

第十届“中国电机工程学会杯”全国大学生电工数学建模竞赛赛题

A 题：微电网日前优化调度

面对不断增长的电能需求以及化石能源的短缺，开发新型可持续发展的可再生能源成为迫切需求。以风力发电、太阳能发电等为代表的环境友好型的电能生产技术不断成熟。

可再生能源根据其接入电力系统方式的不同，分为大规模集中接入和分布式接入，分布式接入主要应用于微电网。根据百度百科，微电网（Micro-Grid）也译为微网，是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等组成的小型发配电系统。如何妥善管理微电网内部分布式电源和储能的运行，实现微电网经济、技术、环境效益的最大化成为重要的研究课题。

图 1 示意了一个含有风机、光伏、蓄电池以及常规负荷的微电网系统。

日前经济调度问题是指在对风机出力、光伏出力、常规负荷进行日前(未来 24 小时)预测基础上，考虑电网侧的分时电价，充分利用微网中的蓄电池等可控手段，使微电网运行的经济性最优。

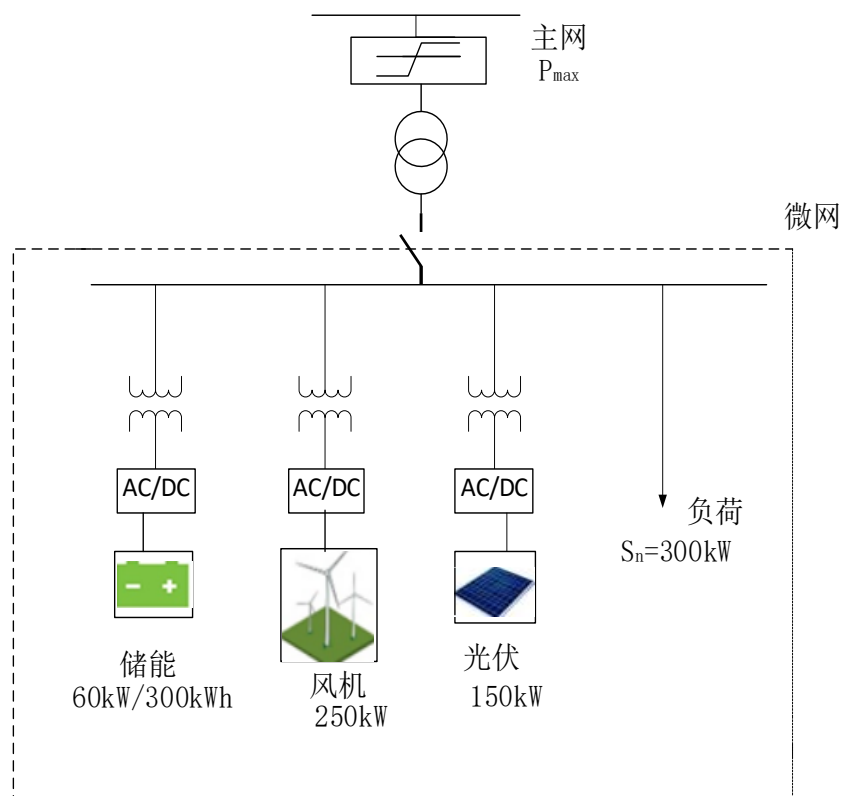


图 1 微网系统结构

微电网系统在满足各电源运行约束和负荷需求基础上，可对系统未来 24 小时的出力调控进行优化，以实现经济性最优。系统的总成本包含风机与光伏的发电成本、蓄电池的成本，以及并网运行下微电网系统与外部电网之间的电能交换成本。

本题假设负荷预测、风机和光伏未来出力已完全准确，具体数据示于附表 1。

对于蓄电池，为防止蓄电池过充和过放的发生，蓄电池的荷电状态(SOC, State-of-Charge，即电池剩余电量与电池容量的比值)应满足上、下限值约束。

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (1)$$

式中， S_t 、 S_{\min} 、 S_{\max} 分别为蓄电池 t 时段的 SOC 状态及其上、下限值。即当 SOC 到达电池最大值($S_{\max}=0.95$)时，电池停止充电；当 SOC 到达最小值($S_{\min}=0.3$)时，电池停止放电。

在单位时间间隔 Δt 内，蓄电池的充、放电功率均恒定，SOC 数值变化由下式决定：

$$S_t = S_0 + \frac{\sum_{i=1}^T P_{cha,i} X_i \Delta t - \sum_{i=1}^T P_{dis,i} Y_i \Delta t}{E_b} \quad (2)$$

式中， S_0 为蓄电池的初始 SOC 状态； $P_{cha,t}$ 和 $P_{dis,t}$ 分别为蓄电池在第 t 个时段的充电和放电功率； X_t 和 Y_t 分别为蓄电池的充电状态和放电状态，其中 $X_t \in \{0,1\}$ ， $Y_t \in \{0,1\}$ ； Δt 为单位时间间隔， T 为时段总数。

考虑到在同一时间间隔 Δt 内，蓄电池不能同时处于充电和放电状态，因此蓄电池的充放电状态需要满足以下约束：

$$X_t \bullet Y_t = 0 \quad (3)$$

蓄电池在参与系统的运行优化过程中，其能量状态需满足在调度周期始末相等的约束：

$$S_0 = S_T \quad (4)$$

同时，考虑到蓄电池充放电功率大小与电池的寿命有关，单位时间内充放电最大功率为蓄电池组额定容量的 20%，即

$$\begin{cases} 0 \leq P_{cha,t} \leq 0.2E_b X_t \\ 0 \leq P_{dis,t} \leq 0.2E_b Y_t \end{cases} \quad (5)$$

式中， E_b 为电池容量。

在一个调度周期内，蓄电池的充放电次数以及放电深度都会对电池寿命造成影响，放电深度可以由式(5)进行约束，充放电次数需满足：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T |X_{t+1} - X_t| \leq N_1 \\ \sum_{t=1}^T |Y_{t+1} - Y_t| \leq N_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中， N_1 和 N_2 分别为蓄电池充电和放电的次数限制值。

题目参数设置

- 1) 计算要求：计算时间为 24 小时，时间间隔为 15 min。
- 2) 风机的装机容量 250kW，发电成本 0.52 元/kWh。
- 3) 光伏的装机容量 150kW，发电成本 0.75 元/kWh。
- 4) 假设不计蓄电池损耗，蓄电池额定容量为 300 kWh，电池 SOC 运行范围为[0.3,0.95]，初始 SOC 值为 0.4，由充电至放电成本为 0.2 元/kWh，每天的充放电次数限制均为 8 次。
- 5) 售电及购电电价：售电及购电电价如表 1 所示。

表 1 售电及购电电价

时段	0:00~7:00	7:00~10:00	10:00~15:00	15:00~18:00	18:00~21:00	21:00~0:00
售电电价 (元/kWh)	0.22	0.42	0.65	0.42	0.65	0.42
购电电价 (元/kWh)	0.25	0.53	0.82	0.53	0.82	0.53

题目计算要求

- 1) 经济性评估方案：

若微网中蓄电池不作用，且微网与电网交换功率无约束，在无可再生能源和可再生能源全额利用两种情况下，分别计算各时段负荷的供电构成（kW）、全天总供电费用(元)和负荷平均购电单价（元/kWh）。

- 2) 最优日前调度方案一：

若不计蓄电池作用，且微网与电网交换功率无约束，以平均负荷供电单价最小为目标（允许弃风弃光），分别计算各时段负荷的供电构成（kW）、全天总供电费用(元)和平均购电单价（元/kWh），分析可再生能源的利用情况。

- 3) 最优日前调度方案二：

若考虑蓄电池作用，且微网与电网允许交换功率不超过 150kW，在可再生能源全额利用的条件下，以负荷平均供电单价最小为目标，建立优化模型，给出最优调度方案，包括各时段负荷的供电构成（kW）、全天总供电费用(元)和平均

购电单价（元/kWh），分析蓄电池参与调节后产生的影响。

4) 最优日前调度方案三：

若考虑蓄电池作用，且微网与电网允许交换功率不超过 150kW，以负荷供电成本最小为目标（允许弃风弃光），建立优化模型，给出最优调度方案，包括各时段负荷的供电构成（kW）、全天总供电费用(元)和平均购电单价（元/kWh），分析可再生能源的利用情况以及蓄电池参与调节后产生的影响。

请将上述四问的计算过程结果和最终结果分别填写于附表 2 和附表 3 中。

5) 微网中涉及多个利益主体，如用户、电网、可再生能源和蓄电池，利益诉求具有一定的冲突，根据你的了解，在不使任一主体的利益严重受损前提下，试制定科学的策略，使得综合效益达到最优。

6) 通过上述问题的求解，你对微电网日前优化调度有何认识？阐明你的观点和依据。

附表 1:

序号	负荷(kW)	风机(kW)	光伏(kW)
1	64.3	163.10	0
2	65.5	201.47	0
3	66.7	154.26	0
4	66.9	140.29	0
5	67.5	200.29	0
6	67.7	250.00	0
7	68	154.26	0
8	68.2	125.64	0
9	70.2	182.87	0
10	71.9	211.67	0
11	71.9	214.11	0
12	71.9	224.41	0
13	70.7	158.26	0
14	70.7	135.45	0
15	71.3	163.10	0
16	72	175.49	0
17	76.5	219.38	0
18	77.6	250.00	0
19	78.7	168.04	0
20	78.8	124.56	0.06
21	90.6	170.15	0.96
22	93.8	201.47	2.11
23	94.7	231.44	4.04
24	94.8	250.00	6.54
25	110.5	235.01	9.18
26	113.1	227.59	13.40
27	113.9	135.90	16.29
28	114.3	106.25	20.19
29	132.2	213.81	28.80
30	145.4	250.00	34.78
31	145.2	221.25	31.62
32	145.1	204.14	39.61
33	154.1	246.62	46.08
34	157.4	250.00	53.66
35	156.5	179.02	36.29
36	155.5	144.06	49.64
37	144	197.36	76.96
38	142.2	227.91	66.81

第十届“中国电机工程学会杯”全国大学生电工数学建模竞赛赛题

39	142.1	215.96	55.57
40	142.1	218.44	88.62
41	125.3	212.28	87.02
42	118.9	210.15	54.04
43	116.9	153.76	63.44
44	115.9	124.77	101.59
45	115.4	90.46	104.11
46	115	57.35	90.68
47	124.1	96.22	91.85
48	127.1	114.66	66.78
49	130.2	94.39	77.14
50	131.6	86.98	63.76
51	140.7	69.47	75.46
52	141.8	55.77	110.46
53	143.9	74.36	70.57
54	145.5	83.41	103.15
55	145.5	50.33	72.79
56	145.6	37.21	67.41
57	144.7	9.10	28.94
58	144.4	1.34	23.89
59	145.2	19.54	19.75
60	145.3	33.06	31.53
61	149.6	2.02	40.48
62	150.3	0	63.95
63	150.1	10.47	59.41
64	150	16.35	50.76
65	203.5	21.07	41.64
66	207.2	27.11	23.39
67	207	43.75	24.86
68	206.9	53.45	20.60
69	215.5	19.61	17.40
70	223.9	9.95	15.06
71	225	72.19	13.59
72	225.5	120.28	22.08
73	233.9	81.91	18.20
74	237.5	76.88	12.15
75	236.6	62.81	5.37
76	236.1	56.82	2.07
77	215.4	34.90	0
78	211	23.98	0
79	210.9	25.11	0
80	210.8	23.43	0

第十届“中国电机工程学会杯”全国大学生电工数学建模竞赛赛题

81	198	58.69	0
82	197.9	93.67	0
83	198.5	93.49	0
84	198.6	99.55	0
85	180.8	56.82	0
86	177.2	26.01	0
87	177.8	16.74	0
88	177.9	6.97	0
89	161.5	18.98	0
90	147.3	23.12	0
91	147.2	44.43	0
92	147.2	55.64	0
93	117.2	92.41	0
94	107.5	109.01	0
95	62	73.42	0
96	58.7	63.80	0

附表 2:

序号	风机 (kW)	光伏(kW)	蓄电池(kW)
1			
2			
⋮	⋮	⋮	⋮
95			
96			

附表 3:

分类	储能	与电网的功率限制	充放电次数		与电网交换的最大功率 (kW)		风机成本 (元)	光伏成本 (元)	总成本 (元)	平均成本 (元)
无可再生能源	无储能	自由								
可再生能源 全部接纳	无储能	自由								
	有储能	[-150kW, 150kW]								
可再生能源 选择性接纳	无储能	自由								
	有储能	[-150kW, 150kW]								