

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.020

多能互补微电网的能量管理研究

马喜平¹, 谢永涛², 董开松¹, 贾 嵘²

(1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050; 2. 西安理工大学, 西安 710048)

摘要: 微电网系统以其高效性、灵活性的运行优势在电力系统中不断得到重视。为使微电网系统能够稳定、可靠、经济地运行,文中以多种分布式能源为对象,建立了一个以综合成本最小为优化目标、满足多约束条件的微电网能量管理模型。以实际微电网系统为背景,讨论分析多能互补微电网在不同季节典型日条件下的运行经济性,并结合实际情况,给出一个典型微电网的经济运行方案。结果表明,文中所建立的模型具有很好的适用性,能够为微电网实际运行提供一定的理论指导。

关键词: 分布式电源; 微电网; 能量管理; 优化调度

Research on Energy Management of Multi-energy Complementary Microgrid

MA Xiping¹, XIE Yongtao², DONG Kaisong¹, JIA Rong²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China;
2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Microgrid system is increasingly recognized in power system with the operational advantage of efficiency and flexibility. In order to make the microgrid stable reliable and economical, this paper established an energy management model of microgrid with the minimum cost as the optimization goal and following multiple constraints for a variety of distributed generation. First, taking into account of actual microgrid, this paper analyzes the operational economics of microgrid running on typical day in different season conditions. Last, this paper put forward a typical economical operation solutions of microgrid combined with actual situation. The results show that the model established in this paper is of good applicability and provides some theoretical guidance for the actual operation of the microgrid.

Key words: distributed power supply; microgrid; energy management; optimized dispatching

0 引言

随着能源危机、环境约束以及用户对供电可靠性要求的提高,微网越来越受到人们的关注,微电网能量管理技术是微电网研究的关键技术之一^[1-3]。能量管理系统(EMS)的主要任务为:在满足本地负荷需求与电能质量的基础上,对网内各分布式电源、储能设备以及不同类型的负荷进行统一、合理的调度管理,并结合相应的环保、可靠性指标,优化供用电计划,确保微电网的安全性、稳定性和可靠性,实现微电网能够高效、经济地运行^[4-7]。

目前,国内外已有不少专家学者对微电网能量

管理方面的问题进行了研究。文[8]中设计了一种能量平衡算法优化蓄电池的充放电管理,初步建立了微网能量管理模型,但模型仅考虑了储能单元与发电单元,忽略了系统中其他单元;文[9]中提出了一种基于中央控制器分层控制的微网能量管理策略,并给出了微网运行的市场政策;文[10]中提出了一种基于多种微源的单相交流微网的能量管理策略,并采用线性编程优化了系统运行成本和蓄电池寿命;文[11-13]中以传统电力系统优化调度为基础,引入“能源环境效益”的概念,提出含风电场的多目标优化调度模型;文[14]中建立了将运行维护成本最低与环境污染最小的微网多目标优化模型,分析了不同权重系数对优化结果的影响,但文中未考虑新能源出力的不确定性。随着微网研究的深入发展

收稿日期:2014-12-09; 修回日期:2015-01-14

基金项目:国家电网科技项目(5227221350BR)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5227221350BR).

与逐步成熟,为了充分发挥分布式能源(DER)系统的效益,微网能量管理问题已成为国内外微网研究领域的一个热点。

文中以一个包含多种 DER 单元的微网为对象,综合考虑风电和光伏出力波动性及负荷预测误差等不确定性因素,在满足多种约束条件的基础上,建立以综合成本最小为优化目标的微电网系统能量管理模型。以实际微电网系统为背景,讨论分析多能互补微电网在不同季节典型日条件下的运行经济性,并结合实际情况,给出一个典型微电网的经济运行方案。结果表明,文中所建立的模型具有很好的适用性,能够为微电网实际运行提供一定的理论指导。

1 DER 单元模型

分布式能源(DER)包括具有不同特性的分布式电源单元和分布式储能单元;对单元级 DER 进行建模分析与研究,是对微网进行有效能量管理和运行控制的基础。文中所包含的 DER 单元分别为光伏(PV)、风机(WT)、柴油发电机(DE)、燃料电池(FC)以及蓄电池(BAT)。

1.1 光伏发电单元

由于光伏发电单元的出力受太阳辐射强度、环境温度影响^[14],故光伏发电单元的功率输出一般以标准测试条件(STC)下的系统出力为标准进行修正,其稳定功率输出可表示^[15]为

$$P_{PV}=P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1+k(T_c-T_r)]。 \quad (1)$$

式(1)中: P_{PV} 为光伏发电单元的实际输出功率, kW; P_{STC} 为光伏发电单元在 STC 下的最大输出功率, kW; G_{ING} 为实际的太阳辐照强度, W/m²; G_{STC} 为 STC 下的辐照强度, $G_{STC}=1\ 000\text{ W/m}^2$; k 为功率温度系数, %/°C; T_c 为电池板的实际工作温度, °C; T_r 为参考温度(标准测试温度), $T_r=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 风力发电单元

不同的风力发电机会有不同的功率输出特性曲线,文中采用文[16]中的功率输出模型来计算风电机的功率输出:

$$P_{WT}=\begin{cases} 0 & \nu < \nu_{c_i}, \nu \geq \nu_{co} \\ \frac{\nu^3 - \nu_{c_i}^3}{\nu_r^3 - \nu_{cr}^3} P_r & \nu_{c_i} \leq \nu \leq \nu_{r_o} \\ 0 & \nu_r < \nu < \nu_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: P_{WT} 为风力发电机的输出功率; P_r 为风力发电机的额定功率; ν 为风力发电机组的实际风速; ν_{c_i} , ν_{co} , ν_r 分别为风力发电机的切入风速、切出风速

和额定风速。

1.3 柴油发电机

柴油发电机运行时的燃料消耗成本主要与其有功功率输出相关,即柴油发电机单元的能耗—功率输出特性为

$$C_{DE}[(P_i)t]=ap_i^2(t)+bp_i(t)+c_{i_o}。 \quad (3)$$

式(3)中: $C_{DE}[(P_i)t]$ 为系统柴油发电机的能耗成本,元; $P_i(t)$ 为柴油发电机在 t 时段内的净输出功率, kW; a_i , b_i , c_i 分别为柴油发电机的燃料费用系数,元/(kW·h)。

1.4 燃料电池

在燃料电池发电系统正常稳态运行过程中,其有功功率输出与燃料输入量成比例,燃料电池的燃料消耗成本计算公式为

$$C_{FC}(t)=C_{fuel} \sum_{i=1}^n \frac{P_i(t)}{\eta_i(t)}。 \quad (4)$$

式(4)中: $C_{FC}(t)$ 为燃料电池的能耗成本,元; C_{fuel} 为气体燃料价格,元/m³; $P_i(t)$ 为燃料电池在 t 时段内的净输出功率, kW; $\eta_i(t)$ 为燃料电池的燃料利用率,即输出电能与输入燃料的比值, kW·h/m³。

1.5 储能蓄电池

微网中可再生能源发电所占比例较大,为平衡其随机波动,改善电能质量,维护系统稳定,一般会配备一定量的 DS 单元。铅酸蓄电池以其低廉的价格被广泛作为微电网的储能单元,荷电状态 SOC 是铅酸蓄电池管理的一个重要参数,其表达式为

$$S_{OC}(t)=S_{OC}(t-1)(1-\sigma_{sdr})+I_{BAT}(t)\Delta t\eta_{bce}/C_{BAT}。 \quad (5)$$

式(5)中: $S_{OC}(t)$ 为储能蓄电池 t 时段内的荷电状态,即剩余容量; $I_{BAT}(t)$ 为储能蓄电池 t 时段内充放电电流,充电时为正,放电时为负; σ_{sdr} 为储能蓄电池自放电率; Δt 为充放电时间; η_{bce} 为充放电效率。

2 微网能量管理模型

微网能量管理模型(MEMM)作为微网优化控制的中枢,其首要任务为:在给定的周期内,综合考虑分布式电源发电量预测、储能单元剩余容量预测、该地区负荷需求以及电网电价市场信息,按照不同的优化运行目标和约束条件做出决策,实时制定微网运行的能量管理策略,合理安排分布式电源和储能单元的启停与出力,通过对分布式电源、储能设备和负荷的灵活性来实现微网系统的优化运行,从而最终实现微网系统的经济性^[17]。

2.1 目标函数

1) 目标 1:微网系统运行成本最低。考虑 DER 的能耗成本、运行维护成本、以及微网与主网之间的能

量交互成本3个因素,从而有:

$$\min C_1(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_i(t)p_i(t)F_i(t) + S_i(t)K_{OMi}|p_i(t)| + S_i(t)C_{MP}(t)] + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l T_{ij}S_i(t)[1 - S_i(t-1) + \sum_{i=1}^m C_{GRID}(t)] \quad (6)$$

式(6)中:

$$C_{GRID} = C_P(t)C_{GP}(t) - C_S(t)C_{SP}(t); \quad (7)$$

$$C_{MP}(t) = C_K \gamma p_i(t) \quad (8)$$

式(6)~(8)中: t 为系统运行时段; $C(t)$ 为 t 时段内运行总成本; i 为DER单元的编号; m 为一个周期包含的时段数,文中 $m=24$; n 为DER单元的总数; $S_i(t)$ 为第 i 个DER单元在 t 时段内的工作状态,0为停机,1为运行; $p_i(t)$ 、 $F_i(t)$ 、 K_{OMi} 为微网系统中第 i 个DER单元在 t 时段内的有功功率输出、燃料消耗成本、运行管理系数; $C_{GRID}(t)$ 为微网与主网间的交互成本; $C_P(t)$ 、 $C_{GP}(t)$ 、 $C_S(t)$ 、 $C_{SP}(t)$ 为 t 时段内微网系统向主网系统的购电电价、购电量、售电量、售电电价,当 $C_{GP}(t)=C_{SP}(t)=0$, t 对于各时段都成立时,可认为此时系统处于独立运行状态; $C_{MP}(t)$ 为第 i 个DER单元在 t 时段内所排放的污染物的费用; k 为所排放的污染物类型(CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等); C_K 为处理每kg污染物的费用,分别为0.210、14.842、62.964元; γ_i 为不同电能生产方式在输出 $p_i(t)$ 电能时所排放的污染物,文中只考虑柴油发电机和燃料电池。

2)目标2:储能装置投资成本最低。考虑将储能装置的投资成本折算到每一次充放电中,表示为充放电功率的函数。充放电功率越小,储能的使用寿命就越长,对投资成本的消耗就越小;反之,储能的使用寿命越短,对投资成本的消耗就越大。

$$\begin{cases} \min C_2(t) = \frac{1}{P_{sn} T_a} C_{cap} C_c(r, n) \sum_{i=1}^{24} P_s(t) \\ C_c(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: $C_c(r, n)$ 为资本回收系数, r 为折旧率; n 为储能装置使用寿命; T_a 为储能装置年运行小时数; P_{sn} 为储能装置额定输出功率; C_{cap} 为储能装置总投资成本费用; $P_s(t)$ 为 t 时段储能装置实际功率。

3)目标3:微网系统综合效益最高,即综合考虑微网系统的能耗成本和储能装置的投资成本,即:

$$\min C(t) = \min [C_1(t) + C_2(t)] \quad (10)$$

2.2 约束条件

1)功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^n S_i P_i(t) + P_{GRID} = P_L(t) - P_{PV}(t) - P_{WT}(t) \quad (11)$$

式(11)中: S_i 为第 i 个可调度型DER单元的工

作状态,0表示停机,1表示运行; $P_i(t)$ 为第 i 个可调度型DER单元在 t 时段内的有功功率输出; P_{GRID} 为微网系统与主网系统间的交互功率,其中,当微网向主网输出功率时, $P_{GRID} \geq 0$;当微网从主网吸收功率时, $P_{GRID} < 0$; $P_L(t)$ 为 t 时段内总负荷需求; $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 分别为 t 时段内光伏、风力发电单元的有功功率输出,此处不考虑网损。

2)DER单元输出功率约束

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (12)$$

式(12)中: $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为第 i 个DER单元的功率输出下限、输出上限。

3)储能单元存储容量约束

$$0 \leq P_s(t) \leq P_{BAT}^{\max}; \quad (13)$$

$$S_{OC_{min}} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC_{max}} \quad (14)$$

式(13)、(14)中: $P_s(t)$ 为储能蓄电池的充放电功率,充电时为正,放电时为负; $P_{BAT}^{\max}$ 为储能蓄电池的最大充放电功率; $S_{OC}(t)$ 为储能单元 t 时段内的荷电状态。

4)微网与主网间允许交互的最大容量约束,即它们之间所达成的供求协议或者联络线的物理传输容量限值:

$$P_{GRID}^{\min} \leq P_{GRID}(t) \leq P_{GRID}^{\max} \quad (15)$$

式(15)中: $P_{GRID}^{\max}$ 、 $P_{GRID}^{\min}$ 分别为微网与主网系统间允许交互的容量上限与下限。

5)旋转备用约束

由于微电网运行过程中存在很多不确定性因素,为了保证微电网可靠、稳定运行,在系统设计规划时需要设置一定的旋转备用。给定置信水平 β ,可将旋转备用约束以概率形式描述:

$$P_{GRID}^{\max} + P_{DE}^{\max} + P_{FC}^{\max} + P_{BAT}^{\max} + P_{PV} + P_{WT} - P_L^{\max} \geq \beta \quad (16)$$

式(16)中: $P_{GRID}^{\max}$ 为微网系统与主网系统间能够允许交互的最大功率; $P_{DE}^{\max}$ 、 $P_{FC}^{\max}$ 、 $P_{BAT}^{\max}$ 、 P_{PV} 、 P_{WT} 分别为柴油发电机组、燃料电池、储能蓄电池以及光伏、风力发电单元的最大输出功率; $P_L^{\max}$ 为微网系统最大负荷需求; β 为给定的置信水平。

3 算例分析

3.1 算例参数

文中以1天24个时段为调度周期,对于一个实际微网系统进行日前调度决策,其包含的分布式电源有:光伏发电、风力发电、燃料电池发电、柴油发电机和储能单元,此外,微网与配电网间联络线的物理传输容量上限为60kW,系统中各DER单元的相关参数见表1。储能单元为蓄电池(BS),荷电状态上下限分别为100%和20%。

表 1 微网系统中各 DER 单元的参数

Table 1 The parameters of microgrid DER units

DER 类型	PV	WT	FC	DE	BS
功率下限/kW	0	0	0	0	-30
功率上限/kW	6	12	30	30	30
寿命/a	20	10	10	10	5
安装成本 $F/(\text{万元} \cdot \text{kW}^{-1})$	6.650	2.375	4.275	1.600	—

3.2 仿真结果分析

3.2.1 春秋季节的优化分析

算例参数基础数据。图 1 为春秋季节不可调度机组出力预测及电负荷预测。由图 1 可知:由于春秋季节温度较适宜,不需要集中供冷或供暖,主要的负荷来源为照明用电和其他生活用电;由图 1 还可看出,1~6 时段,负荷处于谷段,而在 21 时时负荷达到峰值;图 1 中风电/光电的输出功率呈现着很大随机性与波动性。

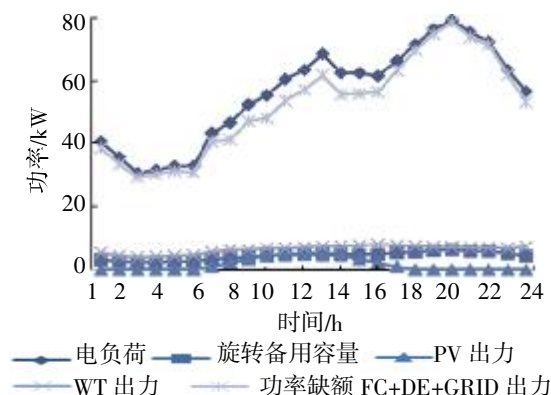


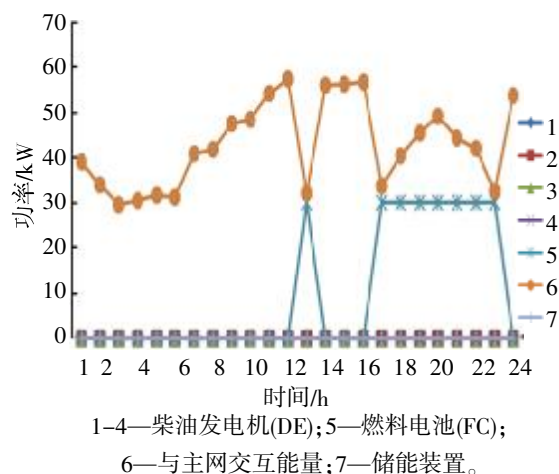
图 1 春秋季节不可调度机组出力预测及电负荷预测

Fig. 1 Not scheduling unit output prediction and electric load forecasting in spring or autumn

春秋季节并网运行下优化结果见图 2。由 2 图可知:0~11 时处于电价的谷时段,FC 和 DE 的发电成本高于购电电价,而此时风力发电和光伏发电的总输出功率较小,所以此时从主网购电来满足功率差额。12~14、17~23 时处于电价的峰时段,此时 FC 发电机组在出力范围内的发电成本低于购电价格,可满发,剩余功率差额由主网提供。其中,BAT 为周期性的充放电,基本不参与调节,充放电周期为 6 h。

春秋季节孤网运行下优化结果。春秋季节时 DER 单元不用考虑采用 DE 提供冷、热负荷,只需满足电负荷的供应需求即可。通过各 DER 单元的出力情况,对孤岛运行下春秋季节典型日一天 24 个小时的目标函数进行优化求解,得出各时刻的系统优化结果见图 3。

由图 3 可知,春秋季节处于孤岛运行时,优先采用风力、光伏发电。当 BAT 放电时,优先使用 BAT 装置。0~6 时,WT 和 PV 出力较低,DE 比 FC 发电成本低,FC 与 BT 需放电满足负荷;7~8 时,负荷增加,WT、PV、FC 出力增大,DE 逐渐发电;9~10 时进入用

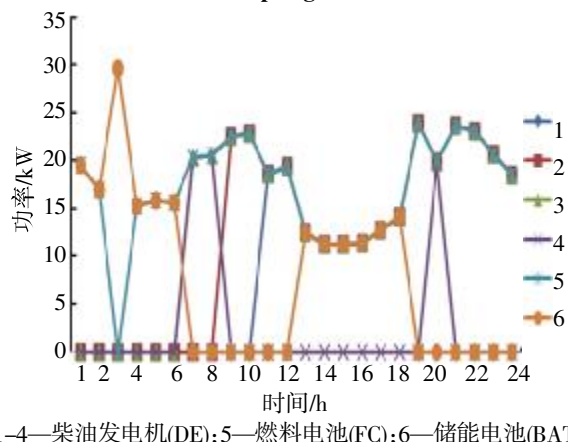


1-4—柴油发电机(DE);5—燃料电池(FC);

6—与主网交互能量;7—储能装置。

图 2 春秋季节并网运行下微网功率优化结果

Fig. 2 Interconnection microgrid of power optimization results in spring or autumn



1-4—柴油发电机(DE);5—燃料电池(FC);6—储能电池(BAT)。

图 3 春秋季节孤网运行时微网功率优化结果

Fig. 3 Isolated microgrid of power optimization results in spring or autumn

电高峰,2 号 DE 和 FC 参与调节,BAT 充完电后开始放电以供应负荷;11~24 时,DE 和 FC 继续发电;15~17 时,负荷较小,FC 出力减小;17~20 时,负荷增加,BAT 持续放电,1~3 号 DE 出力,必要时所有 DE 出力,FC 逐渐满发;20~24 时负荷下降,机组出力下降,BAT 进入充电状态。

3.2.2 夏季的优化分析

夏季算例参数。夏季不可调度机组出力预测及电负荷预测见图 4。

由图 4 可知,夏季需集中供冷,空调等高功率电器占了电负荷的较大部分,12~15 时与 20~22 时为用电高峰。夏季日照时间长、强度大,风力发电功率曲线较平缓,而光伏发电功率输出较大。DE 和 FC 的输出功率在满足系统冷负荷需求的前提下,当出力大于所需电负荷时,剩余电量可出售给主网;当满足不了电负荷需求时,可调整其他发电单元,或从主网购电以供应电负荷差额。

夏季并网运行下优化结果见图 5。

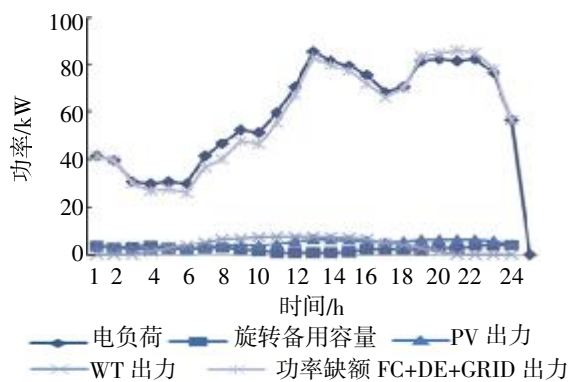


图4 夏季不可调度机组出力预测及电负荷预测

Fig. 4 Not scheduling unit output prediction and electric load forecasting in summer

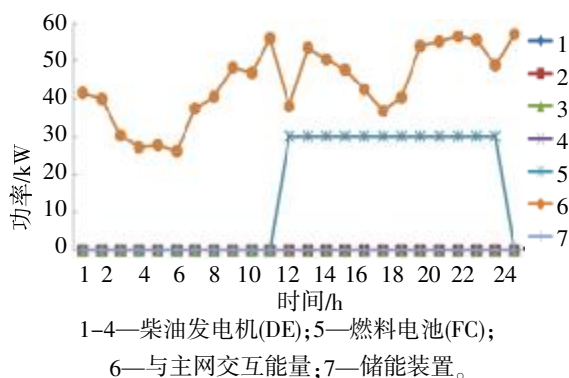


图5 夏季并网运行下微网功率优化结果

Fig. 5 Interconnection microgrid of power optimization results in summer

由图5可知,0~5时为电价谷时段,FC和DE的发电成本均高于购电价格,当WT、PV满发时,优先选择由主网满足负荷需求,且BAT完成充放电时;8~11时为电价平时段,FC的发电成本在一定的出力范围内低于售电、购电价格,而DE在满足冷负荷需求后输出功率的发电成本高于购电价格,故其出力为0;12~23时为电价峰时段,FC的发电成本低于购电、售电价格,FC满发,DE的发电成本满足冷负荷需求后输出功率的发电成本高于购电电价,故峰时段时,FC与主网满足负荷,DE仍不发电;24时为电价平时段,FC继续发电,DE按满足冷负荷需求发电,负荷有缺额则向主网购电。BAT不参与调节。

夏季孤网运行下优化结果见图6。

由图6可知,夏季处孤岛运行时,优先使用风力、光伏发电。0~3时,WT、PV总出力较低,由FC发电和储能供给;4~7时,负荷降低,由储能供给;7~12时,储能元件进入充电状态,7点随负荷需求增加,FC发电,DE按照3214顺序最优分配出力;13~18时为用电高峰,BAT充电完成,调解后进入放电阶段。19~24时负荷降低,BAT放电完全,进入下个充电周期。

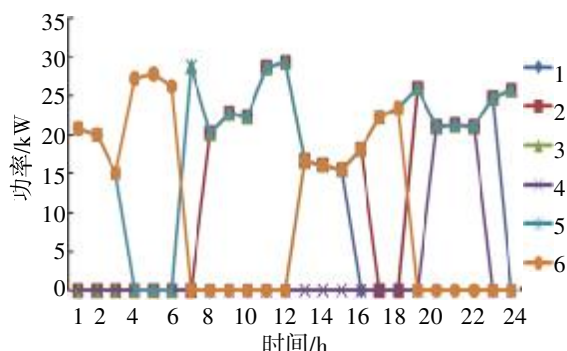


图6 夏季孤网运行下优化结果

Fig. 6 Isolated microgrid of power optimization results in summer

3.2.3 冬季的优化分析

冬季算例参数。冬季不可调度机组出力预测及电负荷预测见图7。由于冬季气温较低,除了要满足电负荷的需求,还需兼顾热负荷的供应。

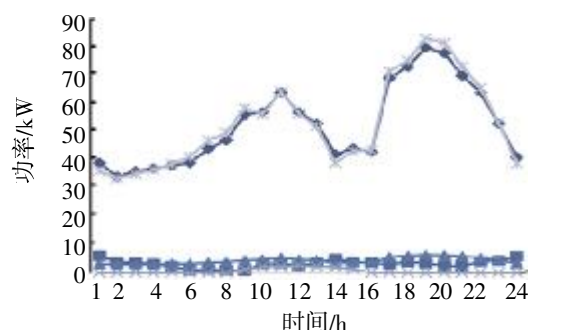


图7 冬季不可调度机组出力预测及电负荷预测

Fig. 7 Not scheduling unit output prediction and electric load forecasting in winter

由图7可知,冬季需集中供暖,10~12时和18~21时电负荷较高。风力发电相比春秋、夏季平均输出功率较高,而光伏发电的输出功率较低。

冬季并网运行下优化结果见图8。

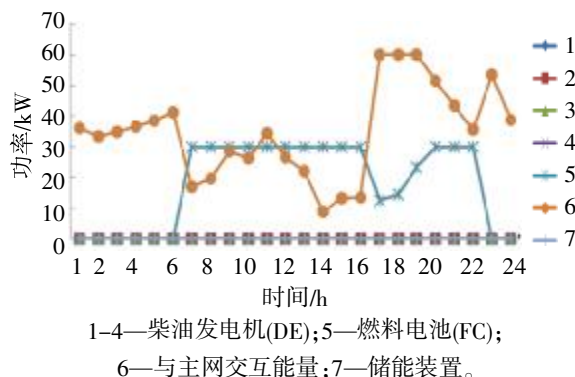
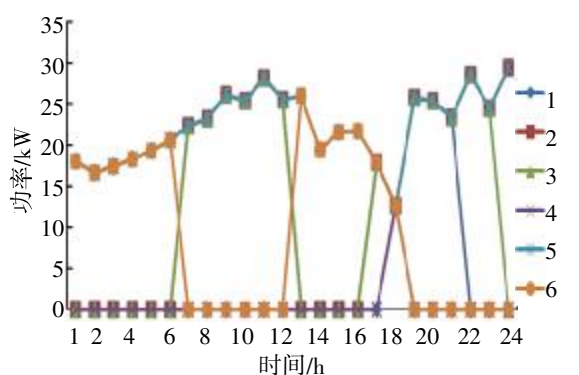


图8 冬季并网运行下微网功率优化结果

Fig. 8 Interconnection microgrid of power optimization results in winter

由图 8 可知, 当 WT、PV 发电时, FC 满足热负荷需求, BAT 完成充放电, 0-7 时为电价谷时段, FC、MT 发电成本高于购电价格, FC 不发电, 需向主网购电以达平衡; 8-10 时为电价平时段, DE 发电成本在一定范围内高于购电价格, 此时负荷缺额由 FC 发电满足, 剩余负荷由主网供给; 11-15 时为电价峰时段, FC 发电成本低于购电、售电价格, FC 满发; 16-18 时为电价平时段, 电价与负荷功率适中, 系统通过购电供应负荷, 剩余的由 FC 补充; 19-21 时为电价峰时段, FC 满发, 剩余由电网供给; 23-24 时为电价平时段, 负荷降低, 主网满足负荷, 若主网交互功率上限不满足负荷需求, 由 FC 继续发电, BAT 不参与调节。冬季孤网运行下优化结果见图 9。



1—4—柴油发电机(DE); 5—燃料电池(FC); 6—储能电池(BAT)。

图 9 冬季孤网运行下微网功率优化结果

Fig. 9 Isolated microgrid of power optimization results in winter

由图 9 可知, 冬季处孤岛运行时, 优先使用风力、光伏发电。0-7 时, WT、PV 总出力较低, 由 FC 发电和储能供给, 无多余功率; 7-10 时, BAT 充电状态, FC 持续发电, 负荷增加, DE 开始发电; 10-12 时为用电高峰期, FC 满发, 3 号 DE 满发 2 号 DE 补充缺额, BAT 持续充电; 13-16 时, 负荷降低, FC 出力减小, DE 不发电, 缺额由 BAT 来补充; 17-21 时, 负荷增大, DE、FC 逐渐满发; 22-23 时, 负荷稍减轻, FC 减少发电, 1 号 DE 停止发电; 23-24 时负荷下降, 只剩 FC 和 2 号 DE 出力来满足负荷需求。

3.3 优化结果分析

为验证文中优化调度方法的有效性, 需对比优化前后的综合成本的情况, 成本对比见表 2。

由表 2 可知, 微电网系统应用能量管理系统进行优化调度前后, 微电网无论处于并网运行还是孤网运行, 系统优化幅度均较大, 尤其在夏季时, 由于空调等高功率电器的高频率使用, 优化幅度更为明显, 可达 6.5% 左右。由此可见, 微电网系统应用能量管理系统进行优化调度能有效地降低了系统的运行成本。

表 2 优化前后系统日综合成本对比

Table 2 The comprehensive cost of the system contrast before and after optimization

并网优化前	成本/元	并网优化后	成本/元	优化幅度 /%
春秋季	645.32	605.02	春秋季	6.24
夏季	698.74	652.72	夏季	6.59
冬季	702.24	672.31	冬季	4.26

孤岛优化前	成本/元	孤岛优化后	成本/元	优化幅度 /%
春秋季	677.51	656.85	春秋季	3.05
夏季	710.42	664.27	夏季	6.50
冬季	714.75	673.45	冬季	5.78

4 结语

文中在分析微电网中各个分布式电源的数学模型的基础上, 建立了一个以综合成本最小为优化目标、满足多约束条件的微电网能量管理模型。以实际微电网系统为背景, 通过遗传算法求解了微电网内各分布式电源在不同工况下出力, 结果显示, 优化调度有效地降低了系统的运行成本和投资成本, 验证了所研究的模型、策略和算法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 张连芹, 邵能灵. 微网能量管理方案研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 183-185.
ZHANG Lianqin, TAI Nengling. Research of energy management system in micro-grid[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 183-185.
- [2] 殷晓刚, 戴冬云, 韩云, 等. 交直流混合微网关键技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 43-46.
YAN Xiaogang, DAI Dongyun, HAN Yun, et al. Discussion on key technologies of AC-DC hybrid microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 43-46.
- [3] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
GUO Saiqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129.
- [4] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201.
CHEN Changsong, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Micro-grid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 196-201.

- [5] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
CHEN Jie,YANG Xiu,ZHU Lan,et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19): 57-66.
- [6] 张建华,苏玲,陈勇,等.微网的能量管理及其控制策略[J].电网技术,2011,35(7):24-28.
ZHANG Jianhua,SU Ling,CHEN Yong,et al. Energy management of microgrid and its control strategy[J]. Power System Technology,2011,35(7): 24-28.
- [7] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu,SU Jian,LYU Zhipeng,et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1): 57-70.
- [8] DUFO LOPEZ R,BERNAL AGUSTIN J L. Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms[J]. Solar Energy,2005(79):33-46.
- [9] TSIKALAKIS A G,HATZIARGYRIOU N D. Centralized-control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(1): 241-248.
- [10] CHAKRABORTY S,WEISS M D,SIMOES M G. Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(1): 97-109.
- [11] MARNAY C,VENKATARAMANAN G,STADLER M,et al. Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3): 975-982.
- [12] 张晓花,赵晋泉,陈星莺.节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J].中国电机工程学报,2010,30(22): 71-76.
ZHANG Xiaohua,ZHAO Jinqian,CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22): 71-76.
- [13] 陈道君,龚庆武,张茂林,等.考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J].中国电机工程学报,2011,31(13):10-17.
CHEN Daojun,GONG Qingwu,ZHANG Maolin,et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(13): 10-17.
- [14] 徐奉友,李朝锋,陶学军,等.一种基于自适应控制算法的光伏发电站自动发电控制系统[J].电力系统保护与控制,2014(14):128-131.
XU Fengyou,LI Chaofeng,TAO Xuejun,et al. A photovoltaic automatic generation control system based on adaptive control algorithm[J]. Power System Protection and Control,2014(14): 128-131.
- [15] 张曦,康重庆,张宁,等.太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J].电力系统自动化,2014(6):6-13.
ZHANG Xi,KANG Chongqing,ZHANG Ning,et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014(6): 6-13.
- [16] 于晗,钟志勇,黄杰波,等.考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J].电力系统自动化,2009,33(2):20-24.
YU Han,ZHONG Zhiyong,HUANG Jiebo,et al. A chance Constrained transmission network expansion planning method associated with load and wind farm variations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(2): 20-24.
- 马喜平(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向电力新能源并网技术。
谢永涛(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统新能源。
董开松(1966—),男,硕士,高级工程师,国网工程技术专家,主要研究方向为新能源发电及并网技术。
贾嵘(1971—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化。

(编辑 赵彩莉)

(上接第107页)

- [12] SALAMEH Z M,CASACCA M A,LYNCH W A. A mathematical model for lead-acid batteries [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1992,7(1): 93-98.
- [13] 陆秋瑜,胡伟,郑乐,等.多时间尺度的电池储能系统建模及分析应用[J].中国电机工程学报,2013,33(16): 86-93.
LU Qiuyu,HU Wei,ZHENG Le,et al. Modeling and analysis of battery energy storage systems in multi-time scales application[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16): 86-93.
- [14] 何彬,欧阳明高.柴油发电机——整流负载系统多变量变增益控制[J].中国电机工程学报,2006,26(3):146-152.
HE Bin,OUYANG Minggao. Multivariable gain-scheduling control of diesel generator with rectified loads[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(3): 146-152.
- [15] 时珊珊,鲁宗相,闵勇,等.微电网孤网运行时的频率特性分析[J].电力系统自动化,2011,35(9):36-41.
SHI Shanshan,LU Zongxiang,MIN Yong,et al. Analysis on frequency characteristics of islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9): 36-41.
- [16] KATIRAEI F,IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed Generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(4): 1821-1831.
- 谢永涛(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统新能源。
贾嵘(1971—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化。
董开松(1966—),男,硕士,高级工程师,国网工程技术专家,主要研究方向为新能源发电及并网技术。
沈渭程(1984—),男,硕士,研究方向为电力系统自动化。

(编辑 赵彩莉)