



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116433225 A

(43) 申请公布日 2023. 07. 14

(21) 申请号 202310688330.3

G06Q 10/0631 (2023.01)

(22) 申请日 2023.06.12

G06Q 50/06 (2012.01)

G06N 3/006 (2023.01)

(71) 申请人 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院

地址 430077 湖北省武汉市武昌区水果湖街徐东路47号

(72) 发明人 王怡聪 张东寅 周航 谭昊宇 柯方超 胡婷 高晓晶 王法靖 魏聪 洪华良 许汉平 陈峰 桑子夏

(74) 专利代理机构 武汉市首臻知识产权代理有限公司 42229

专利代理师 章辉

(51) Int. Cl.

G06Q 10/20 (2023.01)

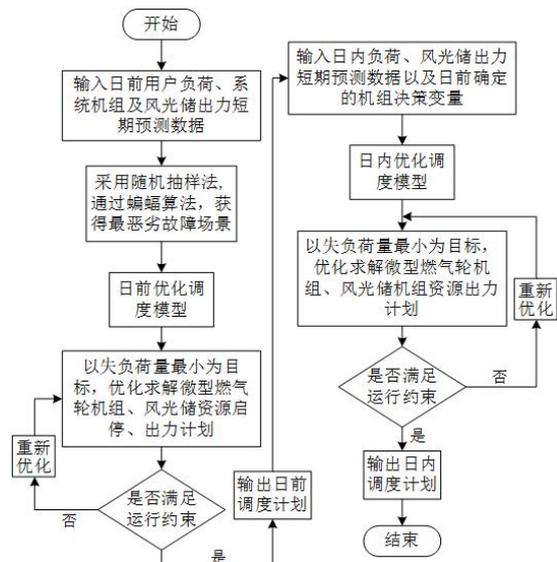
权利要求书4页 说明书18页 附图10页

(54) 发明名称

一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法、装置及设备

(57) 摘要

一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法、装置及设备,方法包括:针对互联微电网系统,建立包括以用户侧失负荷量最小为故障恢复目标的日前优化调度模型和日内优化调度模型的故障恢复调度模型;采用拉丁超立方抽样方法,对确定的场景进行初始故障场景集的抽取,并输入蝙蝠算法,通过迭代求解出最恶劣故障场景;将最恶劣故障场景输入日前优化调度模型,基于ADMM-GBS算法求解日前调度计划;将日前调度计划输入日内优化调度模型,基于ADMM-GBS算法求解日内调度计划。本发明能够保证系统在多时间多故障并发的情况下,通过协调微电网群间功率传输,达到故障减损和快速恢复的目的,有效提高互联微电网系统运行的安全稳定性。



CN 116433225 A

1. 一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,其特征在于,包括:

针对互联微电网系统,建立故障恢复调度模型,该模型包括以用户侧失负荷量最小为故障恢复目标的日前优化调度模型和日内优化调度模型;

采用拉丁超立方抽样方法,对确定的场景进行初始故障场景集的抽取,将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法,通过迭代求解出最恶劣故障场景;

将最恶劣故障场景输入日前优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日前调度计划;将日前调度计划输入日内优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日内调度计划。

2. 根据权利要求1所述的一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,其特征在于,所述日前优化调度模型和所述日内优化调度模型的优化目标为:

$$\min f_{cut} = \sum_{i=1}^{N_{MGs}} \sum_{j=1}^{N_{FAUs}} P_{MG,i} \Delta T_j;$$

式中, f_{cut} 为多微电网系统用户侧失负荷量; N_{MGs} 为微电网个数; N_{FAUs} 为多微电网系统发生故障数量; $P_{MG,i}$ 为第 i 个微网用户侧失负荷量; ΔT_j 为第 j 次故障持续时间。

3. 根据权利要求1所述的一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,其特征在于,所述日前优化调度模型和所述日内优化调度模型的约束条件包括燃气轮机组约束、风电机组约束、光伏机组约束、蓄电池组约束、微电网间联络线约束以及线路潮流约束。

4. 根据权利要求3所述的一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,其特征在于,在每个日内调度周期的第一个时刻的机组出力计划与日前调度对应时刻的机组出力计划关系如下式所示:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{MT}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{MT} \leq P_{i,t}^{MT}(1+\delta) \\ P_{i,t}^{WT}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{WT} \leq P_{i,t}^{WT}(1+\delta); \\ P_{i,t}^{PV}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{PV} \leq P_{i,t}^{PV}(1+\delta) \end{cases}$$

式中, $P_{in,i,t}^{MT}$ 、 $P_{in,i,t}^{WT}$ 、 $P_{in,i,t}^{PV}$ 为日内调度节点 i 在 t 时刻燃气轮机组、风电机组、光伏机组出力; δ 为波动系数。

5. 根据权利要求1所述的一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,其特征在于,

故障场景的抽取有以下约束:一个调度周期内最多2个时刻发生故障;每个时刻最多有2处线路发生故障;

故障场景的抽取方法包括:

将所有满足上述约束的故障场景均匀分布在 $[0,1]$ 区间内,将 $[0,1]$ 区间分为 n 等份,在第 i 个子区间 $[i/n, (i+1)/n]$ 内均匀随机产生一个数;

将 n 个随机数乱序;

根据概率分布的反函数计算采样值。

6. 根据权利要求1所述的一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,其特征在于,所述将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法,通过迭代求解出最恶劣故障场景,包括:

A、初始化燃气轮机组和蓄电池组特性参数、多微电网系统预测负荷大小、风光发电出力大小、算法收敛的阈值以及最大迭代次数;

B、随机初始化每只蝙蝠位置,每只蝙蝠的位置表示一种随机抽取的故障场景;

C、根据每只随机生成蝙蝠的位置,多微电网系统能量管理中心反馈系统内一个调度周期燃气轮机组、风电机组、光伏机组、蓄电池组,从而计算出该故障场景下用户侧总失负荷量;

D、根据结果获得适应度函数,计算最佳蝙蝠个体;

E、更新个体最优值、全局最优值、蝙蝠速度信息和位置信息;

F、重复步骤C至步骤E直到算法满足收敛条件,收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者达到最大循环次数。

7. 根据权利要求1所述的一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,其特征在于,所述基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日前调度计划或者日内调度计划,包括:

将求解问题分解为三个微电网各自失负荷的子问题进行迭代求解,则求解问题的目标函数为:

$$\min P_{cut} = P_1^{cut} + P_2^{cut} + P_3^{cut};$$

式中, P_{cut} 为互联微电网系统在所有故障时刻的总用户侧失负荷量;

具体求解过程如下:

a、初始化耦合变量设为0,同时 $P_{MGs}(t)$ 也为0, $\lambda_{1,k}(t) = \lambda_{2,k}(t) = \lambda_{3,k}(t) = \lambda_0$,初始拉格朗日乘子 λ_0 设置为0;

b、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,3,k}(t)$,代入子问题 L_1 求解,得出 $P_{mg,1,k}(t)$;

c、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,1,k+1}(t)$,代入子问题 L_2 求解,得出 $P_{mg,2,k}(t)$;

d、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,2,k+1}(t)$,代入子问题 L_3 求解,得出 $P_{mg,3,k}(t)$;

$$L_1 = P_1^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{1,k}(t) (P_{mg,1,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right] \\ + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,1,k}(t) - P_{MGs}(t))^2$$

$$L_2 = P_2^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{2,k}(t) (P_{mg,2,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right] \\ + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,2,k}(t) - P_{MGs}(t))^2$$

$$L_3 = P_3^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{3,k}(t) (P_{mg,3,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right] \\ + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,3,k}(t) - P_{MGs}(t))^2$$

式中, P_1^{cut} 、 P_2^{cut} 、 P_3^{cut} 为三个微电网用户侧失负荷量; $\lambda_{1,k}(t)$ 、 $\lambda_{2,k}(t)$ 、 $\lambda_{3,k}(t)$ 为第 k 代三个微电网耦合变量对应的拉格朗日乘子; η 为耦合变量对应的惩罚参数; $P_{mg,1,k}(t)$ 、 $P_{mg,2,k}(t)$ 、 $P_{mg,3,k}(t)$ 为三个微电网第 k 代耦合变量; $P_{MGs}(t)$ 为耦合变量平均值;

e、根据下式更新拉格朗日乘子;

$$\begin{cases} \lambda_{1,k+1}(t) = \lambda_{1,k}(t) + \eta (P_{mg,1,k+1}(t) - P_{mg,3,k}(t)) \\ \lambda_{2,k+1}(t) = \lambda_{2,k}(t) + \eta (P_{mg,2,k+1}(t) - P_{mg,1,k+1}(t)); \\ \lambda_{3,k+1}(t) = \lambda_{3,k}(t) + \eta (P_{mg,3,k+1}(t) - P_{mg,2,k+1}(t)) \end{cases}$$

f、根据下式高斯回代校正 $P_{mg,2,k}(t)$ 和 $P_{mg,3,k}(t)$;

$$\begin{cases} P_{mg,2,k+1}(t) = P_{mg,1,k}(t) - \mu (P_{mg,2,k}(t) - P_{mg,2,k+1}(t)) \\ P_{mg,3,k+1}(t) = P_{mg,1,k}(t) - \mu (P_{mg,3,k}(t) - P_{mg,3,k+1}(t)) \end{cases};$$

式中, μ 为校正系数;

g、判断本次迭代结果偏差是否小于允许收敛误差,若满足则结束计算,若不满足则返回步骤b进行下一代迭代;

$$\|r_k\|_2^2 = \|P_{MGs}(t)\|_2^2 = \left\| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{mg,i,k}(t) \right\|_2^2 \leq \varepsilon;$$

式中, r_k 为第 k 代残差; ε 为收敛误差。

8. 一种互联微电网多时间尺度故障恢复装置,其特征在于,包括:

故障恢复调度模型建立模块,用于针对互联微电网系统,建立包括以用户侧失负荷量最小为故障恢复目标的日前优化调度模型和日内优化调度模型的故障恢复调度模型;

最恶劣故障场景确定模块,用于采用拉丁超立方抽样方法,对确定的场景进行初始故障场景集的抽取,将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法,通过迭代求解出最恶劣故障场景;

调度计划获取模块,用于将最恶劣故障场景输入日前优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日前调度计划,以及将日前调度计划输入日内优化调度模型,基于ADMM-

GBS算法,通过迭代求解日内调度计划。

9. 一种互联微电网多时间尺度故障恢复设备,其特征在于,
包括存储器和处理器;

所述存储器,用于存储计算机程序代码,并将所述计算机程序代码传输给所述处理器;

所述处理器,用于根据所述计算机程序代码中的指令执行如权利要求1至7任一项所述的方法。

10. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至7任一项所述的方法。

一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法、装置及设备

技术领域

[0001] 本发明涉及互联微电网系统故障恢复调度领域,尤其涉及一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法、装置及设备。

背景技术

[0002] 随着传统无源配电网向主动配电网(active distribution network,ADN)的方向快速转变,配电网中微电网(microgrid,MG)的数量逐年显著增长。作为ADN的基本单元,MG有力支撑了分布式电源(distributed generator,DG)、储能装置、柔性负荷及监控保护装置等多元化设备的集中管理和协同配合,通过对微电网进行精细化调度有望极大改善可再生能源的消纳能力和系统的安全经济运行水平。然而,随着多微电网海量设备的接入,一方面系统源-网-荷-储多类型资源统筹协调的复杂度大幅增长,另一方面海量设备可靠性问题伴随的系统故障风险也显著增加。在此背景下,如何有效应对上述挑战已成为电网新的发展阶段中需要关注和解决的重点问题。

[0003] 针对互联微电网资源的统筹协调问题,现有技术主要面向微电网的常态化运行场景,对互联微电网故障情况下的系统恢复策略鲜有涉及。相较于常态化运行场景,故障场景下的MG调控问题复杂度大幅提升:一方面,随着系统功率支撑能力的减弱,用户侧失负荷的情况无法避免,使得原有的MG常态调度策略难以执行;另一方面,由于各MG与调度中心群间信息的交互受阻,原有集中式调度框架将无法保证指令的实时传递和准确下达,因此,基于分布式架构的紧急调度体系具有明显优势,然而传统的分布式调度算法存在突出的收敛性和收敛速度问题。针对故障场景下的微电网优化运行策略方面,现有研究主要面向单微电网问题,在当前多微电网互联互通的新形势下将存在一定局限性。同时,现有研究大多忽略了微电网拓扑结构和线路潮流的影响,由于故障情况下微电网的系统结构更加脆弱,忽略网架因素将严重制约故障恢复策略的可靠性。另外,在微电网故障恢复的优化求解算法方面,现有研究主要分为集中式算法和分布式算法两类。随着微电网群调度资源规模的扩大,主干网络通信传输通道愈发拥挤,调度中心实时接收处理的数据维度也快速增长。受此因素影响,在互联微电网故障恢复的过程中,传统集中式算法收敛速度慢、调度指令实时和可靠性低等缺陷愈加凸显。

发明内容

[0004] 本发明的目的是克服现有技术中存在的安全性低的缺陷与问题,提供一种安全性高的互联微电网多时间尺度故障恢复方法、装置及设备。

[0005] 为实现以上目的,本发明的技术解决方案是:一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,包括:

[0006] 针对互联微电网系统,建立故障恢复调度模型,该模型包括以用户侧失负荷量最小为故障恢复目标的日前优化调度模型和日内优化调度模型;

[0007] 采用拉丁超立方抽样方法,对确定的场景进行初始故障场景集的抽取,将抽取的

初始故障场景集输入蝙蝠算法,通过迭代求解出最恶劣故障场景;

[0008] 将最恶劣故障场景输入日前优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日前调度计划;将日前调度计划输入日内优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日内调度计划。

[0009] 所述日前优化调度模型和所述日内优化调度模型的优化目标为:

$$[0010] \quad \min f_{cut} = \sum_{i=1}^{N_{MGs}} \sum_{j=1}^{N_{FAUs}} P_{MG,i} \Delta T_j;$$

[0011] 式中, f_{cut} 为多微电网系统用户侧失负荷量; N_{MGs} 为微电网个数; N_{FAUs} 为多微电网系统发生故障数量; $P_{MG,i}$ 为第 i 个微网用户侧失负荷量; ΔT_j 为第 j 次故障持续时间。

[0012] 所述日前优化调度模型和所述日内优化调度模型的约束条件包括燃气轮机组约束、风电机组约束、光伏机组约束、蓄电池组约束、微电网间联络线约束以及线路潮流约束;

[0013] 所述燃气轮机组约束为:

$$[0014] \quad P_{n,t,\min}^{MT} \leq p_{n,t}^{MT} \leq P_{n,t,\max}^{MT};$$

[0015] 式中, $p_{n,t}^{MT}$ 为第 n 台燃气轮机组在 t 时刻的功率; $P_{n,t,\min}^{MT}$ 为燃气轮机组最小输出功率; $P_{n,t,\max}^{MT}$ 为燃气轮机组最大输出功率;

$$[0016] \quad \begin{cases} p_{n,t}^{MT} - p_{n,t-1}^{MT} \leq R_n^{up} \\ p_{n,t-1}^{MT} - p_{n,t}^{MT} \leq R_n^{down} \end{cases};$$

[0017] 式中, R_n^{up} 为在单位调度时间尺度内燃气轮机组 n 最大上爬坡功率; R_n^{down} 为在单位调度时间尺度内燃气轮机组 n 最大下爬坡功率;

[0018] 所述蓄电池组约束为:

$$[0019] \quad \begin{cases} SOC(t+\tau) = (1-\delta)SOC(t) + P_{c,i,t}^{ES} \tau \eta / E \\ SOC(t+\tau) = (1-\delta)SOC(t) + P_{d,i,t}^{ES} \tau / (\eta E) \end{cases};$$

[0020] 式中, $P_{c,i,t}^{ES}$ 和 $P_{d,i,t}^{ES}$ 分别为储能 i 在 t 时刻的充电功率和放电功率; δ 为蓄电池自放电系数; SOC 为蓄电池荷电状态; E 为蓄电池额定容量; η 为蓄电池转化效率; τ 为单位调度时间尺度;

$$[0021] \quad \begin{cases} P_{c,\min,i}^{ES} \leq P_{c,i,t}^{ES} \leq P_{c,\max,i}^{ES} \\ P_{d,\min,i}^{ES} \leq P_{d,i,t}^{ES} \leq P_{d,\max,i}^{ES} \end{cases};$$

$$[0022] \quad SOC_{\min,i} \leq SOC_{t,i} \leq SOC_{\max,i};$$

[0023] 式中, $P_{c \min, i}^{ES}$ 和 $P_{d \min, i}^{ES}$ 分别为蓄电池最小充电功率和最小放电功率; $P_{c \max, i}^{ES}$ 和 $P_{d \max, i}^{ES}$ 分别为蓄电池最大充电功率和最大放电功率; $SOC_{\min, i}$ 和 $SOC_{\max, i}$ 分别为蓄电池最小荷电状态和最大荷电状态;

$$[0024] \quad \begin{cases} B_{i,t}^u = x_1 (P_{d \max, i}^{ES} - P_{d, i, t}^{ES}) + x_2 (P_{d \max, i}^{ES} - P_{c, i, t}^{ES}) \\ B_{i,t}^d = x_1 (P_{d, i, t}^{ES} - P_{c \max, i}^{ES}) + x_2 (P_{c, i, t}^{ES} - P_{c \max, i}^{ES}) \end{cases};$$

[0025] 式中, $B_{i,t}^u$ 和 $B_{i,t}^d$ 分别为蓄电池组可提供的最大上调备用和最大下调备用; x_1 和 x_2 分别为蓄电充电状态和放电状态, x_1 为1时表示蓄电池处于放电状态, x_2 为1时表示蓄电池处于充电状态;

[0026] 所述微电网间联络线约束为:

$$[0027] \quad 0 \leq P_{i,j}^t \leq \mu_{i,j}^t P_{i,j}^{\max}, \forall i, j, i \neq j;$$

$$[0028] \quad \mu_{i,j}^t + \mu_{j,i}^t \leq 1;$$

[0029] 式中, $P_{i,j}^t$ 为 t 时刻第 i 个微电网 MG_i 向第 j 个微电网 MG_j 传输功率; $P_{i,j}^{\max}$ 为 t 时刻第 i 个微电网 MG_i 向第 j 个微电网 MG_j 允许传输的最大功率; $\mu_{i,j}^t$ 为 t 时刻联络线功率传输指示变量, $\mu_{i,j}^t$ 为1表示 t 时刻第 i 个微电网 MG_i 向第 j 个微电网 MG_j 传输功率;

[0030] 所述线路潮流约束为:

$$[0031] \quad -d_{l,t} F_{l, \max} \leq f_{l,t} \leq d_{l,t} F_{l, \max};$$

$$[0032] \quad P_{i,t}^{MT} + P_{i,t}^{WT} + P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{cut} + \sum_{n \in N_-(i)} d_{n,t} f_{n,t} + P_{d, i, t}^{ES} = P_{i,t}^L + P_{c, i, t}^{ES};$$

[0033] 式中, $f_{l,t}$ 为 t 时刻系统网络线路 l 的潮流值; $d_{l,t}$ 为 t 时刻系统网络线路 l 的故障指示变量, $d_{l,t}$ 为1表示线路正常运行, $d_{l,t}$ 为0表示线路故障停运; $F_{l, \max}$ 为线路 l 潮流限值; $P_{i,t}^{MT}$ 、 $P_{i,t}^{WT}$ 、 $P_{i,t}^{PV}$ 分别为日前调度节点 i 在 t 时刻燃气轮机组、风电机组、光伏机组出力; $N_-(i)$ 为与节点 i 连接的所有线路集合; $d_{n,t}$ 为 t 时刻集合中线路 n 的故障指示变量; $f_{n,t}$ 为线路 n 在 t 时刻的潮流值; $P_{c, i, t}^{ES}$ 和 $P_{d, i, t}^{ES}$ 分别为蓄电池组充电功率和放电功率; $P_{i,t}^{cut}$ 为节点 i 失负荷量; $P_{i,t}^L$ 为节点 i 预测负荷。

[0034] 在每个日内调度周期的第一个时刻的机组出力计划与日前调度对应时刻的机组出力计划关系如下式所示：

$$[0035] \begin{cases} P_{i,t}^{MT}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{MT} \leq P_{i,t}^{MT}(1+\delta) \\ P_{i,t}^{WT}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{WT} \leq P_{i,t}^{WT}(1+\delta); \\ P_{i,t}^{PV}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{PV} \leq P_{i,t}^{PV}(1+\delta) \end{cases}$$

[0036] 式中, $P_{in,i,t}^{MT}$ 、 $P_{in,i,t}^{WT}$ 、 $P_{in,i,t}^{PV}$ 为日内调度节点 i 在 t 时刻燃气轮机组、风电机组、光伏机组出力; δ 为波动系数。

[0037] 故障场景的抽取有以下约束: 一个调度周期内最多2个时刻发生故障; 每个时刻最多有2处线路发生故障;

[0038] 故障场景的抽取方法包括: 将所有满足上述约束的故障场景均匀分布在 $[0,1]$ 区间内, 将 $[0,1]$ 区间分为 n 等份, 在第 i 个子区间 $[i/n, (i+1)/n]$ 内均匀随机产生一个数; 将 n 个随机数乱序; 根据概率分布的反函数计算采样值。

[0039] 所述将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法, 通过迭代求解出最恶劣故障场景, 包括:

[0040] A、初始化燃气轮机组和蓄电池组特性参数、多微电网系统预测负荷大小、风光发电出力大小、算法收敛的阈值以及最大迭代次数;

[0041] B、随机初始化每只蝙蝠位置, 每只蝙蝠的位置表示一种随机抽取的故障场景;

[0042] C、根据每只随机生成蝙蝠的位置, 多微电网系统能量管理中心反馈系统内一个调度周期燃气轮机组、风电机组、光伏机组、蓄电池组, 从而计算出该故障场景下用户侧总失负荷量;

[0043] D、根据结果获得适应度函数, 计算最佳蝙蝠个体;

[0044] E、更新个体最优值、全局最优值、蝙蝠速度信息和位置信息;

[0045] F、重复步骤C至步骤E直到算法满足收敛条件, 收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者达到最大循环次数。

[0046] 所述基于ADMM-GBS算法, 通过迭代求解日前调度计划或者日内调度计划, 包括:

[0047] 将求解问题分解为三个微电网各自失负荷的子问题进行迭代求解, 则求解问题的目标函数为:

$$[0048] \min P_{cut} = P_1^{cut} + P_2^{cut} + P_3^{cut};$$

[0049] 式中, P_{cut} 为互联微电网系统在所有故障时刻的总用户侧失负荷量;

[0050] 具体求解过程如下:

[0051] a、初始化耦合变量设为0, 同时 $P_{MGs}(t)$ 也为0, $\lambda_{1,k}(t) = \lambda_{2,k}(t) = \lambda_{3,k}(t) = \lambda_0$, 初始拉格朗日乘子 λ_0 设置为0;

[0052] b、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,3,k}(t)$, 代入子问题 L_1 求解, 得出 $P_{mg,1,k}(t)$;

[0053] c、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,1,k+1}(t)$ ，代入子问题 L_2 求解，得出 $P_{mg,2,k}(t)$ ；

[0054] d、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,2,k+1}(t)$ ，代入子问题 L_3 求解，得出 $P_{mg,3,k}(t)$ ；

$$L_1 = P_1^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{1,k}(t) (P_{mg,1,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right]$$

[0055] ;

$$+ \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,1,k}(t) - P_{MGs}(t))^2$$

$$L_2 = P_2^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{2,k}(t) (P_{mg,2,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right]$$

[0056] ;

$$+ \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,2,k}(t) - P_{MGs}(t))^2$$

$$L_3 = P_3^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{3,k}(t) (P_{mg,3,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right]$$

[0057] ;

$$+ \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,3,k}(t) - P_{MGs}(t))^2$$

[0058] 式中， P_1^{cut} 、 P_2^{cut} 、 P_3^{cut} 为三个微电网用户侧失负荷量； $\lambda_{1,k}(t)$ 、 $\lambda_{2,k}(t)$ 、 $\lambda_{3,k}(t)$ 为第 k 代三个微电网耦合变量对应的拉格朗日乘子； η 为耦合变量对应的惩罚参数； $P_{mg,1,k}(t)$ 、 $P_{mg,2,k}(t)$ 、 $P_{mg,3,k}(t)$ 为三个微电网第 k 代耦合变量； $P_{MGs}(t)$ 为耦合变量平均值；

[0059] e、根据下式更新拉格朗日乘子；

$$\begin{cases} \lambda_{1,k+1}(t) = \lambda_{1,k}(t) + \eta (P_{mg,1,k+1}(t) - P_{mg,3,k}(t)) \\ \lambda_{2,k+1}(t) = \lambda_{2,k}(t) + \eta (P_{mg,2,k+1}(t) - P_{mg,1,k+1}(t)) ; \\ \lambda_{3,k+1}(t) = \lambda_{3,k}(t) + \eta (P_{mg,3,k+1}(t) - P_{mg,2,k+1}(t)) \end{cases}$$

[0060]

[0061] f、根据下式高斯回代校正 $P_{mg,2,k}(t)$ 和 $P_{mg,3,k}(t)$ ；

$$\begin{cases} P_{mg,2,k+1}(t) = P_{mg,1,k}(t) - \mu (P_{mg,2,k}(t) - P_{mg,2,k+1}(t)) \\ P_{mg,3,k+1}(t) = P_{mg,1,k}(t) - \mu (P_{mg,3,k}(t) - P_{mg,3,k+1}(t)) \end{cases} ;$$

[0062]

[0063] 式中， μ 为校正系数；

[0064] g、判断本次迭代结果偏差是否小于允许收敛误差,若满足则结束计算,若不满足则返回步骤b进行下一代迭代;

$$[0065] \quad \|r_k\|_2^2 = \|P_{MGs}(t)\|_2^2 = \left\| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{mg,i,k}(t) \right\|_2^2 \leq \varepsilon;$$

[0066] 式中, r_k 为第 k 代残差; ε 为收敛误差。

[0067] 一种互联微电网多时间尺度故障恢复装置,包括:

[0068] 故障恢复调度模型建立模块,用于针对互联微电网系统,建立包括以用户侧失负荷量最小为故障恢复目标的日前优化调度模型和日内优化调度模型的故障恢复调度模型;

[0069] 最恶劣故障场景确定模块,用于采用拉丁超立方抽样方法,对确定的场景进行初始故障场景集的抽取,将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法,通过迭代求解出最恶劣故障场景;

[0070] 调度计划获取模块,用于将最恶劣故障场景输入日前优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日前调度计划,以及将日前调度计划输入日内优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日内调度计划。

[0071] 一种互联微电网多时间尺度故障恢复设备,包括存储器和处理器;所述存储器,用于存储计算机程序代码,并将所述计算机程序代码传输给所述处理器;所述处理器,用于根据所述计算机程序代码中的指令执行一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法。

[0072] 一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法。

[0073] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0074] 本发明一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法、装置及设备中,采用日前-日内两阶段故障恢复策略,有效减小了燃气轮机组、风光发电机组出力数据预测精度对故障恢复效果带来的影响,而且还能够更加灵活精确地制定调度计划,实现了故障状态下互联互动微电网的功率互助互济。针对互联微电网系统网络结构薄弱所导致多故障易并发的特点,采取拉丁超立方分层抽样法以及蝙蝠算法,达到了准确求解系统最恶劣故障场景的目的。采用基于ADMM-GBS的分布式算法,既能保证多主体问题算法收敛性,又解决了故障情况下微电网群间信息交互方面存在的问题,通过迭代求解使得故障恢复计划逐渐趋近于全局最优解。针对最恶劣故障场景进行了线路加固,有效地降低了故障时负荷损失,提高了系统韧性。因此,本发明能够保证系统在多时间多故障并发的情况下,通过协调微电网群间功率传输,达到故障减损和快速恢复的目的,有效提高互联微电网系统运行的安全稳定性。

附图说明

[0075] 图1是本发明中互联微电网系统的结构示意图。

[0076] 图2是本发明中日前-日内两阶段滚动故障恢复模型流程图。

[0077] 图3是本发明中蝙蝠算法模型求解流程图。

[0078] 图4是本发明的实施例中的互联微电网系统的结构示意图。

[0079] 图5是本发明的实施例中的拓扑各节点负荷占总负荷比例示意图。

- [0080] 图6是本发明的实施例中的微电网1风电输出功率和负荷预测曲线图。
 [0081] 图7是本发明的实施例中的微电网2风电输出功率和负荷预测曲线图。
 [0082] 图8是本发明的实施例中的微电网3风电输出功率和负荷预测曲线图。
 [0083] 图9是本发明的实施例中的场景1、2最恶劣故障求解过程图。
 [0084] 图10是本发明的实施例中的微电网1向微电网2传输功率图。
 [0085] 图11是本发明的实施例中的微电网2向微电网3传输功率图。
 [0086] 图12是本发明的实施例中的微电网3向微电网1传输功率图。
 [0087] 图13是本发明一种互联微电网多时间尺度故障恢复装置的结构框图。
 [0088] 图14是本发明一种互联微电网多时间尺度故障恢复设备的结构框图。

具体实施方式

[0089] 以下结合附图说明和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0090] 实施例1:

[0091] 参见图2,一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法,包括:

[0092] S1、针对互联微电网系统,建立故障恢复调度模型,该模型包括以用户侧失负荷量最小为故障恢复目标的日前优化调度模型和日内优化调度模型;

[0093] 互联微电网系统结构如图1所示,考虑故障条件下,保证多微电网系统供电可靠性的需求远远大于盈利要求,因此,优化目标设为系统用户侧失负荷量最小,所述日前优化调度模型和所述日内优化调度模型的优化目标为:

$$[0094] \quad \min f_{cut} = \sum_{i=1}^{N_{MGs}} \sum_{j=1}^{N_{FAUs}} P_{MG,i} \Delta T_j;$$

[0095] 式中, f_{cut} 为多微电网系统用户侧失负荷量; N_{MGs} 为微电网个数; N_{FAUs} 为多微电网系统发生故障数量; $P_{MG,i}$ 为第 i 个微网用户侧失负荷量; ΔT_j 为第 j 次故障持续时间。

[0096] 所述日前优化调度模型和所述日内优化调度模型的约束条件包括燃气轮机组约束、风电机组约束、光伏机组约束、蓄电池组约束、微电网间联络线约束以及线路潮流约束;

[0097] 所述风电机组约束、所述光伏机组约束与所述燃气轮机组相似,所述燃气轮机组约束为:

$$[0098] \quad P_{n,t,\min}^{MT} \leq P_{n,t}^{MT} \leq P_{n,t,\max}^{MT};$$

[0099] 式中, $P_{n,t}^{MT}$ 为第 n 台燃气轮机组在 t 时刻的功率; $P_{n,t,\min}^{MT}$ 为燃气轮机组最小输出功率; $P_{n,t,\max}^{MT}$ 为燃气轮机组最大输出功率;

$$[0100] \quad \begin{cases} P_{n,t}^{MT} - P_{n,t-1}^{MT} \leq R_n^{\text{up}} \\ P_{n,t-1}^{MT} - P_{n,t}^{MT} \leq R_n^{\text{down}}; \end{cases}$$

[0101] 式中, R_n^{up} 为在单位调度时间尺度内燃气轮机组 n 最大上爬坡功率; R_n^{down} 为在单位调度时间尺度内燃气轮机组 n 最大下爬坡功率;

[0102] 所述蓄电池组约束为:

$$[0103] \begin{cases} SOC(t+\tau) = (1-\delta)SOC(t) + P_{c,i,t}^{ES}\tau\eta/E \\ SOC(t+\tau) = (1-\delta)SOC(t) + P_{d,i,t}^{ES}\tau/(\eta E) \end{cases};$$

[0104] 式中, $P_{c,i,t}^{ES}$ 和 $P_{d,i,t}^{ES}$ 分别为储能 i 在 t 时刻的充电功率和放电功率; δ 为蓄电池自放电系数; SOC 为蓄电池荷电状态; E 为蓄电池额定容量; η 为蓄电池转化效率; τ 为单位调度时间尺度;

$$[0105] \begin{cases} P_{c\min,i}^{ES} \leq P_{c,i,t}^{ES} \leq P_{c\max,i}^{ES} \\ P_{d\min,i}^{ES} \leq P_{d,i,t}^{ES} \leq P_{d\max,i}^{ES} \end{cases};$$

$$[0106] SOC_{\min,i} \leq SOC_{t,i} \leq SOC_{\max,i};$$

[0107] 式中, $P_{c\min,i}^{ES}$ 和 $P_{d\min,i}^{ES}$ 分别为蓄电池最小充电功率和最小放电功率; $P_{c\max,i}^{ES}$ 和 $P_{d\max,i}^{ES}$ 分别为蓄电池最大充电功率和最大放电功率; $SOC_{\min,i}$ 和 $SOC_{\max,i}$ 分别为蓄电池最小荷电状态和最大荷电状态;

[0108] 蓄电池组通常接在风光发电机组处, 实现资源就地消纳, 为多微电网系统提供正负备用, 但受最大充放电功率限制, 如下式所示:

$$[0109] \begin{cases} B_{i,t}^u = x_1 (P_{d\max,i}^{ES} - P_{d,i,t}^{ES}) + x_2 (P_{d\max,i}^{ES} - P_{c,i,t}^{ES}) \\ B_{i,t}^d = x_1 (P_{d,i,t}^{ES} - P_{c\max,i}^{ES}) + x_2 (P_{c,i,t}^{ES} - P_{c\max,i}^{ES}) \end{cases};$$

[0110] 式中, $B_{i,t}^u$ 和 $B_{i,t}^d$ 分别为蓄电池组可提供的最大上调备用和最大下调备用; x_1 和 x_2 分别为蓄电充电状态和放电状态, x_1 为1时表示蓄电池处于放电状态, x_2 为1时表示蓄电池处于充电状态;

[0111] 所述微电网间联络线约束为:

$$[0112] 0 \leq P_{i,j}^t \leq \mu_{i,j}^t P_{i,j}^{\max}, \forall i, j, i \neq j;$$

$$[0113] \mu_{i,j}^t + \mu_{j,i}^t \leq 1;$$

[0114] 式中, $P_{i,j}^t$ 为 t 时刻第 i 个微电网 MG_i 向第 j 个微电网 MG_j 传输功率; $P_{i,j}^{\max}$ 为 t 时刻第 i 个微电网 MG_i 向第 j 个微电网 MG_j 允许传输的最大功率; $\mu_{i,j}^t$ 为 t 时刻联络线功率传输指示变量, $\mu_{i,j}^t$ 为1表示 t 时刻第 i 个微电网 MG_i 向第 j 个微电网 MG_j 传输功率;

[0115] 考虑到当线路发生随机故障后,需要在原有优化运行模型约束条件的基础上修改线路潮流上下限约束和节点功率平衡约束,加入故障指示变量,所述线路潮流约束为:

$$[0116] \quad -d_{l,t}F_{l,\max} \leq f_{l,t} \leq d_{l,t}F_{l,\max} :$$

$$P_{i,t}^{MT} + P_{i,t}^{WT} + P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{cut} +$$

$$[0117] \quad \sum_{n \in N_-(i)} d_{n,t}f_{n,t} + P_{d,i,t}^{ES} = P_{i,t}^L + P_{c,i,t}^{ES} ;$$

[0118] 式中, $f_{l,t}$ 为 t 时刻系统网络线路 l 的潮流值; $d_{l,t}$ 为 t 时刻系统网络线路 l 的故障指示变量, $d_{l,t}$ 为 1 表示线路正常运行, $d_{l,t}$ 为 0 表示线路故障停运; $F_{l,\max}$ 为线路 l 潮流限值; $P_{i,t}^{MT}$ 、 $P_{i,t}^{WT}$ 、 $P_{i,t}^{PV}$ 分别为日前调度节点 i 在 t 时刻燃气轮机组、风电机组、光伏机组出力; $N_-(i)$ 为与节点 i 连接的所有线路集合; $d_{n,t}$ 为 t 时刻集合中线路 n 的故障指示变量; $f_{n,t}$ 为线路 n 在 t 时刻的潮流值; $P_{c,i,t}^{ES}$ 和 $P_{d,i,t}^{ES}$ 分别为蓄电池组充电功率和放电功率; $P_{i,t}^{cut}$ 为节点 i 失负荷量; $P_{i,t}^L$ 为节点 i 预测负荷。

[0119] 在每个日内调度周期的第一个时刻的机组出力计划与日前调度对应时刻的机组出力计划关系如下式所示:

$$[0120] \quad \begin{cases} P_{i,t}^{MT}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{MT} \leq P_{i,t}^{MT}(1+\delta) \\ P_{i,t}^{WT}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{WT} \leq P_{i,t}^{WT}(1+\delta) ; \\ P_{i,t}^{PV}(1-\delta) \leq P_{in,i,t}^{PV} \leq P_{i,t}^{PV}(1+\delta) \end{cases}$$

[0121] 式中, $P_{in,i,t}^{MT}$ 、 $P_{in,i,t}^{WT}$ 、 $P_{in,i,t}^{PV}$ 为日内调度节点 i 在 t 时刻燃气轮机组、风电机组、光伏机组出力; δ 为波动系数, 为常数取 0.2。

[0122] S2、采用拉丁超立方抽样方法, 考虑极端事件的时空特性以及故障线路的不确定性, 对确定的场景进行初始故障场景集的抽取, 将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法, 通过迭代求解出最恶劣故障场景;

[0123] 故障场景的抽取有以下约束: 一个调度周期内最多 2 个时刻发生故障; 每个时刻最多有 2 处线路发生故障。故障场景的抽取方法包括: ① 将所有满足上述约束的故障场景均匀分布在 $[0,1]$ 区间内, 将 $[0,1]$ 区间分为 n 等份, 在第 i 个子区间 $[i/n, (i+1)/n]$ 内均匀随机产生一个数; ② 将 n 个随机数乱序, 保证每个随机变量采样值的相关性尽量小; ③ 根据概率分布的反函数计算采样值。

[0124] 参见图 3, 所述将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法, 通过迭代求解出最恶劣故障场景, 包括:

[0125] A、初始化燃气轮机组和蓄电池组特性参数、多微电网系统预测负荷大小、风光发

电出力大小、算法收敛的阈值以及最大迭代次数；

[0126] B、随机初始化每只蝙蝠位置，每只蝙蝠的位置表示一种随机抽取的故障场景；

[0127] C、根据每只随机生成蝙蝠的位置，多微电网系统能量管理中心反馈系统内一个调度周期燃气轮机组、风电机组、光伏机组、蓄电池组，从而计算出该故障场景下用户侧总失负荷量；

[0128] D、根据结果获得适应度函数，计算最佳蝙蝠个体；

[0129] E、更新个体最优值、全局最优值、蝙蝠速度信息和位置信息；

[0130] F、重复步骤C至步骤E直到算法满足收敛条件，收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者达到最大循环次数；

[0131] G、算法输出的结果为多微电网系统最恶劣故障场景，以及对应场景下故障恢复策略的鲁棒最优解。

[0132] 采用蝙蝠算法来解决最恶劣故障场景确定的问题，属最大值问题，选择直接将最大用户侧失负荷量作为适应度函数进行更新。互联微电网系统中的故障情况较为复杂，且难以穷举。蝙蝠算法通过模拟蝙蝠利用回声定位系统来觅食或躲避障碍物的行为来实现迭代寻求的过程，在求解较为复杂的优化问题时，通常能够快速获得较好的优化结果。

[0133] S3、将最恶劣故障场景输入日前优化调度模型，基于ADMM-GBS算法，通过迭代求解日前调度计划；将日前调度计划输入日内优化调度模型，基于ADMM-GBS算法，通过迭代求解日内调度计划；

[0134] 传统的ADMM算法将一个完整的问题分解为两个相对独立的子问题，进行交替分布求解，并且已经被应用于许多研究领域。因此，本发明考虑采用ADMM-GBS算法对包含三个子微电网的多微电网系统优化问题进行求解，此算法在3-block ADMM算法的基础上增加一个变量的校正矩阵，能够使用高斯回代对结果进行修正，保证结果的收敛性。具体原理如下：

[0135] 3-block ADMM算法的直接推广形式如下式所示：

$$[0136] \begin{cases} x^{k+1} = \operatorname{argmin} L^3(x, y^k, z^k, \lambda^k) \\ y^{k+1} = \operatorname{argmin} L^3(x^{k+1}, y, z^k, \lambda^k) \\ z^{k+1} = \operatorname{argmin} L^3(x^{k+1}, y^{k+1}, z, \lambda^k) \\ \lambda^{k+1} = \lambda^k - \eta(Ax^{k+1} + By^{k+1} + Cz^{k+1} - b) \end{cases} ;$$

[0137] 算法经过 k 次迭代得到 x^k, y^k, z^k ，对于第 $k+1$ 次迭代，依次由 y^k, z^k 推导得出 x^{k+1} ，再由 x^{k+1}, z^k 推导得出 y^{k+1} ，之后由 x^{k+1}, y^{k+1} 推导得出 z^{k+1} ，最后更新 λ 。

在这种算法中，一次迭代中 x^k 是由上一代数据计算得出的中间变量， y^k, z^k, λ^k 则是地位对等的核心变量，求解 z^{k+1} 时，使用的是 x^{k+1}, y^{k+1}, z^k 的数据，即 y 与 z 问题信息不对等，致使算法存在收敛性的问题。因此，在常规ADMM预测过程后，添加高斯回代的修正过程如下：

$$[0138] \quad \begin{bmatrix} By^{k+1} \\ Cz^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} By^k \\ Cz^k \end{bmatrix} - \mu \begin{bmatrix} I & -I \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B(y^k - y^{k+1}) \\ C(z^k - z^{k+1}) \end{bmatrix};$$

[0139] 式中, μ 为校正系数, 取值范围 $[0.9, 0.95]$; 该算法可以保证收敛性。

[0140] 本发明将求解问题分解为三个微电网各自失负荷的子问题进行迭代求解, 将各子微电网交换功率作为耦合变量, 在耦合变量处将三个子问题求解, 则求解问题的目标函数为:

$$[0141] \quad \min P_{cut} = P_1^{cut} + P_2^{cut} + P_3^{cut};$$

[0142] 式中, P_{cut} 为互联微电网系统在所有故障时刻的总用户侧失负荷量;

[0143] 迭代过程中, 各耦合变量会逐渐趋近于平均值, 具体求解过程如下:

[0144] a、初始化耦合变量设为0, 同时 $P_{MGs}(t)$ 也为0, $\lambda_{1,k}(t) = \lambda_{2,k}(t) = \lambda_{3,k}(t) = \lambda_0$, 初始拉格朗日乘子 λ_0 设置为0;

[0145] b、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,3,k}(t)$, 代入子问题 L_1 求解, 得出 $P_{mg,1,k}(t)$;

[0146] c、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,1,k+1}(t)$, 代入子问题 L_2 求解, 得出 $P_{mg,2,k}(t)$;

[0147] d、令 $P_{MGs}(t) = P_{mg,2,k+1}(t)$, 代入子问题 L_3 求解, 得出 $P_{mg,3,k}(t)$;

$$[0148] \quad L_1 = P_1^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{1,k}(t) (P_{mg,1,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right] \\ + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,1,k}(t) - P_{MGs}(t))^2;$$

$$[0149] \quad L_2 = P_2^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{2,k}(t) (P_{mg,2,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right] \\ + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,2,k}(t) - P_{MGs}(t))^2;$$

$$[0150] \quad L_3 = P_3^{cut} + \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{3,k}(t) (P_{mg,3,k}(t) - P_{MGs}(t)) \right] \\ + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{mg,3,k}(t) - P_{MGs}(t))^2;$$

$$[0151] \quad P_{MGs}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{mg,i,k}(t);$$

[0152] 式中, P_1^{cut} 、 P_2^{cut} 、 P_3^{cut} 为三个微电网用户侧失负荷量; $\lambda_{1,k}(t)$ 、 $\lambda_{2,k}(t)$ 、 $\lambda_{3,k}(t)$ 为第 k 代三个微电网耦合变量对应的拉格朗日乘子; η 为耦合变量对应的惩罚参数; $P_{mg,1,k}(t)$ 、 $P_{mg,2,k}(t)$ 、 $P_{mg,3,k}(t)$ 为三个微电网第 k 代耦合变量; $P_{MGs}(t)$ 为耦合变量平均值;

[0153] e、根据下式更新拉格朗日乘子;

$$[0154] \quad \begin{cases} \lambda_{1,k+1}(t) = \lambda_{1,k}(t) + \eta(P_{mg,1,k+1}(t) - P_{mg,3,k}(t)) \\ \lambda_{2,k+1}(t) = \lambda_{2,k}(t) + \eta(P_{mg,2,k+1}(t) - P_{mg,1,k+1}(t)); \\ \lambda_{3,k+1}(t) = \lambda_{3,k}(t) + \eta(P_{mg,3,k+1}(t) - P_{mg,2,k+1}(t)) \end{cases}$$

[0155] f、根据下式高斯回代校正 $P_{mg,2,k}(t)$ 和 $P_{mg,3,k}(t)$;

$$[0156] \quad \begin{cases} P_{mg,2,k+1}(t) = P_{mg,1,k}(t) - \mu(P_{mg,2,k}(t) - P_{mg,2,k+1}(t)) \\ P_{mg,3,k+1}(t) = P_{mg,1,k}(t) - \mu(P_{mg,3,k}(t) - P_{mg,3,k+1}(t)) \end{cases};$$

[0157] 式中, μ 为校正系数;

[0158] g、判断本次迭代结果偏差是否小于允许收敛误差,若满足则结束计算,若不满足则返回步骤b进行下一代迭代;

$$[0159] \quad \|r_k\|_2^2 = \|P_{MGs}(t)\|_2^2 = \left\| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{mg,i,k}(t) \right\|_2^2 \leq \varepsilon;$$

[0160] 式中, r_k 为第 k 代残差; ε 为收敛误差。收敛误差设置为一个较小的常数,满足收敛条件时,可视为多微电网系统满足功率平衡条件,得到最终分布式故障恢复调度方案。

[0161] 本发明立足于离网多互联微电网系统故障恢复问题。首先以系统用户侧削减负荷量最小为目标,建立了互联微电网日前-日内两阶段滚动故障恢复模型;其次,基于鲁棒思想,考虑极端事件发生时间以及具体故障线路的不确定性特征,采用拉丁超立方分层随机抽样方法构建了多阶段、多区域的线路故障集。在此基础上,以上述故障集为初始数据,采用蝙蝠算法搜寻获得系统最恶劣故障场景。最后,采用了带高斯回代的交替方向乘子法(ADMM-GBS)对互联微电网的故障恢复模型进行了求解,该算法能有效解决故障状态下互联微电网信息传输受阻以及故障恢复策略难以获得等问题。

[0162] 本发明选取某地由三离网微电网组成的多微电网系统作为仿真算例,其具体拓扑见图4。该系统通过7条联络线路将系统划分为三个子微电网,系统内共配置5个燃气轮机组、2个风储联合系统以及1处光储联合系统。本算例仿真在Pycharm2021.3.3平台调用

Gurobi优化求解器求解。在算例中参数设置如下：各节点负荷占总负荷比例如图5所示；五台燃气轮机组相关参数如表1所示；一个典型日内三个子微电网风光输出功率和负荷预测曲线如图6~图8所示；单条联络线最大功率为165kW；储能装置荷电状态(SOC)上下限分别为0.9、0.2，最大充、放电功率均为300kW，最大储能电量为1200 kW·h；蝙蝠算法种群规模取100，最大迭代次数取250，收敛阈值取0.5%。

[0163] 表1 燃气轮机组相关参数

机组编号	位置节点编号	最大输出功率/kW	最小输出功率/kW	最大爬坡功率/kW·h ⁻¹
1	6	215	0	140
2	13	250	0	125
3	18	160	0	130
4	24	265	0	150
5	28	200	0	135

[0165] 本发明设置两个场景。场景1：调度模型仅考虑日前故障恢复调度，采用分布式算法求解。场景2：调度模型考虑多时间尺度故障恢复调度，采用分布式算法求解。

[0166] 最恶劣场景参数约束设置为：一个调度周期最多2个时刻发生故障，每个时刻最多有2处线路发生故障，并且两个时刻故障线路不可完全相同。每次故障持续时间为1h。在此基础上抽取200组故障场景作为初代数据，基于蝙蝠算法迭代求解场景1、2最恶劣故障场景过程如图9所示。最终得出场景1、2在此典型日该系统最恶劣故障场景为：第19时刻线路2-3与线路23-24发生断线故障，以及第20时刻线路2-3与线路6-7发生断线故障。两个场景的故障都发生在全天的用电高峰时段，并且故障线路临近关键负荷节点，说明了算法的合理性。最恶劣故障场景的确定过程中，能够实现多微电网系统对应场景的集中式故障恢复调度策略的同步更新。然而这种简单策略并不能够满足实际微电网群故障恢复需求，需要进一步通过所建立的分布式多时间尺度调度模型取得最优解。该系统存在高比例新能源发电资源，对风光发电资源存在较强的依赖性，发生故障时会有严重的故障缺额。针对场景1、2确定的最恶劣故障场景，场景1各机组出力计划见表3-1、表3-2。两个故障时段共出现477.94kW负荷损失，占负荷总比例的13.33%。若输入确定的多时间尺度故障恢复模型，场景2各机组出力计划见表4-1、表4-2、表4-3、表4-4、表4-5，具体节点用户侧失负荷量(kW)见表2。

[0167] 表2 场景2节点失负荷情况

节点\时刻	19	20
1	42	0
2	40	0
11	0	1.59
12	73.95	107
22	40.83	0
23	15.83	122.67

[0169] 表3-1 场景1各机组出力计划(kW)

时刻	微型燃汽轮机	失负荷量	风电机组	光伏机组	储能放电	储能充电
0:00	458.65	0	111.02	0	0	0
1:00	184.5	0	85.17	0	300	0
2:00	458.65	0	111.02	0	0	0
3:00	477.18	0	111.02	0	131.06	149.58
4:00	588.67	0	111.02	0	0	197.02
5:00	461.33	0	61.02	0	0	19.68
6:00	416.67	0	11.02	0	74.98	0
7:00	415.74	0	54.33	0	176.8	144.2
8:00	453.19	0	4.33	0	324.15	279
9:00	160	0	19.33	0	323.33	0
10:00	433.33	0	69.33	0	0	0
11:00	483.33	0	19.33	0	0	0
12:00	401.94	0	0	0	83.06	0

[0171] 表3-2 场景1各机组出力计划(kW)

时刻	微型燃汽轮机	失负荷量	风电机组	光伏机组	储能放电	储能充电
13:00	370	0	50	0	65	0
14:00	385	0	100	0	0	0
15:00	373.98	0	111.02	0	0	0
16:00	383.31	0	138.02	0	0	0
17:00	572.72	0	188.02	0	0	239.41
18:00	608.48	0	221.96	0	0	309.12
19:00	564.58	0	199.73	0	0	242.98
20:00	496.67	0	99.73	0	0	56.73
21:00	279.58	0	52.26	0	300	92.17
22:00	587.41	0	102.26	0	150	300
23:00	356.67	0	102.25	0	80.75	0

[0173] 表4-1 场景2各机组出力计划(kW)

[0174]

时刻	微型燃汽轮机组	失负荷量	风电机组	光伏机组	储能放电	储能充电
0:00	458.65	0	111.02	0	0	0
0:15	184.5	0	85.17	0	300	0
0:30	458.65	0	111.02	0	0	0
0:45	477.18	0	111.02	0	131.06	149.58
1:00	588.67	0	111.02	0	0	197.02
1:15	461.33	0	61.02	0	0	19.68
1:30	416.67	0	11.02	0	74.98	0
1:45	415.74	0	54.33	0	176.8	144.2
2:00	453.19	0	4.33	0	324.15	279
2:15	160	0	19.33	0	323.33	0
2:30	433.33	0	69.33	0	0	0
2:45	483.33	0	19.33	0	0	0
3:00	401.94	0	0	0	83.06	0
3:15	370	0	50	0	65	0
3:30	385	0	100	0	0	0
3:45	373.98	0	111.02	0	0	0
4:00	383.31	0	138.02	0	0	0
4:15	572.72	0	188.02	0	0	239.41
4:30	608.48	0	221.96	0	0	309.12
4:45	564.58	0	199.73	0	0	242.98
5:00	496.67	0	99.73	0	0	56.73
5:15	279.58	0	52.26	0	300	92.17
5:30	587.41	0	102.26	0	150	300
5:45	356.67	0	102.25	0	80.75	0
6:00	439.75	0	202.26	0	0	0
6:15	574.53	0	249.02	0	0	181.55
6:30	496.67	0	249.02	10.98	0	114.67
6:45	460.03	0	170.99	10.98	0	0
7:00	648.87	0	112.05	0	116.88	106.13
7:15	570.13	0	112.05	49.05	266.06	225.62
7:30	683.16	0	112.05	49.05	183.84	256.43
7:45	434.82	0	59.42	0	277.43	0
8:00	453.29	0	159.42	0	571.96	0
8:15	692.66	0	259.42	50	182.59	0
8:30	830.46	0	309.42	99.36	0	54.57
8:45	798.66	0	308.18	99.36	0	21.54

[0175] 表4-2 场景2各机组出力计划(kW)

[0176]

时刻	微型燃汽轮机组	失负荷量	风电机组	光伏机组	储能放电	储能充电
9:00	765.78	0	346.52	149.36	86	0
9:15	965	0	296.52	154.05	0	67.9
9:30	980.38	0	213.24	154.05	0	0
9:45	1031.21	0	113.24	154.05	49.17	0
10:00	1050.37	0	13.24	186.87	118.52	0
10:15	1072.76	0	13.24	186.87	96.13	0
10:30	797.76	0	13.24	186.87	371.13	0
10:45	944.39	0	13.24	186.87	224.5	0
11:00	1069.39	0	113.24	215.52	99.18	0
11:15	1059.22	0	213.24	215.52	9.36	0
11:30	1005.73	0	297.26	215.52	0	21.18
11:45	1012.9	0	347.26	215.52	0	78.35
12:00	887.9	0	347.26	233.52	0	183.01
12:15	773.7	0	341.38	233.52	0	62.94

[0177] 表4-3 场景2各机组出力计划(kW)

[0178]

时刻	微型燃汽轮机组	失负荷量	风电机组	光伏机组	储能放电	储能充电
12:30	730.18	0	321.96	233.52	0	0
12:45	808.4	0	321.96	233.52	0	78.22
13:00	840	0	221.96	203.31	164	253.27
13:15	894.5	0	221.96	225.63	0	166.1
13:30	1078.9	0	221.96	225.63	0	350.49
13:45	885.75	0	221.96	225.63	0	157.35
14:00	788.59	0	321.96	196.98	0	140.87
14:15	854.82	0	374.47	196.98	0	259.6
14:30	965	0	326.52	196.98	0	321.83
14:45	808.46	0	236.97	196.98	0	75.74
15:00	965	0	136.97	160.86	0	106.83
15:15	1090	0	136.97	160.86	0	231.83
15:30	965	0	136.97	160.86	0	106.83
15:45	1090	0	136.97	160.86	0	231.83
16:00	965	0	236.97	113.85	0	42.15
16:15	866.84	0	336.97	113.85	0	43.99
16:30	967.2	0	427.06	113.85	0	234.44
16:45	1090	0	372.21	107.24	0	295.79
17:00	1090	0	272.21	57.24	56.55	0

[0179] 表4-4 场景2各机组出力计划(kW)

时刻	微型燃汽轮机组	失负荷量	风电机组	光伏机组	储能放电	储能充电
17:15	1090	0	272.21	57.24	56.55	0
17:30	1090	0	272.21	57.24	56.55	0
17:45	1090	0	219.71	57.24	109.05	0
18:00	1073.55	224.8	119.71	17.91	276.7	0
18:15	1090	230.77	119.71	17.91	254.27	0
18:30	1090	230.77	119.71	17.91	254.27	0
18:45	1090	230.77	119.71	17.91	254.27	0
19:00	1087.08	264.59	192.7	0	328.64	0
19:15	1049.03	264.59	242.7	0	316.69	0
19:30	1040.93	264.59	271.01	0	296.47	0
19:45	1087.08	264.59	271.01	0	250.33	0
20:00	1072.89	0	371.01	0	212.77	0
20:15	1090	0	436.71	0	129.96	0
20:30	1090	0	443.36	0	129.97	6.67
20:45	1090	0	393.36	0	173.31	0
21:00	954.31	0	393.36	0	0	0
21:15	973.84	0	443.36	0	0	69.53
21:30	940	0	419.75	0	0	12.08
21:45	973.84	0	369.75	0	4.08	0

[0181] 表4-5 场景2各机组出力计划(kW)

时刻	微型燃汽轮机组	失负荷量	风电机组	光伏机组	储能放电	储能充电
22:00	834.79	0	272.15	0	0	123.6
22:15	900.59	0	272.15	0	0	189.4
22:30	854.19	0	272.15	0	0	143
22:45	613.33	0	222.15	0	147.85	0
23:00	613.86	0	208.35	0	69.8	175.68
23:15	620.53	0	158.35	0	91.69	154.24
23:30	449.36	0	59.6	0	207.38	0
23:45	410	0	0	0	306.33	0

[0183] 场景2两个故障时段共出现443.87kW负荷损失,占负荷总比例的12.38%。相对于仅考虑日前调度的分布式故障恢复算法有34.07kW负荷损失量的减少。对比结果可以发现,在非故障时段日前与日内调度计划各机组出力区别不大,但是在故障时段,出现较大区别。这是因为在极端事件攻击下,更小的时间尺度上各机组能够缓慢增加其出力,在更加灵活地调用系统内资源的同时,尽量降低故障给系统运行造成的波动。

[0184] 针对系统无故障运行、场景1、场景2三种情况优化运行结果,对比在19-20时段子微电网群间功率传输情况如图10~图12所示。系统无故障运行时,各子微电网内部发电资源足够保证该微网安全稳定运行,微电网群间仅存在少量的功率传输。在第19时刻,微电网1内部发生两处线路故障,微电网2向1以及微电网3向1功率传输明显增加;在第20时刻微电网1、微电网2内部各发生一处线路故障,微电网3向1以及微电网3向2功率传输明显增加。相对于仅考虑日前故障恢复计划的方案,在多时间尺度所制定的恢复方案能够保证联络线功率传输变化放缓,并且使得其他微电网向故障微电网提供更多的功率支撑。在保证系统稳定性的同时,进一步实现系统故障的减损和快速恢复。因此,针对互联微电网系统建立多时间尺度故障恢复模型,并且采用分布式算法求解对于故障的快速恢复有重要作用,克服了传统微电网故障恢复时,只能依靠上级电网支撑,或是只能单独微电网自恢复的缺陷。

[0185] 实施例2:

[0186] 参见图13,一种互联微电网多时间尺度故障恢复装置,包括:故障恢复调度模型建立模块,用于针对互联微电网系统,建立包括以用户侧失负荷量最小为故障恢复目标的日前优化调度模型和日内优化调度模型的故障恢复调度模型;最恶劣故障场景确定模块,用于采用拉丁超立方抽样方法,对确定的场景进行初始故障场景集的抽取,将抽取的初始故障场景集输入蝙蝠算法,通过迭代求解出最恶劣故障场景;调度计划获取模块,用于将最恶劣故障场景输入日前优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日前调度计划,以及将日前调度计划输入日内优化调度模型,基于ADMM-GBS算法,通过迭代求解日内调度计划。

[0187] 实施例3:

[0188] 参见图14,一种互联微电网多时间尺度故障恢复设备,包括存储器和处理器;所述存储器,用于存储计算机程序代码,并将所述计算机程序代码传输给所述处理器;所述处理器,用于根据所述计算机程序代码中的指令执行一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法。

[0189] 一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现一种互联微电网多时间尺度故障恢复方法。

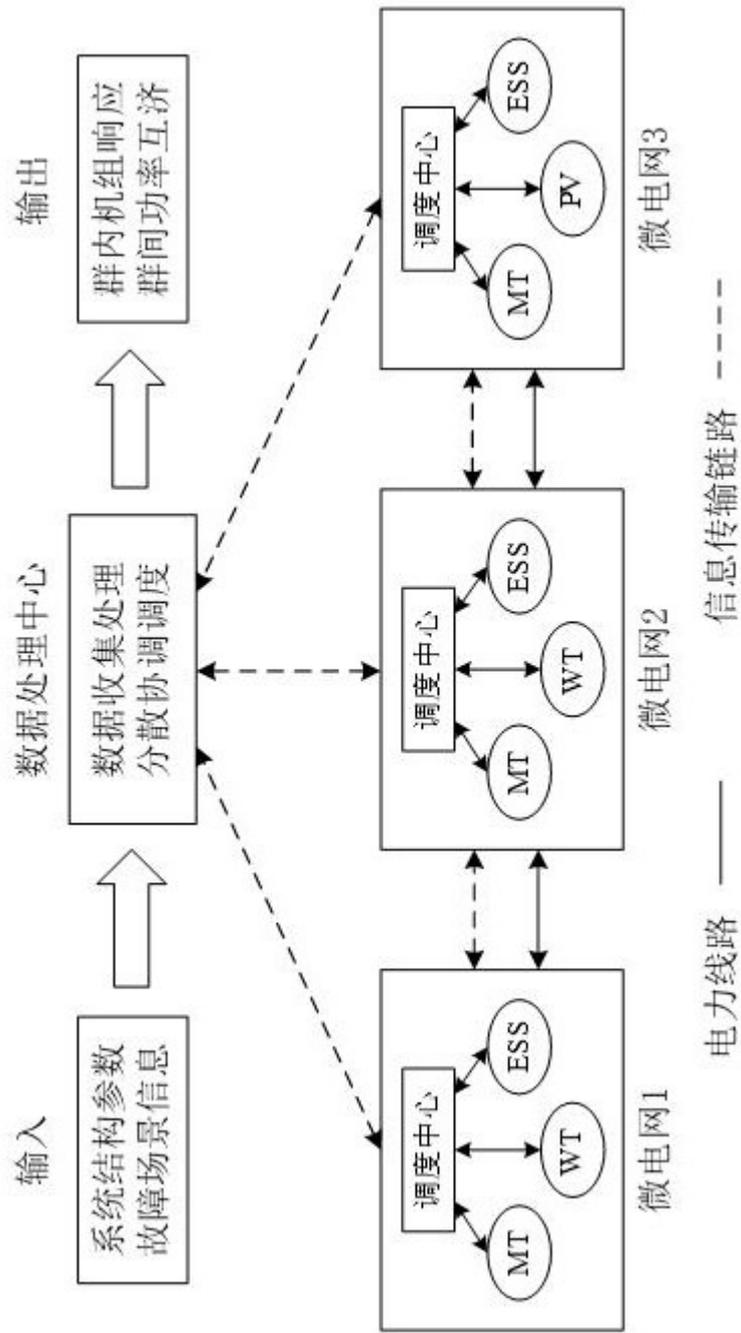


图 1

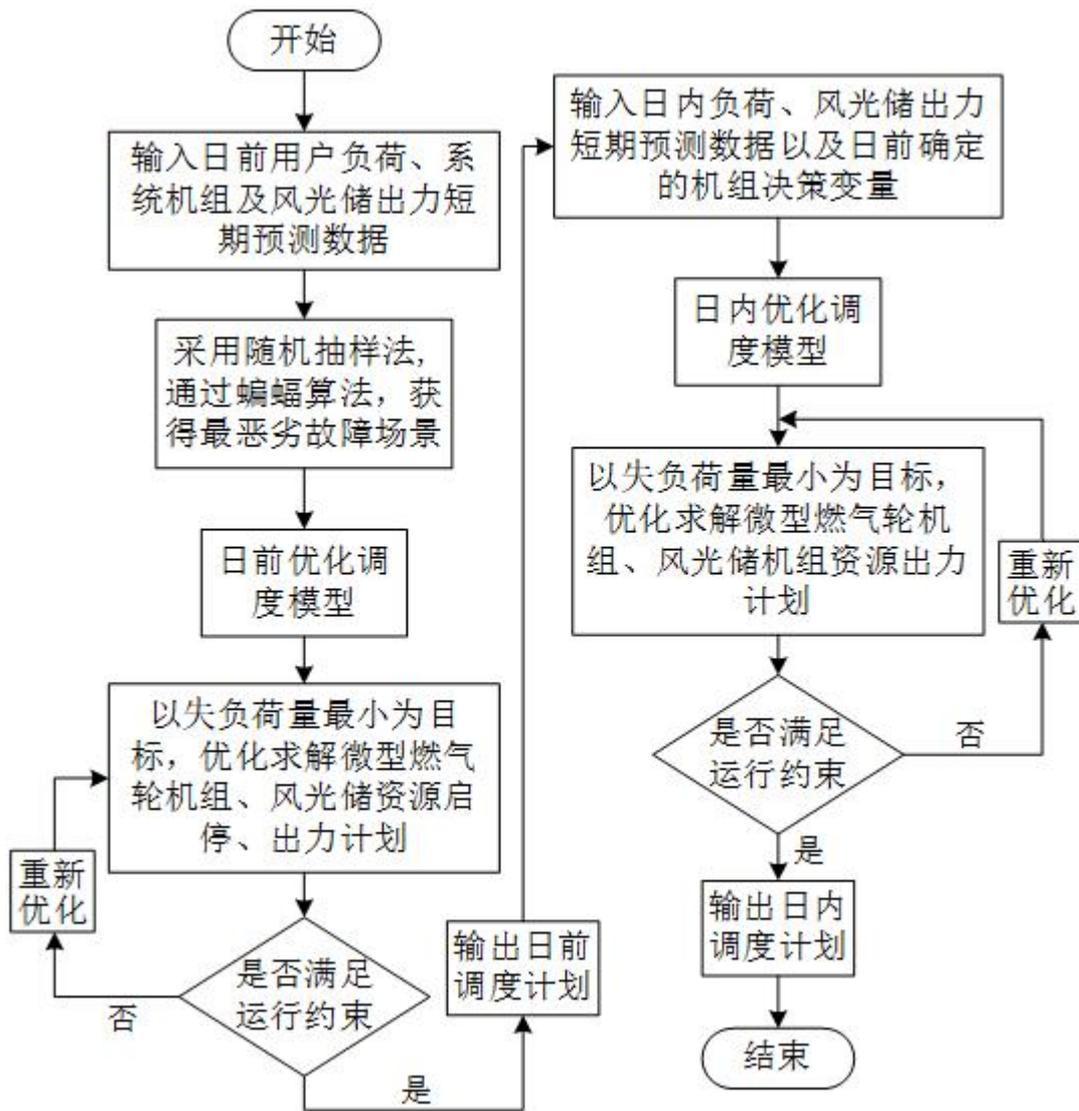


图 2

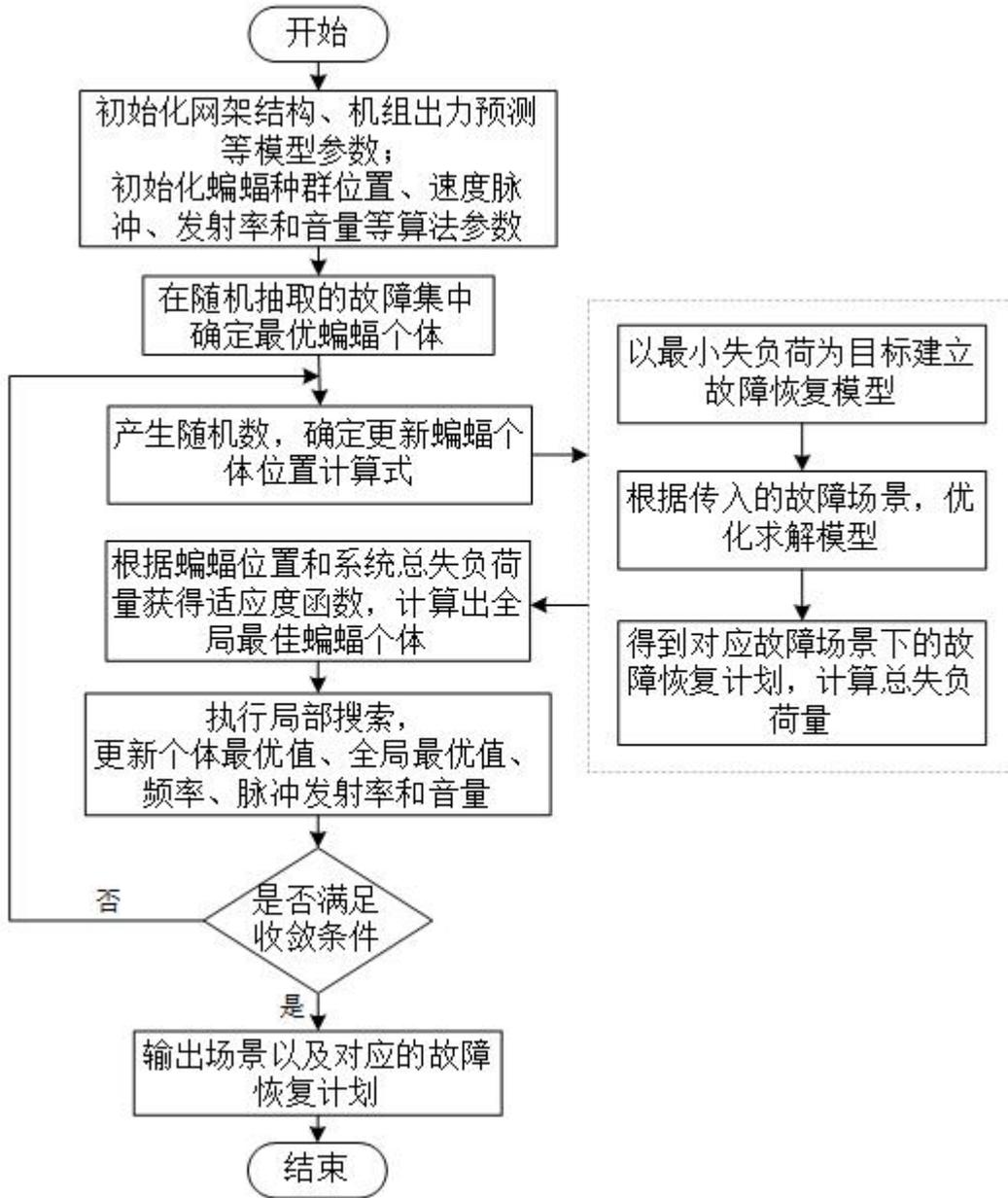


图 3

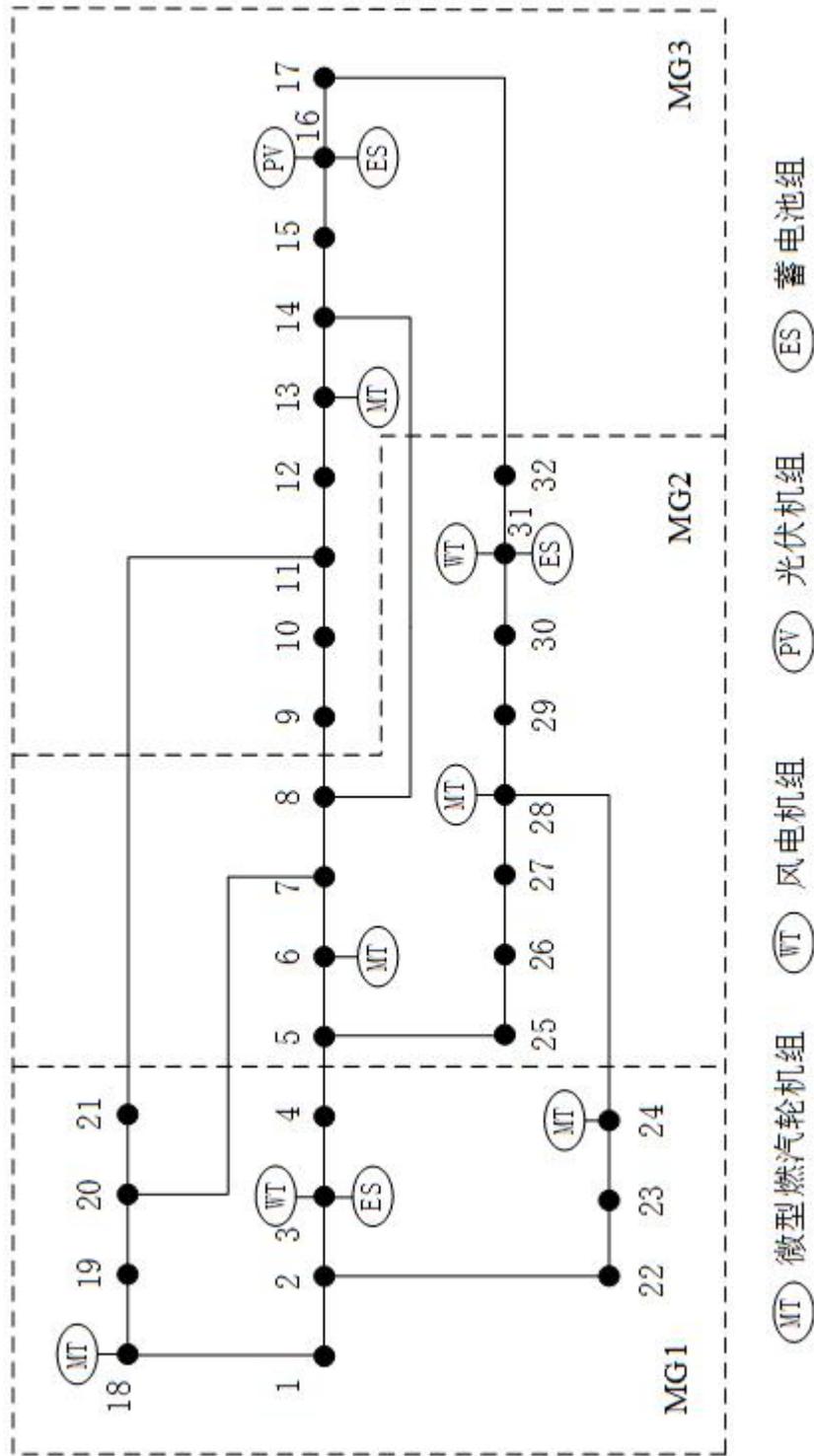


图 4

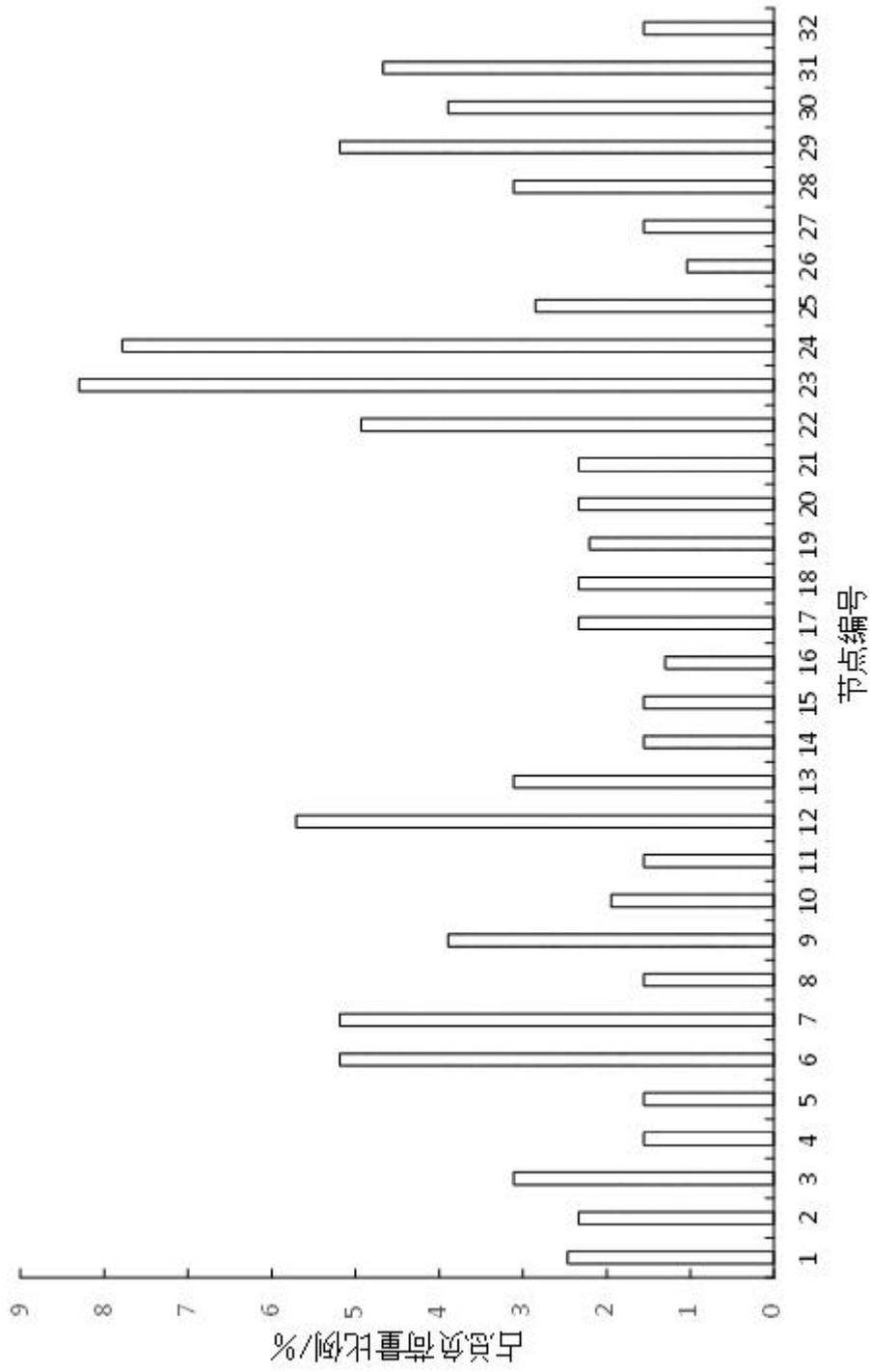


图 5

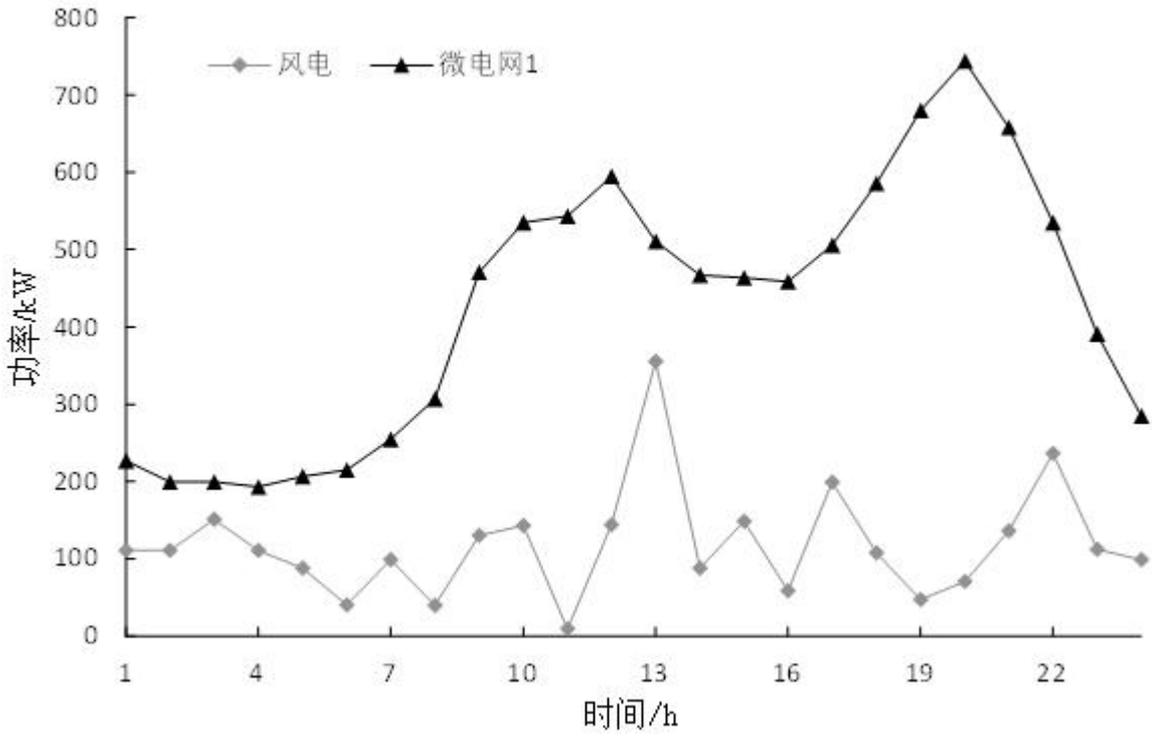


图 6

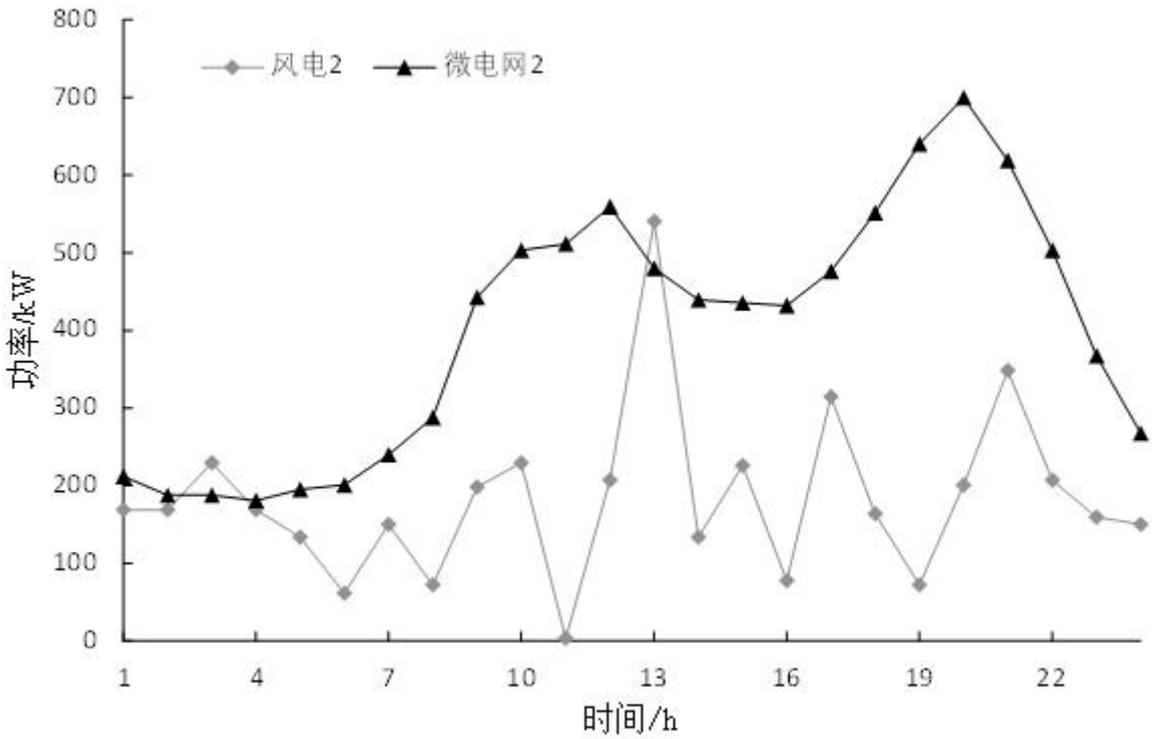


图 7

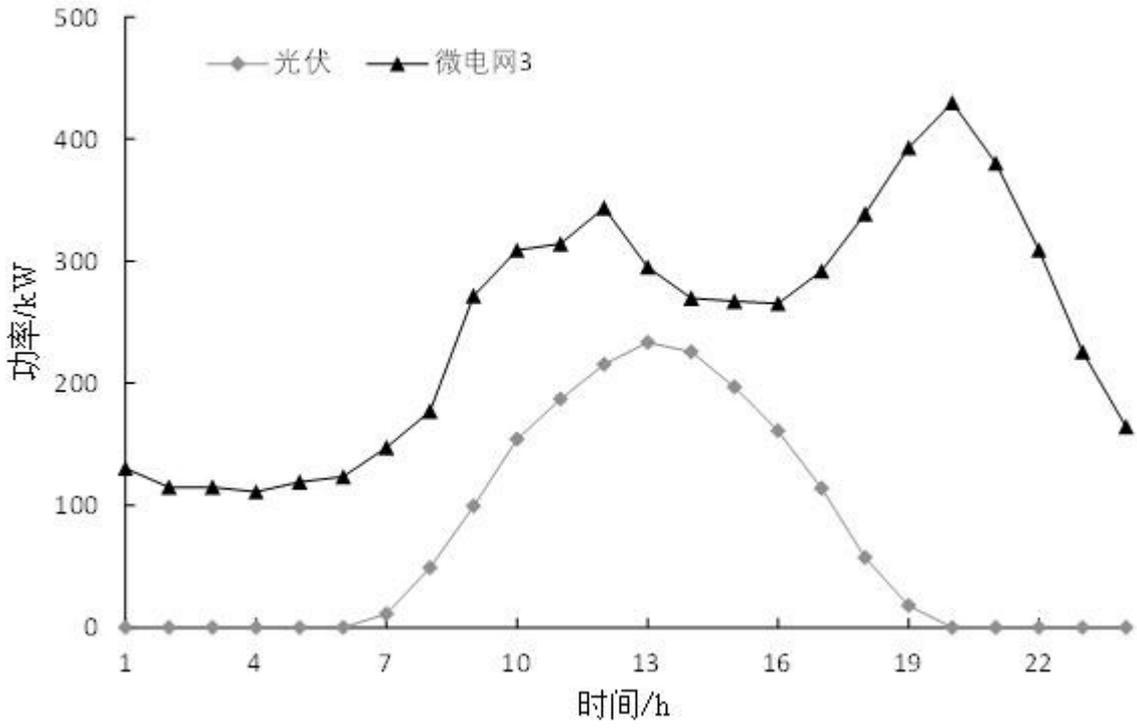


图 8

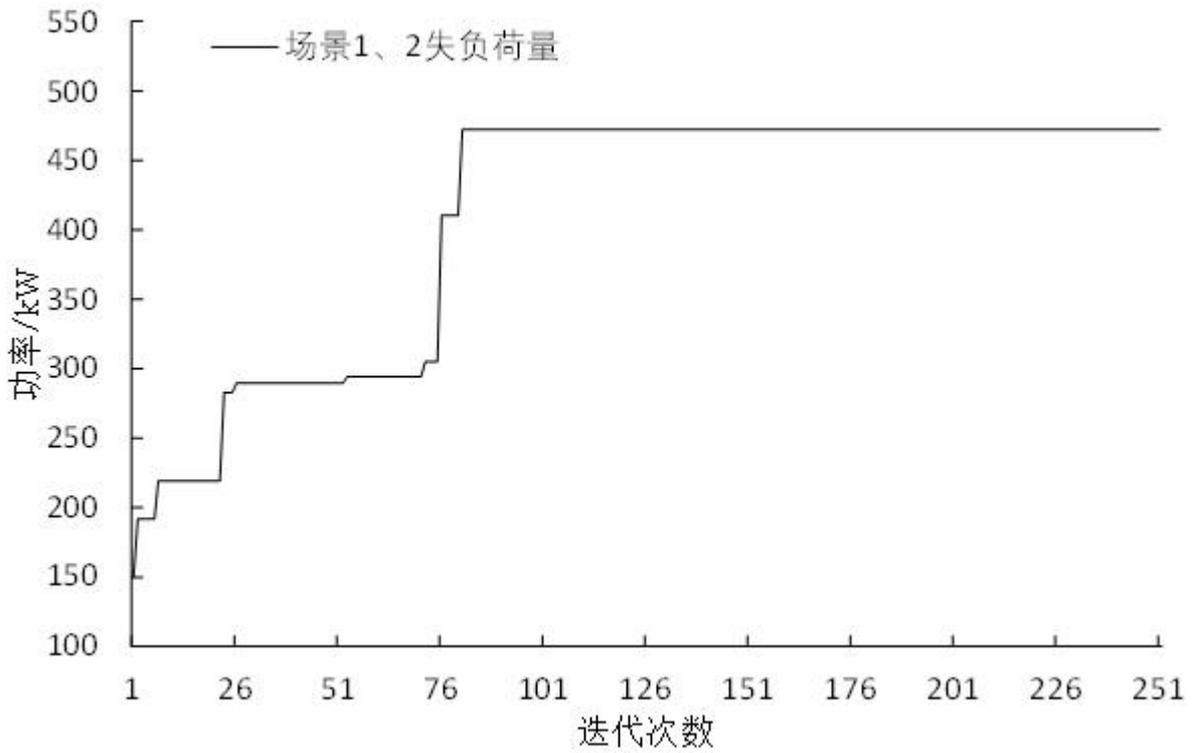


图 9

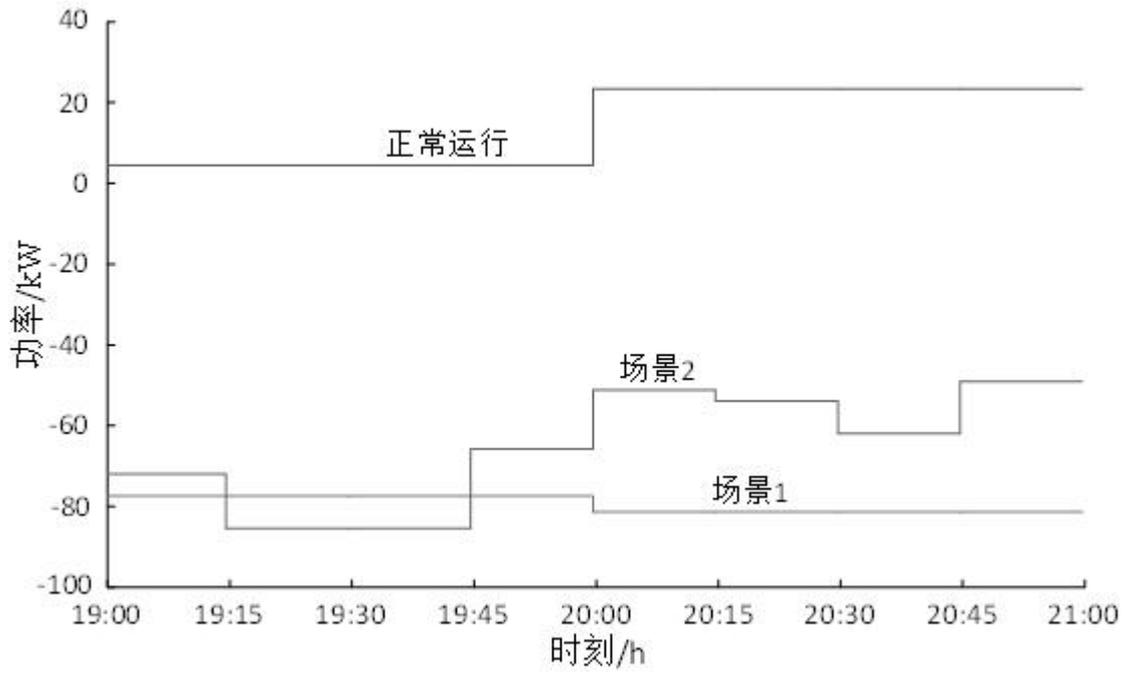


图 10

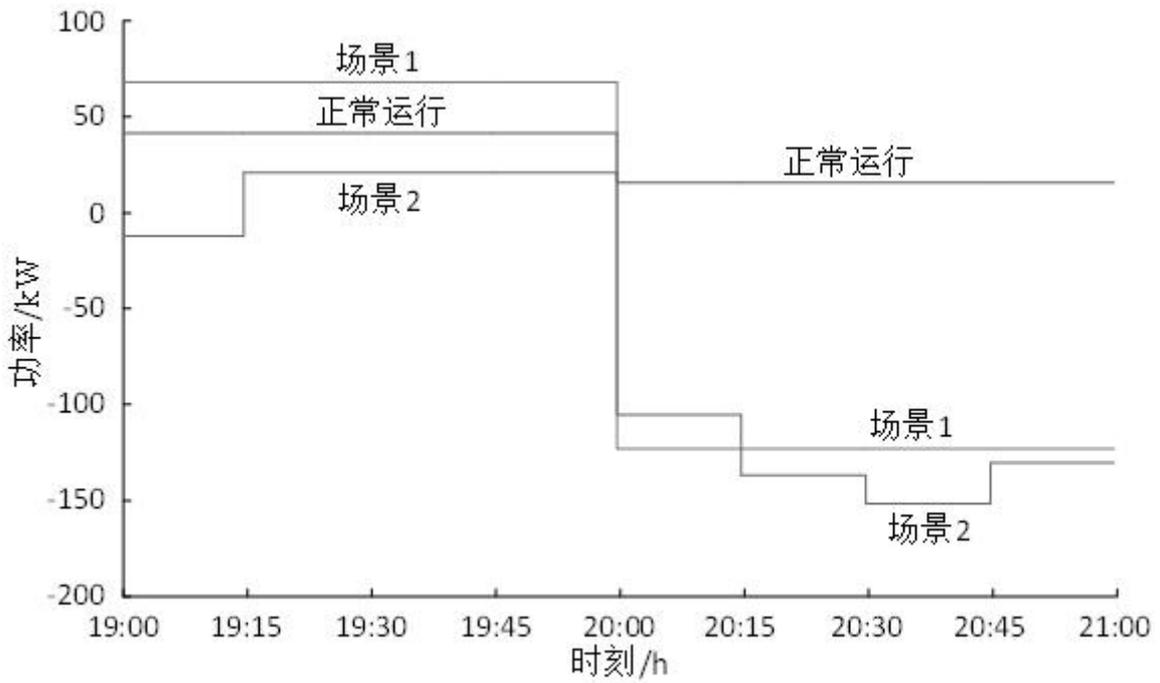


图 11

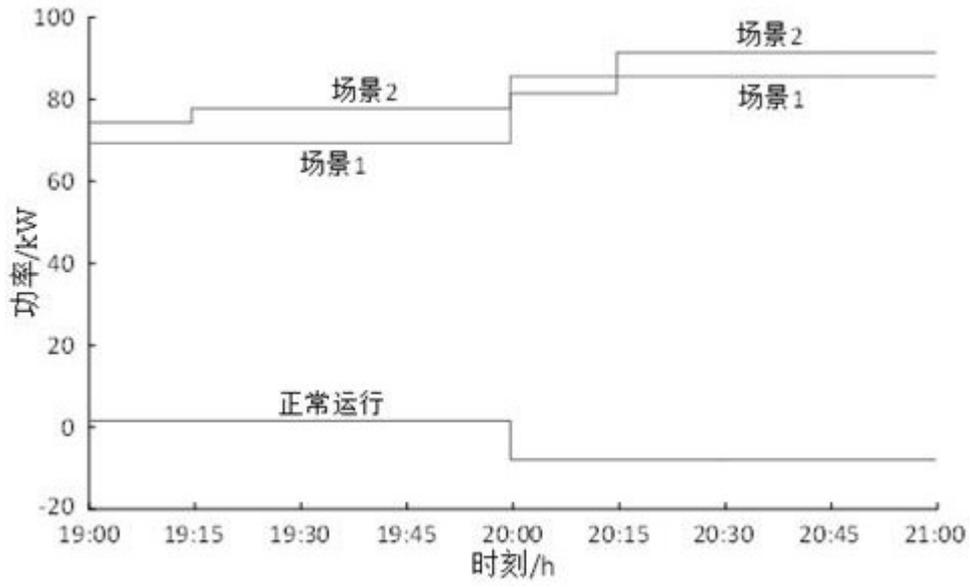


图 12

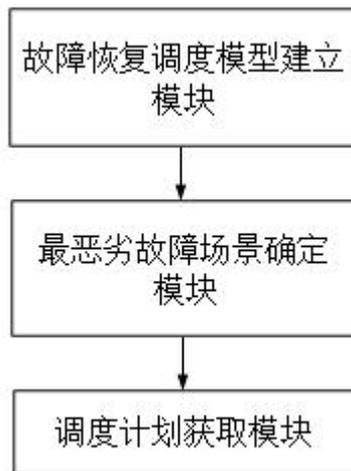


图 13

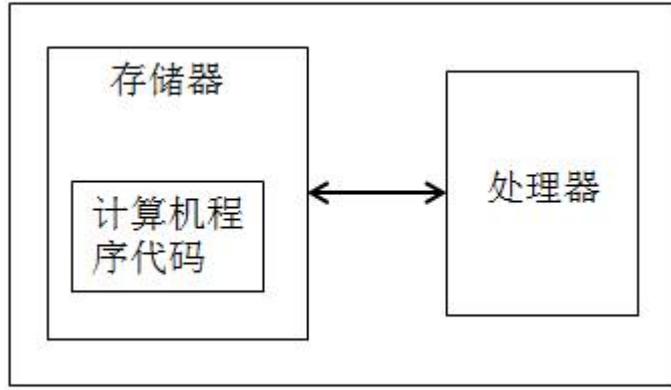


图 14