



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105139147 A

(43) 申请公布日 2015. 12. 09

(21) 申请号 201510598550. 2

(22) 申请日 2015. 09. 18

(71) 申请人 北京北变微电网技术有限公司

地址 100193 北京市海淀区上地中关村软件园华夏科技大厦 232 室

申请人 西安交通大学

(72) 发明人 祝振鹏 刘世民 王秀丽 刘春阳

杨博 张忠 王建学

(74) 专利代理机构 北京市卓华知识产权代理有

限公司 11299

代理人 周瑞艳

(51) Int. Cl.

G06Q 10/06(2012. 01)

G06Q 50/06(2012. 01)

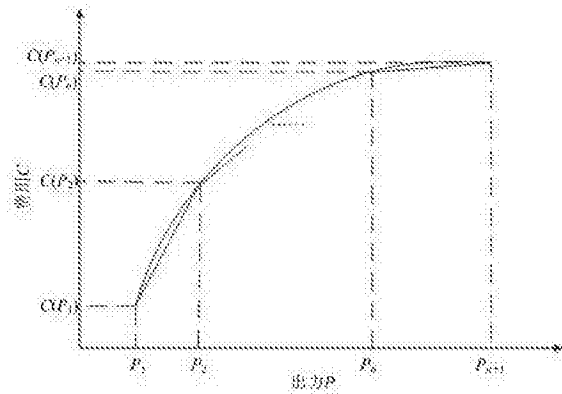
权利要求书7页 说明书16页 附图12页

(54) 发明名称

微电网系统的经济调度方法

(57) 摘要

本发明涉及一种微电网系统的经济调度方法,以运行成本最低为控制目标,分别构建了并网运行、孤网长期稳定运行和孤网短期运行这三种运行状态下的目标函数和相对应的约束条件,通过对系统内各种设备建模,使所构建的各目标函数覆盖了设备折旧费用、燃料费用、维护费用、启停费用、环保费用等设备运行成本及购售电成本、切负荷成本、线路损耗成本等较为全面的多种成本影响因素,并应用分段线性化的处理方法将非线性问题转化为线性问题,引入 0、1 决策变量将约束中的二次约束转换为一次约束,按时间分层求解。本发明具有多种可选的调度模式,适用性强,不仅计算结果精确性好,而且计算速度快,可适用于大型的微电网优化调度。



1. 一种微电网系统的经济调度方法,其特征在于:

选择微电网系统的运行状态,在适于与大电网并网运行的情况下选择与大电网并网的并网运行状态,在不适于与大电网并网运行的情况下选择孤网运行状态,在并网运行状态下满足微电网系统内所有用电设备的用电需求,以微电网系统的运行成本最少为目标,通过对下列并网运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的调度参数:

并网运行目标函数为:

$$\min C = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{open,i}(t) + C_{OM,i}(P_i(t)) + C_{DP,i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [C_{OM,k}(P_k(t)) + C_{DP,k}(P_k(t))] + \sum_{t=1}^T [C_{buy} \times P_{buy}(t) - C_{sell} \times P_{sell}(t)]$$

在孤网长期运行状态下,保持储能装置剩余电量的正常波动范围,以微电网系统的运行成本最少为目标,通过对下列孤网长期运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的长期运行调度参数,保证微电网系统内一级负荷的用电需求:

孤网长期运行目标函数为:

$$\min C = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{open,i}(t) + C_{OM,i}(P_i(t)) + C_{DP,i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [C_{OM,k}(P_k(t)) + C_{DP,k}(P_k(t)) + C_{PUMSH,k}] + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_l(P_l(t)) \times U_l(t)] \\ + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{L_i} [U_l(t) \times a_{l1} \times (T-t)]$$

在孤网短期运行的情况下,先将储能装置作为电源投入供电,保证所有负荷不断电直到电源电量不足,在出现电源电量不足的情形后,通过对下列孤网短期运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的短期运行调度参数:

孤网短期运行目标函数为:

$$\min C = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{open,i}(t) + C_{OM,i}(P_i(t)) + C_{DP,i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [C_{OM,k}(P_k(t)) + C_{DP,k}(P_k(t))] + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_l(P_l(t)) \times U_l(t)] \\ + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{L_i} [U_l(t) \times a_{l1} \times (T-t)]$$

其中,C为微电网系统的运行成本, $P_i(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻的输出功率, $C_i(P_i(t))$ 为可控电源 i 的 t 时刻的燃料成本,所述可控电源包括微型燃气轮机、柴油机和燃料电池;

$S_i(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻的启动成本; $U_{open,i}(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻 0、1 开机决策变量,0 表示非启动,1 表示启动;

$C_{OM,i}(P_i(t))$ 、 $C_{DP,i}(P_i(t))$ 、 $C_e(P_i(t))$ 分别为可控电源 i 的 t 时刻的维护成本、折旧成本和环境成本;

$P_k(t)$ 为蓄电池 k 的 t 时刻的输出功率, $C_{OM,k}(P_k(t))$ 、 $C_{DP,k}(P_k(t))$ 分别为蓄电池 k 的 t 时刻的维护成本和折旧成本;

C_{buy} 、 C_{sell} 分别为微电网从外部购电和向外部售电的电价； $P_{buy}(t)$ 、 $P_{sell}(t)$ 分别为微电网 t 时刻从外部购电和向外部售电的功率；

$C_{PMSH,t}$ 为蓄电池周期不平衡罚函数；

$P_1(t)$ 为 t 时刻负荷节点 1 的负荷， $C_1(P_1(t))$ 为负荷节点 1 的切负荷费用函数， $U_1(t)$ 为负荷节点 1 的切负荷 0、1 决策变量，0 表示不切负荷，1 表示切负荷；

$U_{1_1}(t)$ 为一级负荷 1_1 的切负荷 0、1 决策变量，0 表示不切负荷，1 表示切负荷， α_{1_1} 为一级负荷节点 1_1 的罚函数的系数；

α_1 为负荷节点 1 的罚函数的系数；

I 为可控电源的数量； K 为蓄电池的数量； T 、 T' 为一个调度周期内的优化时段数， L 为可中断负荷的负荷节点个数， L_1 表示一级负荷节点的个数。

2. 如权利要求 1 所述的微电网系统的经济调度方法，其特征在于：

所述微型燃气轮机的燃料成本函数为：

$$C_{MGT} = (C_{nt} / C_{cal}) \sum \frac{P_{MGT}(t) \Delta t}{\eta_{MGT}(t)} ;$$

其中， C_{nt} 是天然气价格； C_{cal} 为天然气的热值； $P_{MGT}(t)$ 是微型燃气轮机 t 时刻的输出功率； $\eta_{MGT}(t)$ 是微型燃气轮机 t 时刻的发电效率；

所述柴油机的燃料成本函数为：

$$C_{DG} = \sum (a + bP_{DG}(t) + cP_{DG}^2(t)) \Delta t ;$$

其中，a、b、c 分别为成本函数的系数，由厂家提供或者拟合得到； $P_{DG}(t)$ 是柴油机 t 时刻的输出功率；

所述燃料电池的燃料成本函数为：

$$C_{FC} = (C_{nt} / C_{cal}) \sum \frac{P_{FC}(t) \Delta t}{\eta_{FC}(t)} ;$$

其中， $P_{FC}(t)$ 是燃料电池 t 时刻的输出功率； $\eta_{FC}(t)$ 是燃料电池 t 时刻的发电效率。

3. 如权利要求 2 所述的微电网系统的经济调度方法，其特征在于：

所述可控电源 i 的 t 时刻的维护成本 $C_{OM,i}(P_i(t)) = K_{OM,i} P_i(t) \Delta t$ ，

其中， $K_{OM,i}$ 为可控电源 i 的单位电量运行维护成本系数， Δt 为一个时段的时长；

所述可控电源 i 的 t 时刻的折旧成本 $C_{DE,i}(P_i(t)) = \frac{C_{as,i}}{8760k_i n_i} P_i(t) \Delta t$ ，

其中， $C_{as,i}$ 为可控电源 i 的单位容量安装成本的现值； k_i 为可控电源 i 的容量因数； n_i 为可控电源 i 的使用年限；

所述可控电源 i 的 t 时刻的环境成本 $C_e(P_i(t)) = \sum_{j=1}^m (V_j Q_j P_i(t) \Delta t)$ ，

其中， V_j 为第 j 项污染物的单位排放费用； Q_j 为可控电源 i 的单位电量的第 j 项污染物排放量；m 为污染物的种类数；

所述蓄电池 k 的 t 时刻的维护成本 $C_{\text{OM},k}(P_k(t)) = K_{\text{OM},k} |P_k(t)| \Delta t$,

其中, $K_{\text{OM},k}$ 为蓄电池 k 的单位电量运行维护成本系数;

所述蓄电池 k 的 t 时刻的折旧成本

$$C_{\text{DP},k}(P_k(t)) = (E_{\text{rated},k} \cdot C_{E,k} + P_{\text{rated},k} \cdot C_{P,k}) \cdot L_{\text{loss},k},$$

其中, $E_{\text{rated},k}$ 、 $P_{\text{rated},k}$ 分别为蓄电池 k 的额定容量和额定功率, $C_{E,k}$ 、 $C_{P,k}$ 分别为蓄电池 k 的单位容量安装成本的现值和单位功率安装成本的现值; $L_{\text{loss},k}$ 为蓄电池 k 的寿命损耗系数, 其值为蓄电池一个周期累积的能量吞吐量与蓄电池寿命内总能量吞吐量之比;

所述蓄电池周期不平衡罚函数

$$C_{\text{PUNISH},k} = \begin{cases} b_k \times (\text{SOC}_k(1) + \Delta \text{SOC}_k - \text{SOC}_k(T)) & \text{if } (\text{SOC}_k(1) + \Delta \text{SOC}_k > \text{SOC}_k(T)) \\ 0 & \text{if } (\text{SOC}_k(1) + \Delta \text{SOC}_k \leq \text{SOC}_k(T)) \end{cases};$$

式中, b_k 为罚函数的系数; $\text{SOC}_k(1)$ 、 $\text{SOC}_k(T)$ 分别表示蓄电池 k 的 SOC 初始值和一个调度周期后的值, ΔSOC_k 为程序设置的一个调度周期后 SOC_k 的增加量, 如果蓄电池 SOC_k 状态良好, 可以将 ΔSOC_k 设为 0;

所述负荷节点 1 的切负荷费用函数 $C_1(R_1(t)) = C_{1_cut} \cdot R_1(t)$,

其中, C_{1_cut} 为切负荷节点 1 时单位电能的经济损失惩罚系数。

4. 如权利要求 3 所述的微电网系统的经济调度方法, 其特征在于:

每种经济调度模式下均设有与相应目标函数配套的约束条件,

并网运行目标函数对应的所述约束条件包括功率平衡约束、备用约束、可控电源输出功率约束、可控电源运行状态变量与启停变量约束、可控电源最小停运时间和运行时间约束、可控电源爬坡率约束、蓄电池荷电状态约束、蓄电池功率范围约束、同一蓄电池组充放电互斥约束、不同蓄电池组充放电互斥约束、微电网与大电网间功率最大容量约束、购电与售电互斥约束和蓄电池周期储能平衡约束;

孤网长期运行目标函数对应的所述约束条件包括功率平衡约束、备用约束、可控电源输出功率约束、可控电源运行状态变量与启停变量约束、可控电源最小停运时间和运行时间约束、可控电源爬坡率约束、蓄电池荷电状态约束、蓄电池功率范围约束、同一蓄电池组充放电互斥约束、不同蓄电池组充放电互斥约束和蓄电池周期储能平衡约束;

孤网短期运行目标函数对应的所述约束条件包括功率平衡约束、备用约束、可控电源输出功率约束、可控电源运行状态变量与启停变量约束、可控电源最小停运时间和运行时间约束、可控电源爬坡率约束、蓄电池荷电状态约束、蓄电池功率范围约束、同一蓄电池组充放电互斥约束和不同蓄电池组充放电互斥约束。

5. 如权利要求 4 所述的微电网系统的经济调度方法, 其特征在于:

并网运行目标函数对应的所述功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^I P_i(t) + \sum_{k=1}^K P_k(t) + P_w(t) + P_p(t) + P_{\text{buy}}(t) - P_{\text{sell}}(t) = P_d(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad t=1, 2, \dots, T;$$

孤网长期运行目标函数和孤网短期运行目标函数对应的所述功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^I P_i(t) + \sum_{k=1}^K P_k(t) + P_w(t) + P_p(t) = P_d(t) - \sum_{l=1}^L P_l(t) \cdot U_l(t) + P_{loss}(t) \quad t=1,2,\dots,T;$$

其中, $P_w(t)$ 、 $P_p(t)$ 分别为 t 时刻风电输出功率和 t 时刻太阳能发电输出功率, $P_d(t)$ 为 t 时刻微电网的负荷需求功率, $P_{loss}(t)$ 为 t 时刻微电网的线损功率, $P_{loss}(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m P_m(t)$ $t=1,2,\dots,T$, $P_m(t)$ 为 t 时刻流过线路 m 的功率, α_m 为线路 m 的线损系数, M 为微电网支路总数;

并网运行目标函数对应的所述备用约束为:

$$\sum_{i=1}^I \min(U_i(t) \cdot \bar{P}_i - P_i(t), \Delta_{up,i}) + \sum_{k=1}^K \min\left(\frac{\bar{E}_k - E_k(t)}{\Delta T} \cdot \eta_{dk,k} \cdot \bar{P}_{dk,k} - P_k(t)\right);$$

$$+ \bar{P}_{buy} - P_{buy}(t) + P_{sell}(t) \geq R_s(t) \quad t=1,2,\dots,T$$

此约束中, 不等式左边为系统旋转备用的值, 分别为可控机组、蓄电池和联网的旋转备用值, $R_s(t)$ 为系统所需旋转备用;

孤网长期运行目标函数和孤网短期运行目标函数对应的所述备用约束为:

$$\sum_{i=1}^I \min(U_i(t) \cdot \bar{P}_i - P_i(t), \Delta_{up,i}) + \sum_{k=1}^K \min\left(\frac{\bar{E}_k - E_k(t)}{\Delta T} \cdot \eta_{dk,k} \cdot \bar{P}_{dk,k} - P_k(t)\right);$$

$$\geq R_s(t) \quad t=1,2,\dots,T$$

其中, $U_i(t)$ 为可控电源 i 的运行状态, 0 表示停运, 1 表示运行; \bar{P}_i 为可控电源 i 的输出功率上限, $\Delta_{up,i}$ 为可控电源 i 的最大向上爬坡率, \bar{E}_k 、 $E_k(t)$ 分别为蓄电池剩余能量的上限、蓄电池 k 在 t 时刻的剩余能量, $\eta_{dk,k}$ 为蓄电池 k 的放电效率, $\bar{P}_{dk,k}$ 为蓄电池 k 的最大放电功率, \bar{P}_{buy} 为允许微电网向大电网购电功率的最大值, $R_s(t)$ 为 t 时刻微电网的旋转备用功率需求;

所述可控电源输出功率约束为:

$$\underline{P}_i U_i(t) \leq P_i(t) \leq \bar{P}_i U_i(t);$$

其中, \underline{P}_i 、 \bar{P}_i 分别表示可控电源 i 的输出功率下限和输出功率上限;

所述可控电源运行状态变量与启停变量约束为:

$$U_i(t) - U_i(t-1) = U_{open,i}(t-1) - U_{close,i}(t-1);$$

$$U_{open,i}(t) + U_{close,i}(t) \leq 1;$$

其中, $U_{close,i}(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻 0、1 关机决策变量, 0 表示非停机, 1 表示停机操作;

所述可控电源最小停运时间和运行时间约束为:

$$U_{open,i}(t) + \sum_{t'=t+1}^{\min(T, t+MOT_i)} U_{close,i}(t') \leq 1;$$

$$U_{close,i}(t) + \sum_{t'=t+1}^{\min(T, t+MOT_i)} U_{open,i}(t') \leq 1;$$

其中, MCT_i 为可控电源 i 的最小开机持续时间; MCT_i 为可控电源 i 的最小关机持续时间; T 为调度时间周期,

所述可控电源爬坡率约束为:

$$-\Delta_{down,i} \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq \Delta_{up,i};$$

其中, $\Delta_{down,i}$ 为可控电源 i 的最大向下爬坡率;

所述蓄电池荷电状态约束为:

$$SOC_k \leq SOC_k(t) \leq \overline{SOC}_k;$$

其中, $SOC_k(t)$ 为蓄电池 k 的 t 时刻的剩余电量, SOC_k 、 \overline{SOC}_k 分别为蓄电池 k 剩余电量最小值和最大值;

所述蓄电池功率范围约束为:

$$-\bar{P}_{dk,k} < P_k(t) < \bar{P}_{ck,k};$$

其中 $\bar{P}_{ck,k}$ 、 $\bar{P}_{dk,k}$ 分别为蓄电池 k 的最大充电功率和最大放电功率;

所述同一蓄电池组充放电互斥约束为:

$$U_{dk,k}(t) + U_{ck,k}(t) \leq 1;$$

其中, $U_{dk,k}(t)$ 为蓄电池 k 的放电状态 0、1 决策变量, 0 表示非放电状态, 1 表示放电状态, $U_{ck,k}(t)$ 为蓄电池 k 的充电状态 0、1 决策变量, 0 表示非充电状态, 1 表示充电状态;

所述不同蓄电池组充放电互斥约束为:

$$\sum_{k=1}^K U_{dk,k}(t) \leq K \times e_{dk,k}(t),$$

$$U_{ck,k}(t) \leq K \times (1 - e_{dk,k}(t)),$$

$$\sum_{k=1}^K U_{ck,k}(t) \leq K \times e_{ck,k}(t),$$

$$U_{dk,k}(t) \leq K \times (1 - e_{ck,k}(t)),$$

其中, $e_{dk,k}(t)$ 、 $e_{ck,k}(t)$ 为辅助 0、1 变量, $e_{dk,k}(t)$ 为 0 表示无法放电, 1 表示无法充电, $e_{ck,k}(t)$ 为 0 表示无法充电, 1 表示无法放电;

所述微电网与大电网间功率最大容量约束为:

$$0 \leq P_{buy}(t) \leq \bar{P}_{buy} \times U_{buy}(t),$$

$$0 \leq P_{sell}(t) \leq \bar{P}_{sell} \times U_{sell}(t),$$

其中, \bar{P}_{sell} 为允许微电网向大电网售电功率的最大值, $U_{buy}(t)$ 为 t 时段微电网向大电网购电的 0、1 决策变量, 0 表示不购电, 1 表示购电, $U_{sell}(t)$ 为 t 时段微电网向大电网售电的 0、1 决策变量, 0 表示不售电, 1 表示售电;

所述购电与售电互斥约束为:

$$U_{buy}(t) + U_{sell}(t) \leq 1,$$

并网运行目标函数对应的所述蓄电池周期储能平衡约束为：

$$SOC_k(1) + \Delta SOC_k = SOC_k(T),$$

孤网长期稳定运行目标函数对应的所述蓄电池周期储能平衡约束为：

$$SOC_k(1) + \Delta SOC_k = SOC_k(T) + \Delta SOC_{\text{planish}k},$$

ΔSOC_k 为蓄电池 k 预设的调度后剩余电量增加量, $SOC_k(1)$ 、 $SOC_k(T)$ 分别为蓄电池 k 的 SOC 初始值和一个调度周期后的值; $\Delta SOC_{\text{planish}k}$ 为蓄电池 k 一个调度周期后计划外的剩余电量减少量。

6. 如权利要求 5 所述的微电网系统的经济调度方法, 其特征在于风电输出功率的求解模型为：

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \text{ or } v > v_{co} \\ \frac{P_{\text{rated_WT}}(v - v_{ci})}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_{\text{rated_WT}} & v_r < v \leq v_{co} \end{cases};$$

其中, v 为风速; v_{ci} 、 v_{co} 、 v_r 分别为切入风速、切出风速和额定风速; $P_{\text{rated_WT}}$ 为风机额定功率;

太阳能发电输出功率的求解模型为：

$$P_{PV} = P_{\text{src}} \frac{G_s}{G_{\text{src}}} [1 + k_{TC}(T_s - T_{\text{src}})];$$

其中, G_{src} 、 T_{src} 分别为标准测试条件中的太阳辐射照度和电池温度; G_s 为工作点的太阳辐射照度; T_s 为工作点的电池温度; P_{src} 为标准测试条件下的光伏额定发电功率; k_{TC} 为功率温度系数。

7. 如权利要求 6 所述的微电网系统的经济调度方法, 其特征在于: 所述线损系数 α_n 采用前推回代三相潮流计算方法得到。

8. 如权利要求 7 所述的微电网系统的经济调度方法, 其特征在于：

蓄电池的剩余能量计算公式为：

$$E(t) = E(t-1)(1 - \alpha) - P_{\text{ch}}(t)\Delta t / \eta_{\text{ch}} + P_{\text{dis}}(t)\Delta t \eta_{\text{dis}};$$

其中, $E(t)$ 、 $E(t-1)$ 分别为 t、t-1 时段末的蓄电池剩余能量; $P_{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{\text{dis}}(t)$ 分别为蓄电池的充电功率和放电功率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别是蓄电池的充电效率和放电效率; α 是蓄电池的自放电率。

9. 如权利要求 1、2、3、4、5、6、7 或 8 所述的微电网系统的经济调度方法, 其特征在于将所述可控电源的燃料成本所基于的成本函数 $C(P)$ 进行分段线性化处理,

得到分段线性函数 $P = \sum_{s=1}^{n+1} z_s P_s$ 以及 $C(P) = \sum_{s=1}^{n+1} z_s C(P_s)$, 其中, P_1 、 P_2 、……、 P_n 、 P_{n+1} 为费用曲线 n 个分段的共 n+1 个分点, $P_1 \leq P_2 \leq \dots \leq P_n \leq P_{n+1}$, y_s 为 0、1 变量, z_s 与 y_s 满足

$$\begin{cases} z_1 \leq y_1, z_2 \leq y_1 + y_2, \dots, z_n \leq y_{n-1} + y_n, z_{n+1} \leq y_n \\ y_1 + y_2 + \dots + y_n = 1, y_s = 0, 1 \\ z_1 + z_2 + \dots + z_n = 1, z_s \geq 0 (s = 1, 2, \dots, n+1) \end{cases}, z_s \text{ 与 } y_s \text{ 为辅助变量, 此式保证对成本函数的分段的}$$

合理与唯一,

目标函数求解时, 其中的可控电源的燃料成本基于分段线性化处理后的 $C'(P)$ 进行。

10. 如权利要求 1、2、3、4、5、6、7、8 或 9 所述的微电网系统的经济调度方法, 其特征在于求解过程中采用按时间分层求解, 即将上一层的单位调度时段作为下一层的调度周期, 并将下一层的调度周期再划分成若干调度时段, 先求解上层优化问题, 将上层优化问题的求解结果作为下层优化问题的初始条件, 再求解下层优化问题, 所有下层优化问题都求解完后即得出最终的优化结果。

微电网系统的经济调度方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种微电网能量调度优化方法,涉及微电网能量管理技术领域,适用于微电网能量管理的日前经济调度。

背景技术

[0002] 随着能源危机加剧和环境污染日益严重,微电网作为一种新型能源网络化供应和管理技术,受到越来越多的关注。随着微电网工程的不断发展完善,微电网能量管理系统成为微电网研究的重点。

[0003] 微电网能量管理系统是针对微电网的智能控制系统,其能优化分布式电源的功率分配,并使系统经济安全的运行。作为微电网能量管理的核心部分,其调度优化模型的设计对微电网能量管理的效果起着至关重要的作用。如何选择算法快速准确的求解考虑各种复杂约束条件的调度优化问题均给该课题带来较大的挑战。解决这一系列问题将提高能量的利用效率,减少微电网系统的运营成本,具有较好的社会效益。

[0004] 现阶段,一些微电网调度优化的研究建立了线性的调度模型,但是这种模型过于粗糙,不利于深入研究。当前大多数模型建立的是非线性优化模型,一般采用粒子群算法、蚁群算法、遗传算法等智能优化算法求解。随着规模的增加,智能算法往往不容易收敛并且求解速度较慢。同时,当前模型一般只适用于少数微电网算例,模型的适用性有待提高。

发明内容

[0005] 为了克服现有技术下的上述缺陷,本发明的目的在于提供一种微电网系统的经济调度方法,该方法设定了多种调度模式,可以根据不同类型的微电网按需选择,因此具有很强的适用性,且由于求解速度的改进使得该方法尤其可适用于大型的微电网。

[0006] 本发明的技术方案是:

一种微电网系统的经济调度方法:

选择微电网系统的运行状态,在适于与大电网并网运行的情况下选择与大电网并网的并网运行状态,在不适于与大电网并网运行的情况下选择孤网运行状态,在并网运行状态下满足微电网系统内所有用电设备的用电需求,以微电网系统的运行成本最少为目标,通过对下列并网运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的调度参数:

并网运行目标函数为:

$$\min C = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{open,i}(t) + C_{Oil,i}(P_i(t)) + C_{DP,i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^T [C_{Oil,k}(P_k(t)) + C_{DP,k}(P_k(t))] + \sum_{l=1}^T [C_{buy} \times P_{buy}(t) - C_{sell} \times P_{sell}(t)]$$

在孤网长期运行状态下,保持储能装置剩余电量的正常波动范围,(通常应使储能装置的剩余电量与调度前基本一致),以微电网系统的运行成本最少为目标,通过对下列孤网长期运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的长期运行调度参数,保证微电网系统内

一级负荷的用电需求：

孤网长期运行目标函数为：

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{\text{open},i}(t) + C_{\text{OM},i}(P_i(t)) + C_{\text{DP},i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [C_{\text{OM},k}(P_k(t)) + C_{\text{DP},k}(P_k(t)) + C_{\text{PUNISH},k}] + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L [C_l(P_l(t)) \times U_l(t)] , \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^{L_1} [U_{l_1}(t) \times a_{l_1} \times (T-t)] \end{aligned}$$

在孤网短期运行的情况下，先将储能装置作为电源投入供电，保证所有负荷不断电直到电源电量不足，在出现电源电量不足的情形后，通过对下列孤网短期运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的短期运行调度参数：

孤网短期运行目标函数为：

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{\text{open},i}(t) + C_{\text{OM},i}(P_i(t)) + C_{\text{DP},i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [C_{\text{OM},k}(P_k(t)) + C_{\text{DP},k}(P_k(t))] + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L [C_l(P_l(t)) \times U_l(t)] , \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^{L_1} [U_{l_1}(t) \times a_{l_1} \times (T-t)] \end{aligned}$$

其中， C 为微电网系统的运行成本， $P_i(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻的输出功率， $C_i(P_i(t))$ 为可控电源 i 的 t 时刻的燃料成本，所述可控电源包括微型燃气轮机、柴油机和燃料电池；

$S_i(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻的启动成本； $U_{\text{open},i}(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻0、1 开机决策变量，0 表示非启动（保持原启停状态或者停机），1 表示启动；

$C_{\text{OM},i}(P_i(t))$ 、 $C_{\text{DP},i}(P_i(t))$ 、 $C_e(P_i(t))$ 分别为可控电源 i 的 t 时刻的维护成本、折旧成本和环境成本；

$P_k(t)$ 为蓄电池 k 的 t 时刻的输出功率， $C_{\text{OM},k}(P_k(t))$ 、 $C_{\text{DP},k}(P_k(t))$ 分别为蓄电池 k 的 t 时刻的维护成本和折旧成本；

C_{buy} 、 C_{sell} 分别为微电网从外部购电和向外部售电的电价； $P_{\text{buy}}(t)$ 、 $P_{\text{sell}}(t)$ 分别为微电网 t 时刻从外部购电和向外部售电的功率；

$C_{\text{PUNISH},k}$ 为蓄电池周期不平衡罚函数；

$P_l(t)$ 为 t 时刻负荷节点 l 的负荷， $C_l(P_l(t))$ 为负荷节点 l 的切负荷费用函数， $U_l(t)$ 为负荷节点 l 的切负荷0、1 决策变量，0 表示不切负荷，1 表示切负荷；

$U_{l_1}(t)$ 为一级负荷 l_1 的切负荷0、1 决策变量，0 表示不切负荷，1 表示切负荷， a_{l_1} 为一级负荷节点 l_1 的罚函数的系数；

a_l 为负荷节点 l 的罚函数的系数；

I 为可控电源的数量； K 为蓄电池的数量； T 、 T' 为一个调度周期内的优化时段数， L 为可中断负荷的负荷节点个数， L_1 表示一级负荷节点的个数。

[0007] 本发明的有益效果为：

由于对微电网的各类电源分别进行了分类归纳,对不同类型的电源分别建模,由此可以将微电网大部分电源纳入日前经济调度模型中,且新增元件也很简单,因此具有很强的适用性。

[0008] 由于模型中综合考虑了设备折旧费用、燃料费用、维护费用、启停费用、环保费用等设备运行成本及购售电成本、切负荷成本、线路损耗成本等,同时满足了功率平衡、备用、爬坡率、出力上下限、最小启停时间、蓄电池容量上下限、蓄电池充放电功率上下限、蓄电池周期充放电总能量、购售电功率上限等约束条件,比现有技术下的调度方法更贴近微电网的实际需求,由此建立起的微电网日前经济调度模型也更为完善。

[0009] 由于设定了并网经济运行模式、孤网长期稳定运行模式和孤网短期运行模式等不同模式,可以按需选择,以适应不同条件下的微电网要求,扩大了本调度方法的适用范围。

[0010] 由于模型求解过程中采用了按时间分层求解的优化求解方法,可以根据需要设置不同时间尺度,获得很短时间范围(自由设定,例如可以为 10min 或者 15min 等)的求解结果,因此可以显著提高调度的精度。

[0011] 由于引入了采用前推回代法的三相潮流计算方法,可以在三相不平衡的情况下计算微电网的潮流,得出微电网的线损,计算出微电网平均线损系数。

[0012] 由于应用了分段线性化的处理方法将非线性问题转化为线性问题,并引入了 0、1 决策变量,将约束中的二次约束转换为一次约束,使微电网日前经济调度模型更易于求解。

[0013] 在应用混合整数线性规划算法对微电网日前经济调度模型进行求解的基础上,加入按时间分层优化的方法,很好地同时保证了计算的准确性和快速性。

附图说明

[0014] 图 1 是费用曲线线性化示意图;

图 2 是配电网前推回代法流程图;

图 3 是分层优化的时间周期对应关系;

图 4 是分层优化流程图;

图 5 是微电网结构图;

图 6 是微电网典型日负荷曲线;

图 7 是光伏出力典型场景;

图 8 是预测误差 5% 时,光伏预测出力曲线;

图 9 是模式一下软件计算的理论调度结果(并网);

图 10 是模式一下实际运行的调度结果(并网);

图 11 是采用现有调度方法的实际调度结果(并网);

图 12 是模式二下软件计算的理论切负荷结果(孤网长期);

图 13 是模式二下软件计算的理论调度结果(孤网长期);

图 14 是模式二下实际运行的切负荷结果(孤网长期);

图 15 是模式二下实际运行的调度结果(孤网长期);

图 16 是模式三下软件计算的理论切负荷结果(孤网短期);

图 17 是模式三下软件计算的理论调度结果(孤网短期);

图 18 是模式三下实际运行的切负荷结果(孤网短期);

图 19 是模式三下实际运行的调度结果(孤网短期)；

图 20 是采用现有调度方法的实际切负荷结果(孤网)；

图 21 是采用现有调度方法的实际调度结果(孤网)。

具体实施方式

[0015] 本发明涉及一种基于混合整数线性分层规划的微电网系统的经济调度方法,是以微电网系统运行成本最低为控制目标,根据调度时刻所述微电网系统处于的不同运行状态,选择采用适宜的调度模式。具体而言,在适于与大电网并网运行的情况下选择与大电网并网的并网运行状态,在不适于与大电网并网运行的情况下选择孤网运行状态,在并网运行状态下满足微电网系统内所有用电设备的用电需求,并网运行状态下,以微电网系统的运行成本最少为目标,通过对并网运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的调度参数;在孤网长期运行状态下,保持储能装置剩余电量的正常波动范围,以微电网系统的运行成本最少为目标,通过对孤网长期运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的长期运行调度参数,保证微电网系统内一级负荷的用电需求;在孤网短期运行的情况下,先将储能装置作为电源投入供电,保证所有负荷不断电直到电源电量不足,在出现电源电量不足的情形后,通过对孤网短期运行目标函数的运行成本最小化求解获得相应的短期运行调度参数。

[0016] 所述目标函数的构建直至求解包括以下步骤:

步骤一:建立微电网中不同电源、储能的调度模型;

步骤二:建立并网运行与孤网运行下多个优化调度模型,包括并网经济运行模式、孤网长期稳定运行模式和孤网短期运行模式下的目标函数;

步骤三:对各模型进行线性化处理,使求解问题转化为混合整数线性规划问题;

步骤四:应用前推回代法,计算微电网的三相潮流,得到线路损耗的系数;

步骤五:建立按时间分层的微电网调度优化模型;

步骤六:根据微电网的特点和运行要求,选择相应模式下的目标函数及对应的约束条件,进行优化求解。

[0017] 下面是对上述各步骤的详细介绍。

[0018] 步骤一:建立微电网不同电源、储能装置的调度模型。微电网的电源主要包括传统的完全可控机组(包括微型燃气轮机、燃料电池、柴油机等常规机组(或称为可控电源))、新能源机组(包括风电、光伏等),以及储能装置(包括各类蓄电池、超级电容等)。每组中相应设备的数量可能是单数也可能是多数,目标函数中以相应设备组为单位,但名称上不限制是否有“组”字样。对上述不同类型的电源分别建模,由此可以将微电网大部分电源纳入调度优化模型中。它们各自的模型如下:

1) 风机模型:

风机的出力与风速的关系可以由式(1)近似表示:

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{cl} \text{ or } v \geq v_{co} \\ \frac{P_{rated_WT}(v - v_{cl})}{v_r - v_{cl}} & v_{cl} \leq v \leq v_r \\ P_{rated_WT} & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

其中, v 为风速, v_{in} 、 v_{out} 、 v_r 分别为切入风速、切出风速和额定风速; P_{rated_WT} 为风机额定功率。

[0019] 2) 光伏发电模型:

在标准测试条件下, 光伏发电的出力可以由式(2)表示:

$$P_{PV} = P_{src} \frac{G_e}{G_{src}} [1 + k_{rc}(T_e - T_{src})] \quad (2)$$

其中, G_{src} 、 T_{src} 分别为标准测试条件中的太阳辐射照度和电池温度; G_e 为工作点的太阳辐射照度; T_e 为工作点的电池温度; P_{src} 为标准测试条件下的光伏额定发电功率; k_{rc} 为功率温度系数。

[0020] 3) 微型燃气轮机模型:

微型燃气轮机的燃料成本函数如下:

$$C_{MR} = (C_{nr} / C_{cal}) \sum_t \frac{P_{MR}(t) \Delta t}{\eta_{MR}(t)} \quad (3)$$

其中 C_{nr} 是天然气价格; C_{cal} 为天然气的热值; $P_{MR}(t)$ 是微型燃气轮机 t 时刻的输出功率; $\eta_{MR}(t)$ 是微型燃气轮机 t 时刻的发电效率。

[0021] 4) 燃料电池模型:

燃料电池发电的燃料成本函数与微型燃气轮机的相似, 成本函数如下:

$$C_{FC} = (C_{nr} / C_{cal}) \sum_t \frac{P_{FC}(t) \Delta t}{\eta_{FC}(t)} \quad (4)$$

其中, C_{nr} 是天然气价格; C_{cal} 为天然气的热值; $P_{FC}(t)$ 是 t 时刻燃料电池的输出功率; $\eta_{FC}(t)$ 是时刻 t 的燃料电池发电效率。

[0022] 5) 柴油机模型:

柴油发电机的燃料成本与传统火力发电类似, 可以表示为柴油发电机的输出功率的二次多项式, 其燃料成本可以用下式表示:

$$C_{DG} = \sum_t (a + bP_{DG}(t) + cP_{DG}^2(t)) \Delta t \quad (5)$$

其中, a 、 b 、 c 分别为费用函数的系数, 可以由厂家提供或者拟合得到; $P_{DG}(t)$ 是柴油发电机 t 时刻的输出功率。

[0023] 6) 蓄电池模型:

(1) 蓄电池在 t 时刻的剩余能量跟其前一个时刻即 $t - \Delta t$ 时刻的剩余能量以及其从 $t - \Delta t$ 时刻到 t 时刻的充放电有关, 在充放电的过程中, 蓄电池的剩余能量计算公式为:

$$E(t) = E(t-1)(1 - \sigma) - P_{ch}(t) \Delta t / \eta_{ch} + P_{dis}(t) \Delta t \eta_{dis} \quad (6)$$

其中 $E(t)$ 、 $E(t-1)$ 分别为 t 、 $t-1$ 时刻末的蓄电池剩余能量(kWh); $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 分别为蓄电池的充电功率和放电功率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别是蓄电池的充电效率和放电效率; σ 是蓄电池的自放电率。

[0024] (2) 蓄电池的剩余电量有约束, 超过约束就可能会导致的电池的损坏, 蓄电池的剩余电量约束如下:

$$\underline{SOC} \leq SOC(t) \leq \overline{SOC} \quad (7)$$

其中 \underline{SOC} 、 \overline{SOC} 分别是蓄电池最小和最大容许剩余电量， $SOC(t)$ 是蓄电池 t 时刻的剩余电量。

[0025] (3) 蓄电池的充放电功率同样有限制，超过限制也会造成损坏，充放电功率的上下限约束表达如下：

$$-\bar{P}_{ch} < P(t) < \bar{P}_{dk} \quad (8)$$

其中， \bar{P}_{ch} 、 \bar{P}_{dk} 分别表示蓄电池的最大充电功率和最大放电功率。

[0026] (4) 蓄电池的寿命模型

蓄电池的寿命一般是由厂家给出的不同放电深度下的循环次数来表示，蓄电池总的循环次数函数如下：

$$N = a_1 + a_2 \cdot e^{-a_3 \cdot DOD} + a_4 \cdot e^{-a_5 \cdot DOD} \quad (9)$$

其中，DOD 是蓄电池的放电深度； a_1 - a_5 是由生产厂家提供的参数。

[0027] 但是，蓄电池通常会频繁的充放电，不能保证每次的放电深度都是一样的，给计算循环次数带来难度。

[0028] 吞吐量法是针对蓄电池运行中循环次数难以统计而提出的简单易行的寿命预测方法，其寿命的计算公式如下：

$$E_{throughput} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{rated} \cdot DOD_i \cdot N_i}{n} \quad (10)$$

其中， $E_{throughput}$ 为蓄电池寿命内总的能量吞吐量； E_{rated} 为蓄电池的额定容量； n 为对蓄电池的不同放电深度测试的个数。

[0029] 其中，不同放电深度的循环次数和对应的总能量吞吐量由厂家给出。

[0030] 假设蓄电池总的能量吞吐量为一定值，则寿命损耗系数公式如下：

$$L_{loss} = \frac{E_{loss}}{E_{throughput}} \quad (11)$$

其中， E_{loss} 为计算周期内蓄电池的能量吞吐量，如式(12)所示：

$$E_{loss} = \int_{t=0}^T |P(t)| dt \quad (12)$$

其中， $P(t)$ 是蓄电池 t 时刻的充电或放电功率；

吞吐量法可以粗略的计算出蓄电池的使用寿命。

[0031] 步骤二：构造不同模式下的目标函数和约束条件。建立全面的微电网日前经济调度模型，可以通过修改参数来选择不同的模式，典型模式为以下三个模式：

模式一：并网运行，运行成本最小

本节以费用最少为目标，综合考虑系统和各微源的约束条件，建立了在并网条件下的微电网日前经济调度模型。

[0032] 目标函数：

并网条件下微电网模型的目标函数如式(13)所示：

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{open,i}(t) + C_{OM,i}(P_i(t)) + C_{DP,i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [C_{OM,k}(P_k(t)) + C_{DP,k}(P_k(t))] + \sum_{t=1}^T [C_{buy} \times P_{buy}(t) - C_{sell} \times P_{sell}(t)] \end{aligned} \quad (13)$$

$C_i(P_i(t))$ 为可控电源燃料成本函数,包括微型燃气轮机、柴油机和燃料电池; $U_i(t)$:表示 t 时刻可控电源运行的 0、1 决策变量,0 表示不运行,1 表示运行; $S_i(t)$:可控电源启动成本; $U_{open,i}(t)$: t 时刻可控电源启动的 0、1 决策变量,0 表示非启动(保持原启停状态或者停机),1 表示启动; $C_{OM,i}(P_i(t))$ 、 $C_{DP,i}(P_i(t))$ 、 $C_e(P_i(t))$:分别表示可控机组的维护费用、折旧成本和环境成本; $C_{OM,k}$ 、 $C_{DP,k}(P_k(t))$:分别表示储能装置的维护费用、折旧成本; C_{buy} 、 C_{sell} :分别表示微电网从外部购电和售电的电价; $P_{buy}(t)$ 、 $P_{sell}(t)$:分别表示微电网从外部购电和售电的功率。

[0033] 式中的可控机组维护费用、折旧成本和环境成本的函数见式(14)–(16):

$$C_{OM,i}(P_i(t)) = K_{OM,i} \cdot P_i(t) \cdot \Delta t \quad (14)$$

$$C_{DP,i}(P_i(t)) = \frac{C_{as,i}}{8760k_i n_i} \cdot P_i(t) \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$C_e(P_i(t)) = \sum_{j=1}^m (V_j \cdot Q_{ij} \cdot P_i(t) \cdot \Delta t) \quad (16)$$

其中, $C_{as,i}$ 为第 i 个可控电源的单位容量安装成本的现值(本文费用都折算到现值); k_i 为第 i 个微源的容量因数; n_i 为第 i 个微源的使用年限; $K_{OM,i}$ 为第 i 个微源的单位电量运行维护成本系数; V_j 为第 j 项污染物的单位排放费用; Q_{ij} 为第 i 个微源单位电量的第 j 项污染物排放量; m 为污染物的种类; Δt 为一个时段的时长。

[0034] 式中的储能装置的维护费用、折旧成本函数见式(17)、(18):

$$C_{OM,k}(P_k(t)) = K_{OM,k} \cdot |P_k(t)| \cdot \Delta t \quad (17)$$

$$C_{DP,k}(P_k(t)) = (E_{rated,k} \cdot C_{E,k} + P_{rated,k} \cdot C_{P,k}) e^{-L_{loss,k} t} \quad (18)$$

其中, $K_{OM,k}$ 为第 k 个蓄电池组的单位电量运行维护成本系数; $E_{rated,k}$ 、 $P_{rated,k}$ 分别为第 k 个蓄电池组的额定容量和额定功率, $C_{E,k}$ 、 $C_{P,k}$ 分别为蓄电池组 k 的单位容量和单位功率安装成本的现值; $L_{loss,k}$ 为蓄电池组 k 的寿命损耗系数。

[0035] 约束条件

1) 功率平衡和备用约束

(1) 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^I P_i(t) + \sum_{k=1}^K P_k(t) + P_w(t) + P_p(t) + P_{buy}(t) - P_{sell}(t) = P_d(t) + P_{loss}(t) \quad t=1, 2, \dots, T \quad (19)$$

$$P_{loss}(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m e^{P_m(t)} \quad t=1, 2, \dots, T \quad (20)$$

其中, M 为微电网支路总数; $P_{loss}(t)$ 为微电网的线损; $P_m(t)$ 为流过线路 m 的功率; α_m 为

线路 m 的线损系数,由潮流计算估算得到。

[0036] (2) 备用约束:

$$\sum_{i=1}^I \min(U_i(t) \cdot \bar{P}_i - P_i(t), \Delta_{up,i}) + \sum_{k=1}^K \min\left(\frac{\bar{E}_k - E_k(t)}{\Delta T} \cdot \eta_{dk,k}, \bar{P}_{dk,k} - P_k(t)\right) + \bar{P}_{dgp} - P_{dgp}(t) + P_{sell}(t) \geq R_s(t) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (21)$$

其中, $P_i(t)$ 、 $P_k(t)$ 、 $P_w(t)$ 、 $P_p(t)$ 、 $P_{dgp}(t)$ 、 $P_{sell}(t)$ 分别表示可控机组出力、蓄电池组出力、风电出力、太阳能发电出力和对大电网的购电和售电; $U_i(t)$ 为可控电源 i 的运行状态, 0 表示停运, 1 表示运行; \bar{P}_i 为可控电源 i 的输出功率上限, $\Delta_{up,i}$ 为可控电源 i 的最大向上爬坡率, \bar{E}_k 、 $E_k(t)$ 分别为蓄电池剩余能量的上限、蓄电池 k 在 t 时刻的剩余能量, $\eta_{dk,k}$ 为蓄电池 k 的放电效率, $\bar{P}_{dk,k}$ 为蓄电池 k 的最大放电功率, $P_d(t)$ 为微电网的负荷需求; $R_s(t)$ 为微电网的旋转备用需求。此约束中, 不等式左边为系统旋转备用的值, 分别为可控机组、蓄电池和联网的旋转备用值, $R_s(t)$ 为系统所需旋转备用。以下孤网备用约束除联网备用外与并网基本相同。

[0037] 2) 与大电网相关的约束

(3) 微电网与大电网间功率最大容量约束:

$$0 \leq P_{dgp}(t) \leq \bar{P}_{dgp} \times U_{dgp}(t) \quad (22)$$

$$0 \leq P_{sell}(t) \leq \bar{P}_{sell} \times U_{sell}(t) \quad (23)$$

(4) 购电与售电互斥约束:

$$U_{dgp}(t) + U_{sell}(t) \leq 1 \quad (24)$$

其中, \bar{P}_{dgp} 、 \bar{P}_{sell} 分别表示允许微电网向大电网购电和售电的最大值; $U_{dgp}(t)$ 为 t 时段微电网向大电网购电的 0、1 决策变量, 0 表示不购电(售电或者既不购电也不售电), 1 表示购电, $U_{sell}(t)$ 为 t 时段微电网向大电网售电的 0、1 决策变量, 0 表示不售电(购电或者既不购电也不售电), 1 表示售电。

[0038] 3) 与可控机组相关的约束

(5) 可控电源的输出功率约束:

$$\underline{P}_i U_i(t) \leq P_i(t) \leq \bar{P}_i U_i(t) \quad (25)$$

其中, \underline{P}_i 、 \bar{P}_i 分别表示可控机组 i 的出力下限和出力上限。

[0039] (6) 运行状态变量与启停变量约束:

$$U_i(t) - U_i(t-1) = U_{open,i}(t-1) - U_{close,i}(t-1) \quad (26)$$

$$U_{open,i}(t) + U_{close,i}(t) \leq 1 \quad (27)$$

其中, $U_i(t)$ 表示可控机组 i 的运行状态, 0 表示停运、1 表示运行; $U_{open,i}(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻 0、1 开机决策变量, 0 表示非启动(保持原启停状态或者停机), 1 表示启动。 $U_{close,i}(t)$ 为可控电源 i 的 t 时刻 0、1 关机决策变量, 0 表示非停机(保持原启停状态或者开机), 1 表示停机操作。

[0040] (7) 最小停运时间、运行时间约束：

$$U_{open,i}(t) + \sum_{t'=t-1}^{\min(T,t-1+MOT_i)} U_{close,i}(t') \leq 1 \quad (28)$$

$$U_{close,i}(t) + \sum_{t'=t+1}^{\min(T,t+1+MOT_i)} U_{open,i}(t') \leq 1 \quad (29)$$

其中, MOT_i 为可控机组 i 的最小开机持续时间; MOT_i 为可控机组 i 的最小关机持续时间; T 为调度时间周期。

[0041] (8) 爬坡率约束：

$$-\Delta_{down,i} \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq \Delta_{up,i} \quad (30)$$

式中 $\Delta_{down,i}$ 、 $\Delta_{up,i}$ 分别表示可控机组 i 的最大向下和向上爬坡率。

[0042] 4) 与蓄电池组相关的约束：

(9) 荷电状态约束：

$$\underline{SOC}_k \leq SOC_k(t) \leq \overline{SOC}_k \quad (31)$$

其中, $SOC_k(t)$ 为蓄电池 k 的 t 时刻的剩余电量, \underline{SOC}_k 、 \overline{SOC}_k 分别表示蓄电池组 k 的剩余电量的最小和最大值。

[0043] (10) 满足功率约束：

$$-\bar{P}_{ch,k} < P_k(t) < \bar{P}_{dis,k} \quad (32)$$

其中 $\bar{P}_{ch,k}$ 、 $\bar{P}_{dis,k}$ 分别表示蓄电池组 k 的最大充电功率和最大放电功率。

[0044] (11) 周期储能平衡约束：

$$SOC_k(1) + \Delta SOC_k = SOC_k(T) \quad (33)$$

ΔSOC_k 为程序设置的一个调度后 SOC_k 的增加量, 如果蓄电池 SOC_k 状态良好, 可以将 ΔSOC_k 设为 0。 $SOC_k(1)$ 、 $SOC_k(T)$ 分别为蓄电池 k 的 SOC 初始值和一个调度周期后的值。此约束表示, 调度周期的始末时刻蓄电池组 k 的剩余电量是满足设定值的。

[0045] (12) 同一蓄电池组的充放电互斥约束：

$$U_{dis,k}(t) + U_{ch,k}(t) \leq 1 \quad (34)$$

式中 $U_{dis,k}(t)$ 为蓄电池 k 的放电状态 0、1 决策变量, 0 表示非放电状态 (充电或者不充不放), 1 表示放电状态, $U_{ch,k}(t)$ 为蓄电池 k 的充电状态 0、1 决策变量, 0 表示非充电状态 (放电或者不充不放), 1 表示充电状态。

[0046] 不同蓄电池组的充放电互斥约束：

$$\sum_{k=1}^K U_{dis,k}(t) \leq K \times e_{dis,k}(t) \quad (35)$$

$$U_{ch,k}(t) \leq K \times (1 - e_{dis,k}(t)) \quad (36)$$

$$\sum_{k=1}^K U_{ch,k}(t) \leq K \times e_{ch,k}(t) \quad (37)$$

$$U_{dk,k}(t) \leq K \times (1 - e_{ck,k}(t)) \quad (38)$$

其中 $e_{dk,k}(t)$ 、 $e_{ck,k}(t)$ 为辅助 0、1 变量； $e_{dk,k}(t)$ 为 0 表示无法放电，1 表示无法充电， $e_{ck,k}(t)$ 为 0 表示无法充电，1 表示无法放电，K 为蓄电池组的个数。此约束表示当一个蓄电池放电时其它蓄电池组不能充电，反之亦然。

[0047] 模式二：孤网长期稳定运行

本模式以费用最少为目标，综合考虑系统和各微源的约束条件，建立了在孤网长期稳定运行条件下的微电网日前经济调度模型。

[0048] 目标函数：

孤网运行下微电网经济调度模型的目标函数如下：

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{open,i}(t) + C_{OM,i}(P_i(t)) + C_{DP,i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K [C_{OM,k}(P_k(t)) + C_{DP,k}(P_k(t)) + C_{PUNISH,k}] + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L [C_l(P_l(t)) \times U_l(t)] \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{L_1} [U_{h_1}(t) \times a_{h_1} \times (T-t)] \end{aligned} \quad (39)$$

与并网运行方式不同的是，孤网运行没有和大电网之间的购售电，但是孤网运行方式有切负荷的可能，需要考虑切负荷的成本。目标函数中 L 表示可中断负荷的负荷节点个数， $U_l(t)$ 表示切负荷的 0、1 决策变量，0 表示不切负荷，1 表示切负荷； $C_l(P_l(t))$ 表示负荷节点 l 的切负荷的费用函数； L_1 表示一级负荷的负荷节点个数。 $U_{h_1}(t)$ 为一级负荷 l_1 的切负荷 0、1 决策变量，0 表示不切负荷，1 表示切负荷， a_{h_1} 表示一级负荷节点 l_1 的罚函数的系数，相应惩罚项迫使相同的一级负荷前一个时段切负荷成本比后一个时段高，此惩罚项系数的调节可改变模型对时段前后的重视程度，若设为 0，则时段前后没有区别。

[0049] 蓄电池的 SOC 周期不平衡罚函数如下：

$$C_{PUNISH,k} = \begin{cases} b_k \times (SOC_k(1) + \Delta SOC_k - SOC_k(T)) & \text{if } (SOC_k(1) + \Delta SOC_k > SOC_k(T)) \\ 0 & \text{if } (SOC_k(1) + \Delta SOC_k \leq SOC_k(T)) \end{cases} \quad (40)$$

式中， b_k 为罚函数的系数，其值根据需要比一级负荷的惩罚系数 C_{l_cut} 稍小。 $SOC_k(1)$ 、 $SOC_k(T)$ 分别表示蓄电池 k 的 SOC 初始值和一个调度周期后的值， ΔSOC_k 为程序设置的一个调度周期后 SOC_k 的增加量，如果蓄电池 SOC_k 状态良好，可以将 ΔSOC_k 设为 0。

[0050] 切负荷费用函数如下：

$$C_l(P_l(t)) = C_{l_cut} \cdot P_l(t) \quad (41)$$

式中 $P_l(t)$ 表示 t 时间负荷节点 l 的负荷； C_{l_cut} 表示切负荷节点 l 时单位电能的经济损失惩罚系数。

[0051] 约束条件

孤网运行方式的约束条件大部分和并网运行方式相同，只是缺少与大电网之间的功率约束条件，增加了切负荷的约束。为了简便，在此只给出与并网运行不同的约束。

[0052] 1) 功率平衡约束：

$$\sum_{i=1}^I P_i(t) + \sum_{k=1}^K R_k(t) + P_w(t) + P_p(t) = P_d(t) - \sum_{i=1}^I P_i(t) \cdot U_i(t) + P_{loss}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad (42)$$

$$P_{loss}(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m P_m(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad (43)$$

其中, M 为微电网支路总数; $P_{loss}(t)$ 为微电网的线损; $P_m(t)$ 为流过线路 m 的功率; α_m 为线路 m 的线损系数, 由潮流计算估算得到。

[0053] 2) 备用约束:

$$\sum_{i=1}^I \min(U_i(t) \cdot \bar{P}_i - P_i(t), \Delta_{up,i}) + \sum_{k=1}^K \min\left(\frac{\bar{E}_k - E_k(t)}{\Delta T} \cdot \eta_{dk,k}, \bar{P}_{dk,k} - R_k(t)\right) \geq R_s(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad (44)$$

其中, $U_i(t)$ 为可控电源 i 的运行状态, 0 表示停运, 1 表示运行; \bar{P}_i 为可控电源 i 的输出功率上限, $\Delta_{up,i}$ 为可控电源 i 的最大向上爬坡率, \bar{E}_k 、 $E_k(t)$ 分别为蓄电池剩余能量的上限、蓄电池 k 在 t 时刻的剩余能量, $\eta_{dk,k}$ 为蓄电池 k 的放电效率, $\bar{P}_{dk,k}$ 为蓄电池 k 的最大放电功率, $R_s(t)$ 为 t 时刻微电网的旋转备用功率需求。此约束中, 不等式左边为系统旋转备用的值, 分别为可控机组、蓄电池的旋转备用值, $R_s(t)$ 为系统所需旋转备用。

[0054] 3) 周期储能平衡约束:

$$SOC_k(1) + \Delta SOC_k = SOC_k(T) + \Delta SOC_{penal,k,k} \quad (45)$$

ΔSOC_k 为程序设置的一个调度周期后 SOC_k 的增加量, 如果蓄电池 SOC_k 状态良好, 可以将 ΔSOC_k 设为 0, $\Delta SOC_{penal,k,k}$ 表示一个调度周期后蓄电池计划外的 SOC_k 的减少量。此约束与模型中蓄电池的 SOC 周期不平衡罚函数结合, 可以确保蓄电池在保证一级负荷供电的情况下, 调度周期的始末时刻蓄电池组 k 的剩余电量尽量满足设定值的。

[0055] 模式三: 孤网短期运行

本模式同样以费用最少为目标, 综合考虑系统和各微源的约束条件, 建立了在孤网短期运行条件下的微电网日前经济调度模型。与孤网长期稳定运行不同的是, 孤网短期运行尽量考虑孤网短时间内运行的最优结果。

[0056] 目标函数

孤网运行下微电网经济调度模型的目标函数如下:

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + S_i(t) \times U_{open,i}(t) + C_{OM,i}(P_i(t)) + C_{DP,i}(P_i(t)) + C_e(P_i(t))] \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [C_{OM,k}(P_k(t)) + C_{DP,k}(P_k(t))] + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) \times U_i(t)] \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [U_i(t) \times a_i \times (T-t)] \end{aligned} \quad (46)$$

与孤网长期稳定运行方式不同的是, 孤网短期运行时目标函数中没有蓄电池没有 SOC 周期不平衡惩罚项, 而最后一项的范围扩大到所有等级的负荷。目标函数中 T' 表示孤网短期运行时的优化周期, 一般比较小 (1h), 这样可以保证只考虑短期优化, 连续多个优化周期可以得到更长时间内的优化结果; L 表示可中断负荷的负荷节点个数, $U_i(t)$ 表示切负荷的 0、

1 决策变量,0 表示不切负荷,1 表示切负荷; $C_i(P_i(t))$ 表示负荷节点 1 的切负荷的费用函数; α_i 表示罚函数的系数,针对所有负荷,相应的惩罚项迫使相同等级的负荷前一个时段切负荷成本比后一个时段高,此惩罚项系数的调节可改变模型对时段前后的重视程度,若设为 0,则时段前后没有区别。

[0057] 切负荷费用函数如下:

$$C_i(P_i(t)) = C_{i_cut} \cdot P_i(t) \quad (47)$$

式中 $P_i(t)$ 表示 t 时间负荷节点 1 的负荷; C_{i_cut} 表示切负荷节点 1 时单位电能的经济损失惩罚系数。

[0058] 约束条件

孤网短期运行方式的约束条件大部分和孤网长期稳定运行方式相同,只是孤网短期运行方式下没有周期储能平衡约束。在此不再赘述。

[0059] 步骤三:对模型进行线性化处理,使求解问题转化为混合整数线性规划问题。

[0060] 混合整数线性规划算法的计算时间相对其他算法较少,可以解决相对大型的问题。但是它需要将非线性的问题转化为线性问题来求解,在微电网的模型中有多个非线性的约束需要进行线性化处理。模型中的大部分非线性的约束,已经在约束条件里进行了分段线性化的处理,但是可控机组出力还需进行额外的处理。

[0061] 可控机组出力的处理:

可控机组的燃料费用曲线是非线性的,要在混合整数线性规划中考虑燃料费用,需要将费用曲线进行分段线性化,如图 1 所示,可控机组的燃料费用函数 $C(P)$ 是一个非线性函数,假设将费用曲线分为 n 段线性组合,各个分段的分点为 $P_1 \leq P_2 \leq L \leq P_n \leq P_{n+1}$,引入一个新的变量 z_k ,可以将出力 P 和燃料费用的分段线性函数 $C(P)$ 分别表示为式(48)和式(49):

$$P = \sum_{s=1}^{n+1} z_s P_s \quad (48)$$

$$C(P) = \sum_{s=1}^{n+1} z_s C(P_s) \quad (49)$$

再次引入一个新的 0、1 变量 y_s ,其中 z_s 与 y_s 满足下列约束:

$$\begin{cases} z_1 \leq y_1, z_2 \leq y_1 + y_2, \dots, z_n \leq y_{n-1} + y_n, z_{n+1} \leq y_n \\ y_1 + y_2 + \dots + y_n = 1, y_s = 0, 1 \\ z_1 + z_2 + \dots + z_n = 1, z_s \geq 0 (s=1, 2, \dots, n+1) \end{cases} \quad (50)$$

z_s 与 y_s 为辅助变量,此式用于保证对成本函数的分段的合理与唯一。

[0062] 步骤四:应用前推回代法,计算微电网的三相潮流,得到线路损耗的系数。

[0063] 前推回代法的原理过程是:一般给定配电网的始端电压和末端负荷,以馈线为计算基本单位。开始时由末端向始端推算,设全网电压都为额定电压,根据负荷功率由末端向始端逐段推导,仅计算各元件中的功率损耗而不计算电压,求得各条支路上的电流和功率损耗,并据此获得始端功率,这是前推过程;再根据给定的始端电压和求得的始端功率由始端向末端逐段算电压降落,求得各节点电压,这是回代过程;如此重复上述过程,直至各个节点的电压偏差满足容许条件为止。具体流程图见图 2。

[0064] 将潮流计算得到的每个支路的平均线损结果,代入模型的线损系数 α_m 。

[0065] 步骤五:对模型按时间进行分层求解。

[0066] 由于同一时刻下微电网中每个单元的出力关系都是耦合在一起的,尽量不对其进行分解,而微电网中的电源响应速度都较快,所以可以将模型按时间分为上下两层优化进行求解。上层优化求解模型的时间间隔较大(一般取 1h),下层优化求解模型为上层优化求解模型的每个时间间隔内的优化。分层优化对应的时间关系如图 3 所示。

[0067] 将原始问题按照一定时间间隔分为上层优化问题和下层优化问题。首先求解上层优化问题,上层优化的问题的求解结果作为下层优化问题的初始条件,而后求解下层优化问题,所有下层优化问题都求解完后得出最终的优化结果。具体的分层优化流程图见图 4。

[0068] 步骤六:选择合适的模式,进行计算。

[0069] 所建模型有不同的微电网模式可供选择,根据微电网的特点和运行要求进行选择,修改模型中的参数可以达到各种不同的要求,也可以选择使用默认值进行计算。

[0070] 图 5 所示为某项目的部分微电网结构示意图。微电网中有 1 个光伏发电电源,共计容量 25kW;1 组储能装置(蓄电池),共计容量 100kWh;3 个负荷节点,假设负荷 C6 为一级负荷,负荷 C7 为二级负荷,负荷 D5 为三级负荷。

[0071] 典型日负荷曲线:

微电网中有 3 个负荷节点,其总负荷的日负荷曲线如图 6 所示。此典型日负荷曲线有三个负荷高峰,最大负荷为 21.6kW,最小负荷为 5.1kW。

[0072] 光伏出力特性:

图 7 给出了晴天光伏出力的典型场景。图中光伏容量为 25kW。假设预测误差 5% 时的光伏预测出力如图 8 所示。

[0073] 蓄电池基本参数:

算例中的蓄电池基本参数如表 1 所示。

表 1 蓄电池基本参数

参数名称	充电效率	放电效率	单位容量安装成本/ 元·kWh ⁻¹	循环次数	维护费用/ 元· kWh ⁻¹
参数值	0.9	0.9	2000	4000	0.0832

[0074] 购售电电价:

算例中的购售电电价采用峰谷平电价。具体峰谷平时段的划分和电价见表 2。由表中数据可见,白天上班时间和晚高峰划分为峰时段,其中中午和晚高峰划分为尖峰时段,凌晨左右划分为谷时段,其余时段为平时段。

表 2 峰谷平电价

时段类型	尖峰时段	峰时段	平时段	谷时段
时段	11:00-13:00 20:00-21:00	10:00-15:00 18:00-21:00	7:00-10:00 15:00-18:00 21:00-23:00	23:00-7:00
购电价/元·kWh-1	1.52	1.39	0.87	0.38
售电价/元·kWh-1	0.81	0.81	0.81	0.30

[0075] 污染物排放征收费用：

算例中的污染物排放征收费用见表 3。

表 3 污染物排放征收费用

污染物类型	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	灰
征收费用/元·kg-1	6	8	0.023	1	0.12

[0076] 切负荷费用：

不同等级负荷的切负荷费用见表 4。

表 4 不同等级负荷的切负荷费用

负荷等级	一级	二级	三级	四级
切负荷费用/元·kWh-1	20	15	10	5

[0077] 测试结果：

1) 模式一：并网运行，运行成本最小。测试内容如下：

场景：晴天；模式：并网运行，运行成本最小；光伏预测误差 5%。

[0078] A) 程序计算结果：

模式一下，软件计算的理论调度结果如图 9 所示。

[0079] 图 9 中，PCC 点购售电功率、蓄电池充放电功率、光伏出力相加基本等于总负荷，即保证功率平衡。在负荷低谷时段，微电网从配网购电增加，以向蓄电池充电；在负荷高峰时段，微电网从配网购电减少，由蓄电池和光伏供电，多余电力反送到配网中。

[0080] B) 实际运行结果：

模式一下，实际运行的调度结果如图 10 所示。

[0081] 从图 10 可以看出，实际运行结果与计算结果趋势基本相同：在负荷低谷时段，微电网从配网购电增加，以向蓄电池充电；在负荷高峰时段，微电网从配网购电减少，由蓄电池和光伏供电，多余电力反送到配网中。

[0082] 2) 并网原模式(即并网自动运行，没有采用本发明的调度方法)时的测试内容如

下：

场景：晴天；模式：并网运行，没有调度策略；

实际运行结果如图 11 所示。

[0083] 由图 11 知，实际运行过程中保持功率平衡，光伏按照最大功率追踪方式运行，蓄电池放电电量放到下界时，开始小功率充电，充一定电量后，开始大功率放电，导致蓄电池充放电功率和 PCC 点功率有较大波动。

[0084] 3) 模式二：孤网长期稳定运行。测试内容如下：

场景：晴天；模式：孤网运行，孤网长期稳定运行；光伏预测误差 5%。

[0085] A) 程序计算结果：

模式二下，软件计算的理论切负荷结果如图 12 所示。

[0086] 由图 12 可知，三级负荷 D5 全天 24 时段全部切掉，二级负荷 C7 只切晚间时段，一级负荷 C6 保证不断电。

[0087] 模式二下，软件计算的理论调度结果如图 13 所示。

[0088] 由图 13 可知，切负荷切掉的功率、蓄电池充放电功率、光伏出力相加基本等于总负荷功率，即功率基本平衡。白天由光伏供电，多余的电量由蓄电池存储起来，晚间由蓄电池供电。

[0089] B) 实际运行结果：

模式二下，实际运行的切负荷结果如图 14 所示。

[0090] 图 14 中显示的实际切负荷情况与计算结果相同。

[0091] 模式二下，实际运行的调度结果如图 15 所示。

[0092] 由图 15 可知，功率基本平衡，并且实际运行结果与程序计算结果的趋势相同：白天由光伏供电，多余的电量由蓄电池存储起来，晚间由蓄电池供电。

[0093] 4) 模式三：孤网短期运行。测试内容如下：

场景：晴天；模式：孤网运行，满足短期负荷需求；光伏预测误差 5%。

[0094] A) 程序计算结果：

模式三下，软件计算的理论切负荷结果如图 16 所示。

[0095] 由图 16 可知，从 0 点到 3 点，没有切负荷指令，保证所有负荷不断电。3 点之后蓄电池电量放光，需要依次切除负荷。

[0096] 模式三下，软件计算的理论调度结果如图 17 所示。

[0097] 由图 17 可知，孤网运行时，满足短期负荷需求，一般用于并网模式下的短期停电，需要全力保证短期内负荷不断电，3 小时后需要切负荷的时段，没有意义。

[0098] B) 实际运行结果：

模式三下，实际运行的切负荷结果如图 18 所示。

[0099] 图 18 中的实际切负荷情况与程序计算结果相同。

[0100] 模式三下，实际运行的调度结果如图 19 所示。

[0101] 由图 19 可知，微电网实际运行结果与程序计算结果的趋势基本相同。

[0102] 4) 孤网原模式自动运行(即没有采用本发明的调度方法)时的测试内容如下：

场景：晴天；模式：孤网运行，没有调度策略；

如图 20 所示，微电网孤网运行，只保留一级负荷，切掉其他负荷。

[0103] 实际调度结果如图 21 所示,晚间由蓄电池供电,白天由光伏供电,多余的电量由蓄电池储存,但是蓄电池在 15 点后充满电量,导致弃光现象出现。

[0104] 测试结论:

不同测试内容的实际运行成本对比如表 5 所示。

表 5 微电网运行成本

测试内容	蓄电池费用/元	购售电费用/元	切负荷费用/元	总费用/元
模式一	31.14	86.06	0	117.21
并网原模式	19.10	122.29	0	141.39
模式二	29.92	0	1791.68	1821.6
模式三	18.65	0	1776.4	1795.05
孤网原模式	38.89	0	2412.02	2450.91

[0105] 1) 对比模式一、模式二和模式三的程序计算结果和实际运行结果可知,在存在预测误差的情况下,程序计算结果和实际运行结果存在偏差,但是趋势基本相同。

[0106] 2) 对比模式一和并网原模式可知,在模式一时,蓄电池在电价较低的晚间充电,在电价较高的负荷高峰阶段放电;光伏按照最大功率追踪方式满发;PCC 点的购售电在电价低时多购电,在电价高时少购电,多余光伏电量反送至配网;微电网实际运行成本为 117.21 元。并网运行、没有经济调度策略时,蓄电池首先大功率放电,而后小功率充电,充电到一定程度后,继续放电,如此循环。由此蓄电池的费用减少,购售电费用增加,而总费用增加为 141.39 元,在并网运行下的总费用最高。

[0107] 3) 对比模式一、模式二和孤网原模式可知,孤网运行、负荷需求大时,微电网需要进行选择性的切负荷。在满足孤网长期稳定运行的策略下,微电网首先保证一级负荷的供电,切除部分时段的二级负荷,切除三级负荷,在一个调度周期后(一天),蓄电池的剩余容量与调度前基本一致,使蓄电池有充足电量保证孤网长期稳定运行。在满足短期负荷需求的策略下,微电网保证短期内所有负荷不断电直到电源电量不足,此种情况适用于并网运行时的短时停电,进入孤网运行状态后会很快回到并网运行状态。在没有经济调度策略、自动运行时,微电网会只保证一级负荷的供电,将其它负荷切除。不同策略下的总费用依次为 1821.6 元、1795.05 元和 2450.91 元。其中孤网长期稳定运行策略和满足短期负荷需求策略下的总费用比没有经济调度策略的总费用低很多,而满足短期负荷需求策略的总费用比孤网长期稳定运行策略低,这是因为满足短期负荷需求策略下将蓄电池的剩余容量放到很低的状态。

[0108] 本发明所谓的几级负荷是指按照用户对供电连续性的要求,将供电负荷依次分为若干级,一级负荷是对供电连续性要求最高的负荷,从一级负荷往后对供电连续性依次降低。

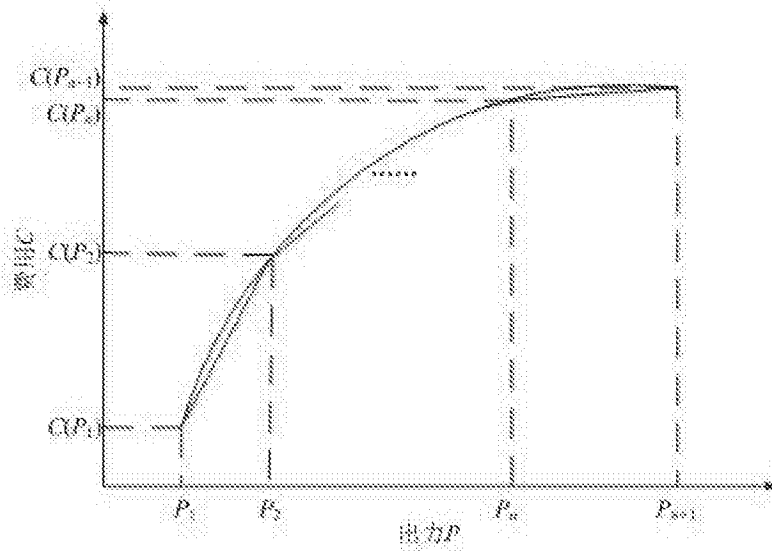


图 1

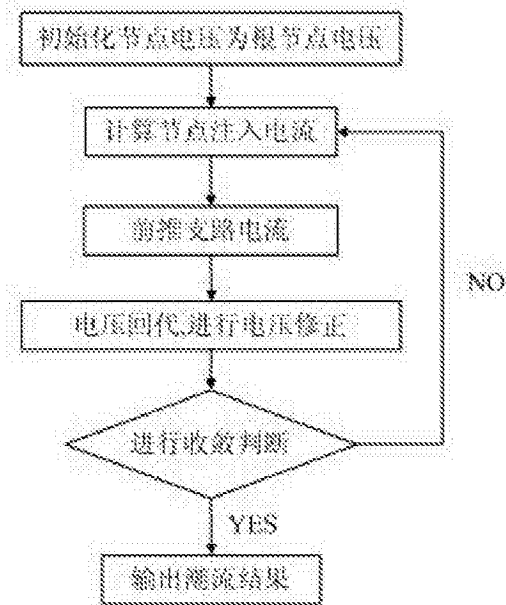


图 2

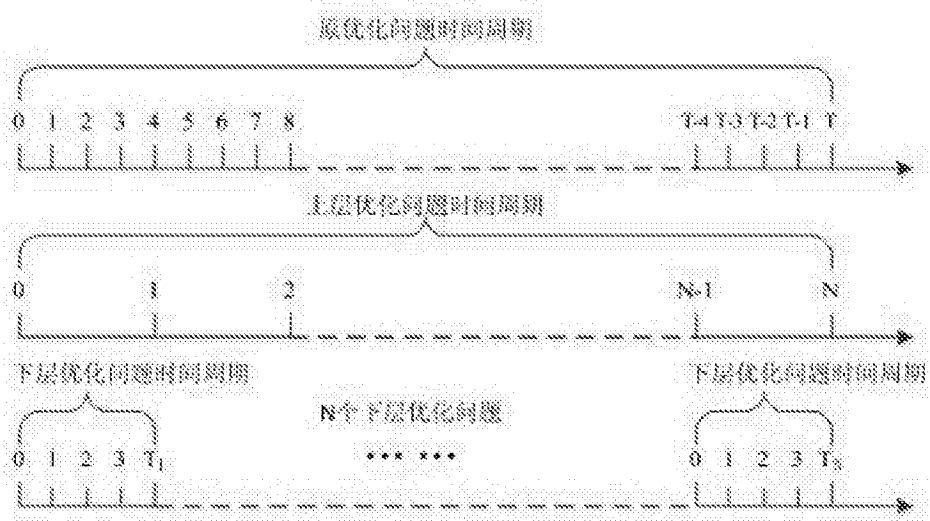


图 3

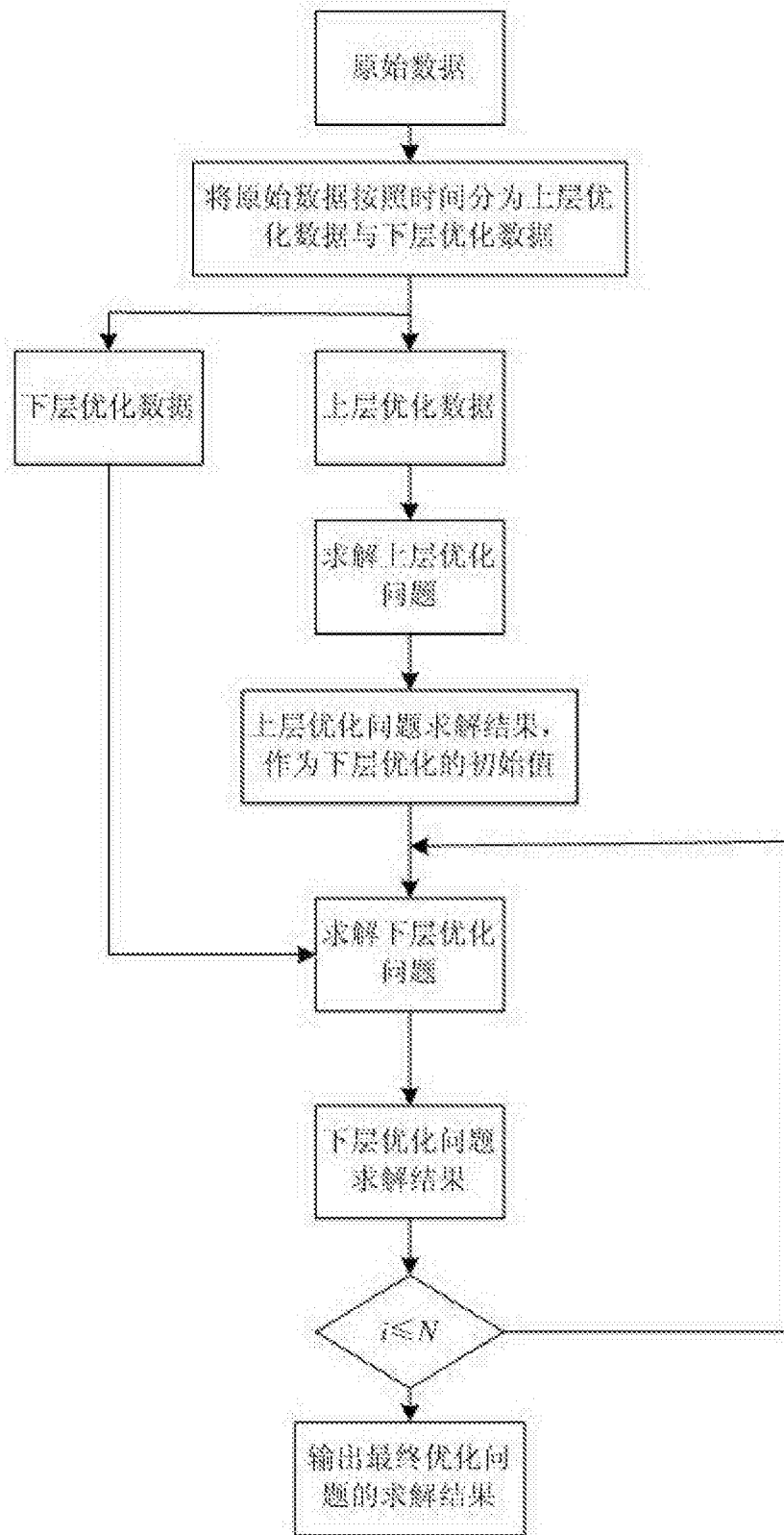


图 4

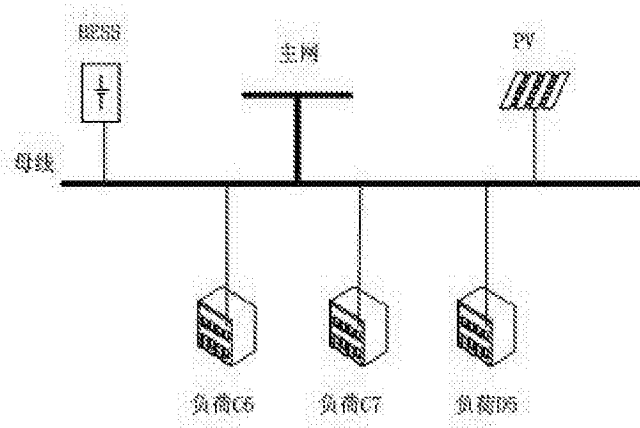


图 5

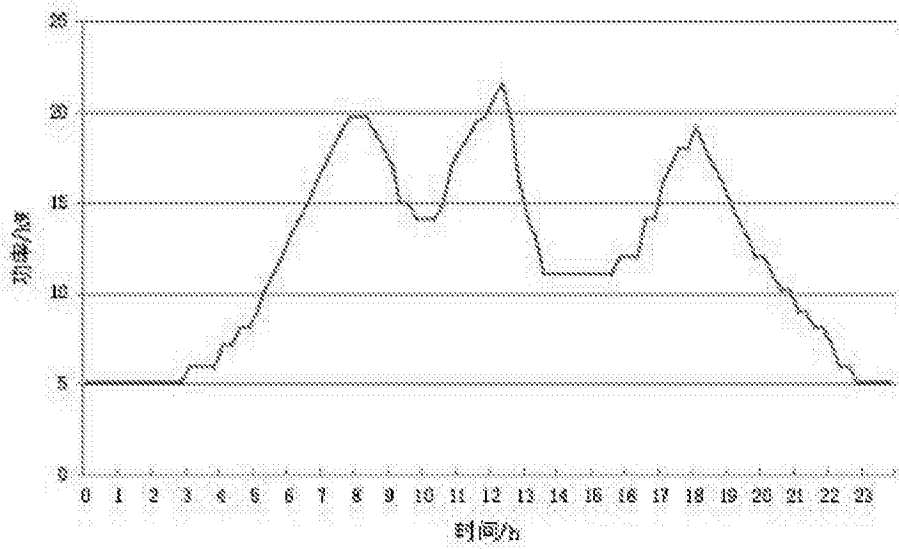


图 6

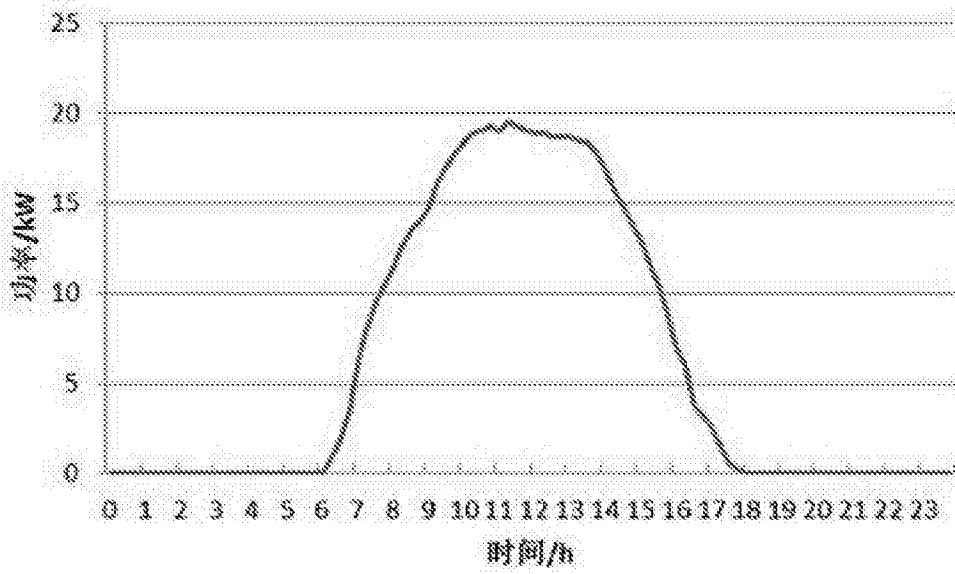


图 7

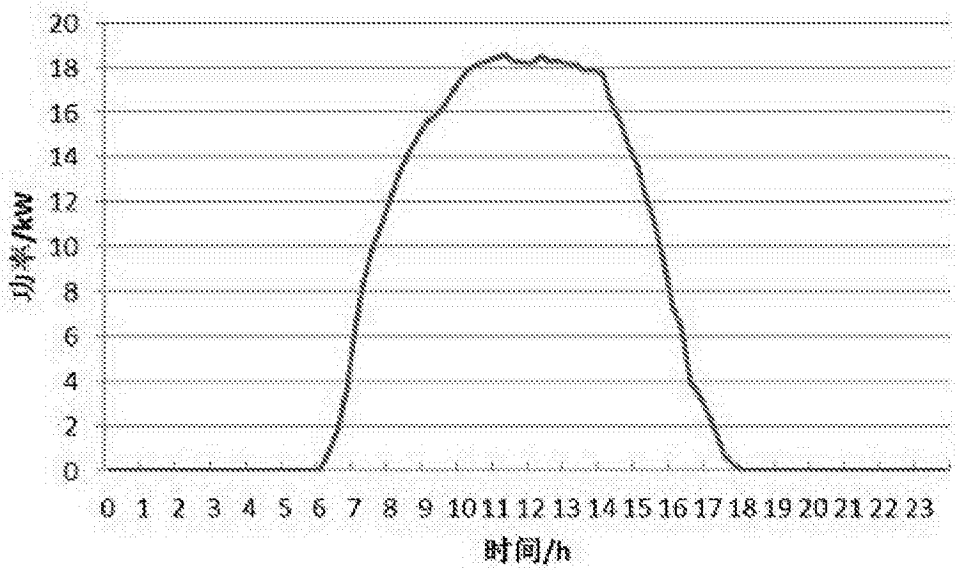


图 8

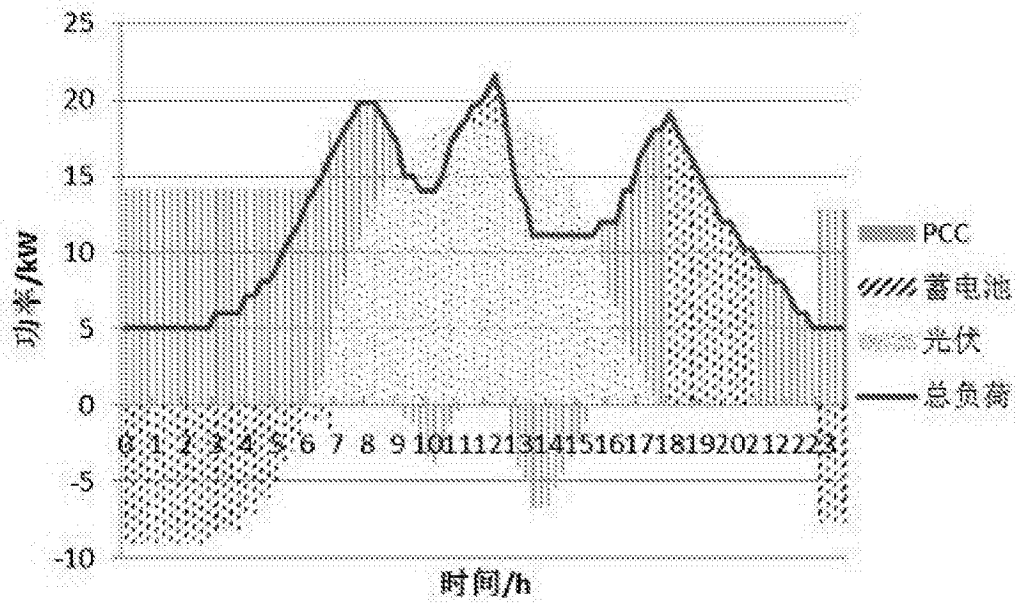


图 9

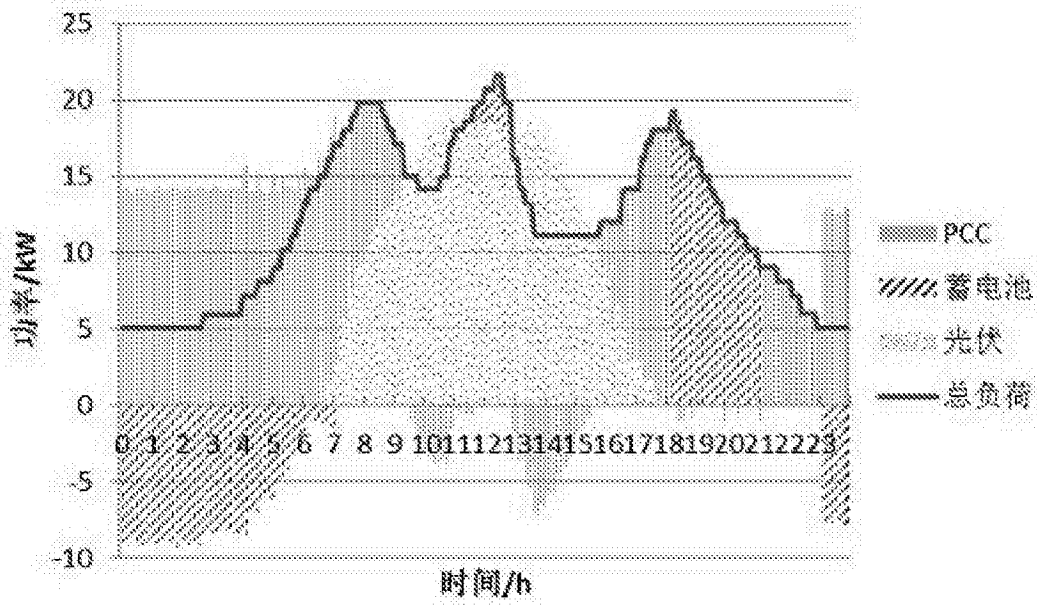


图 10

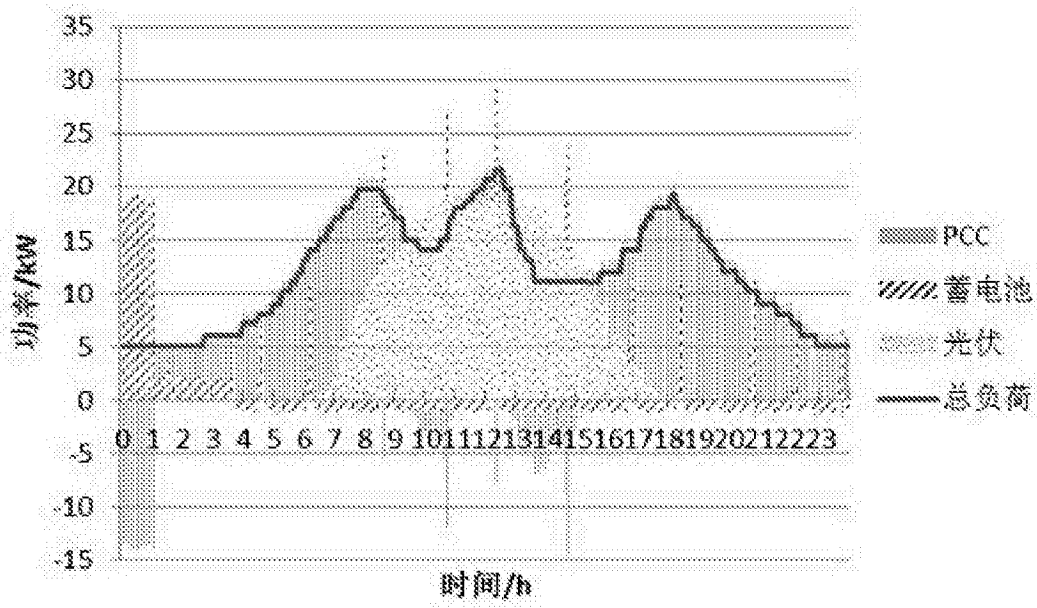


图 11

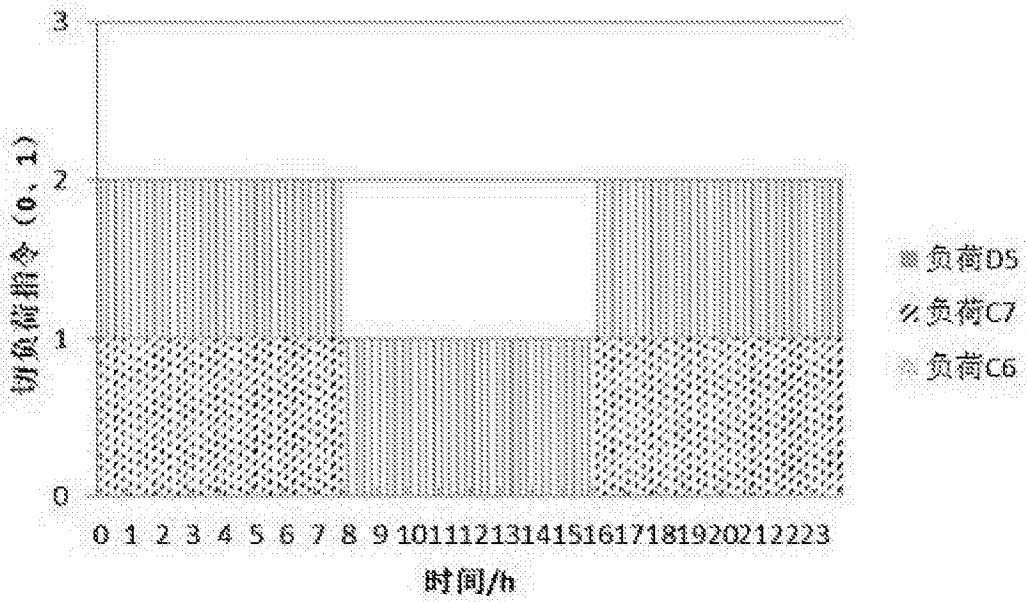


图 12

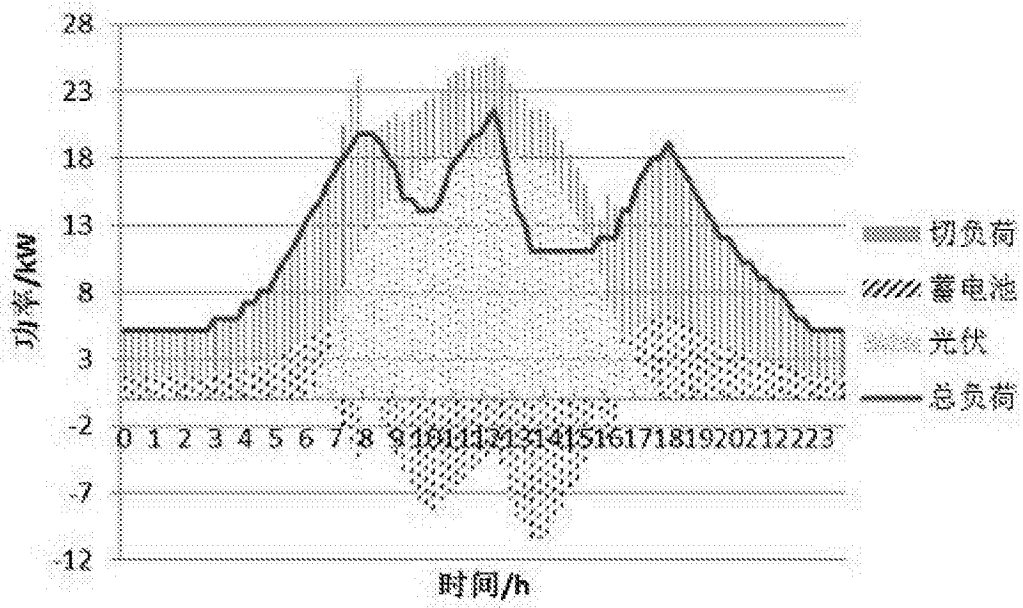


图 13

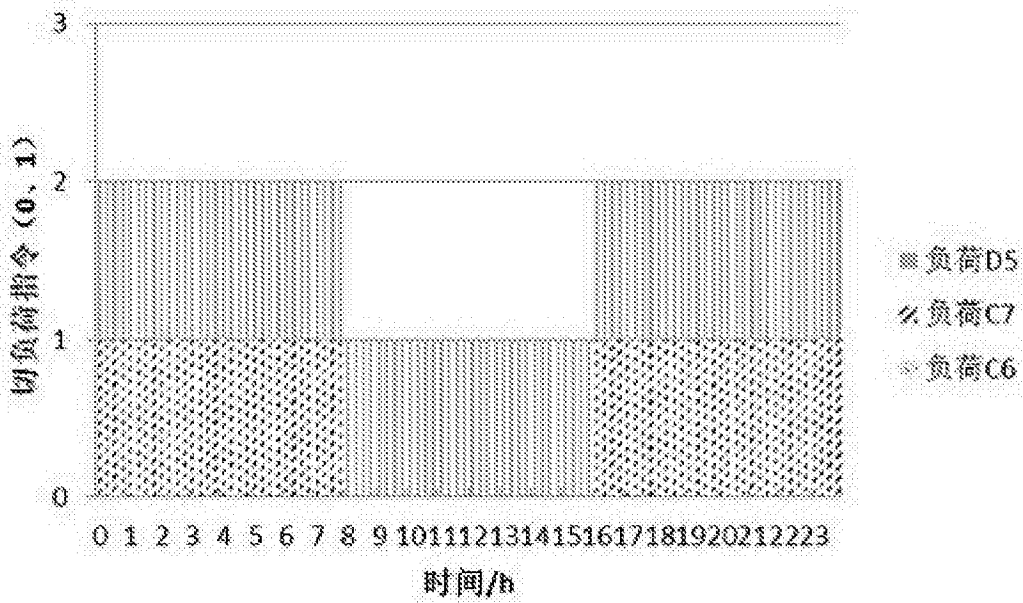


图 14

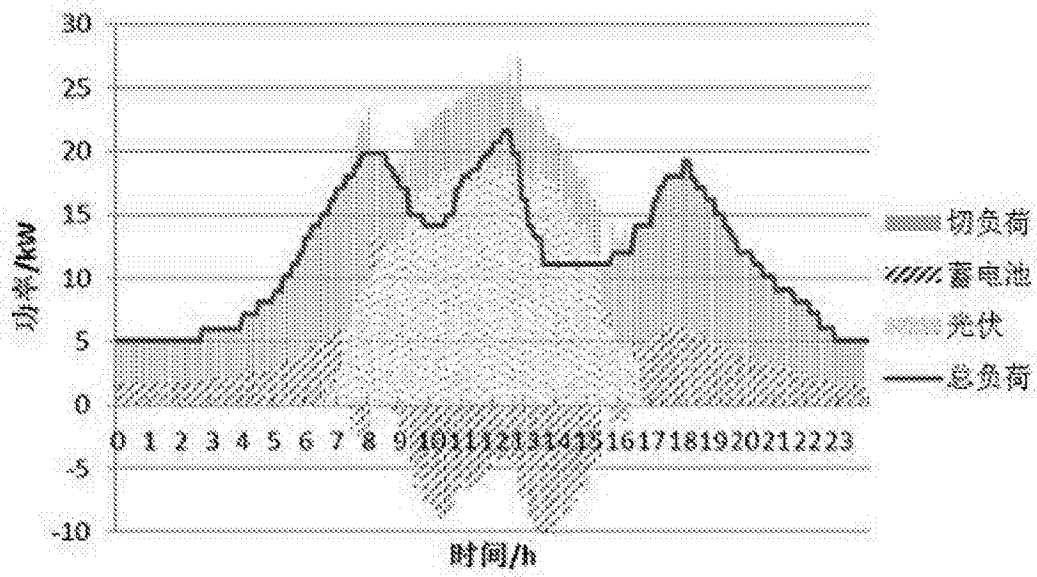


图 15

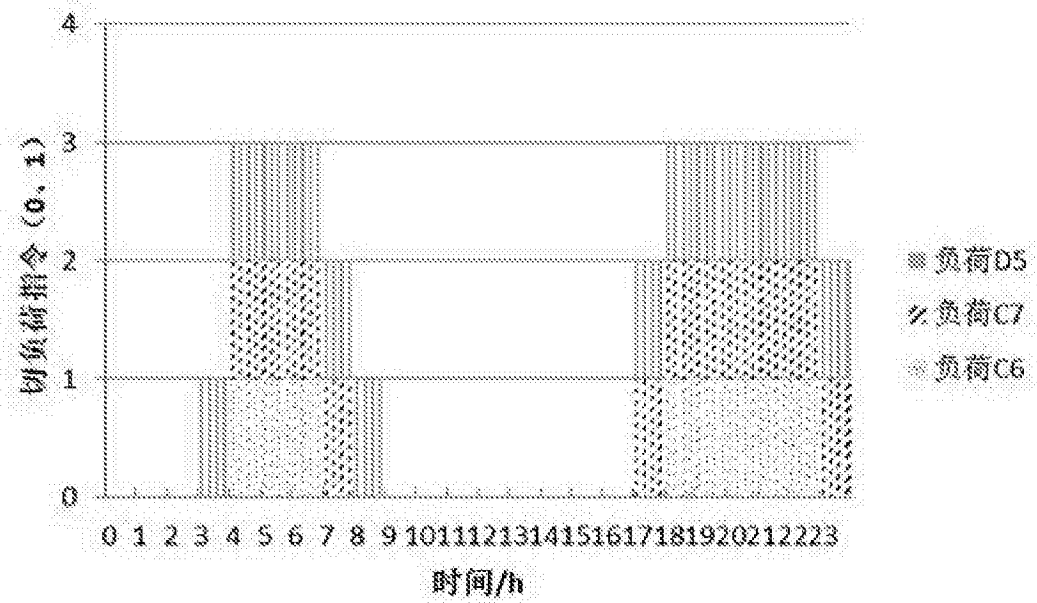


图 16

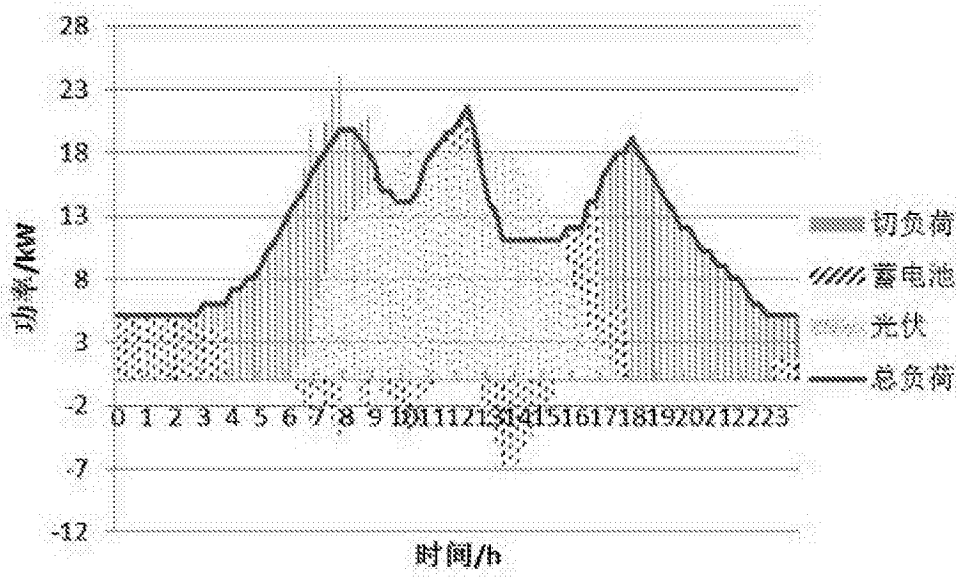


图 17

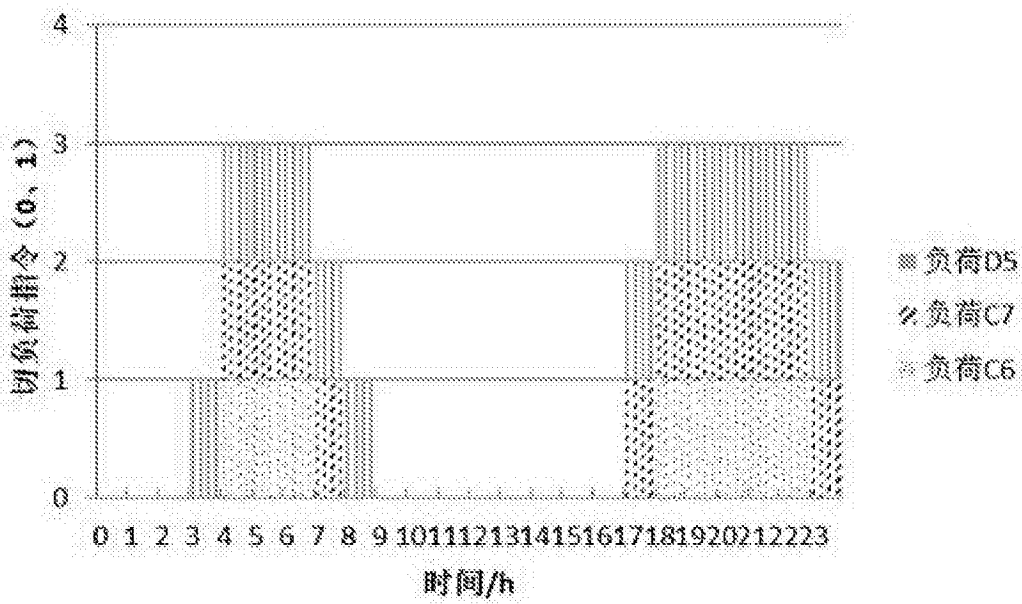


图 18

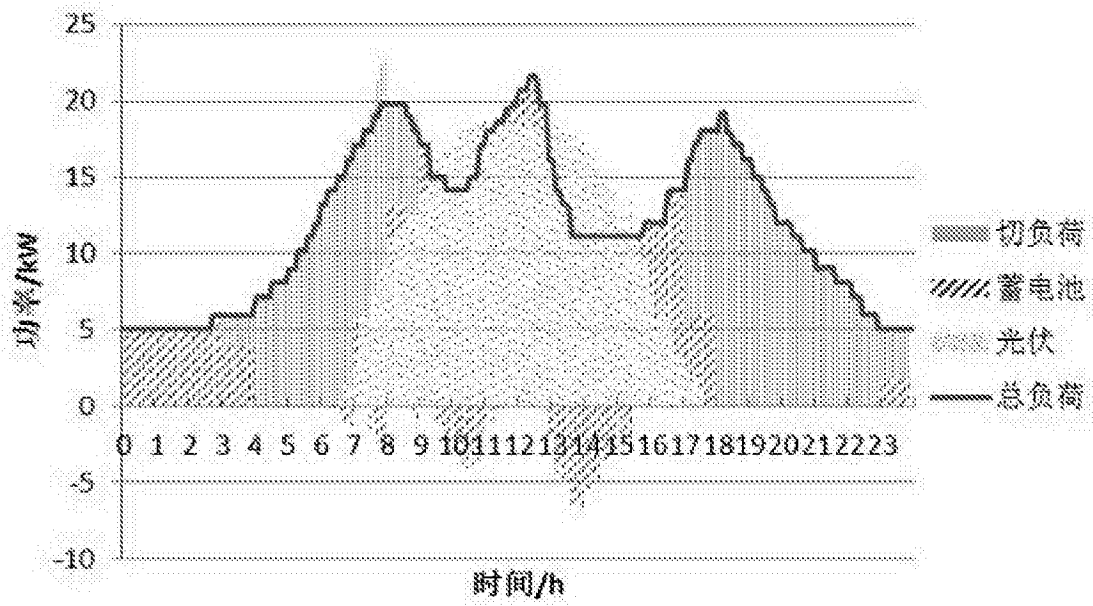


图 19

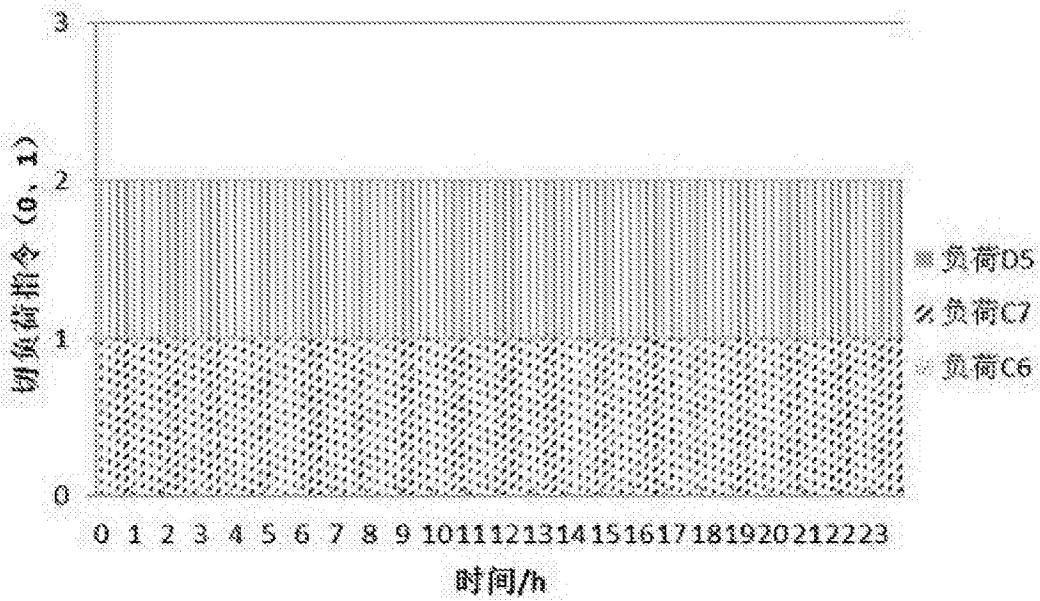


图 20

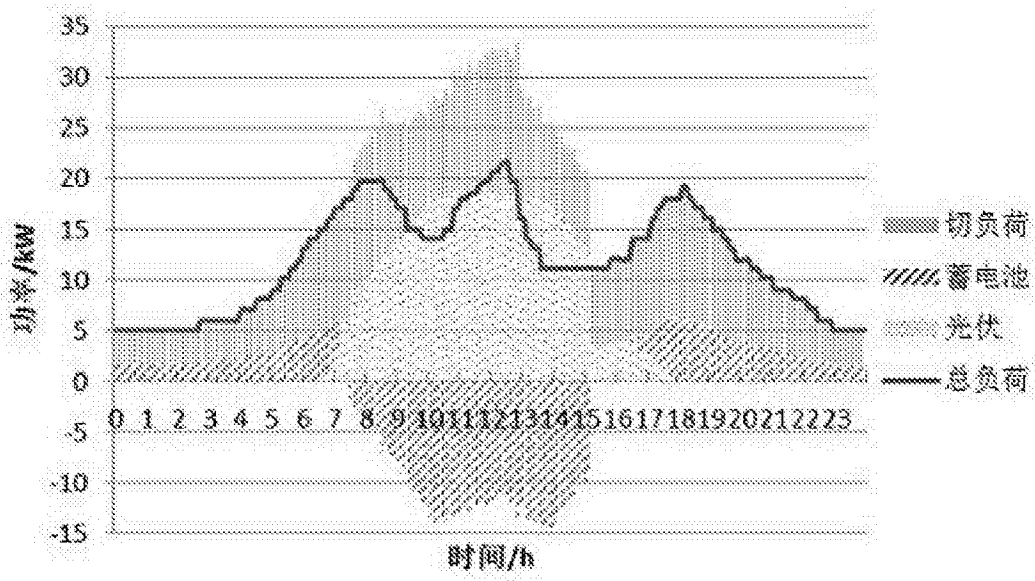


图 21