

Scheduling Strategy and Economic Operation Optimization for Micro-Grids

Xiangyang Zhao, Jiangman Duan

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing
Email: zhaoxiangyang@buaa.edu.cn, djiangman@asee.buaa.edu.cn

Received: Aug. 20th, 2012; revised: Sep. 23rd, 2012; accepted: Sep. 30th, 2012

Abstract: The micro grid system has something different from the traditional power grid. That is the power grid realizes the balance of system based on load forecast, adjusting the controllable generators. While the generation units and load in microgrid have strong volatility and randomness. This paper bases on a microgrid with solar system, wind power, energy storage, load and power grid, aims at the problem that how to balance the random load and generator, studies the two operation state of the microgrid, establishes the scheduling strategy, operation optimization method and operation objectives. Analysis and verify the correctness and effectiveness of the proposed scheduling model, scheduling strategy, optimized objectives and optimization algorithm with an example.

Keywords: Micro-Grids; Economic Optimization; Scheduling Strategy; Energy Management; Island Operation

微电网系统的调度策略及经济运行优化研究

赵向阳, 段江曼

北京航空航天大学, 自动化科学与电气工程学院, 北京
Email: zhaoxiangyang@buaa.edu.cn, djiangman@asee.buaa.edu.cn

收稿日期: 2012年8月20日; 修回日期: 2012年9月23日; 录用日期: 2012年9月30日

摘要: 传统大电网采用基于负荷预测, 调节可控发电的模式, 实现系统功率平衡; 而微电网系统是由波动性和随机性很强的可再生新能源发电和随机负荷组成。如何通过调度实现具有强随机性的发电和用电单元之间的功率平衡, 是微电网急需解决的关键问题。本课题以光伏/风力发电、储能、负荷、配电网等单元构成的微电网系统为研究对象, 研究微电网的调度策略及运行优化方法, 确立并网和孤岛两种运行状态下的调度策略及运行目标; 并以一个算例分析验证所提出的调度模型、调度策略、优化目标及优化算法的正确性与有效性。

关键词: 微电网; 经济优化; 调度策略; 能量管理; 孤岛运行

1. 引言

微电网是一个集成了分布式发电、负荷、储能以及保护和控制等一系列环节的小型供能系统^[1], 能够实现系统内部的能量存储和转化。它具有低成本、高灵活性、高能源利用效率、低污染的特点。微电网系统根据运行时是否与配电网连接分为并网和孤岛两种模式^[2]。

微电网系统中的风力及光伏发电等新能源发电与天气状况实时相关, 且负荷变化也随机不确定^[3], 若要使微电网安全、稳定、经济运行, 就需要实时平衡这两个随机变化的变量, 就要对微电网内各分布式电源(DER)间、单个微电网与大电网间的能量优化管理研究制定出合理的调度控制策略, 实现风能、太阳能等可再生能源的有效利用。

微电网的电经济优化是能量管理中最重要的一环,与传统大电网中的经济优化相比,在微电网中主要有两个特点^[4]:一是电源的种类繁多,耗量特性复杂;二是其运行状态分为并网和孤岛两种,功率和能量的平衡受到时间的约束^[5,6]。

文献[7]建立了包含 DER 单元的微电网系统优化调度模型,但对于建立完善的考虑孤岛运行及储能系统的微电网经济运行优化模型及理论体系仍有待进一步研究。文献[8]中虽然考虑了众多分布式发电单元的耗量特性,提出了多目标优化的调度策略,但是也未考虑微电网在孤岛状态下的经济调度。

本文研究的微电网系统将可再生能源风能、太阳能和传统的化石能源(小型同步发电单元、燃料电池)结合起来使用,一方面能够减少化石能源的使用,另一方面使各种能源得到更合理的配置与利用,提高能源的利用效率。本文建立了微电网系统能量调度的模型,提出了在并网和孤岛运行下的调度策略,并通过算例验证了所提出的调度策略及目标函数的正确性。

2. 微电网 DER 子系统的调度特性建模

2.1. 太阳能光伏发电子系统

太阳能光伏发电(PV)是利用半导体界面的光生伏特效应将光能直接转变为电能的一种技术。光伏电池组件的功率输出模型可表示如下^[9]:

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

式中: P_{PV} 是太阳辐照强度为 G_{ING} (W/m^2) 时,组件的输出功率(kW); P_{STC} 是标准测试条件下 ($G_{STC} = 1000 W/m^2, 25^\circ C$) 组件的最大输出功率(kW); k 是功率温度系数; T_C 光伏电池温度; T_r 参考温度。由此数学关系式可以知道,日照强度和电池温度等都可以改变太阳能板的输出功率。

2.2. 风力发电子系统

风力发电机(WT)的叶片从风中捕获部分能量转化为旋转的动能,然后通过机械驱动系统将机械能传送给发电机,最终转化为电能输出。

研究可知,在风速给定时,风力发电机的有功功率输出特性如下^[10]:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \\ k_2 \cdot v^2 + k_1 \cdot v + k_0, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_t, & v \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v > v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_0, k_1, k_2 为风电功率特性曲线参数; v_i, v_r, v_o, P_t 是风机的切入风速、额定风速、切出风速以及额定功率。

2.3. 同步发电子系统

同步发电机是常规电力系统中的主要发电单元类型,柴油发电机组(DE)是最早应用的一种分布式电源技术,一般用作备用电源或用于调峰场合。对于传统的同步发电机,有:

$$P = (E_0 U / x_t) \sin \theta \quad (3)$$

上式中, E_0 为定子电动势; U 为机端电压; θ 为 E_0 与 U 之间的夹角。可知调节进气量(原动机的功率)可以改变定子电动势,进而调节输出的有功功率。

同步发电单元的能耗特性为^[11]:

$$C_{f,DE}(P_{DE}) = aP_{DE}^2 + bP_{DE} + c \quad (4)$$

$C_{f,DE}$ 是同步发电单元运行时的燃料消耗成本(元); P_{DE} 为同步发电单元的输出功率(kW); a, b, c 为系数。

2.4. 燃料电池子系统

燃料电池(FC)是一种将燃料和氧化剂经电化学反应把化学能直接转变为电能的化学电池。较之常规发电形式,燃料电池具有转换效率高、环境污染小、噪音低、模块化结构、组装及维修方便、可靠性高等优点^[12]。

燃料电池通过逆变器将其输出的直流电转换成交流电接入电网^[13]。

$$P = (mU_{cell} U_s / X) \sin \delta \quad (5)$$

式中, X 为连接燃料电池和电网的线路阻抗; m 调节输出交流电压的幅值; δ 为调节输出电压的相角; U_{cell} 为燃料电池输出的直流电压; U_s 为电网侧电压。与普通发电机调节功率原理相似,燃料电池的出力可通过调节燃料耗量和逆变器参数来调控。

燃料电池的耗能特性为:

$$C_{f,FC}(P_{FC}) = C_{\text{fuel}} \sum \frac{P_{FC}}{\eta_{FC}} \quad (6)$$

$C_{f,FC}$: 燃料消耗成本(元); P_{FC} : 输出功率(kW); C_{fuel} : 燃料价格(元/m³); η_{FC} : 燃料电池的燃料利用率(kW·h/m³)。

2.5. 储能子系统

分布式储能单元可用于平抑负荷波动、进行削峰填谷^[5,14]; 与风力发电、光伏发电等可再生能源发电技术相配合, 以稳定系统的功率输出, 增强可再生能源发电系统的可调度性能; 可通过参与电力市场, 利用峰谷电价差异使储能系统所有者获得一定的经济收益。本文应用循环寿命长, 耐过充能力高、充放电效率高、功率能量密度高的锂电池作为能量存储单元, 用超级电容作为短时功率平衡单元^[15]。

荷电状态(State of Charge, SOC)是经济调度优化问题的重要参数。

$$SOC_{t+1} = SOC_t - SOC_t \times \sigma_{SDR} \pm I_{BATt} \times \Delta t \times \eta_{BCE} \quad (7)$$

上式中, SOC 代表荷电状态; σ_{SDR} 是自放电率; I_{BATt} 是充放电电流; Δt 是充放电时间(h); η_{BCE} 是充放电效率, 依据充放电电流不同一般在 0.65~0.85 范围内。

蓄电池通过双向换流器将直流电转换成交流电接入微电网, 反之将交流电整流为直流电储存在电池中。通过换流器与电网的功率交换如下:

$$P = (u_s u_R / X) \sin \delta \quad (8)$$

式中, X 为连接线阻抗; u_s 为微电网输出端电压; u_R 为蓄电池的输出端电压。蓄电池输出的功率可通过调节逆变器来调控。

3. 调度系统的建立

3.1. 目标函数通用方程^[8]

$$C = k_1 C_G + k_2 C_{OM} + k_3 C_{\text{grid}} + k_4 C_L + k_5 C_{ENV} + k_6 C_{DP} \quad (9)$$

$0 \leq k_j \leq 1, (j=1, 2, \dots, 6)$ 为考虑权重系数, 取 0 为不考虑, 1 表示考虑。

3.1.1. 发电单元的燃料消耗成本^[8]

$$C_G = \sum_{i=1}^N CF_i(P_{it}) \quad (10)$$

CF_i 是第 i 个发电单元运行时的燃料消耗成本(元/kW·h); P_{it} 是第 i 个发电单元的 t 时刻功率输出, 单位 kW。

3.1.2. 发电单元运行管理成本^[7]

$$C_{OM} = \sum_{i=1}^N OM_i(P_{it}) = \sum_{i=1}^N K_{OMi} \times P_{it} \quad (11)$$

OM_i 是第 i 个发电单元的运行管理成本, K_{OMi} 是运行管理系数。

3.1.3. 购电成本或售电利润^[7]

$$C_{\text{Grid}} = CP_t \times CGP_t - CS_t \times CSP_t \quad (12)$$

CP_t 和 CS_t 为 t 时刻微电网向配电网买电、售电电价(元/kW·h); CGP_t 和 CSP_t 分别为微电网向配电网买电量和售电量(kW·h)。

3.1.4. 削减负荷的赔偿费用^[8]

$$C_L = 0.68 \times \sum \text{Shload} \quad (13)$$

微电网中所有削减负荷的赔偿成本为 0.68 元/kW·h, Shload 为削减负荷(kW·h)。

3.1.5. 治污成本^[16]

$$C_{MP} = C_k \gamma_{ik}(P_{it}) \quad (14)$$

C_{MP} 是处理污染物的费用; k 所排放的污染物类型(CO₂、SO₂、NO_x等); C_k 是处理每 kg 污染物的费用(元/kg); γ_{ik} 为不同的电能生产方式在输出 P_{it} 电能时所排放的污染物。

3.1.6. 发电单元折旧成本^[8]

$$C_{DP} = \sum_{i=1}^N \frac{ADCC_i}{cf_i \times P_{fci} \times 8760} \times P_{it} \times \Delta t \quad (15)$$

$ADCC_i$ 是第 i 号发电单元的年均折旧资本; P_{fci} 是第 i 号发电单元的最大输出功率; cf_i 为容量因素, $cf_{(wt)} = 0.3291$, $cf_{(pv)} = 0.1698$ 。

$$ADCC = \text{InsCost} \times CFR \quad (16)$$

$$CFR = \frac{d(1+d)^L}{(1+d)^L - 1} \quad (17)$$

其中, InsCost 是发电单元单位容量安装成本(元/kW·h); CFR 为资本回收系数; d 为利率, 此处取 $d = 0.06$; L 为发电单元寿命(年)。

3.2. 目标函数

1) 目标函数 1: 考虑运行费用最低, 有 DER 能耗成本、运行管理成本及微电网与主网间的能量交互成本, 则有 $k_1 = k_2 = k_3 = 1$, $k_4 = k_5 = k_6 = 0$ 。

2) 目标函数 2: 微电网的折旧成本最低, 有 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = 0$, $k_6 = 1$ 。

3) 目标函数 3: 微电网的环境效益最大, 治污成本最低, 有 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_6 = 0$, $k_5 = 1$ 。

4) 目标函数 4: 微电网的综合效益最高。综合效益考虑到运行费用、折旧成本和环境效益, 则为多目标优化问题。

3.3. 约束条件

系统运行时需要满足的约束条件如下。

1) 等式约束^[17], 即功率平衡约束, 微电网系统的节点功率约束方程为:

$$\begin{cases} P_{DG_i} - P_{L_i} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_{DG_i} - Q_{L_i} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

式中, n 为节点数, V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压; P_{DG_i} 与 Q_{DG_i} 是节点 i 的有功发电功率与无功发电功率; δ_{ij} 是节点 i 和 j 之间的相角差; P_{L_i} 和 Q_{L_i} 为节点 i 的有功和无功负荷; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导与电纳。

2) 不等式约束

DER 单元功率输出限值:

$$P_i^{\min} \leq P_{it} \leq P_i^{\max}, V_i^{\min} \leq V_{it} \leq V_i^{\max} \quad (19)$$

P_i^{\min} 、 P_i^{\max} : 发电单元 i 的最小、最大输出功率; V_i^{\min} 、 V_i^{\max} : 发电单元 i 的最低、最高输出电压。

3) 储能单元必须时刻满足存储容量约束。对于锂电池来说, 即必须满足荷电状态约束:

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max}$$

4) 微电网与主网间能够允许交互的最大容量约束, 这可能是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^[18]:

$$P_{\text{line}}^{\min} \leq P_{\text{line}t} \leq P_{\text{line}}^{\max} \quad (20)$$

3.4. 调度策略

本文根据微电网系统与主网系统间能量交互方式的不同、微电网系统中所包含的分布式能源单元是否享受优先调度权的不同, 将微电网系统与主网系统间的交互运行控制策略划分为以下几种。

并网条件下的调度策略:

策略 1: 优先利用微电网内部可调度的 DER 来尽力满足网内负荷需求, 可以从主网吸收功率, 但不可向主网输出功率;

策略 2: 微电网与主网间可以自由双向交换功率。

孤岛条件下的调度策略, 如图 1 所示: 优先利用微电网中可调度的 DER 来尽力满足网内负荷需求; 在 DER 都最大出力后, 功率缺额部分由锂电池补充; 当锂电池的出力也达极限时, 考虑削减部分非重要负荷(电动车充电器)以满足孤岛的功率平衡, 削减部分赔偿 0.68 元/kW·h; 此时会降低用户满意度。

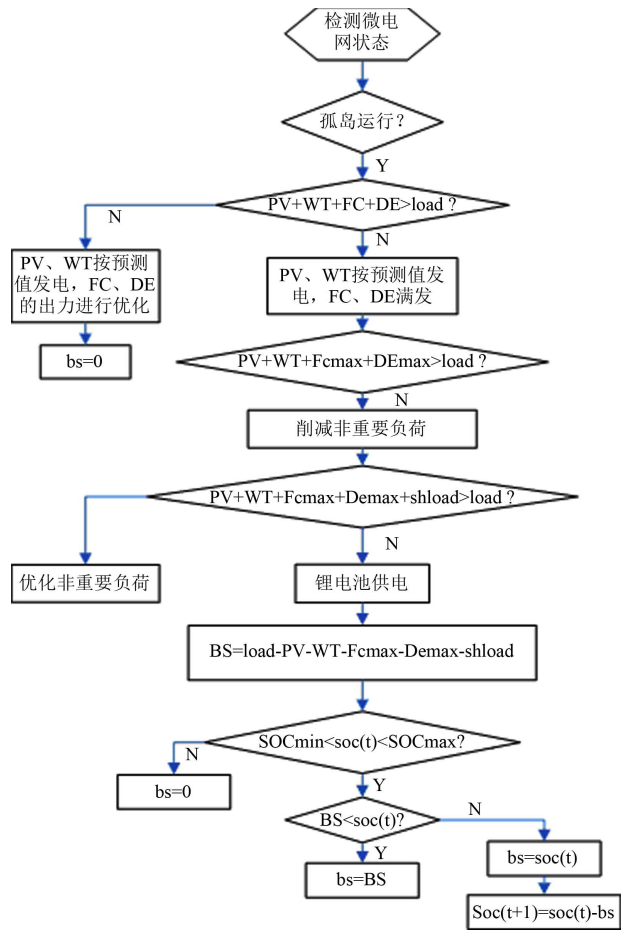


Figure 1. Scheduling strategy in islanded operation
图 1. 孤岛运行时的调度策略

3.5. 算法选择

微电网系统的能量管理问题是一个多目标、多变量、多约束的混合非线性规划问题^[19], 因此整个优化过程比较复杂。传统的数学优化方法如线性规划、非线性规划、整数规划、二次规划、动态规划等方法不能实现全局最优, 只能找到局部最优解。遗传算法^[20,21]具有全局寻优和收敛速度快的特点, 这些都适宜于处理微电网系统中的优化调度问题。

4. 算例分析

4.1. 算例系统

本文所选取的微电网算例系统包含光伏发电、风力发电、燃料电池发电和同步发电单元(以柴油机为例)4种类型的分布式电源。微电网系统与主网系统间联络线的物理传输容量上限为 30 kW, 各 DER 单元的相关信息如表 1 所示。

下面给出本文计算分析过程中所需的负荷需求数据、可再生能源子系统发电预测数据、主网系统实时电价等数据, 如图 2、3 所示^[22]。

微电网系统的运行优化受多种因素的影响。除各 DER 的运行费用系数不同外^[23], 微电网系统采用的运行控制策略, 优化运行时选取的运行优化目标以及微

电网与主网间交互电价类型的不同, 均会引起系统运行优化结果的不同。

4.2. 算例结果及分析

假设微电网系统在负荷需求最大时(时段为 19 时至 22 时)从配电网脱离, 孤岛运行, 列举不同的控制目标和控制策略组合下的优化结果, 如图 4~图 11 所示。

对于目标 1, 0~8 时, 电价在较低范围内上涨, 由配电网提供电能平衡负荷需求; 在 9~11 时, 电价依次高于燃料电池及柴油发电成本, 此阶段由 FC 及 DE 供电(由于 FC 成本低于 DE, FC 优先发电), 并以实时电价向配电网售电以获取利润; 在 17~19 时, 配电网电价下落, 微电网继续从配电网买电, 剩余负荷需求由 FC 和 DE 依次承担; 19~22 时微电网系统处于

Table 1. Relevant data of DER subsystem
表 1. 各 DER 子系统相关数据

DER 类型	功率/kW		寿命/a	安装成本/(元/kW)
	下限	上限		
光伏发电	0	20	20	66,500
风力发电	0	40	10	23,750
燃料电池	0	30	10	42,750
柴油发电	0	30	10	16,000

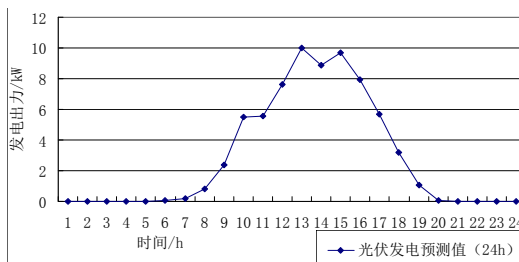
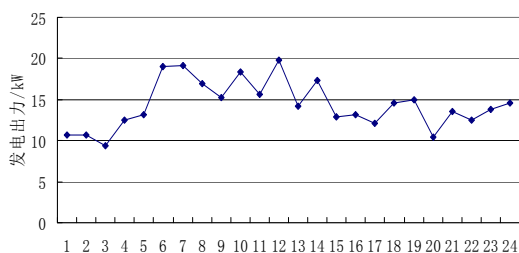


Figure 2. Predictive value of wind power and PV
图 2. 风力发电预测值及光伏发电预测值

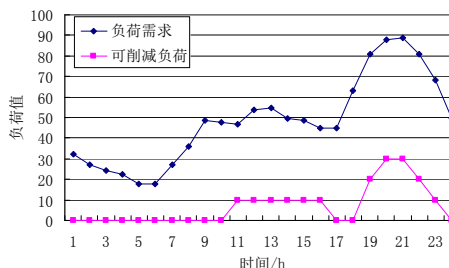
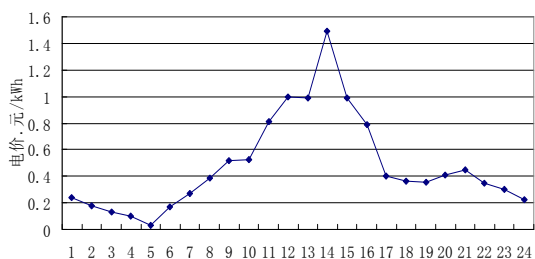


Figure 3. Real-time pricing of grid and load demand
图 3. 配电网实时电价及负荷需求值

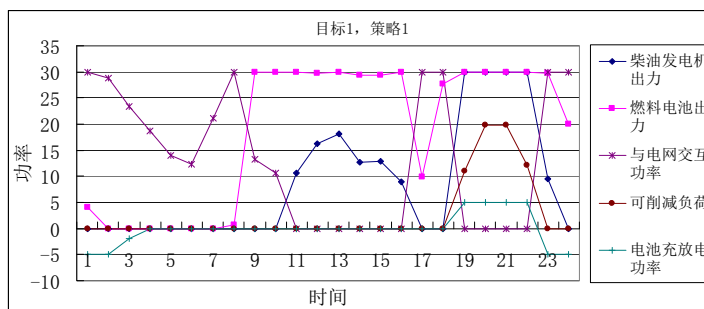


Figure 4. Scheduling results under Objective 1, Strategy1
图 4. 目标 1, 策略 1 下调度结果

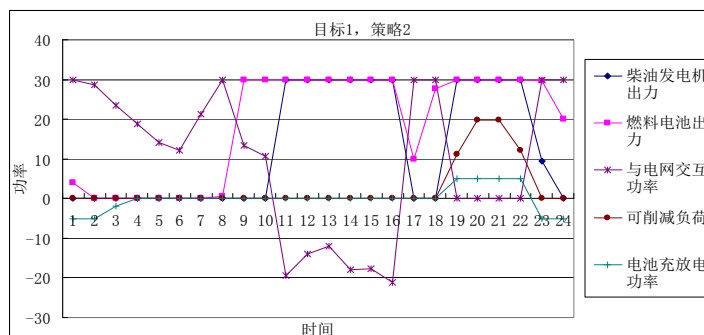


Figure 5. Scheduling results under Objective 1, Strategy2
图 5. 目标 1, 策略 2 下调度结果

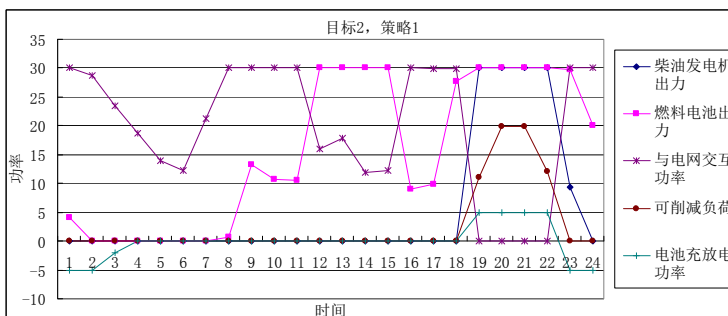


Figure 6. Scheduling results under Objective 2, Strategy1
图 6. 目标 2, 策略 1 下的调度结果

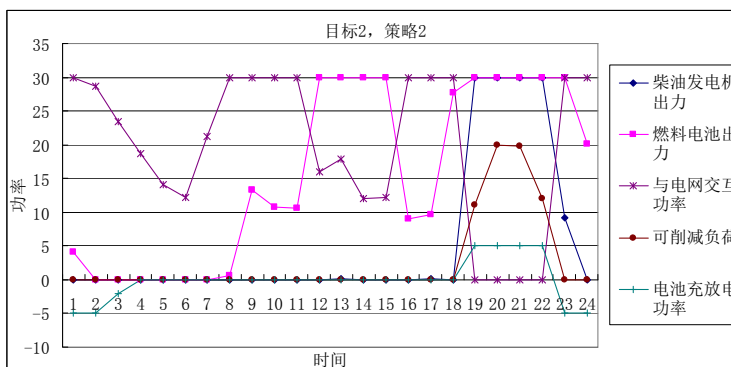


Figure 7. Scheduling results under Objective 2, Strategy2
图 7. 目标 2, 策略 2 下的调度结果

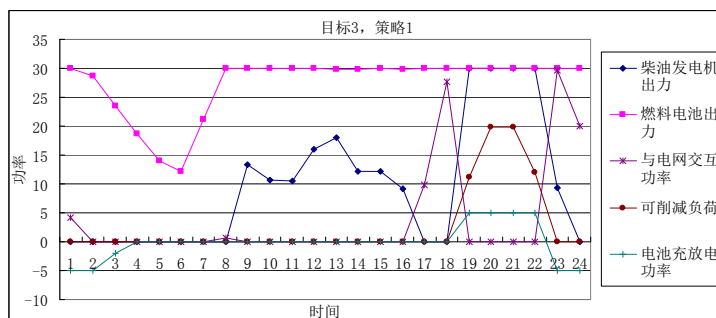


Figure 8. Scheduling results under Objective 3, Strategy1
图 8. 目标 3, 策略 1 下的调度结果

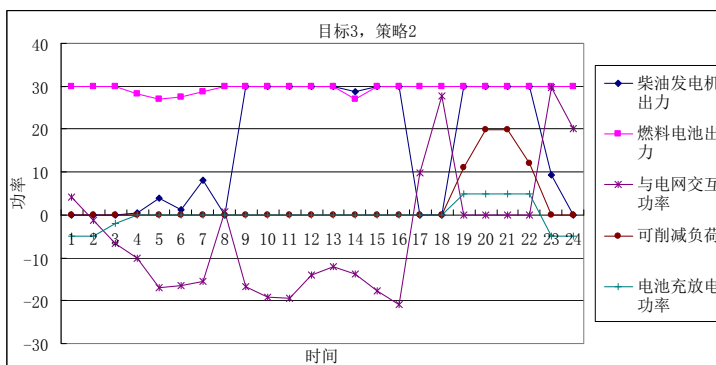


Figure 9. Scheduling results under Objective 3, Strategy2
图 9. 目标 3, 策略 2 下的调度结果

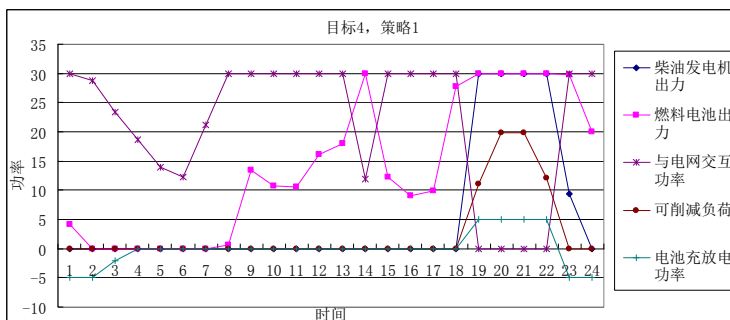


Figure 10. Scheduling results under Objective 4, Strategy1
图 10. 目标 4, 策略 1 下的调度结果

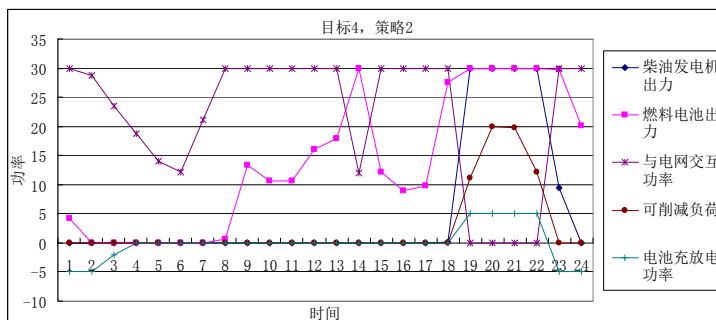


Figure 11. Scheduling results under Objective 4, Strategy2
图 11. 目标 4, 策略 2 下的调度结果

孤岛运行状态,由FC/DE满发提供功率,功率缺额由蓄电池承担,也可削减部分非重要负荷。

对于目标2,考虑了微电网系统的折旧成本,使得策略1和2的调度结果几乎一样。这是由于微电网系统的初始投资成本很高,使得微电网的折旧成本远高于配电网,即使调度策略允许其向电网售电,微电网考虑经济性也只能从配电网买电。从这点可以看出,高成本的发电设备还是竞争不过配电网,发展新能源是需要政策扶持的^[24]。

对于目标3环境成本最低,在0时至7时,燃料电池的治污成本很低,优先为用户提供电能;此时处于并网状态,实时检测蓄电池剩余容量,若在可充电范围内,为电池充电并及时检测更新电池状态;对于可多发的电能则售卖给配电网。在7时以后,电网电价走高,与治污成本之和很大,燃料电池的环境成本体现出很强的优势,利用燃料电池优先发电,不足部分由治污成本之低的柴油发电机来承担;若采用策略1,由柴油发电平衡负荷需求;若采用策略2,柴油发电机也以最大功率输出,多余的电能售卖给电网以获取利润。16时后,电价骤降,柴油发电机减少发电。在孤岛的19~22时阶段,此时柴油发电机和燃料电池均满功率发电,不足的部分由蓄电池和削减部分非重要负荷承担。23时至24时为并网状态,检测蓄电池状态并为其充电,负荷需求由成本较低的燃料电池和配电网来承担。

对于目标4来说,不论采取策略1还是策略2,调度结果基本不变,这是由于考虑了全部的费用参数使得微电源的运行成本远高于从电网购电成本,因而整个调度阶段都不向电网售电。

表2为经济调度的不同结果的组合。

Table 2. Scheduling results under different goals and different strategies

表2. 不同目标,不同策略下的调度结果(元)

组合方式	能耗成本	折旧成本	环境成本	综合成本
1, 1	336.34	972.17	378.85	1626.1
1, 2	312.27	1181.6	401.07	1938
2, 1	413.46	736.07	394.2	1320.5
2, 2	412.22	737.12	394.35	1321
3, 1	422.53	1151.3	307.62	1869.5
3, 2	484.92	1495.4	294.37	2377.6
4, 1	378.77	765.43	413.26	1284.8
4, 2	377.43	763.79	413.7	1283.6

若负荷需求全部由配电网承担,电费为601.2590元,环境成本为365.2848元。

由表2可知对于不同的目标函数来说,对比策略1与策略2,后者比前者的经济效益有所提高,是由于在满足了负荷需求的基础上微电网系统利用成本较低的DER向配电网系统售电,获取利益。较之负荷需求全部由配电网承担的方式,DER单元的投入及调度策略的实现使得环境成本分别降低了8.35%和12.2%。然而,由于目前技术不够先进等原因导致DER的折旧成本很高,以致目标3的调度在整个周期内,除去电价特别高的个别时段外,都是由配电网提供能量。

运行得到的调度结果经过潮流计算得到各节点电压电流都在约束范围内不越界,有着较好的电能质量指标。

由以上调度结果可初步验证调度策略的正确性与有效性。

5. 结论

微电网系统中发电及负荷的随机波动挑战着系统的稳定运行,本文针对包含光伏发电、风力发电、燃料电池、柴油发电及锂电池储能的微电网系统提出了微电网在孤岛和并网两种情况下的调度策略及优化目标,讨论了多目标及多策略对运行优化结果的影响,验证了所提出的调度模型及调度策略的正确性与有效性。

参考文献 (References)

- [1] 时珊珊,鲁宗相,周双喜等. 中国微电网的特点和发展方向[J]. 中国电力, 2009, 42(7): 21-24.
- [2] N. Hatzigiorgiou, H. Asano, R. Iravani, et al. Microgrids. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [3] 袁越,李振杰,冯宇等. 中国发展微电网的目的、方向、前景[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 59-63.
- [4] 陈达威,朱桂萍. 低压微电网中功率传输特性研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 406-411.
- [5] J. D. Kueck, R. H. Staunton, S. D. Labinov, et al. Microgrid energy management system, 2003. <http://certs.lbl.gov/pdf/phase2-kueck.pdf>
- [6] R. Schainker. Energy storage and distributed generation technologies. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2006.
- [7] 茆美琴,丁明,张榴晨等. 多能源发电微电网实验平台及其能量管理信息集成[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 106-111.
- [8] F. Katiraei, M. R. Lravani. Power management strategies for a micro grid with multiple distributed generation units. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [9] 周德佳,赵争鸣,吴理博等. 基于仿真模型的太阳能光伏电

- 池阵列特性的分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(7): 1109-1112.
- [10] 孟祥星, 王宏. 大规模风电并网条件下的电力系统调度[J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(1): 1-7.
- [11] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
- [12] 王丹. 分布式发电系统建模及稳定性仿真[D]. 天津大学, 2009.
- [13] Z. Wang, X. Huang and J. Jiang. Design and implementation of a control system for a microgrid involving a fuel cell power module. Electrical Power Conference, 25-26 October 2007: 207-212.
- [14] M. Pedrasa, T. Spooner. A survey of techniques used to control micro grid generation and storage during island operation. Melbourne: The AUPEC 2006 Conference, 2006.
- [15] 鲁鸿毅, 何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 87-91.
- [16] 钱科军, 袁越, 石晓丹等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.
- [17] 王艳. 基于多智能体技术的微电网潮流优化控制策略研究[D]. 中南大学, 2011.
- [18] J. Tippayachai, W. Ongsakul and I. Ngamroo. Parallel micro genetic algorithm for constrained economic dispatch. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 790-797.
- [19] 杨洋. 微电网能量管理机制与控制体系的完善[D]. 上海交通大学, 2011: 2-5.
- [20] 玄光男, 程润伟, 著. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [21] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82-87.
- [22] 杨为, 丁明, 毕锐等. 微电网实验平台的设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(1): 38, 41.
- [23] M. Pedrasa, T. Spooner. A survey of techniques used to control micro grid generation and storage during island operation. Melbourne: The AUPEC 2006 Conference, 2006.
- [24] 盛鹏, 孔力, 齐智平等. 新型电网——微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-81.