

DOI: 10.7652/xjtuxb201306016

考虑需求侧管理的微网经济优化运行

吴雄, 王秀丽, 崔强

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 建立了考虑需求侧管理的微网经济优化模型。将微网的电力负荷分为 3 个部分: 固定负荷、可转移负荷、随机负荷, 其中可转移负荷的管理是需求侧管理的主要内容, 也是微网经济优化运行的重要目标。在分时电价的环境下, 建立了微网中分布式电源与需求侧负荷优化管理的协调运行模型。通过函数线性化将该优化问题转化为一个混合整数规划问题, 采用专业混合整数规划软件求解。仿真结果表明, 考虑需求侧管理的微网经济运行相比不考虑时的总费用减少了 3.83%, 具有较好的经济效益。

关键词: 需求侧管理; 负荷管理; 微网; 经济优化; 混合整数规划

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0090-07

Optimal Operation of Microgrid Considering Demand Side Management

WU Xiong, WANG Xiuli, CUI Qiang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An economic scheduling model for a microgrid is proposed by considering demand side management. Three types of loads, i.e., fixed, transferable, and user-action loads, are considered, and the management of transferable load is especially significant in the demand side management. In the case of time-of-use price, the formula of demand side management is described, and the harmonization scheduling model of the distributed generations with demand management is established. Function linearization facilitates converting the optimization case into a mixed-integer linear programming, and a commercial mixed-integer linear programming software is applied to solve the programming problem. The numerical tests for a microgrid indicate that with demand side management consideration, the total cost reduces by 3.83%.

Keywords: demand side management; load management; microgrid; optimal operation; mixed-integer linear programming

随着整个电力系统向智能电网的演变, 微网作为一种新型的供电模式得到了广泛的关注。微网由分布式电源和负荷组成, 可以并网或脱网运行, 能同时满足本地用户电能与热能的需求^[1]。目前, 国内外对微网的研究主要集中在分布式电源的接入及控制技术方面^[2], 一些国家和地区建立了微网示范工程作为分布式电源以及微网控制的实验平台。与此

同时, 基于微网实验平台的微网能量管理系统也逐渐得到了研究^[3-4]。微网能量管理系统的重要功能是实现微网的经济调度, 即满足系统正常运行条件下优化调度各分布式电源的出力, 尽可能地减少运行费用。微网的经济优化运行是实现微网能量管理的重要的一步, 具有重大的研究意义。

随着电力市场化的发展和完善, 电力系统的利

收稿日期: 2012-12-03。 作者简介: 吴雄(1986—), 男, 博士生; 王秀丽(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA05A103); 中国高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100201110022)。

网络出版时间: 2013-03-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130307.0828.006.html>

益主体将逐步多元化,需求侧资源的管理正在被重新认识^[5]。需求侧管理通过对用户的负荷管理、推行各种经济激励等措施,将需求侧的资源进行综合规划,具有降低能耗、减少发电投资、促进电力可持续发展的重要意义。微网的负荷水平在几十千瓦到几兆瓦,具有很好的参与需求侧管理的潜力^[6]。

目前,国内外已有相关文献对微网的经济运行管理进行了研究。文献[7]设计了包含可控负荷的需求侧竞价的 market 规则,提出了两种市场规则下的微网优化运营策略。文献[8]提出了基于需求响应的微网优化运行模型,但负荷侧模型描述较简单。文献[9-10]对各分布式电源进行了数学建模,建立了微网的经济优化调度模型,具有一定的启发意义,但微网模型较简略。文献[11]研究了包含热电联供系统的微网经济优化运行,但缺乏对蓄电池动态运行特性的研究。文献[12]研究了包含硫钠电池的微网的经济运行,具有实际意义。

以往的文献主要考虑微网分布式电源侧的调度经济性,对微网需求侧负荷的管理鲜有研究。本文建立了微网需求侧可控负荷的管理模型,提出了考虑需求侧管理的微网经济优化运行模型,研究了微网负荷侧的管理和分布式电源的协调运行。本文的微网算例包含微型燃气轮机(MT)、燃料电池(FC)、光伏(PV)、风电(WT)等分布式电源以及储能设备,考虑了各设备的运行费用、启停费用以及微网购电费用,建立了考虑需求侧管理的微网经济优化运行模型。本文模型为一个混合整数、非线性的组合优化问题,采用函数线性化的方法将该优化问题转化为混合整数优化问题,并用相关的规划软件求解,仿真结果验证了模型与方法的有效性。

1 微网的基本结构及需求侧管理

1.1 微网基本结构

本文研究的微网由以下3个部分组成:分布式发电机,储能单元以及微网负荷。微网与外部电网并网运行,基本结构如图1所示。

分布式发电机包括微型燃气轮机、燃料电池、光伏、风力发电机。微型燃气轮机和燃料电池为燃气机组,可以控制机组的出力,属于可控机组。光伏、风电为可再生能源发电机,其出力很大程度上由气象环境所决定,具有随机性与波动性,属于不可控的机组。接入储能设备主要是为了缓冲可再生能源的接入对微网的稳定运行带来的影响^[13]。

对于拥有多于两台分布式机组的微网,需要建

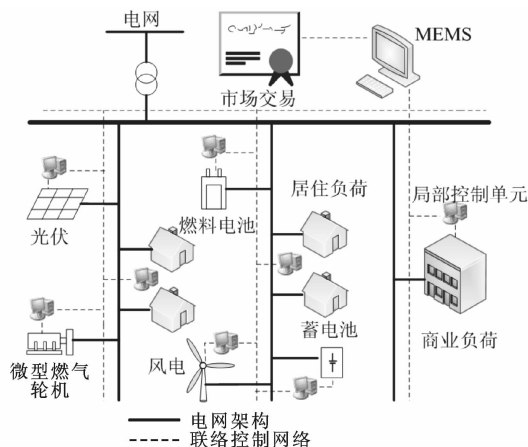


图1 微网的基本结构

立一个集中控制系统^[14],称为微网能量管理系统(MEMS)。MEMS为微网与电网之间的控制界面,其基本传输控制网络如图1所示。它的主要功能是制定微网的优化运行计划,协调局部控制器产生最优的发电生产计划以及负荷管理策略。

1.2 需求侧管理

20世纪80年代,美国电力科学研究院提出了电力需求侧管理(DSM)的理念,改变了过去仅由电力供应方满足不断增长的电力需求的概念,提出了将需求方节约能源和科学合理使用能源作为供应侧一种可替代资源的新概念^[15]。

负荷管理是需求侧管理中的一项重要技术措施,通过调整可控负荷的使用达到需求侧管理的目的。需求侧负荷一般分为3种类型^[16]:固定负荷、可转移负荷、随机负荷,其中固定负荷为用户的最小负荷需求,一般可根据历史数据预测。可转移负荷指可以从某个时段转移到其他时段的负荷,如洗衣机、热水器,但是其使用有时段约束,如白天人的活动期间,合理安排可转移负荷是需求侧管理的关键。随机负荷为用户临时启动的负荷,无法准确预测,本文假设其由系统备用来满足。

本文对需求侧管理的建模主要是基于负荷转移的管理,即在不违背各时段负荷接纳能力的情况下,将负荷从电价峰时段转移到电价谷时段,以减少系统总的运行费用。该模型考虑了负荷类型、负荷数量、转移负荷持续时间等因素。

2 考虑需求侧管理的微网优化模型

考虑需求侧管理的微网经济优化运行的目标是:在满足各分布式电源正常运行以及负荷侧的消纳约束条件下,通过合理安排各可控单元的发电计

划以及负荷调整,使微网的总运行费用最少。对于可再生能源机组,由于其利用光照、风能等自然资源发电,发电成本很小,可以忽略不计。微型燃气轮机与燃料电池的发电成本包括燃料成本、启动成本和维护成本,成本总和为机组发电的非线性函数。由于微网作为一个整体与外部电网并网,当内部电源不足或自行满足内部负荷已不经济时,可以从外部电网购电,这里不考虑微网向外网送电,因此微网运行的总费用中还包括购电费用,此外需求侧的负荷转移需要一定的补偿费用。综上可知,微网优化运行的目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\Delta TC(P_i^{\text{CG}}(t)) + C_{s,i}^{\text{CG}}(t)] + \Delta T \sum_{t=1}^T P_{\text{buy}}(t) C_{\text{grid}}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{TL}}} \rho_i \sum_{t=1}^T \sum_{t'=1}^T D_i^{\text{TL}}(t, t') \quad (1)$$

$$C_{s,i}^{\text{CG}}(t) = \max\{0, U_i(t) - U_i(t-1)\} C_{\text{es},i}^{\text{CG}} \quad (2)$$

式中: T 为运行周期; ΔT 为单位时间间隔; N 为可控机组的数量; $P_i^{\text{CG}}(t)$ 为可控机组 i 在 t 时段的功率,上标 CG 代表可控机组; $C(P_i^{\text{CG}}(t))$ 为可控机组 i 在 t 时段的发电费用; $C_{s,i}^{\text{CG}}(t)$ 为可控机组 i 在 t 时段的启动费用; $U_i(t)$ 为可控机组在 t 时段的启动状态,值为 0 表示停机状态,为 1 表示开机状态; $C_{\text{es},i}^{\text{CG}}$ 为可控机组 i 每次启动的费用; $P_{\text{buy}}(t)$ 为微网在 t 时段的购电量; $C_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时段的购电价格; $D_i^{\text{TL}}(t, t')$ 为从 t 时段转向 t' 时段的第 i 类可转移负荷量; ρ_i 为第 i 类可转移负荷的单位补贴费用; N_{TL} 为可转移负荷的种类。

式(1)需满足系统约束、分布式发电机组约束、储能设备约束、负荷侧约束等约束条件。

(1) 系统约束。系统能量平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i^{\text{CG}}(t) + \sum_{i=1}^M P_i^{\text{RG}}(t) + P_{\text{buy}}(t) + P_{\text{dis}}(t) - P_{\text{ch}}(t) = \tilde{P}_{\text{L}}(t) \quad (3)$$

联络线约束

$$0 \leq P_{\text{buy}}(t) \leq P_{\text{line,max}} \quad (4)$$

式中: M 为可再生能源机组的台数; $P_i^{\text{RG}}(t)$ 为可再生能源机组 i 在 t 时段的功率; $P_{\text{ch}}(t)$ 和 $P_{\text{dis}}(t)$ 分别为蓄电池在 t 时段的充电功率和放电功率; $\tilde{P}_{\text{L}}(t)$ 为 t 时段的负荷值; $P_{\text{line,max}}$ 为微网与外网联络线上允许的最大传输功率。

(2) 分布式发电机组约束。微型燃气轮机^[17]和燃料电池^[18]的运行特征相似,都具有较小的体积和较高的操作灵活性,启停迅速且机组发电可控。它

们的运行主要受爬坡速度、最小技术输出及最大输出容量约束。

发电能力约束

$$P_{i,\min}^{\text{CG}} U_i(t) \leq P_i^{\text{CG}}(t) \leq P_{i,\max}^{\text{CG}} U_i(t) \quad (5)$$

爬坡约束

$$-R_i^{\text{down}} \Delta T \leq P_i^{\text{CG}}(t) - P_i^{\text{CG}}(t-1) \leq R_i^{\text{up}} \Delta T \quad (6)$$

式中: $P_{i,\min}^{\text{CG}}$ 、 $P_{i,\max}^{\text{CG}}$ 分别为可控发电机组 i 的最小和最大功率; R_i^{down} 、 R_i^{up} 分别是可控机组 i 的下爬坡和上爬坡速度。

(3) 储能设备约束。储能设备选用目前广泛应用的铅酸蓄电池。铅酸蓄电池有最大存储容量限制,且为了延长蓄电池的使用寿命,一般不允许其深度放电,即放电到一定程度,要停止放电,让蓄电池留有一定的能量。

储能容量约束

$$E(t) = E(t-1) + \Delta TP_{\text{ch}}(t) \eta_{\text{ch}} - \Delta TP_{\text{dis}}(t) / \eta_{\text{dis}} \quad (7)$$

$$E_c S_{\text{OC},\min} \leq E(t) \leq E_c S_{\text{OC},\max} \quad (8)$$

出力约束

$$0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{c},\max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{d},\max} \quad (10)$$

一个周期始末储能容量相等约束

$$E(0) = E(T) \quad (11)$$

式中: $E(t)$ 为蓄电池 t 时段的总能量; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为蓄电池的充电功率和放电效率; E_c 为蓄电池的满容量; $S_{\text{OC},\min}$ 和 $S_{\text{OC},\max}$ 分别为蓄电池的最小和最大充电状态值,取值范围为 $(0, 1]$; $P_{\text{d},\max}$ 和 $P_{\text{c},\max}$ 分别为蓄电池放电和充电最大值。

(4) 负荷侧约束。负荷侧分为固定负荷、可转移负荷、随机负荷,其中可转移负荷具有可调控特性,对于可转移负荷,有如下一些约束。

转入转出负荷容量约束

$$D_i^{\text{TL}}(t, t') = X_i^{\text{TL}}(t, t') \Delta D_i^{\text{TL}} \quad (12)$$

$$\sum_{t=\max(t_0-L_i+1, 1)}^{t_0} \sum_{t'=1}^T D_i^{\text{TL}}(t', t) \leq D_{i,\max}^{\text{I}}(t_0) \quad (13)$$

$$\sum_{t=\max(t_0-L_i+1, 1)}^{t_0} \sum_{t'=1}^T D_i^{\text{TL}}(t, t') \leq D_{i,\max}^{\text{O}}(t_0) = P_i^{\text{TL}}(t_0) \quad (14)$$

可转移负荷时间区间约束

$$\left. \begin{aligned} D_i^{\text{TL}}(t, t') &= 0, & t' &\in S_{i,1} \\ D_i^{\text{TL}}(t, t') &\geq 0, & t' &\in S_{i,2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

可转移负荷修正及容量约束

$$P_i^{\text{TL}'}(t_0) = P_i^{\text{TL}}(t_0) + \sum_{t=\max(t_0-L_i+1,1)}^{t_0} \sum_{t'=1}^T (D_i^{\text{TL}}(t',t) - D_i^{\text{TL}}(t,t')) \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{TL}}} P_i^{\text{TL}'}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{TL}}(t) \quad (17)$$

可转移负荷平衡约束

$$\sum_{t=1}^T P_i^{\text{TL}'}(t) = \sum_{t=1}^T P_i^{\text{TL}}(t) \quad (18)$$

总负荷平衡约束

$$\tilde{P}_{\text{L}}(t) = \sum_i P_i^{\text{TL}'}(t) + P^{\text{FL}}(t) + P^{\text{RL}}(t) \quad (19)$$

式中:上标 TL 代表可转移负荷;FL 代表固定负荷;RL 代表随机负荷; $X_i^{\text{TL}}(t,t')$ 为从时段 t 转移到 t' 的第 i 类可转移负荷的单元数量; ΔD_i^{TL} 为第 i 类可转移负荷的基本单元量; L_i 为第 i 类可转移负荷的持续时间; $D_{i,\text{max}}^{\text{I}}(t)$ 、 $D_{i,\text{max}}^{\text{O}}(t)$ 分别为 t 时段第 i 类负荷的最大接纳量和输出量; $S_{i,1}$ 、 $S_{i,2}$ 分别为不允许和允许接纳第 i 类负荷的时间集合; $P_i^{\text{TL}}(t)$ 、 $P_i^{\text{TL}'}(t)$ 分别为转移前和转移后 t 时段第 i 类负荷量; $P^{\text{FL}}(t)$ 、 $P^{\text{RL}}(t)$ 分别为 t 时段的固定负荷和随机负荷。

式(12)表示负荷的总量为负荷单元数与单元量的乘积。式(13)表示从其他时段转入 t_0 时段的总负荷不超过该时段允许接纳的负荷,其左边第一个求合公式表示 t_0 以前不超过时长 L_i 的转移负荷对 t_0 时段的负荷的贡献,应予以计及。同理,式(14)表示从 t_0 时段转出的总负荷不超过该时段允许转移的负荷。式(15)表示在哪些时段才能接纳部分转移负荷。式(16)表示转移后的负荷为转移前的负荷加上转移的负荷。式(17)表示总的负荷转移量必须在一定的幅值内。式(19)指系统最终负荷应该包括固定负荷、转移负荷和随机负荷量。

3 模型的求解

本文优化问题为混合整数非线性问题。对模型中的非线性因素进行线性化处理,将问题转化为混合整数线性规划问题,然后采用成熟的混合整数规划软件求解。

燃料机组的发电费用一般为出力的连续光滑非线性函数,可以将其分成 N 段来线性逼近,每一段引入一个状态变量 $B_i(t)$ 和一个连续变量 $P_i(t)$ 。图 2 为发电费用曲线分段线性化示意图。

发电费用的线性化函数表达式如下

$$\tilde{f}(t) = \sum_{i=1}^N [\alpha_i P_i(t) + \beta_i B_i(t)] \quad (20)$$

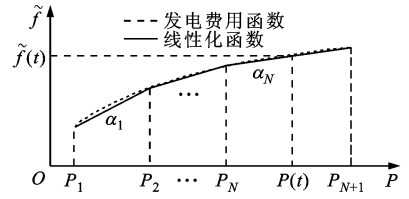


图 2 发电费用曲线分段线性化示意图

其中

$$\alpha_i = \frac{f(P_{i+1}) - f(P_i)}{P_{i+1} - P_i} \quad (21)$$

$$\beta_i = f(P_i) - P_i \alpha_i \quad (22)$$

$$P_i B_i(t) \leq P_i(t) \leq P_{i+1} B_i(t) \quad (23)$$

$$B_s(t) = \sum_{i=1}^N B_i(t) \leq 1 \quad (24)$$

式中: $f(t)$ 、 $\tilde{f}(t)$ 分别为发电费用函数和其线性化函数; α_i 为第 i 段分段线的斜率; β_i 为第 i 段分段线的等效截距; P_i 为第 i 个分段点,其中 P_1 对应发电机的最小出力, P_{N+1} 对应发电机的最大出力; $P_i(t)$ 为 t 时段第 i 段的出力; $B_i(t)$ 为 t 时段第 i 段的状态; $B_s(t)$ 为 t 时段发电机的运行状态。

线性化后本文模型为混合整数线性规划问题,可以采用成熟的优化软件 IBM ILOG CPLEX 来进行求解。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文选取中国北方某地区微网设计案例,其网架结构如图 1 所示,其中包括光伏、风电、微型燃气轮机、燃料电池、蓄电池等各类型微源各一台,所研究的时间周期为 1 d,单位时间间隔为 1 h。算例的数据^[19]包括冬季典型日电负荷的预测出力、风机与光伏预测出力,如图 3 所示,并假设预测误差由系统备用所吸收。

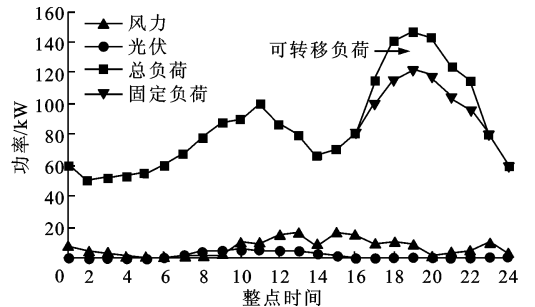


图 3 冬季典型日光伏、风电功率以及电负荷的预测

微网负荷侧实行分时电价政策,峰时段(11:00~15:00 和 19:00~21:00)电价为 0.83 元/kW·h,

平时段(08:00~10:00,16:00~18:00 和 22:00~23:00)为 0.49 元/kW·h,谷时段(24:00~07:00)为 0.17 元/kW·h。

假设微网分布式电源与负荷侧利益一致,即补偿费用 ρ_i 为 0,负荷只有在人活动期间(8:00~22:00)才能调控。有两类可转移负荷,单位负荷持续时间分别为 1 h 和 2 h,可转移负荷的量如图 3 所示,各时段负荷的最大转入量设定为 25 kW。

微网系统的相关参数如表 1 所示。令微型燃气轮机和燃料电池的初始状态均为停运状态,微型燃气轮机和燃料电池的一次启动费用分别为 1.94 元和 2.72 元。微型燃气轮机与燃料电池的发电费用曲线如图 4 所示。

蓄电池额定功率为 20 kW,容量为 100 kW·h,最小容量取为额定容量的 20%,初始容量取为最小容量值, η_{ch} 和 η_{dis} 均取 0.9。

表 1 微网系统的运行参数

序号	类型	$P_{\min}$ /kW	$P_{\max}$ /kW	R_{down} /kW·min ⁻¹	R_{up} /kW·min ⁻¹
1	MT	5	65	5	10
2	FC	5	40	2	2
3	WT	0	20		
4	PV	0	10		
5	电网	0	70		

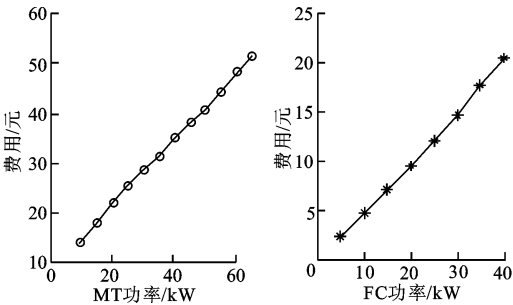


图 4 MT 与 FC 的发电费用曲线

4.2 结果分析

令各燃料机组的成本函数均分为 5 段,经测试分段数大于等于 5 段后其计算误差几乎为 0。采用 CPLEX 软件进行编程计算,测试平台为一台主频 2.20×10^9 Hz 双核 CPU、2 GB 内存的 PC 机,计算结果绘制如图 5 所示。

从图 5 可以看出,MT 于 19 时启动后,一直到 21 时以接近额定功率运行,而其余时段处于停运状态。这是因为电价峰时段 19:00~21:00 时,MT 按

额定功率运行的发电成本比电价低,MT 启动发电满足部分负荷需求,而在其他时段其发电成本较高,故停运。FC 的发电成本比电网峰时段和平时段的价格低,比谷时段高,故在初始谷时段 7 h 内停运,从 8 时启动后一直以近额定功率连续运行 16 h,于谷时段 24 时停运。蓄电池在整个运行周期中在电压峰时段放电,在谷时段充电,充分利用峰谷电价差减少系统运行的费用,在其他时段则不出力,以减少充放电的损耗。

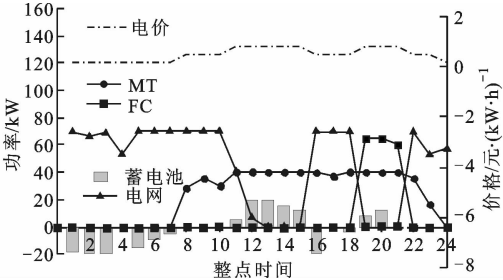


图 5 可控电源的调度出力

微网负荷的管理结果如表 2 所示,从表中可以看出,大部分可控负荷从峰时段的 17:00~21:00 转入到谷时段 8:00~10:00,且总转移量不超过设定的 25 kW,为微网的 MEMS 提供了具体的转移指令。最终的负荷优化结果如图 6 所示,从图中可以看出,可转移负荷从电价高的时段转入电价较低的时段,实现了微网侧负荷管理的经济性,同时高峰时段的负荷也得到了很好的削减。

表 2 可控负荷的转移情况

转出时刻	转入时刻	负荷类型	转移量/kW	持续时长/h
17	9	1	10	2
18	16	2	15	1
19	8	2	5	1
19	9	2	5	1
19	10	2	5	1
19	16	1	10	2
20	8	2	10	1
20	22	2	5	1
21	8	2	5	1
21	9	1	10	2
21	22	2	5	1
22	8	2	5	1

为了说明微网分布式电源和需求侧负荷联合优化带来的经济效益,本文计算了 3 种情况下的总运行费用。情况 1 为负荷侧不可调节,总费用为 879.20

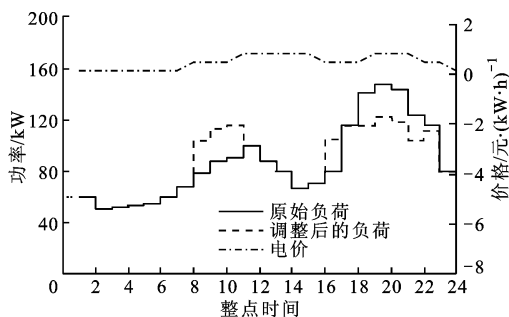


图6 优化后的负荷变化情况

元。情况2为微网分布式电源和负荷侧分别独立管理,总费用为860.38元,其负荷侧的优化管理减少了总的电费,相比情况1的总费用减少了2.14%。情况3为微网分布式电源和负荷联合管理,其运行费用最少为845.50元,相对于负荷侧不可调节的情况的总费用减少了3.83%。以上分析表明,当负荷侧经过优化管理后,其系统费用有所降低,当微网分布式电源与负荷侧管理协调运行时,其经济效益更显著。

5 结论

(1)本文研究了考虑需求侧管理的微网经济优化运行,在分时电价的环境下,建立了微网中分布式电源与需求侧负荷优化管理的协调运行模型。

(2)通过将优化问题线性化处理,采用线性规划软件CPLEX求解,仿真结果验证了模型和算法的准确性。当微网负荷侧参与需求侧管理时使得系统的总费用降低了3.83%,且减少了高峰时段的负荷,具有较好的经济和社会效益。

(3)由于需要掌握负荷的用电需求等特点,本文提出的模型更适合于学校、企业等具有集中管理和控制的微网系统,使得微网分布式电源和负荷侧均能得到优化。

(4)今后的研究可以考虑可中断负荷对微网运行的影响,进一步建立含多种需求侧管理的微网经济运行模型。

参考文献:

- [1] GUERRERO J M. Microgrids: integration of distributed energy resources into the smart-grid [C]// 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 4281-4414.
- [2] 黄宇淇,方宾义,孙锦枫. 飞轮储能系统应用于微网的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 83-87.

HUANG Yuqi, FANG Binyi, SUN Jinfeng. Simulation research on the microgrid with flywheel energy storage system [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 83-87.

- [3] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [4] HRISTIYAN K, LU Di, COLAS F, et al. Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4583-4592.
- [5] 董军,张婧,陈小良,等. 考虑需求侧响应的短期阻塞管理模型与激励机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 24-28.
- DONG Jun, ZHANG Jing, CHEN Xiaoliang, et al. Study on short-run congestion management model and incentive mechanism considering demand response [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 24-28.
- [6] 向月,刘俊勇,魏震波,等. 可再生能源接入下新型可中断负荷发展研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 148-155.
- XIANG Yue, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Research on development of new interruptible load with renewable energy access [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 148-155.
- [7] TSICALAKIS A G, HATZIARGYRION N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [8] PALMA-BEHNKE R, BENAVIDES C, ARANDA E, et al. Energy management system for a renewable energy based microgrid with a demand side management mechanism [C]// IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [9] 艾欣,崔明勇,雷之力. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济优化运行分析[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(5): 1-6.
- AI Xin, CUI Mingyong, LEI Zhili. Environmental and economic dispatch of microgrid using chaotic ant swarm algorithms [J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(5): 1-6.
- [10] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 78-82.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al.

- Steady model and operation optimization for microgrids under centralized control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 78-82.
- [11] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid connected microgrid [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.
- [12] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [13] 陈伟, 石晶, 任丽, 等. 微网中的多元复合储能技术 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112-115.
CHEN Wei, SHI Jing, REN Li, et al. Composite usage of multi-type energy storage technologies in microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 112-115.
- [14] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [15] 胡江溢, 王鹤, 周昭茂. 电力需求侧管理的国际经验及对我国的启示 [J]. 电网技术, 2007, 31(18): 10-14.
HU Jiangyi, WANG He, ZHOU Zhaomao. International experience of power demand side management and enlightenment to China [J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 10-14.
- [16] CHOI S J, PARK S J, KANG D J, et al. A microgrid energy management system for inducing optimal demand response [C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 19-24.
- [17] CAMPANARI S, MACCHI E. Technical and tariff scenarios effect on microturbine trigenerative applications [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(3): 581-589.
- [18] PANDIAN M S, ANWARI M, HUSODO B Y, et al. Efficiency and economics analysis of proton exchange membrane fuel cell [C] // 2010 Conference Proceedings in IPEC. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 875-880.
- [19] 李乐. 微网的经济运行研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 89 页)

- [10] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于模量电容参数识别的永久性故障判别方法 [J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1021-1027.
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Permanent faults identification method for three-phase autoreclosing based on capacitance parameter [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1021-1027.
- [11] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵. 基于电流差动的双端带并联电抗器输电线路三相重合闸永久性故障判别 [J]. 电网技术, 2011, 35(6): 183-187.
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing. Differential current-based identification of permanent faults for three-phase autoreclosure on transmission line with shunt reactors at both ends [J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 183-187.
- [12] 黄少锋, 王兴国, 刘千宽. 一种基于固有频率的长距离输电线路保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 59-63.
HUANG Shaofeng, WANG Xingguo, LIU Qiankuan. Natural frequency based protection scheme for long distance transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 59-63.
- [13] 黄少锋, 王兴国. 一种基于固有频率的超高压线路相间保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 58-62, 103.
HUANG Shaofeng, WANG Xingguo. Phase-to-phase protection scheme of EHV transmission lines based on nature frequencies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 58-62, 103.

(编辑 杜秀杰)