型见第 1 章。

影响可控负荷成本的参数中，与时间尺度相关的参数主要为提前通知时间 t_N 和停电持续时间 t_L ，其计算方法如式(16)：

$$t_L(t) = \begin{cases} 0 & \Delta P = 0 \\ 1 & \Delta P \neq 0 \text{ 且 } t = 1 \\ t_L(t-1) + 1 & \Delta P \neq 0 \text{ 且 } t \neq 1 \end{cases} \quad (16)$$

$t_L(t)$ 为计划中 t ($1 \leq t \leq 24$) 时段的停电持续时间参数，当前一时段处于削减状态时，该时段中若继续进行削减，则持续时间增加一个小时。

滚动优化阶段，同理参考式(15)，在滚动优化阶段，第 k 个时段进行的滚动计划目标函数为：

$$\begin{aligned} \min \pi_C^{roll} = & \sum_{t=k}^T \sum_{i=1}^M C_{CGit} + \sum_{t=k}^T C_{GRIDt} \\ & + \sum_{t=k}^T \sum_{j=1}^N C_{ILjt}^{daily} + \sum_{n=1}^k \sum_{t=k}^T \sum_{j=1}^N C_{ILjn}^{roll} \end{aligned} \quad (17)$$

在目标函数中,可控负荷成本分为两项。这是由于滚动计划是基于日前计划和之前的滚动计划的更新,前一项是同日前计划相同部分的可控负荷成本,后一项为每次滚动计划更新产生的可控负荷停电成本。

负荷停电成本的参数提前通知时间 t_N 和停电持续时间 t_L 计算方法如式(18)所示:

$$t_L(t) = \begin{cases} 0 & \Delta P = 0 \\ t_L(t-1)+1 & \Delta P \neq 0 \end{cases} \quad (18)$$

在滚动计划中 $t \neq 1$, 这是因为第一个时间段直接使用了日前计划,而不作滚动计划。

调度阶段,其考虑可控负荷停电成本的目标函数可写为:

$$\begin{aligned} \min \pi_C^{st} = & \sum_{i=1}^M C_{CGi} + C_{GRID} \\ & + \sum_{j=1}^N C_{ILj}^{daily} + \sum_{n=1}^k \sum_{j=1}^N C_{ILjn}^{roll} + \sum_{j=1}^N C_{ILj}^{st} \end{aligned} \quad (19)$$

其中,最后一项为超短期调度中参与调度的可控负荷成本,提前通知时间 t_N 固定为超短期调度的间隔时间,即 5 min~15 min。

4.2.2. 约束条件

本文考虑微电网运行中包含的各种基本约束条件,包括有功功率平衡约束,电源输出最大最小值约束,主网交换功率约束,分布式电源爬坡约束,可控负荷削减量上下限等,此外对可控负荷提出了多个约束条件。

1) 功率平衡约束

微电网中的功率平衡应满足:

$$\sum_{i=1}^M P_{Gi} + P_{GRID} = \sum_{j=1}^N P_{Lj} \quad (20)$$

其中 M 为微电网中全部分布式电源数量, N 为微电网中全部负荷数量。 P_{Gi} 为第 i 个电源的发电功率, P_{GRID} 为与主网交换功率, P_{Lj} 为第 j 个负荷消耗的功率。

2) 常规不等约束

分布式电源发电上下限约束:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (21)$$

其中 P_{Gi}^{\min} 为第 i 个电源的输出功率下限, P_{Gi}^{\max} 为第 i 个电源的输出功率上限。

主网交换功率约束:

$$P_{GRID}^{\min} \leq P_{GRID} \leq P_{GRID}^{\max} \quad (22)$$

其中 P_{GRID}^{\min} 为主网交换功率下限, P_{GRID}^{\max} 为主网交换功率上限。

可控分布式电源爬坡约束:

$$k_{Gdi} \Delta t \leq P_{Giti} - P_{Giti-\Delta t} \leq k_{Gui} \Delta t \quad (23)$$

k_{Gdi} 、 k_{Gui} 分别为机组下降和上升的最大爬坡速率。

3) 可控负荷约束

可控负荷作为用户,应当享有一定用电稳定和可靠权限,不能无限制进行削减。因此,在调度中必须遵循针对可控负荷的约束条件。一般而言,可控负荷的约束条件主要包括负荷停电量约束、负荷停电

次数约束和负荷停电时间约束。

负荷停电量约束：

$$\Delta P_i \leq \Delta P_i^{\max} \quad (24)$$

其中 ΔP_i 为第 i 个负荷的负荷停电量， ΔP_i^{\max} 为其停电量上限。

负荷停电次数约束：

$$N_{iLi} \leq N_{iLi}^{\max} \quad (25)$$

其中 N_{iLi} 为第 i 个负荷的停电次数， N_{iLi}^{\max} 为其停电次数上限。

负荷停电时间约束：

$$T_{iLi} \leq T_{iLi}^{\max} \quad (26)$$

其中 T_{iLi} 为第 i 个负荷的总停电时间， T_{iLi}^{\max} 为其总停电时间上限。

5. 算例验证

5.1. 算例系统

本文所采用的算例为一简化的微电网，包括了多种分布式电源和负荷，并与大电网以联络线进行连接。

分布式电源包括两台变速恒频风力发电机、一个包括了 60 个太阳能光伏电池板的光伏阵列、一台燃气轮机和一个燃料电池。其参数如表 5 所示。

负荷包括部分不可控负荷与可控负荷。其中可控负荷设为某一电子设备用户。根据表 3 及表 4，其缺电系数参数为 $k_1 = 0.0002$ ， $k_2 = 1.0$ ，负荷停电补偿系数为 $k = 0.14$ 。

可控负荷的停电约束如表 6 所示。本文中所设定的负荷停电约束参数参考了大电网中常见可中断负荷合同，因此限制程度较高。

微电网与大电网通过电网联络线连接，最大传输功率为 30 kW。峰电时售电电价为 0.65 元/kW，购电电价为 0.88 元/kWh，谷电时售电电价为 0.13 元/kW，购电电价为 0.23 元/kW。

5.2. 仿真结果及分析

算例对传统多时间尺度调度方法和本文提出的可控负荷参与下的多时间尺度调度方法两种情况进行仿真分析。在调度方法中，分布式电源和大电网以同样的调度策略参与经济调度，在传统调度方法中以满负荷运行作为约束条件，本文方法基于 4.2.2 中的约束条件进行仿真，对负荷是否参与调度优化的经济性进行比较。仿真过程主要考虑微电网日前计划、滚动优化、超短期调度三个阶段。在每个仿真阶段中，根据可控负荷是否参与经济调度分为两种情况，各阶段的仿真结果及分析对比如下。

日前计划阶段下仿真结果如图 2 所示，其中虚线部分为可控负荷不参与经济调度下发布计划，实线为可控负荷参与经济调度下发布计划。

可以看出，在 11:00 至 16:00，可控负荷参与了调度，削减了部分负荷。这一时段为负荷高峰时段，通过削减负荷降低了分布式电源的发电压力。

表 7 为负荷参与与否情况下的微电网可控单元成本对比。

由表 7 分析可知，在负荷参与调度后，由于削减了部分可控负荷，从而产生了可控负荷成本。负荷是否参与调度对于燃气轮机和电网购电成本影响不大，主要影响的是燃料电池的运行成本。

这是由于在本算例中，燃料电池的综合发电成本最高，因而在发电过程中，优先使用成本较低的燃气轮机或向电网购电。在负荷高峰时段，燃气轮机的发电功率和电网购电功率已达上限，因而削减负荷降低了成本较高的燃料电池的发电功率，从而降低了发电成本，降低了微电网在日前计划中的总成本。

Table 5. Parameters of distributed power cost
表 5. 各分布式电源成本参数

参数	微型燃气轮机	燃料电池	风力发电机	光伏电池板
额定功率(kW)	100	80	15	0.2
最小功率(kW)	30	30	0	0
燃料效率(%)	30.4	40	/	/
安装成本(万元/kW)	1.306	4.275	2.375	6.65
折旧年限	10	10	10	20
平均可靠度系数	0.98	0.98	0.98	0.98
维护费用(元/kWh)	0.12	0.03	0.03	0.01
最大爬坡速率(kW/min)	6	6	/	/

Table 6. Controllable load power constraints
表 6. 可控负荷停电约束

约束类型	约束上限值
日前计划停电量(%)	10
滚动优化停电量(%)	10
超短期停电量(%)	5
停电次数	2
停电时间(h)	4

Table 7. The comparison of recently plan cost
表 7. 日前计划成本对比

微电网可控单元	负荷参与	无负荷参与
可控负荷成本	16.0	0
燃气轮机成本	2652.9	2650.7
燃料电池成本	3781.3	3904.3
大电网售购电费用	434.1	433.8
总成本	6884.3	6988.8

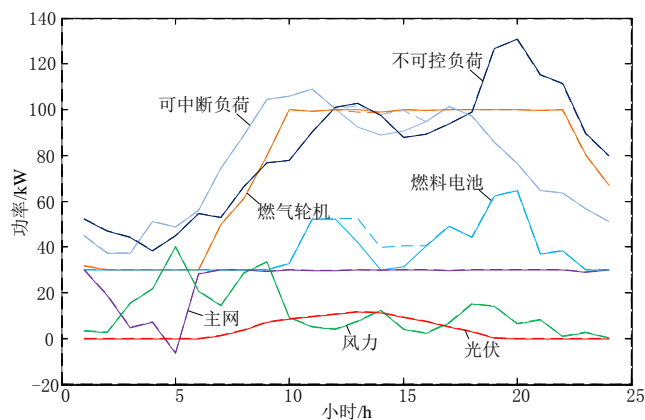


Figure 2. Load involved in recently scheduling
图 2. 负荷参与调度的日前计划

滚动优化为每一小时进行一次计划，因而对应了 23 次仿真数据。为简略起见，仅绘出每小时的有效运行计划，如图 3 所示，同样的实线部分表示可控负荷参与经济调度的调度计划变化。

从图 3 可以看出，在日前计划的基础上，9:00~11:00 时段中有可控负荷在滚动优化阶段参与了经济调度。

表 8 为滚动优化阶段所得的每时段最终计划成本对比。

从表 8 可以发现，由于滚动计划中提前了对可控负荷的停电，滚动计划更新导致的停电成本大幅提升，导致最终的停电成本增加了近一倍。

负荷参与调度前后的滚动计划成本对比与日前计划情况相似，即燃气轮机和大电网售购电费用基本不变，燃料电池成本降低。而滚动计划中，由于每次刷新得到的负荷总量有所下降，负荷停电量也下降，导致燃料电池成本下降小于日前计划，负荷是否参与调度的经济性低于日前计划；反之若滚动计划的负荷值大于日前计划，将增大停电量，导致燃料电池的成本下降幅度变大，负荷是否参与调度的经济性高于日前计划。

超短期调度阶段仿真结果如图 4 所示。

表 9 为超短期调度阶段所得的计划成本对比。

由表 9 可以看出，微电网的运行总成本相比于滚动计划增长，其成本的升高主要来自于燃料电池的发电成本升高。这是因为在超短期调度阶段，风光资源和负荷的波动，为保证微电网的功率平衡，依赖燃料电池出力平抑波动，其发电成本增长。

同时，由于提前通知时间很短，此阶段中停电成本很高，相较于滚动计划中的可控负荷成本又有了很大提高。可以看出，可控负荷停电以降低发电成本的方法在超短期调度中受到了很大限制，因此可以预见，如果要进行更短时间尺度的调度，则负荷的停电成本更高。因此，可控负荷参与调度的实用价值主要存在于日前计划和滚动计划，而不适合较短时间尺度的超短期调度。

Table 8. Cost comparison of rolling optimization

表 8. 滚动优化成本对比

微电网可控单元	负荷参与	无负荷参与
可控负荷成本	31.2	0
燃气轮机成本	2600.9	2613.0
燃料电池成本	3782.5	3848.0
大电网售购电费用	435.6	437.2
总成本	6850.2	6898.2

Table 9. Cost comparison of ultra short scheduling

表 9. 超短期调度成本对比

微电网可控单元	负荷参与	无负荷参与
可控负荷成本	52.5	0
燃气轮机成本	2670.5	2671.6
燃料电池成本	3874.2	4041.8
大电网售购电费用	436.4	436.6
总成本	7033.6	7160.0

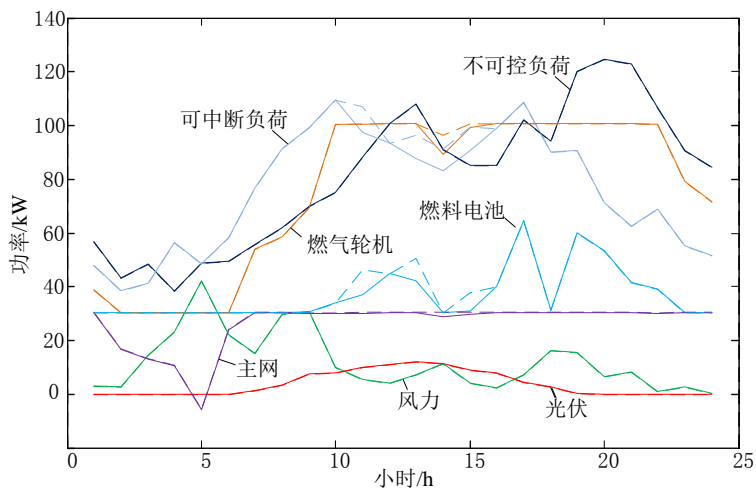


Figure 3. Rolling optimization with load participate in scheduling
图 3. 负荷参与调度的滚动优化

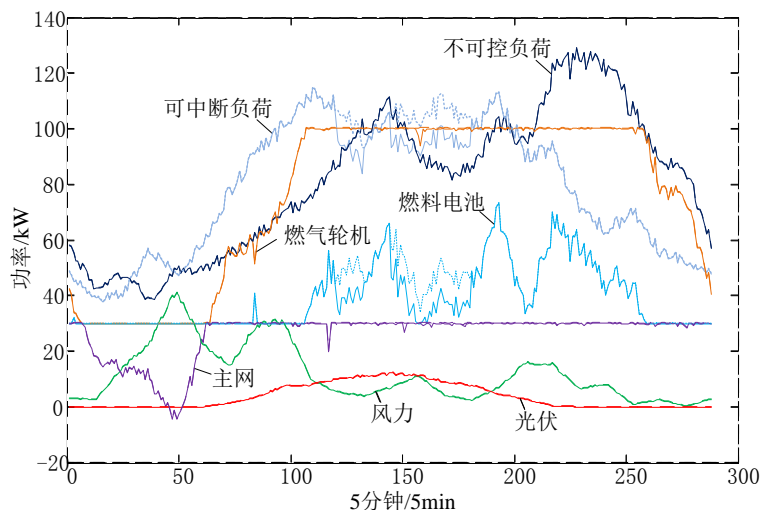


Figure 4. Ultra short scheduling with load participating in scheduling
图 4. 负荷参与调度的超短期调度

6. 结语

相比于常见的经济负荷分配策略，令负荷参与经济优化调度能够进一步提高微电网经济性，体现微电网灵活多样的特点。不同种类负荷在相同电价的情况下可能产生不同效益，因而相对于单纯考虑实时电价的微电网需求侧管理方法，考虑负荷效益的经济优化能够更加适用于不同环境。

本文分析了影响可控负荷成本的多种因素，建立了基于可控负荷协议和停电成本的可控负荷成本模型并制订了微电网可控负荷参与调度的策略，以此建立了考虑负荷参与的多时间尺度微电网调度模型。负荷参与调度有利于降低微电网在峰荷状态下的电源发电压力，通过消除部分可控负荷减少电源发电成本，从而提高微电网的整体效益。通过典型微电网单元的算例进行仿真，证明了模型的有效性和合理性，并得出结论可控负荷参与调度更适合日前计划与滚动优化阶段，在超短期调度尽量避免更新可控负荷的停电量。

本文仅考虑了在并网状态下的优化调度情况，而未考虑在离线运行和独立运行状态下的经济优化方

案。负荷管理在以上两种情况下具有更大的利用价值。同时，除了停电成本模型外，针对于特殊的负荷种类可以建立起更加细化而具体的负荷效益模型，以应用于特殊场合的微电网经济运行优化。今后的研究将围绕于这两点，进一步提高微电网运行的经济性。

参考文献 (References)

- [1] 习朋, 李鹏 (2011) 基于改进粒子群算法的微网经济负荷分配. *电气技术*, **10**, 7-10.
- [2] Chakraborty, S., Weiss, M.D. and Simoes, M.G. (2007) Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **54**, 97-109. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2006.888766>
- [3] 张颖媛 (2011) 微网系统的运行优化与能量管理研究. 硕士论文, 合肥工业大学, 合肥.
- [4] 陈健, 王成山, 赵波, 等 (2012) 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化. *电力系统自动化*, **20**, 25-31.
- [5] 曾鸣, 马少寅, 刘洋, 等 (2012) 基于需求侧响应的区域微电网投资成本效益分析. *水电能源科学*, **7**, 190-193.
- [6] Lau, R., Ayyorgun, S., Mau, S.C., et al. (2011) Strategy and modeling for building DR optimization. 2011 *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Brussels, 17-20 October 2011, 381-386. <http://dx.doi.org/10.1109/SmartGridComm.2011.6102352>
- [7] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等 (2013) 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型. *中国电机工程学报*, **1**, 30-38.
- [8] 王建学, 王锡凡, 张显, 等 (2004) 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理 (一)——可中断负荷成本效益分析. *电力自动化设备*, **5**, 15-19.
- [9] Balducci, P.J., Roop, J.M., Schienbein, L.A., et al. (2002) Electrical power interruption cost estimates for individual industries, sectors and US economy. Pacific Northwest National Laboratory. <http://dx.doi.org/10.2172/926127>
- [10] 陈浩琿 (2007) 引入激励与保障机制的可中断负荷合同研究. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.
- [11] 陈达威, 朱桂萍 (2011) 微电网负荷优化分配. *电力系统自动化*, **20**, 45-49.
- [12] 王建学, 王锡凡, 王秀丽 (2005) 电力市场可中断负荷合同模型研究. *中国电机工程学报*, **9**, 11-16.