



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112583017 A

(43) 申请公布日 2021.03.30

(21) 申请号 202011322270.6

(22) 申请日 2020.11.23

(71) 申请人 平高集团有限公司

地址 467001 河南省平顶山市南环东路22号

申请人 平高集团储能科技有限公司  
国家电网有限公司  
国网江苏省电力有限公司经济技术研究院

(72) 发明人 田刚领 阮鹏 张柳丽 张兴  
赵亚一 牛哲荟 刘钊

(74) 专利代理机构 郑州睿信知识产权代理有限公司 41119

代理人 吴敏

(51) Int.Cl.

H02J 3/06 (2006.01)

H02J 3/46 (2006.01)

H02J 3/32 (2006.01)

G06Q 10/06 (2012.01)

G06Q 50/06 (2012.01)

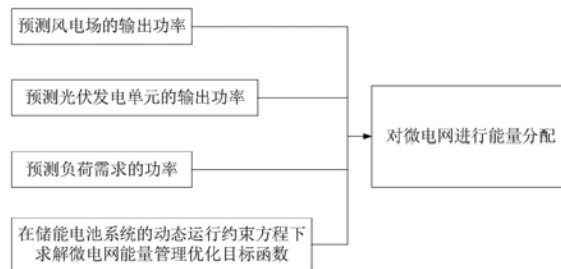
权利要求书4页 说明书12页 附图2页

(54) 发明名称

考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法及系统

(57) 摘要

本发明提供了一种考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法及系统,属于微电网能量分配领域。该方法包括:预测风电场的输出功率,预测光伏发电单元的输出功率,预测负荷需求的功率,在储能电池系统的动态运行约束方程下求解微电网能量分配优化目标函数,结合优化目标函数的求解结果和预测得到的风电场的输出功率、光伏发电单元的输出功率以及负荷需求的功率对微电网进行能量分配。本发明充分考虑了储能电池系统的动态特性,能够保证储能电池安全、合理、可靠运行,保证微电网安全可靠运行。



1. 一种考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

(1) 获取历史负荷数据,并实时获取气象数据,根据气象数据预测得到风速、光照强度和温度;

(2) 结合风速与风电场输出功率之间的经验公式以及所述风速,预测得到风电场的输出功率;

(3) 结合光伏发电单元的UI输出特性曲线以及所述光照强度和温度,预测得到光伏发电单元的输出功率;

(4) 结合历史负荷数据预测得到负荷需求的功率;

(5) 在储能电池系统的动态运行约束方程下求解微电网能量分配优化目标函数,结合所述优化目标函数的求解结果和预测得到的风电场的输出功率、光伏发电单元的输出功率以及负荷需求的功率对微电网进行能量分配;

其中,所述微电网能量分配优化目标函数根据微电网的环境效益 $C_{EB}$ 、售电效益 $C_{SE}$ 、间接效益 $C_{ID}$ 、运行维护成本 $C_{OM}$ 、购电成本 $C_{PE}$ 、更换成本 $C_{RP}$ 和弃风光损失 $C_{AB}$ 建立;所述环境效益是指微电网向上级电网购电时产生的污染物排放收费,所述售电效益是指微电网向上级电网售电时产生的效益,所述间接效益是指微电网中储能电池系统给负荷供电时产生的效益,所述运行维护成本是指对微电网进行维护产生的成本,所述购电成本是指微电网向上级电网购电时产生的成本,所述更换成本是指对微电网中的储能电池进行更换产生的成本,所述弃风光损失是指微电网中风光资源未被消纳所带来的资源浪费。

2. 根据权利要求1所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,其特征在于,所述优化目标函数为: $f=C_{EB}+C_{SE}+C_{ID}-C_{OM}-C_{PE}-C_{RP}-C_{AB}$ , $f$ 表示优化目标函数。

3. 根据权利要求1或2所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,其特征在于,所述储能电池系统的动态运行约束方程包括:储能电池SOC的动态运行约束方程、储能电池输出功率的动态运行约束方程、储能电池放电深度DoD的动态运行约束方程和储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 的动态运行约束方程。

4. 根据权利要求3所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,其特征在于,所述储能电池SOC的动态运行约束方程为: $SOC_{k,min} \leq SOC_{VRB,k} \leq SOC_{k,max}$ ;所述储能电池输出功率的动态运行约束方程为: $|P_{VRB,k}| \leq |P_{ab,k}(SOC_{VRB,k})| \cdot P_{VRB,k}^{rated}$ ;所述储能电池放电深度DoD的动态运行约束方程为: $D_{od,k} \leq D_{od,kmax}$ ;所述储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 的动态运行约束方程为: $|S_{VRB,k}| \leq |S_{VRBk,max}|$ ;

式中, $k$ 代表储能电池系统中的第 $k$ 个储能电池, $SOC_{k,min}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC下限值, $SOC_{k,max}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC上限值, $SOC_{VRB,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC值, $P_{VRB,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的充放电功率, $P_{ab,k}(SOC_{VRB,k})$ 代表第 $k$ 个储能电池的荷电状态为 $SOC_{VRB,k}$ 时对应的最大吸收功率, $P_{VRB,k}^{rated}$ 代表第 $k$ 个储能电池的额定功率, $D_{od,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的放电深度, $D_{od,kmax}$ 代表第 $k$ 个储能电池的放电深度上限值, $S_{VRB,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的视在功率, $S_{VRBk,max}$ 代表第 $k$ 个储能电池的视在功率上限值。

5. 根据权利要求4所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,其特征在于,对储能电池SOC进行约束时,储能电池SOC的计算公式为:

$$SOC_t = \begin{cases} SOC_{t-1} - \int_{t-1}^t \frac{P_{VRB}(t)}{\eta_d E_{VRB}^{rated}} dt, & \text{放电时} \\ SOC_{t-1} - \int_{t-1}^t \frac{P_{VRB}(t)\eta_c}{E_{VRB}^{rated}} dt, & \text{充电时} \end{cases}$$

对储能电池输出功率进行约束时,储能电池系统最大吸收功率的计算公式为:

$$P_{ab}(p.u.) = \begin{cases} a_{ab}^c SOC^2 + b_{ab}^c SOC + c_{ab}^c, & \text{充电时} \\ a_{ab}^d SOC^2 + b_{ab}^d SOC + c_{ab}^d, & \text{放电时} \end{cases}$$

式中, $SOC_{t-1}$ 、 $SOC_t$ 分别表示 $t-1$ 时刻和 $t$ 时刻的电池荷电状态, $P_{VRB}(t)$ 表示 $t$ 时刻的电池充放电功率, $E_{VRB}^{rated}$ 为储能电池的额定容量, $\eta_d$ 表示电池放电效率, $\eta_c$ 表示电池充电效率,

$$\begin{cases} \eta_d = \frac{P_{VRB}(p.u.)}{a_d P_{VRB}(p.u.) + b_d SOC(SOC-1) + c_d} \frac{a_d^v P_{VRB}(p.u.) + b_d^v SOC + c_d^v}{a_0^v T_W(SOC + b_0^v) + c_0^v} \\ \eta_c = \frac{(a_c SOC + b_c) P_{VRB}(p.u.) + c_c SOC + d_c}{P_{VRB}(p.u.)} \frac{a_0^v T_W(SOC + b_0^v) + c_0^v}{(a_c^v SOC + b_c^v) P_{VRB}(p.u.) + c_c^v SOC + d_c^v} \end{cases}, p.u. \text{代表标么值}, P_{VRB}(p.u.)$$

为电池充放电功率 $P_{VRB}$ 与电池额定功率的比值, $SOC$ 表示电池荷电状态, $T_W$ 表示电池温度, $a_c$ 、 $b_c$ 、 $c_c$ 、 $d_c$ 、 $a_d$ 、 $b_d$ 和 $c_d$ 通过电池的测试拟合得到,上标 $v$ 代表电压,参数带上标 $v$ 说明该参数与电池的电压相关, $a_0^v$ 、 $b_0^v$ 、 $c_0^v$ 均为常系数,通过电池的测试拟合得到; $P_{ab}(p.u.)$ 表示电池最大吸收功率 $P_{ab}$ 与电池额定吸收功率的比值, $a_{ab}^c$ 、 $b_{ab}^c$ 、 $c_{ab}^c$ 、 $a_{ab}^d$ 、 $b_{ab}^d$ 、 $c_{ab}^d$ 均为常系数,通过电池的测试拟合得到。

6. 根据权利要求5所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,其特征在于,所述环境效益 $C_{EB}$ 的计算公式为:

$$C_{EB} = \sum_{j=1}^N \left( \int_{t=0}^T (P_{grid,in} - P_{grid,t}) dt \zeta_{grid,j} c_{\sigma,j} \right), \text{if } P_{grid,t} > 0;$$

$$\text{售电效益 } C_{SE} \text{ 的计算公式为: } C_{SE} = \begin{cases} \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} C_{st_i} P_{grid,t_i} dt, & P_{grid,t_i} < 0 \\ 0, & P_{grid,t_i} \geq 0 \end{cases};$$

$$\text{购电成本 } C_{PE} \text{ 的计算公式为: } C_{PE} = \begin{cases} 0, & P_{grid,t_i} < 0 \\ \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} C_{pt_i} P_{grid,t_i} dt, & P_{grid,t_i} \geq 0 \end{cases};$$

式中, $N$ 代表污染物种类数, $T$ 代表积分总时长, $j$ 代表第 $j$ 个污染物, $P_{grid,in}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内微电网不运行时向上级电网的购电功率, $P_{grid,t}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内微电网运行时向上级电网的购电功率, $\zeta_{grid,j}$ 代表污染物排放密度函数, $c_{\sigma,j}$ 代表单位污染物排放收费价格,污染物为 $CO_2$ 、 $SO_2$ 和 $NO_x$ , $T_i$ 、 $T_{i+1}$ 分别代表积分起始时间、积分终止时间,其中, $T_0=0$ 、 $T_M=T$ , $C_{st_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的售电电价, $C_{pt_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的购电电价, $P_{grid,t_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内微电网运行时向上级电网的购电功率。

7. 根据权利要求5所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,其特征在于,所述间接效益 $C_{ID}$ 的计算公式为: $C_{ID} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} P_{VRB,k}(t_i) \eta_{di} C_{lt_i} dt, \text{if } P_{VRB,k}(t_i) > 0;$

式中, $T_i$ 、 $T_{i+1}$ 分别代表积分起始时间、积分终止时间,其中, $T_0=0$ 、 $T_M=T$ , $T$ 代表积分总时长, $P_{VRB,k}(t_i)$ 代表第 $k$ 个储能电池在时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的充放电功率, $K$ 代表储能电池的总个

数,  $\eta_{di}$  代表时间区间  $T_i \sim T_{i+1}$  内的电池放电效率,  $C_{lt_i}$  代表时间区间  $T_i \sim T_{i+1}$  内的负荷供电电价。

8. 根据权利要求5所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法, 其特征在于, 所述更换成本  $C_{RP}$  的计算公式为:  $C_{RP} = \sum_{D_{oDi}=0}^{D_{oDi}=1} \frac{1}{N_{rec}(D_{oDi})} C_{in-VRB}$ ; 式中,  $C_{in-VRB}$  代表储能电池

的投资成本,  $N_{rec}(D_{oDi})$  为  $D_{oDi}$  的拟合多项式,

$N_{rec}(D_{oDi}) = 46794.87D_{oDi}^5 - 131963.87D_{oDi}^4 + 129460.95D_{oDi}^3 - 45085.95D_{oDi}^2 - 3091.36D_{oDi} + 4443.33$ ,  $D_{oDi}$  为第  $i$  个

储能电池的放电深度, 取值范围为  $0 \sim 1$ ; 所述弃风光损失  $C_{AB}$  的计算公式为:

$C_{AB} = \lambda_c \cdot \int_{t=0}^T (\sum_{i=1}^I P_{\omega,i} + \sum_{j=1}^J P_{PV,j} + P_{grid,t} + \sum_{k=1}^K P_{VRB,k} \eta - P_{Lk}) dt$ ; 式中,  $\lambda_c$  代表弃风光因子,  $T$  代表积分总时长,  $P_{\omega,i}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内第  $i$  个风电场的输出功率,  $I$  代表风电场的总个数,  $P_{PV,j}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内第  $j$  个光伏发电单元的输出功率,  $J$  代表光伏发电单元的总个数,  $P_{grid,t}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内微电网运行时向上级电网的购电功率,  $\eta$  代表时间区间  $0 \sim T$  内的电池充电效率或放电效率,  $P_{VRB,k}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内第  $k$  个储能电池的充放电功率,  $K$  代表储能电池的总个数,  $P_{Lk}$  代表负荷需求的功率。

9. 根据权利要求5所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法, 其特征在于, 所述风速与风电场输出功率之间的经验公式为:

$$P_{\omega} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \\ P_N(a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4), & v_{in} \leq v < v_N \\ P_N, & v_N \leq v < v_{out} \\ 0, & v \geq v_{out} \end{cases}$$

式中,  $P_{\omega}$  表示风电场的输出功率,  $P_N$  表示风电场的额定功率,  $v$  表示利用气象数据预测得到的风速,  $v_{in}$  表示风电场的设定切入风速,  $v_N$  表示风电场的设定额定风速,  $v_{out}$  表示风电场的设定切出风速,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  为利用最小二乘法拟合相应场景下的历史风速数据及其对应的历史风电场输出功率数据得到的拟合系数;

当光伏发电单元由  $N_s$  个光伏组件串联、 $N_p$  个光伏组件并联构成时, 光伏发电单元的UI输出特性曲线为:

$$I = I'_{sc} N_p \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{U}{C_2 U'_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}$$

式中,  $I$ 、 $U$  分别表示光伏发电单元的输出电流和输出电压,

$$C_1 = \left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{U'_m}{C_2 U'_{oc}}\right),$$

$$C_2 = \left(\frac{U'_m}{U'_{oc}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}}\right)\right]^{-1}, \quad I'_m = \frac{I_m S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T), \quad I'_{sc} = \frac{I_{sc} S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T), \quad U'_m = U_m$$

$$(1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S), \quad U'_{oc} = U_{oc} (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S), \quad \Delta T = T - T_{ref}, \quad \Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1, \quad I_{sc}、U_{oc}、I_m、U_m$$

分别是光照强度  $S_{ref} = 1000 \text{W/m}^2$  且工作温度  $T_{ref} = 25^\circ$  时光伏组件的短路电流、开路电压、最

大功率点电流和最大功率点电压,S、T分别是利用气象数据预测得到的光照强度和温度。

10.一种考虑储能运行约束的混合微电网能量分配系统,其特征在于,该能量分配系统包括处理器、存储器以及存储在所述存储器中并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器在执行所述计算机程序时实现如权利要求1-9任一项所述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法。

## 考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法及系统,属于微电网能量分配技术领域。

### 背景技术

[0002] 微电网的能量分配策略是保证微电网内部能源协调优化运行与负荷可靠供电的基础。合理地调度微电网内部分布式电源、分布式储能电池系统以及负荷用能需求,不仅可以保证微电网的可靠运行,同时也可以提升微电网运行效益,保证新能源的可靠并网,降低可再生能源的资源浪费。

[0003] 储能电池作为一种复杂的化学介质,运行过程中其内部效率、最大吸收功率等参数在动态变化,存在动态特性。储能电池的动态特性是制约储能电池运行的重要约束,当前的交直流混合微电网能量分配方案并未考虑储能电池的动态特性,无法保证储能电池的安全、合理、可靠运行,存在很大的局限性,对微电网的控制也会存在很大的偏差。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法及系统,用以解决目前的交直流混合微电网能量分配方法未考虑储能电池的动态特性,无法保证储能电池的安全、合理、可靠运行,进而无法保证交直流混合微电网安全可靠运行的问题。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供了一种考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法,该方法包括以下步骤:

[0006] (1) 获取历史负荷数据,并实时获取气象数据,根据气象数据预测得到风速、光照强度和温度;

[0007] (2) 结合风速与风电场输出功率之间的经验公式以及所述风速,预测得到风电场的输出功率;

[0008] (3) 结合光伏发电单元的UI输出特性曲线以及所述光照强度和温度,预测得到光伏发电单元的输出功率;

[0009] (4) 结合历史负荷数据预测得到负荷需求的功率;

[0010] (5) 在储能电池系统的动态运行约束方程下求解微电网能量分配优化目标函数,结合所述优化目标函数的求解结果和预测得到的风电场的输出功率、光伏发电单元的输出功率以及负荷需求的功率对微电网进行能量分配;

[0011] 其中,所述微电网能量分配优化目标函数根据微电网的环境效益 $C_{EB}$ 、售电效益 $C_{SE}$ 、间接效益 $C_{ID}$ 、运行维护成本 $C_{OM}$ 、购电成本 $C_{PE}$ 、更换成本 $C_{RP}$ 和弃风光损失 $C_{AB}$ 建立;所述环境效益是指微电网向上级电网购电时产生的污染物排放收费,所述售电效益是指微电网向上级电网售电时产生的效益,所述间接效益是指微电网中储能电池系统给负荷供电时产生的效益,所述运行维护成本是指对微电网进行维护产生的成本,所述购电成本是指微电网

向上级电网购电时产生的成本,所述更换成本是指对微电网中的储能电池进行更换产生的成本,所述弃风光损失是指微电网中风光资源未被消纳所带来的资源浪费。

[0012] 本发明还提供了一种考虑储能运行约束的混合微电网能量分配系统,该能量分配系统包括处理器、存储器以及存储在所述存储器中并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器在执行所述计算机程序时实现上述的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法。

[0013] 进一步地,在上述方法及系统中,所述优化目标函数为: $f = C_{EB} + C_{SE} + C_{ID} - C_{OM} - C_{PE} - C_{RP} - C_{AB}$ ,  $f$ 表示优化目标函数。

[0014] 进一步地,在上述方法及系统中,所述储能电池系统的动态运行约束方程包括:储能电池SOC的动态运行约束方程、储能电池输出功率的动态运行约束方程、储能电池放电深度DoD的动态运行约束方程和储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 的动态运行约束方程。

[0015] 进一步地,在上述方法及系统中,所述储能电池SOC的动态运行约束方程为: $SOC_{k, \min} \leq SOC_{VRB, k} \leq SOC_{k, \max}$ ;所述储能电池输出功率的动态运行约束方程为:

$|P_{VRB, k}| \leq |P_{ab, k}(SOC_{VRB, k})| \cdot P_{VRB, k}^{rated}$ ;所述储能电池放电深度DoD的动态运行约束方程为: $D_{od, k} \leq D_{od, kmax}$ ;所述储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 的动态运行约束方程为: $|S_{VRB, k}| \leq |S_{VRBk, \max}|$ ;

[0016] 式中,  $k$ 代表储能电池系统中的第 $k$ 个储能电池,  $SOC_{k, \min}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC下限值,  $SOC_{k, \max}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC上限值,  $SOC_{VRB, k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC值,  $P_{VRB, k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的充放电功率,  $P_{ab, k}(SOC_{VRB, k})$ 代表第 $k$ 个储能电池的荷电状态为 $SOC_{VRB, k}$ 时对应的最大吸收功率,  $P_{VRB, k}^{rated}$ 代表第 $k$ 个储能电池的额定功率,  $D_{od, k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的放电深度,  $D_{od, kmax}$ 代表第 $k$ 个储能电池的放电深度上限值,  $S_{VRB, k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的视在功率,  $S_{VRBk, \max}$ 代表第 $k$ 个储能电池的视在功率上限值。

[0017] 进一步地,在上述方法及系统中,对储能电池SOC进行约束时,储能电池SOC的计算公式为:

$$[0018] \quad SOC_t = \begin{cases} SOC_{t-1} - \int_{t-1}^t \frac{P_{VRB}(t)}{\eta_d E_{VRB}^{rated}} dt, & \text{放电时} \\ SOC_{t-1} - \int_{t-1}^t \frac{P_{VRB}(t)\eta_c}{E_{VRB}^{rated}} dt, & \text{充电时} \end{cases}$$

[0019] 对储能电池输出功率进行约束时,储能电池系统最大吸收功率的计算公式为:

$$[0020] \quad P_{ab}(p.u.) = \begin{cases} a_{ab}^c SOC^2 + b_{ab}^c SOC + c_{ab}^c, & \text{充电时} \\ a_{ab}^d SOC^2 + b_{ab}^d SOC + c_{ab}^d, & \text{放电时} \end{cases}$$

[0021] 式中,  $SOC_{t-1}$ 、 $SOC_t$ 分别表示 $t-1$ 时刻和 $t$ 时刻的电池荷电状态,  $P_{VRB}(t)$ 表示 $t$ 时刻的电池充放电功率,  $E_{VRB}^{rated}$ 为储能电池的额定容量,  $\eta_d$ 表示电池放电效率,  $\eta_c$ 表示电池充电效率,

$$\text{率, } \begin{cases} \eta_d = \frac{P_{VRB}(p.u.)}{a_d P_{VRB}(p.u.) + b_d SOC(SOC-1) + c_d} \frac{a_d^v P_{VRB}(p.u.) + b_d^v SOC + c_d^v}{a_d^v T_w(SOC + b_d^v) + c_d^v} \\ \eta_c = \frac{(a_c SOC + b_c) P_{VRB}(p.u.) + c_c SOC + d_c}{P_{VRB}(p.u.)} \frac{a_c^v T_w(SOC + b_c^v) + c_c^v}{(a_c^v SOC + b_c^v) P_{VRB}(p.u.) + c_c^v SOC + d_c^v} \end{cases}, p.u. \text{代表标么值, } P_{VRB}$$

(p.u.)为电池充放电功率 $P_{VRB}$ 与电池额定功率的比值,  $SOC$ 表示电池荷电状态,  $T_w$ 表示电池温度,  $a_c$ 、 $b_c$ 、 $c_c$ 、 $d_c$ 、 $a_d$ 、 $b_d$ 和 $c_d$ 通过电池的测试拟合得到,上标 $v$ 代表电压,参数带上标 $v$ 说明

该参数与电池的电压相关,  $a_0^v$ 、 $b_0^v$ 、 $c_0^v$ 均为常系数,通过电池的测试拟合得到; $P_{ab}$  (p.u.)表示电池最大吸收功率 $P_{ab}$ 与电池额定吸收功率的比值,  $a_{ab}^c$ 、 $b_{ab}^c$ 、 $c_{ab}^c$ 、 $a_{ab}^d$ 、 $b_{ab}^d$ 、 $c_{ab}^d$ 均为常系数,通过电池的测试拟合得到。

[0022] 进一步地,在上述方法及系统中,所述环境效益 $C_{EB}$ 的计算公式为: $C_{EB} =$

$$\sum_{j=1}^N \left( \int_{t=0}^T (P_{grid,in} - P_{grid,t}) dt \zeta_{grid,j} c_{\sigma,j} \right), \text{ if } P_{grid,t} > 0;$$

[0023] 售电效益 $C_{SE}$ 的计算公式为: $C_{SE} = \begin{cases} \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} C_{st_i} P_{grid,t_i} dt, P_{grid,t_i} < 0; \\ 0, P_{grid,t_i} \geq 0 \end{cases}$ ;

[0024] 购电成本 $C_{PE}$ 的计算公式为: $C_{PE} = \begin{cases} 0, P_{grid,t_i} < 0 \\ \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} C_{pt_i} P_{grid,t_i} dt, P_{grid,t_i} \geq 0 \end{cases}$ ;

[0025] 式中, $N$ 代表污染物种类数, $T$ 代表积分总时长, $j$ 代表第 $j$ 个污染物, $P_{grid,in}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内微电网不运行时向上级电网的购电功率, $P_{grid,t}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内微电网运行时向上级电网的购电功率, $\zeta_{grid,j}$ 代表污染物排放密度函数, $c_{\sigma,j}$ 代表单位污染物排放收费价格,污染物为 $CO_2$ 、 $SO_2$ 和 $NO_x$ , $T_i$ 、 $T_{i+1}$ 分别代表积分起始时间、积分终止时间,其中, $T_0 = 0$ 、 $T_M = T$ , $C_{st_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的售电电价, $C_{pt_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的购电电价, $P_{grid,t_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内微电网运行时向上级电网的购电功率。

[0026] 进一步地,在上述方法及系统中,所述间接效益 $C_{ID}$ 的计算公式为:

$$C_{ID} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} P_{VRB,k}(t_i) \eta_{di} C_{lt_i} dt, \text{ if } P_{VRB,k}(t_i) > 0;$$

式中, $T_i$ 、 $T_{i+1}$ 分别代表积分起始时间、积分终止时间,其中, $T_0 = 0$ 、 $T_M = T$ , $T$ 代表积分总时长, $P_{VRB,k}(t_i)$ 代表第 $k$ 个储能电池在时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的充放电功率, $K$ 代表储能电池的总个数, $\eta_{di}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的电池放电效率, $C_{lt_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的负荷供电电价。

[0027] 进一步地,在上述方法及系统中,所述更换成本 $C_{RP}$ 的计算公式为: $C_{RP} =$

$$\sum_{D_{odi}=0}^{D_{odi}=1} \frac{1}{N_{rec}(D_{odi})} C_{in-VRB};$$

式中, $C_{in-VRB}$ 代表储能电池的投资成本, $N_{rec}(D_{odi})$ 为 $D_{odi}$ 的拟合多项式, $N_{rec}(D_{odi}) = 46794.87D_{odi}^5 - 131963.87D_{odi}^4 + 129460.95D_{odi}^3 - 45085.95D_{odi}^2 - 3091.36D_{odi} + 4443.33$ , $D_{odi}$ 为第 $i$ 个储能电池的放电深度,取值范围为 $0 \sim 1$ ;

[0028] 所述弃风光损失 $C_{AB}$ 的计算公式为:

$$C_{AB} = \lambda_c \cdot \int_{t=0}^T (\sum_{i=1}^I P_{\omega,i} + \sum_{j=1}^J P_{PV,j} + P_{grid,t} + \sum_{k=1}^K P_{VRB,k} \eta - P_{Lk}) dt;$$

式中, $\lambda_c$ 代表弃风光因子, $T$ 代表积分总时长, $P_{\omega,i}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内第 $i$ 个风电场的输出功率, $I$ 代表风电场的总个数, $P_{PV,j}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内第 $j$ 个光伏发电单元的输出功率, $J$ 代表光伏发电单元的总个数, $P_{grid,t}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内微电网运行时向上级电网的购电功率, $\eta$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内的电池充电效率或放电效率, $P_{VRB,k}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内第 $k$ 个储能电池的充放电功率, $K$ 代表储能电池的总个数, $P_{Lk}$ 代表负荷需求的功率。

[0029] 进一步地,在上述方法及系统中,所述风速与风电场输出功率之间的经验公式为:



$$[0030] \quad P_{\omega} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \\ P_N(a_1v^3 + a_2v^2 + a_3v + a_4), & v_{in} \leq v < v_N \\ P_N, & v_N \leq v < v_{out} \\ 0, & v \geq v_{out} \end{cases}$$

[0031] 式中,  $P_{\omega}$  表示风电场的输出功率,  $P_N$  表示风电场的额定功率,  $v$  表示利用气象数据预测得到的风速,  $v_{in}$  表示风电场的设定切入风速,  $v_N$  表示风电场的设定额定风速,  $v_{out}$  表示风电场的设定切出风速,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  为利用最小二乘法拟合相应场景下的历史风速数据及其对应的历史风电场输出功率数据得到的拟合系数;

[0032] 当光伏发电单元由  $N_s$  个光伏组件串联、 $N_p$  个光伏组件并联构成时, 光伏发电单元的 UI 输出特性曲线为:

$$[0033] \quad I = I'_{sc} N_p \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{U}{C_2 U'_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}$$

[0034] 式中,  $I$ 、 $U$  分别表示光伏发电单元的输出电流和输出电压,  $C_1 = (1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}}) \exp(-\frac{U'_m}{C_2 U'_{oc}})$ ,  $C_2 = (\frac{U'_m}{U'_{oc}} - 1) [\ln(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}})]^{-1}$ ,  $I'_m = \frac{I_m S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T)$ ,  $I'_{sc} = \frac{I_{sc} S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T)$ ,  $U'_m = U_m$

$(1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S)$ ,  $U'_{oc} = U_{oc} (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S)$ ,  $\Delta T = T - T_{ref}$ ,  $\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1$ ,  $I_{sc}$ 、 $U_{oc}$ 、 $I_m$ 、 $U_m$

分别是光照强度  $S_{ref} = 1000 \text{W/m}^2$  且工作温度  $T_{ref} = 25^\circ$  时光伏组件的短路电流、开路电压、最大功率点电流和最大功率点电压,  $S$ 、 $T$  分别是利用气象数据预测得到的光照强度和温度。

[0035] 本发明的有益效果是: 本发明根据微电网的环境效益  $C_{EB}$ 、售电效益  $C_{SE}$ 、间接效益  $C_{ID}$ 、运行维护成本  $C_{OM}$ 、购电成本  $C_{PE}$ 、更换成本  $C_{RP}$  和弃风光损失  $C_{AB}$  建立了微电网能量分配的优化目标函数, 并在储能电池系统的动态运行约束方程下求解该优化目标函数得到微电网的能量分配策略, 由于储能电池系统的动态运行约束方程是根据储能电池系统的充放电效率、最大吸收功率和 SOC 的动态特性建立的, 因此, 本发明的混合微电网能量分配方法充分考虑了储能电池系统的动态特性, 能够保证储能电池安全、合理、可靠运行, 保证微电网安全可靠运行, 提高了储能电池的安全性, 降低了储能电站的运行风险, 提升了储能电池系统的利用率。

## 附图说明

[0036] 图1是本发明方法实施例中的交直流混合微电网能量分配方法流程图;

[0037] 图2是本发明方法实施例中的交直流混合微电网的物理结构示意图;

[0038] 图3是图2所示交直流混合微电网冬季(2019年12月3号)的能量分配策略;

[0039] 图4是图2所示交直流混合微电网夏季(2019年6月3号)的能量分配策略。

## 具体实施方式

[0040] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施例, 对

本发明进行进一步详细说明。

[0041] 方法实施例：

[0042] 本实施例的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法(以下简称本实施例方法),考虑了储能电池的动态运行约束,能够保证储能电池安全、合理、可靠运行,保证交直流混合微电网(即混合微电网或微电网)安全可靠运行,下面以制定微电网的日能量分配策略为例对本实施方法进行详细介绍(根据实际需要也可以制定微电网某小时或某个时间段的能量分配策略),具体步骤如下：

[0043] 步骤1、获取数据,包括:历史风速数据及其对应的历史风电场输出功率数据、历史负荷数据,并实时获取气象数据、微电网向上级电网的购电功率(包括微电网不运行时向上级电网的购电功率和微电网运行时向上级电网的购电功率),并根据气象数据预测得到风速、光照强度和温度；

[0044] 其中,微电网不运行是指微电网中的风电场、光伏发电单元和储能电池均不工作,但微电网不运行时负荷也可能存在功率需求,此时微电网会向上级电网购电以满足负荷的功率需求;微电网运行是指微电网中的风电场、光伏发电单元和/或储能电池工作,但微电网运行时可能出现满足不了负荷功率需求的情况,此时微电网会向上级电网购电以满足负荷的功率需求。

[0045] 步骤2、预测风电场的日出力曲线,即预测风电场的日输出功率曲线；

[0046] 风电场的出力受诸多因素的影响,本实施例中通过建立风速与风电场输出功率之间的经验公式,并考虑春、夏、秋、冬四个场景,利用最小二乘法拟合每个场景下的历史风速数据及其对应的历史风电场输出功率数据,得到相应场景下的风速与风电场输出功率之间的经验公式中的拟合系数,得到相应场景下的风速-风电场输出功率经验公式;然后,结合相应场景下的风速-风电场输出功率经验公式和风电场的预测风速(根据气象数据得到)对风电场的出力进行预测,得到风电场的日输出功率曲线。

[0047] 其中,风速-风电场输出功率之间的经验公式如下：

$$[0048] \quad P_{\omega} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \\ P_N(a_1v^3 + a_2v^2 + a_3v + a_4), & v_{in} \leq v < v_N \\ P_N, & v_N \leq v < v_{out} \\ 0, & v \geq v_{out} \end{cases}$$

[0049] 式中, $P_{\omega}$ 表示风电场的输出功率, $P_N$ 表示风电场的额定功率, $v$ 表示利用气象数据得到的风电场的预测风速, $v_{in}$ 表示风电场的设定切入风速, $v_N$ 表示风电场的设定额定风速, $v_{out}$ 表示风电场的设定切出风速,其中, $v_{in}$ 、 $v_N$ 、 $v_{out}$ 的值根据实际需要设置, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 和 $a_4$ 为利用最小二乘法拟合相应场景下的历史风速数据及其对应的历史风电场输出功率数据得到的拟合系数。

[0050] 步骤3、预测光伏发电单元的日出力曲线,即预测光伏发电单元的日输出功率曲线；

[0051] 光伏发电单元的出力受诸多因素的影响,本实施例中考虑春、夏、秋、冬四个场景,根据气象数据得到的光照强度和工作温度对光伏发电单元的出力进行预测,得到光伏发电单元的输出功率曲线。具体步骤如下：

[0052] 步骤3.1、设定光伏组件标准工况:光照强度 $S_{ref} = 1000W/m^2$ ,工作温度 $T_{ref} = 25^{\circ}$ ,

当光照强度 $S$ 和工作温度 $T$ 变化时,对光伏组件的短路电流 $I_{sc}$ 、开路电压 $U_{oc}$ 、最大功率点电流 $I_m$ 和最大功率点电压 $U_m$ 进行修正,修正公式如下:

$$[0053] \quad \begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \\ I'_{sc} = \frac{I_{sc} S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ U'_{oc} = U_{oc} (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S) \\ I'_m = \frac{I_m S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ U'_m = U_m (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S) \end{cases}$$

[0054] 式中, $I_{sc}$ 、 $U_{oc}$ 、 $I_m$ 、 $U_m$ 分别是光照强度 $S_{ref}=1000W/m^2$ 且工作温度 $T_{ref}=25^\circ$ 时光伏组件的短路电流、开路电压、最大功率点电流和最大功率点电压,当光伏组件为硅材料时, $a=0.0025$ , $b=0.5$ , $c=0.00288$ 。

[0055] 步骤3.2、根据修正后的光伏组件的短路电流 $I'_{sc}$ 、开路电压 $U'_{oc}$ 、最大功率点电流 $I'_m$ 和最大功率点电压 $U'_m$ 的数值,计算光伏组件的两个参数 $C_1$ 、 $C_2$ ,计算公式如下:

$$[0056] \quad C_1 = \left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{U'_m}{C_2 U'_{oc}}\right)$$

$$[0057] \quad C_2 = \left(\frac{U'_m}{U'_{oc}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}}\right)\right]^{-1}$$

[0058] 步骤3.3、设定光伏阵列由 $N_s$ 个组件串联、 $N_p$ 个组件并联构成,则光伏阵列的UI输出特性曲线为:

$$[0059] \quad I = I'_{sc} N_p \left\{1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{U}{C_2 U'_{oc}}\right) - 1\right]\right\}$$

[0060] 步骤3.4、设定光伏阵列工作于最大功率点,根据光伏阵列的UI输出特性曲线,得到光伏发电单元的最大功率输出曲线。

[0061] 步骤4、预测负荷需求的日出力曲线;

[0062] 负荷需求出力具有随机性,本实施例中采用自回归滑动平均时间序列模型(即ARMA模型)对负荷需求进行定量预测,得到负荷需求的出力曲线;具体步骤如下:

[0063] 步骤4.1、根据历史负荷数据(例如历史5年的负荷数据)采用最小二乘法拟合得到ARMA模型的参数: $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\zeta_a$ ;

[0064] 步骤4.2、根据公式 $y_t = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i y_{t-i} + \delta_t - \sum_{j=1}^m \theta_j \delta_{t-j}$ 构造ARMA模型的时间序列 $y_t$ ,其中 $\delta_t$ 为均值为0、标准差为 $\zeta_a$ 的高斯白噪声, $y_{t-i}$ 为前 $i$ 列的时间序列, $\delta_{t-j}$ 为前 $j$ 列的高斯白噪声, $n$ 和 $j$ 的值需要根据ARMA模型构造的时间序列来确定;

[0065] 步骤4.3、考虑负荷预测误差 $\zeta_L$ ,根据负荷预测值 $g_k(t) = y_t$ ,利用公式 $P_{Lk}(t) = g_k$

$(t) + \sigma_L \cdot y_t = y_t + \sigma_L \cdot y_t$ 对微电网节点负荷预测值进行修正,得到负荷预测的曲线。

[0066] 其中,将高斯白噪声作为负荷预测误差 $\zeta_L$ 的基数,结合历史负荷数据确定最终的负荷预测误差 $\zeta_L$ 。

[0067] 负荷预测值 $g_k(t)$ 由ARMA模型得到,根据ARMA模型模拟负荷的历史负荷曲线,就可以完成对负荷的预测。

[0068] 步骤5、构建储能电池系统的动态运行约束方程;

[0069] 本实施例中,通过考虑储能电池系统自身的机制和内在运行限制,构建的储能电池系统的动态运行约束方程包括:(1)储能电池SOC的动态运行约束方程,该方程考虑了储能电池SOC的运行限制;(2)储能电池输出功率的动态运行约束方程,该方程考虑了储能电池输出功率受最大吸收功率的运行限制;(3)储能电池放电深度 $D_{od}$ 的动态运行约束方程,该方程考虑了储能电池放电深度 $D_{od}$ 的运行限制;(4)储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 的动态运行约束方程,该方程考虑了储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 的运行限制。

[0070] 各动态运行约束方程如下:

[0071] (1)储能电池SOC的动态运行约束方程:

$$[0072] \quad SOC_{k,\min} \leq SOC_{VRB,k} \leq SOC_{k,\max}$$

[0073] 式中, $k$ 代表储能电池系统中的第 $k$ 个储能电池, $SOC_{k,\min}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC下限值, $SOC_{k,\max}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC上限值, $SOC_{VRB,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的SOC值。

[0074] (2)储能电池输出功率的动态运行约束方程:

$$[0075] \quad |P_{VRB,k}| \leq |P_{ab,k}(SOC_{VRB,k})| \cdot P_{VRB,k}^{rated}$$

[0076] 式中, $P_{VRB,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的充放电功率(当 $P_{VRB,k}$ 表示储能电池的放电功率时等于储能电池的输出功率), $P_{ab,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的荷电状态为 $SOC_{VRB,k}$ 时对应的最大吸收功率,通过储能电池最大吸收功率的动态方程获得, $P_{VRB,k}^{rated}$ 代表第 $k$ 个储能电池的额定功率。

[0077] (3)储能电池放电深度 $D_{od}$ 的动态运行约束方程:

$$[0078] \quad D_{od,k} \leq D_{od,kmax}$$

[0079] 式中, $D_{od,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的放电深度, $D_{od,kmax}$ 代表第 $k$ 个储能电池的放电深度上限值。

[0080] (4)储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 的动态运行约束方程:

$$[0081] \quad |S_{VRB,k}| \leq |S_{VRBk,\max}|$$

[0082] 式中, $S_{VRB,k}$ 代表第 $k$ 个储能电池的视在功率, $S_{VRBk,\max}$ 代表第 $k$ 个储能电池的视在功率上限值。

[0083] 由于视在功率的平方=有功功率的平方+无功功率的平方,因此通过对储能电池视在功率 $S_{VRB}$ 进行约束,能够实现对后续优化目标函数的约束,进而实现对微电网的能量分配策略的约束。

[0084] 其中,各上限值、下限值(包括SOC的上、下限值,最大吸收功率的上、下限值、放电深度 $D_{od}$ 的上限值、 $S_{VRB}$ 的上限值)的设置依据是安全、合理使用储能电池。例如SOC的下限值是为了保证储能能有裕量,应急给重要负荷供电;放电深度上限值是为了保证储能电池不至于过度消耗;最大吸收功率和 $S_{VRB}$ 的上限值也是储能电池本身应遵守的。

[0085] 本实施例中,以全钒液流电池为例,考虑全钒液流储能电池系统内部参数的动态变化性,研究了定量描述全钒液流储能电池系统内部运行特性的动态参数及其数学方程表达式,得到了全钒液流储能电池充放电效率、储能电池最大吸收功率和储能电池SOC的动态方程,具体如下:

[0086] (1) 考虑储能电池的放电效率 $\eta_d$ 和充电效率 $\eta_c$ 受储能电池SOC以及充放电功率 $P_{VRB}$ 的影响,构建的储能电池充放电效率的动态方程为:

$$[0087] \quad \begin{cases} \eta_d = \frac{P_{VRB}(p.u.)}{a_d P_{VRB}(p.u.) + b_d SOC(SOC - 1) + c_d} \frac{a_d^v P_{VRB}(p.u.) + b_d^v SOC + c_d^v}{a_o^v T_w(SOC + b_o^v) + c_o^v} \\ \eta_c = \frac{(a_c SOC + b_c) P_{VRB}(p.u.) + c_c SOC + d_c}{P_{VRB}(p.u.)} \frac{a_o^v T_w(SOC + b_o^v) + c_o^v}{(a_c^v SOC + b_c^v) P_{VRB}(p.u.) + c_c^v SOC + d_c^v} \end{cases}$$

[0088] 式中, $\eta_d$ 表示电池放电效率, $\eta_c$ 表示电池充电效率,p.u.代表标么值, $P_{VRB}(p.u.)$ 为电池充放电功率 $P_{VRB}$ 与电池额定功率的比值,SOC表示电池荷电状态, $T_w$ 表示电池温度, $a_c$ 、 $b_c$ 、 $c_c$ 、 $d_c$ 、 $a_d$ 、 $b_d$ 和 $c_d$ 通过电池的测试拟合得到,上标v代表电压,参数带上标v说明该参数与电池的电压相关, $a_o^v$ 、 $b_o^v$ 、 $c_o^v$ 均为常系数,通过电池的测试拟合得到。

[0089] (2) 考虑储能电池最大吸收功率 $P_{ab}$ 受储能电池SOC的影响,构建的储能电池最大吸收功率的动态方程为:

$$[0090] \quad P_{ab}(p.u.) = \begin{cases} a_{ab}^c SOC^2 + b_{ab}^c SOC + c_{ab}^c, \text{ 充电时} \\ a_{ab}^d SOC^2 + b_{ab}^d SOC + c_{ab}^d, \text{ 放电时} \end{cases}$$

[0091] 式中,p.u.代表标么值, $P_{ab}(p.u.)$ 表示电池最大吸收功率 $P_{ab}$ 与电池额定吸收功率的比值, $a_{ab}^c$ 、 $b_{ab}^c$ 、 $c_{ab}^c$ 、 $a_{ab}^d$ 、 $b_{ab}^d$ 、 $c_{ab}^d$ 均为常系数,通过电池的测试拟合得到。

[0092] (3) 考虑储能电池SOC受充放电功率 $P_{VRB}$ 的影响,构建的储能电池SOC的动态方程为:

$$[0093] \quad SOC_t = \begin{cases} SOC_{t-1} - \int_{t-1}^t \frac{P_{VRB}(t)}{\eta_d E_{VRB}^{rated}} dt, \text{ 放电时} \\ SOC_{t-1} - \int_{t-1}^t \frac{P_{VRB}(t) \eta_c}{E_{VRB}^{rated}} dt, \text{ 充电时} \end{cases}$$

[0094] 式中, $P_{VRB}(t)$ 表示t时刻的电池充放电功率, $\eta_d$ 表示电池放电效率, $\eta_c$ 表示电池充电效率, $E_{VRB}^{rated}$ 为储能电池的额定容量,电池铭牌上标注有这个值, $SOC_{t-1}$ 、 $SOC_t$ 分别表示t-1时刻和t时刻的电池荷电状态。

[0095] 综上,在对储能电池SOC进行约束时,结合储能电池SOC的动态方程和储能电池充放电效率的动态方程计算储能电池的SOC值;对储能电池输出功率进行约束时,利用储能电池最大吸收功率的动态方程计算储能电池系统的最大吸收功率,进而计算储能电池输出功率。由上述公式容易可以看出:储能电池SOC、充电效率 $\eta_c$ 、放电效率 $\eta_d$ 、最大吸收功率 $P_{ab}$ 是相互影响的几个量,在程序中这几个量的计算是通过互相迭代计算的;另外,充电效率 $\eta_c$ 、放电效率 $\eta_d$ 、最大吸收功率 $P_{ab}$ 均是与时间t相关的量。需要说明的是,本实施例中以全钒液流电池为例介绍了当储能电池系统中的电池类型为全钒液流电池时,通过构建储能电池充放电效率、储能电池最大吸收功率和储能电池SOC的动态方程定量描述全钒液流储能电池系统内部运行特性,从而能利用这三个动态方程实现储能电池SOC和储能电池输出功率的

计算,进而实现对储能电池SOC和储能电池输出功率的约束;当储能电池系统中的电池类型发生变化时,需要类似地研究相应电池类型的储能电池系统的内部运行特性的定量描述,即按照储能电池充放电效率受储能电池SOC以及充放电功率 $P_{VRB}$ 的影响、储能电池最大吸收功率 $P_{ab}$ 受储能电池SOC的影响、储能电池SOC受充放电功率 $P_{VRB}$ 的影响建立相应类型储能电池充放电效率、储能电池最大吸收功率和储能电池SOC的动态方程,以便利用这三个动态方程实现储能电池SOC和储能电池输出功率的计算,进而实现对储能电池SOC和储能电池输出功率的约束。

[0096] 步骤6、构建交直流混合微电网能量分配的优化目标函数;

[0097] 本实施例中,综合考虑微电网的环境效益 $C_{EB}$ 、售电效益 $C_{SE}$ 、间接效益 $C_{ID}$ 、运行维护成本 $C_{OM}$ 、购电成本 $C_{PE}$ 、更换成本 $C_{RP}$ 、弃风光损失 $C_{AB}$ ,构建交直流混合微电网能量分配的优化目标函数,优化目标函数 $f$ 为:

$$[0098] \quad f = C_{EB} + C_{SE} + C_{ID} - C_{OM} - C_{PE} - C_{RP} - C_{AB}$$

[0099] 下面详细介绍优化目标函数中各变量的计算方法:

[0100] (1) 环境效益 $C_{EB}$ 的计算公式为:

$$[0101] \quad C_{EB} = \sum_{j=1}^N \left( \int_{t=0}^T (P_{grid,in} - P_{grid,t}) dt \zeta_{grid,j} c_{\sigma,j} \right), \text{if } P_{grid,t} > 0$$

[0102] 式中, $N$ 代表污染物种类数, $T$ 代表积分总时长, $T$ 的取值根据实际需要设置,当制定日能量分配策略时取 $T=24h$ , $j$ 代表第 $j$ 个污染物, $P_{grid,in}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内微电网不运行时向上级电网的购电功率, $P_{grid,t}$ 代表时间区间 $0 \sim T$ 内微电网运行时向上级电网的购电功率, $\zeta_{grid,j}$ 代表污染物排放密度函数, $c_{\sigma,j}$ 代表单位污染物排放收费价格,污染物为 $CO_2$ 、 $SO_2$ 和 $NO_x$ 。由环境效益 $C_{EB}$ 的计算公式可以看出,只有在 $P_{grid,t} > 0$ 时,即微电网运行时向上级电网购电时才产生环境效益。

[0103] (2) 售电效益 $C_{SE}$ 的计算公式为:

$$[0104] \quad C_{SE} = \begin{cases} \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} C_{st_i} P_{grid,t_i} dt, & P_{grid,t_i} < 0 \\ 0, & P_{grid,t_i} \geq 0 \end{cases}$$

[0105] 式中, $T_i$ 、 $T_{i+1}$ 分别代表积分起始时间、积分终止时间,其中, $T_0=0$ 、 $T_M=T$ , $T$ 代表积分总时长, $C_{st_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的售电电价, $P_{grid,t_i}$ 代表时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内微电网运行时向上级电网的购电功率。

[0106] 由售电效益 $C_{SE}$ 的计算公式可以看出,只有在 $P_{grid,t_i} < 0$ 时,即微电网向上级电网售电时才产生售电效益。

[0107] (3) 间接效益 $C_{ID}$ 的计算公式为:

$$[0108] \quad C_{ID} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} P_{VRB,k}(t_i) \eta_{di} C_{lt_i} dt, \text{if } P_{VRB,k}(t_i) > 0$$

[0109] 式中, $T_i$ 、 $T_{i+1}$ 分别代表积分起始时间、积分终止时间,其中, $T_0=0$ 、 $T_M=T$ , $T$ 代表积分总时长, $P_{VRB,k}(t_i)$ 代表第 $k$ 个储能电池在时间区间 $T_i \sim T_{i+1}$ 内的充放电功率, $K$ 代表储能电

池的总个数,  $\eta_{di}$  代表时间区间  $T_i \sim T_{i+1}$  内的电池放电效率,  $C_{lt_i}$  代表时间区间  $T_i \sim T_{i+1}$  内的负荷供电电价。

[0110] 由间接效益  $C_{ID}$  的计算公式可以看出, 只有在  $P_{VRB,k}(t_i) > 0$  时, 即电池放电时, 也就是储能电池给负荷供电时才产生间接效益。

[0111] (4) 运行维护成本  $C_{OM}$  的计算公式为:

$$[0112] \quad C_{OM} = \sum_{k=1}^K (C_{1k} P_{VRB,k}^{rated} + C_{2k} E_{VRB,k}^{rated})$$

[0113] 式中,  $C_{1k}$ 、 $C_{2k}$  分别表示第  $k$  个储能电池对应的常系数,  $P_{VRB,k}^{rated}$  代表第  $k$  个储能电池的额定功率,  $E_{VRB,k}^{rated}$  为第  $k$  个储能电池的额定容量。

[0114] (5) 购电成本  $C_{PE}$  的计算公式为:

$$[0115] \quad C_{PE} = \begin{cases} 0, P_{grid,t_i} < 0 \\ \sum_{i=0}^M \int_{T_i}^{T_{i+1}} C_{pt_i} P_{grid,t_i} dt, P_{grid,t_i} \geq 0 \end{cases}$$

[0116] 式中,  $T_i$ 、 $T_{i+1}$  分别代表积分起始时间、积分终止时间, 其中,  $T_0 = 0$ 、 $T_M = T$ ,  $T$  代表积分总时长,  $P_{grid,t_i}$  代表时间区间  $T_i \sim T_{i+1}$  内微电网运行时向上级电网的购电功率,  $C_{pt_i}$  代表时间区间  $T_i \sim T_{i+1}$  内的购电电价。

[0117] 由购电成本  $C_{PE}$  的计算公式可以看出, 只有在  $P_{grid,t_i} \geq 0$  时, 即微电网向上级电网购电时才产生购电成本。

[0118] (6) 储能电池的更换成本  $C_{RP}$  的计算公式为:

$$[0119] \quad C_{RP} = \sum_{D_{oDi}=0}^{D_{oDi}=1} \frac{1}{N_{rec}(D_{oDi})} C_{in-VRB}$$

[0120] 式中,  $C_{in-VRB}$  代表储能电池的投资成本,  $N_{rec}(D_{oDi})$  为  $D_{oDi}$  的拟合多项式,  $N_{rec}(D_{oDi}) = 46794.87D_{oDi}^5 - 131963.87D_{oDi}^4 + 129460.95D_{oDi}^3 - 45085.95D_{oDi}^2 - 3091.36D_{oDi} + 4443.33$ ,  $D_{oDi}$  为第  $i$  个储能电池的放电深度, 取值范围为  $0 \sim 1$ , 当  $D_{oDi} = 0$  时, 储能电池完全静置, 但是由于储能电池本身的自放电现象, 也会有一定的更换成本。

[0121] 储能电池的更换成本  $C_{RP}$  的含义是: 不同的充放电方式会导致储能电池有不同的损耗, 导致储能电池产生更换成本, 这个更换成本与放电深度有关。

[0122] (7) 弃风光损失  $C_{AB}$  的计算方法为:

$$[0123] \quad C_{AB} = \lambda_c \cdot \int_{t=0}^T \left( \sum_{i=1}^I P_{\omega,i} + \sum_{j=1}^J P_{PV,j} + P_{grid,t} + \sum_{k=1}^K P_{VRB,k} \eta - P_{Lk} \right) dt$$

[0124] 式中,  $\lambda_c$  代表弃风光因子,  $T$  代表积分总时长,  $P_{\omega,i}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内第  $i$  个风电场的输出功率,  $I$  代表风电场的总个数,  $P_{PV,j}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内第  $j$  个光伏发电单元的输出功率,  $J$  代表光伏发电单元的总个数,  $P_{grid,t}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内微电网运行时向上级电网的购电功率,  $\eta$  代表时间区间  $0 \sim T$  内的电池充电效率或放电效率,  $P_{VRB,k}$  代表时间区间  $0 \sim T$  内第  $k$  个储能电池的充放电功率,  $K$  代表储能电池的总个数,  $P_{Lk}$  代表负荷需求的功率。

[0125] 其中,  $\eta$ 表示放电效率或充电效率取决于电池所处的状态,当电池处于放电状态时,  $\eta$ 为放电效率,当电池处于充电状态时,  $\eta$ 为充电效率。

[0126] 其中,弃风光因子 $\lambda_c$ 代表对弃风光的惩罚因子,因为接入的风电光伏等功率需尽量消纳,如果弃掉,会造成资源浪费; $\lambda_c$ 的设置依据是微电网风光资源消纳率;弃风光损失 $C_{AB}$ 的含义是微电网风光资源并未消纳所带来的资源浪费。

[0127] 步骤7、求解优化目标函数,结合优化目标函数的求解结果和预测得到的风电场的日输出功率、光伏发电单元的日输出功率以及负荷需求的日功率得到交直流混合微电网每日的能量分配策略,即得到交直流混合微电网每日各时段分布式电源(风电场、光伏发电单元)、分布式储能电池系统的输出功率。

[0128] 本实施例中,采用动态优化算法求解优化目标函数,求解方法如下:

[0129] 步骤7.1、根据储能电池的状态量SOC,基于储能电池SOC参数的状态转移,分离各个时段Q内储能电池的耦合约束,将优化模型转化成一系列的单时段优化模型;

[0130] 分离各个时段Q内储能电池的耦合约束:由于储能电池SOC代表了当前的核电状态,也即储能的状态,而其在一个时段内的改变有限,因此默认电池在各个时段内不变,这样就可以分离各个时段Q内储能电池的耦合约束,从而转为多个单时段优化模型。

[0131] 步骤7.2、针对单时段优化模型,设置储能电池、风光等输出功率的增量 $\Delta P$ ,以全局搜索的方法找到各时段分布式电源、分布式电池储能系统的输出功率,并作为交直流混合微电网的能量分配策略。

[0132] 单时段优化模型的求解,利用动态优化算法即可实现,即按阶段性增加储能电池输出功率值,直到这个值在本时段内最优。

[0133] 下面通过实验验证本实施例方法的有效性:

[0134] 采用本实施例方法对如图2所示的交直流混合微电网进行了算例验证,统计了该交直流混合微电网冬季(2019年12月3号)和夏季(2019年6月3号)两组数据。

[0135] 图2中的交直流混合微电网中包含2个光伏发电单元(即PV1、PV2)、2个储能电池系统(即VRB1、VRB2)、2个风电场(即Wind1、Wind2)、直流总线、交流总线、直流负荷(即DC loads)、交流负荷等(即AC loads)。

[0136] 利用本实施例方法对图2所示交直流混合微电网进行能量分配的具体步骤如下:

[0137] 1、微电网冬季和夏季发电模式下,根据气象风速数据,预测风电场的日出力曲线;

[0138] 2、微电网冬季和夏季发电模式下,根据气象光照和温度数据,预测光伏发电单元的日出力曲线;

[0139] 3、根据负荷历史数据得到自回归滑动平均模型ARMA的参数: $\varepsilon_1=0.8782, \varepsilon_2=-0.0066, \varepsilon_3=0.0265, \theta_1=-0.2162, \theta_2=0.0091, \zeta_a=0.55792$ ,据此预测负荷需求的出力曲线;

[0140] 4、模拟充放电效率 $\eta$ 的拟合参数: $a_c, b_c, c_c, d_c, a_d, b_d$ 和 $c_d$ ,构建储能电池动态充放电效率的拟合模型,模拟动态吸收功率 $P_{ab}$ 的拟合系数,构建储能电池动态吸收功率的拟合模型;

[0141] 5、构建储能电池SOC上下限、输出功率上下限、放电深度 $D_{od}$ 上限、视在功率 $S_{VRB}$ 上限的动态约束方程;

[0142] 6、综合考虑微电网的售电效益 $C_{SE}$ 、购电成本 $C_{PE}$ 、环境效益 $C_{EB}$ 、更换成本 $C_{RP}$ 、弃风光



损失 $C_{AB}$ 、间接效益 $C_{ID}$ ，构建交直流混合微电网能量分配的优化目标；

[0143] 7、采用动态优化算法对优化模型进行求解，得到交直流微电网冬季(2019年12月3号)和夏季(2019年6月3号)两个典型日的能量分配策略，分别如图3和图4所示。

[0144] 图3是为图2所示交直流微电网制定的冬季2019年12月3号这一天的能量分配策略，可以看出，这一天的能量分配策略包括微电网向上级电网购电 $P_{grid,t}$ 、光伏发电 $P_{PV}$ 和储能电池系统供电 $P_{VRB}$ 。

[0145] 图4是为图2所示交直流微电网制定的夏季2019年6月3号这一天的能量分配策略，可以看出，这一天的负荷需求曲线为 $P_{Lk}$ (即图中的 $P_{L,k}$ )，这一天的能量分配策略包括风电场发电 $P_{\omega,i}$ 、光伏发电 $P_{PV}$ 和微电网向上级电网购电 $P_{grid,t}$ 。

[0146] 系统实施例：

[0147] 本实施例的考虑储能运行约束的混合微电网能量分配系统，包括处理器、存储器以及存储在所述存储器中并可在处理器上运行的计算机程序，所述处理器在执行所述计算机程序时实现考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法。

[0148] 考虑储能运行约束的混合微电网能量分配方法的具体实施过程已在上述方法实施例中进行了详细介绍，这里不做赘述。

[0149] 本领域内的技术人员应明白，本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此，本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0150] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器，使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0151] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中，使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制品，该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0152] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上，使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理，从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0153] 最后应当说明的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制，尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明，所属领域的普通技术人员应当理解：依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换，而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换，其均应涵盖在本发明的权利要求保护范围之内。

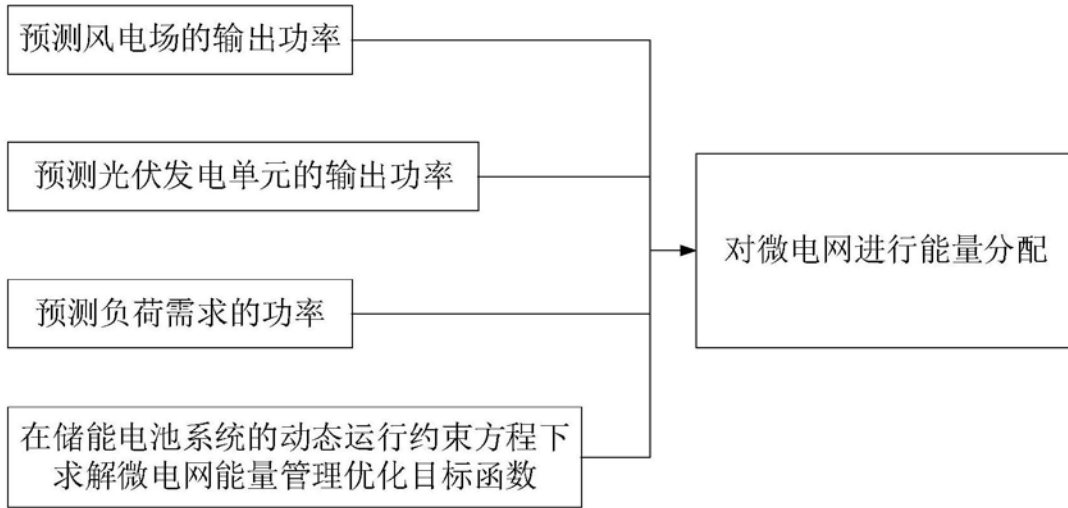


图1

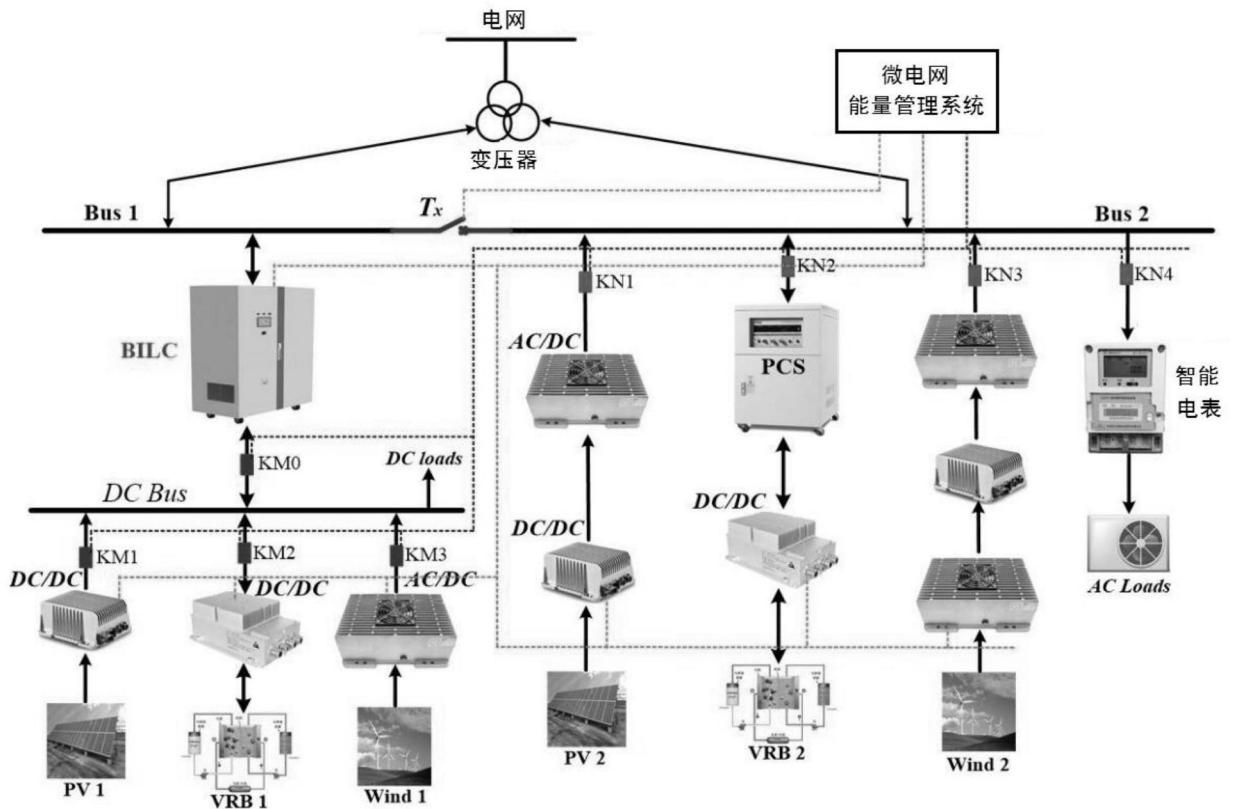


图2

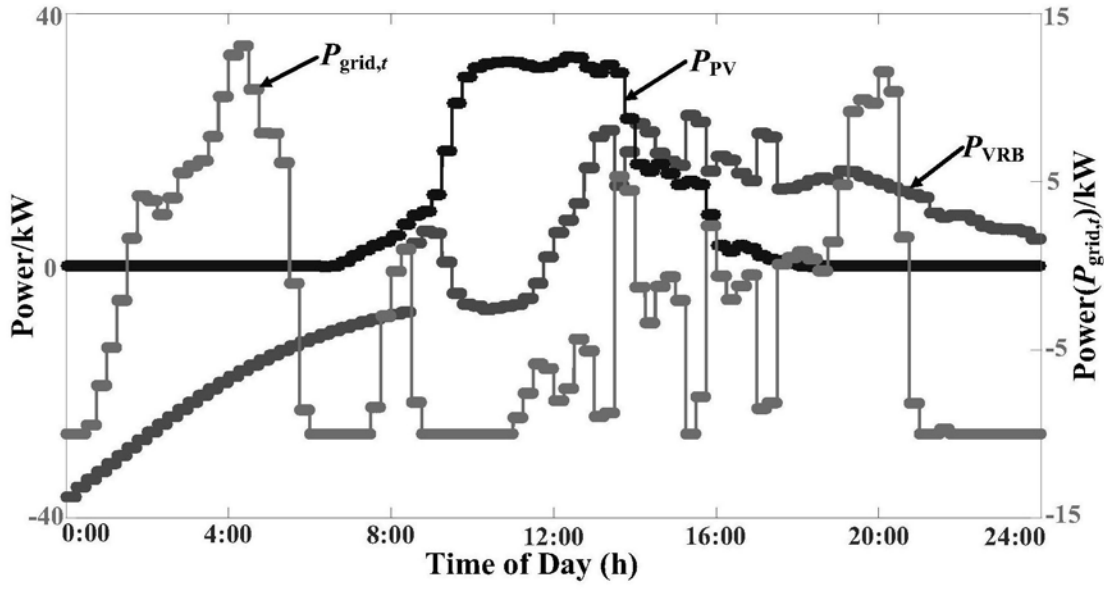


图3

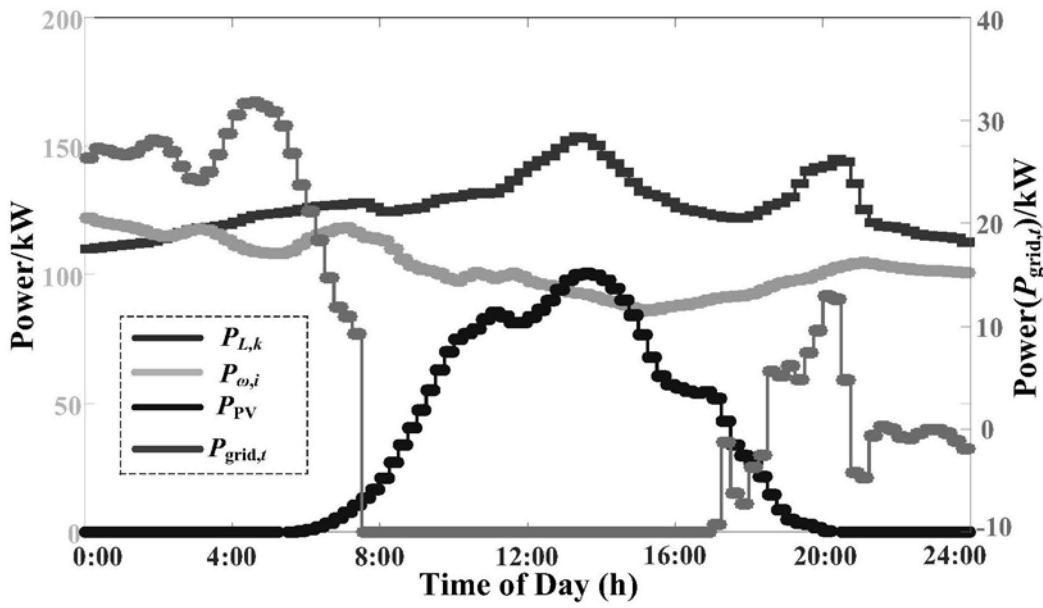


图4