



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111985105 A

(43) 申请公布日 2020. 11. 24

(21) 申请号 202010844243.9

G06F 119/02 (2020.01)

(22) 申请日 2020.08.20

G06F 119/08 (2020.01)

(71) 申请人 重庆大学

地址 400030 重庆市沙坪坝区正街174号

(72) 发明人 邵常政 路红池 谢开贵 胡博

牛涛 李春燕 黄威 李雨菲

李维展

(74) 专利代理机构 广州市华学知识产权代理有

限公司 44245

代理人 张晨

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06Q 10/04 (2012.01)

G06Q 50/06 (2012.01)

G06F 111/04 (2020.01)

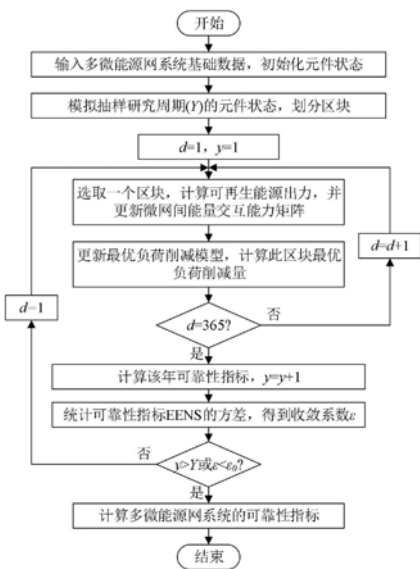
权利要求书7页 说明书12页 附图3页

(54) 发明名称

一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法

(57) 摘要

本发明属于多微能源网系统技术领域,主要涉及一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,包括如下步骤:计及微能源网间多种能量之间的功率交互,基于能源集线器构建多微能源网系统;利用节点法建立供热管网模型,建立热负荷动态特性模型;建立一个计及热动态特性的多微能源网最优切负荷模型;采用序贯蒙特卡罗模拟法评估多微能源网系统的可靠性,计算该多微能源网系统的年度可靠性指标。本发明基于序贯蒙特卡罗模拟法,并充分考虑了热动态特性和微能源网间能量交互等因素对多微能源网系统可靠性的影响,可以更加真实地反映出系统应对故障的变化情况,从而提升可靠性结果的准确性,对多微能源网的合理规划提供准确的数据支撑。



1. 一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1、计及微能源网间多种能量之间的功率交互,基于能源集线器构建多微能源网系统;

S2、利用节点法建立供热管网模型,并依照热负荷特性将热负荷分为常年性热负荷和季节性热负荷,建立热负荷动态特性模型;

S3、考虑供热管网的传输延迟和温度损耗以及季节性热负荷的惯性,考虑各微能源网之间的电能和天然气能量交互及其对系统运行工况的影响,建立计及热动态特性的多微能源网最优切负荷模型;

S4、采用序贯蒙特卡洛模拟法评估多微能源网系统的可靠性,计算该多微能源网系统的年度可靠性指标。

2. 根据权利要求1所述的一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,其特征在于,S1步骤中所述微能源网由输入侧、分布式发电装置、能量转换装置、储能装置和输出侧构成;

微能源网间可自由进行电和天然气能源的交互,不能进行热能的交互,微能源网之间电能和天然气的功率交互受到输电线路或输气管道的额定流量的限制,其约束条件如下:

$$P_{m,n}^{\min} \leq P_{m,n}^t \leq P_{m,n}^{\max}$$

$$G_{m,n}^{\min} \leq G_{m,n}^t \leq G_{m,n}^{\max}$$

式中,  $P_{m,n}^t$  为第m个微能源网向第n个微能源网输送的电功率;  $G_{m,n}^t$  为第m个微能源网向第n个微能源网输送天然气功率;  $P_{m,n}^{\min}$  和  $P_{m,n}^{\max}$  分别为第m个微能源网向第n个微能源网输送的最小和最大电功率;  $G_{m,n}^{\min}$  和  $G_{m,n}^{\max}$  分别为第m个微能源网向第n个微能源网输送的最小和最大天然气功率。

3. 根据权利要求2所述的一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,其特征在于,S2步骤中供热管网模型建立如下:

采用管道热平衡节点法和苏霍夫温降模型进行建模,建模如下:

$$m_p^t \Delta T_{p,outs}^t = \left( \sum_{l=t-\lambda_p^t}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p \right) T_{p,ins}^{t-\lambda_p^t} + \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^{t-\lambda_p^t-1} m_p^l \Delta t T_{p,ins}^l +$$

$$\left( m_p^t \Delta t + \rho A_p L_p - \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^t m_p^l \Delta t \right) T_{p,ins}^{t-\gamma_p^t}$$

$$m_p^t \Delta T_{p,outr}^t = \left( \sum_{l=t-\lambda_p^t}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p \right) T_{p,inr}^{t-\lambda_p^t} + \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^{t-\lambda_p^t-1} m_p^l \Delta t T_{p,inr}^l +$$

$$\left( m_p^t \Delta t + \rho A_p L_p - \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^t m_p^l \Delta t \right) T_{p,inr}^{t-\gamma_p^t}$$

其中,  $\gamma_p^t$  和  $\lambda_p^t$  为热水从流进管道至流出管道的时间间隔数,可用下式表达:

$$\lambda_p^t = \min_{n \in \mathbb{N}} \left\{ n : s.t. \sum_{l=t-n}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p \geq 0 \right\}$$

$$\gamma_p^t = \min_{n \in \mathbb{N}} \left\{ n : s.t. \sum_{l=t-n}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p - m_p^t \Delta t \geq 0 \right\}$$

式中,  $\rho$ 为水的密度;  $A_p$ 和 $L_p$ 分别为管道 $p$ 的横截面积和长度;  $m_p^t$ 为管道 $p$ 在 $t$ 时刻的工质流量;  $T_{p,outs}^t$ 和 $T_{p,ins}^t$ 分别为供水管道 $p$ 在 $t$ 时刻的进水温度和出水温度;  $T_{p,inr}^t$ 和 $T_{p,outr}^t$ 分别为回水管道 $t$ 时刻的进水温度和出水温度;

在传输过程中,热水与管壁进行热交换,产生温损,计及温损后,输出温度为:

$$T_{outs}^t = T_a^t + J(T_{outs}^t - T_a^t)$$

$$T_{outr}^t = T_a^t + J(T_{outr}^t - T_a^t)$$

$$J = \exp\left(-\frac{\zeta \Delta t}{A \rho c}(\lambda + 0.5)\right)$$

式中,  $T_{outs}^t$ 和 $T_{outr}^t$ 分别为供水管道和回水管道计及温损后 $t$ 时刻的出水温度;为管道外部环境温度;  $J$ 为热水流经管道的温损系数;  $\zeta$ 为管道的导热系数;  $c$ 为水的比热容。

4. 根据权利要求3所述的一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,其特征在于, S2步骤中热负荷动态特性模型建立如下:

季节性热负荷主要指采暖、通风、空气调节系统的热负荷,其与室外温度息息相关,其全年变化幅度较大,日内波动较小,采用建筑热负荷模型进行建模:

$$T_{in}^{t+1} = T_{in}^t \cdot e^{-\Delta t/RC} + (R \cdot L_{sh}^t + T_{out}^t)(1 - e^{-\Delta t/RC})$$

根据上式易得到:

$$L_{sh}^t = \frac{1}{R} \left( \frac{T_{in}^{t+1} - T_{in}^t \cdot e^{-\Delta t/RC}}{1 - e^{-\Delta t/RC}} - T_{out}^t \right)$$

式中,  $L_{sh}^t$ 为热网在 $t$ 时刻向用户季节性热负荷提供的热功率;  $T_{in}^t$ 为用户在 $t$ 时刻的室内温度;  $T_{out}^t$ 为 $t$ 时刻的室外温度;  $R$ 为建筑物的热阻;  $C$ 为室内空气热容。

5. 根据权利要求4所述的一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,其特征在于, S3步骤中计及热动态特性的多微能源网最优切负荷模型建立如下:

根据计及微能源网与主网、微能源网与微能源网间的能量交互和热动态特性,建立多微能源网的最优负荷削减模型;

在最优负荷削减模型中,考虑能量交互、需求响应和负荷削减,以微能源网的能量交互成本、弃风弃光惩罚成本和负荷削减惩罚成本之和最小为该模型的目标函数:

$$C = \min \left[ \sum_{n=1}^N (C_{epc,n} + C_{gpc,n} + C_{mepc,n} + C_{mgpc,n} + C_{rcc,n} + C_{lcc,n}) \right]$$

式中,  $N$ 为多微能源网中的微能源网数量;  $C_{epc,n}$ 和 $C_{gpc,n}$ 分别为第 $n$ 个微能源网与主网电能和天然气的交互成本;  $C_{mepc,n}$ 和 $C_{mgpc,n}$ 分别为第 $n$ 个微能源网与其它微能源网电能和天然

气的交互成本; $C_{\text{rcc},n}$ 为第n个微能源网的弃风弃光惩罚成本; $C_{\text{lcc},n}$ 分别为第n个微能源网的负荷削减惩罚成本;

$$C_{\text{epc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{epc}}^t P_n^t \Delta t$$

$$C_{\text{gpc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{gpc}}^t G_n^t \Delta t$$

$$C_{\text{mepc},n} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^N p_{\text{mepc}}^t P_{m,n}^t \Delta t$$

$$C_{\text{mgpc},n} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^N p_{\text{mgpc}}^t G_{m,n}^t \Delta t$$

$$C_{\text{rcc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{rcc}}^t (P_{\text{WTc},k,n}^t + P_{\text{PVc},k,n}^t) \Delta t$$

$$C_{\text{lcc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{elcc}} L_{\text{ec},n}^t \Delta t + \sum_{t=1}^T p_{\text{yhlcc}} L_{\text{yhc},n}^t \Delta t + \sum_{t=1}^T p_{\text{shlcc}} L_{\text{shc},n}^t \Delta t$$

式中, $p_{\text{mepc}}^t$ 为微能源网间t时刻的电能交互价格; $p_{\text{mgpc}}^t$ 为微能源网间t时刻的天然气交互价格; $L_{\text{ec},n}^t$ 、 $L_{\text{yhc},n}^t$ 和 $L_{\text{shc},n}^t$ 分别为第n个微能源网的电负荷削减量、常年性热负荷削减量和季节性热负荷削减量;

约束条件包含如下:

电功率平衡约束

$$P^t = \sum_{k=1}^{K_{\text{tr}}} P_{\text{trI},k}^t$$

$$\sum_{k=1}^{K_{\text{WT}}} P_{\text{WT},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{PV}}} P_{\text{PV},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{tr}}} P_{\text{trO},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{chp}}} P_{\text{chp},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{es}}} P_{\text{edis},k}^t + \sum_{m=1}^N P_m^t = L_e^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{eb}}} P_{\text{eb},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{p2g}}} P_{\text{p2g},k}^t$$

式中, $L_e^t$ 为系统电输出端口t时刻的输出功率; $P_{\text{WT},k}^t$ 为第k台风机t时刻的输出功率; $P_{\text{PV},k}^t$ 为第k台光伏板t时刻的输出功率; $P_{\text{edis},k}^t$ 为第k台电储能装置t时刻与微能源网的净交换功率; $K_{\text{tr}}$ 、 $K_{\text{chp}}$ 、 $K_{\text{es}}$ 、 $K_{\text{eb}}$ 和 $K_{\text{p2g}}$ 分别为变压器、CHP机组、电储能、电锅炉和P2G装置的数量;

天然气功率平衡约束

$$G^t = \sum_{k=1}^{K_{\text{cp}}} G_{\text{cpI},k}^t$$

$$\sum_{k=1}^{K_{\text{cp}}} G_{\text{cpO},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{p2g}}} G_{\text{p2g},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{gs}}} G_{\text{gdis},k}^t + \sum_{m=1}^N G_m^t = \sum_{k=1}^{K_{\text{chp}}} G_{\text{chp},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{ab}}} G_{\text{ab},k}^t$$

式中, $G_{\text{gdis},k}^t$ 为第k台气储能装置t时刻与微能源网的净交换功率; $K_{\text{cp}}$ 、 $K_{\text{gs}}$ 和 $K_{\text{ab}}$ 分别为压缩机、气储能和燃气锅炉的数量;

热功率平衡约束

$$\sum_{k=1}^{K_{ab}} H_{ab,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{chp}} H_{chp,k}^t = c_w m (T_{ins}^t - T_{out}^t)$$

$$c_w m (T_{outs}^t - T_{inr}^t) + \sum_{k=1}^{K_{eb}} H_{eb,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{hs}} H_{hdis,k}^t = L_{sh}^t + L_{yh}^t$$

式中,  $L_h^t$  为系统热输出端口 t 时刻的输出功率;  $H_{hdis,k}^t$  为第 k 台热储能装置 t 时刻与微能源网的净交换功率;  $K_{hs}$  为热储能数量,  $c_w$  为水的比热容;  $L_{yh}^t$  为微能源网 t 时刻向用户常年性热负荷提供的热功率;

需求侧功率平衡约束

在设备故障导致负荷削减后, 微能源网提供的能量不足以满足负荷需求, 需在需求侧增设负荷削减的决策变量;

对于电负荷和常年性热负荷, 需求侧功率平衡中需增设负荷削减变量, 以及负荷削减量的限制约束:

$$L_e^t + L_{ec}^t = L_{D,e}^t$$

$$L_{yh}^t + L_{yhc}^t = L_{D,yh}^t$$

$$0 \leq L_e^t \leq L_{D,e}^t$$

$$0 \leq L_{ec}^t \leq L_{D,e}^t$$

$$0 \leq L_{yh}^t \leq L_{D,yh}^t$$

$$0 \leq L_{yhc}^t \leq L_{D,yh}^t$$

式中,  $L_{D,e}^t$  为系统 t 时刻的电负荷需求量;  $L_{D,yh}^t$  为系统 t 时刻的常年性热负荷需求量;

季节性热负荷削减是由于热网向用户提供的热功率致使室内温度超出适宜温度区间引起的, 其削减量等于热网向用户提供的理论热功率和实际热功率之差的绝对值:

$$L_{shc}^t = \begin{cases} 0, & T_{com,min} \leq T_{in}^t \leq T_{com,max} \\ |L_{shr}^t - L_{sh}^t|, & T_{in}^t < T_{com,min}, T_{in}^t > T_{com,max} \end{cases}$$

式中,  $T_{com,min}$  和  $T_{com,max}$  分别为微能源网室内最小适宜温度和最大适宜温度;  $L_{shr}^t$  为热网向用户 t 时刻提供的理论热功率; 理论热功率是指从现有温度调整到适宜温度区间内温度所需的最小热功率;

$$L_{shr}^t = \begin{cases} \frac{1}{R} \left( \frac{T_{com,min} - T_{in}^t \cdot e^{-\Delta t / RC}}{1 - e^{-\Delta t / RC}} - T_{out}^t \right), & T_{in}^t < T_{com,min} \\ \frac{1}{R} \left( \frac{T_{com,max} - T_{in}^t \cdot e^{-\Delta t / RC}}{1 - e^{-\Delta t / RC}} - T_{out}^t \right), & T_{in}^t > T_{com,max} \end{cases}$$

易可推导出, 季节性热负荷削减量为:

$$L_{\text{shc}}^t = \begin{cases} \frac{1}{R} \left( \frac{T_{\text{com,min}} - T_{\text{in}}^t}{1 - e^{-\Delta t/RC}} \right), & T_{\text{in}}^t < T_{\text{com,min}} \\ 0, & T_{\text{com,min}} \leq T_{\text{in}}^t \leq T_{\text{com,max}} \\ \frac{1}{R} \left( \frac{T_{\text{in}}^t - T_{\text{com,max}}}{1 - e^{-\Delta t/RC}} \right), & T_{\text{in}}^t > T_{\text{com,max}} \end{cases}$$

能量转换设备出力约束

最优负荷削减模型中,需考虑能量转换装置的运行状态及其出力能力,故在模型中增设一组二进制变量,用于表示能量转换装置的运行状态,0表示元件故障,1表示元件运行;

$$\begin{aligned} P_{\text{chp},k}^{\min} \xi_{\text{chp},k}^t &\leq P_{\text{chp},k}^t \leq P_{\text{chp},k}^{\max} \xi_{\text{chp},k}^t \\ H_{\text{chp},k}^{\min} \xi_{\text{chp},k}^t &\leq H_{\text{chp},k}^t \leq H_{\text{chp},k}^{\max} \xi_{\text{chp},k}^t \\ H_{\text{ab},k}^{\min} \xi_{\text{ab},k}^t &\leq H_{\text{ab},k}^t \leq H_{\text{ab},k}^{\max} \xi_{\text{ab},k}^t \\ H_{\text{eb},k}^{\min} \xi_{\text{eb},k}^t &\leq H_{\text{eb},k}^t \leq H_{\text{eb},k}^{\max} \xi_{\text{eb},k}^t \\ G_{\text{p2g},k}^{\min} \xi_{\text{p2g},k}^t &\leq G_{\text{p2g},k}^t \leq G_{\text{p2g},k}^{\max} \xi_{\text{p2g},k}^t \\ P_{\text{trO},k}^{\min} \xi_{\text{tr},k}^t &\leq P_{\text{trO},k}^t \leq P_{\text{trO},k}^{\max} \xi_{\text{tr},k}^t \\ G_{\text{cpO},k}^{\min} \xi_{\text{cp},k}^t &\leq G_{\text{cpO},k}^t \leq G_{\text{cpO},k}^{\max} \xi_{\text{cp},k}^t \\ 0 &\leq P_{\text{WT},k}^t \leq P_{\text{WT},k}^{\max} \xi_{\text{WT},k}^t \\ 0 &\leq P_{\text{PV},k}^t \leq P_{\text{PV},k}^{\max} \xi_{\text{PV},k}^t \end{aligned}$$

式中,  $\xi_{\text{chp},k}^t$ 、 $\xi_{\text{ab},k}^t$ 、 $\xi_{\text{eb},k}^t$ 、 $\xi_{\text{p2g},k}^t$ 、 $\xi_{\text{tr},k}^t$ 、 $\xi_{\text{cp},k}^t$ 、 $\xi_{\text{WT},k}^t$ 和 $\xi_{\text{PV},k}^t$ 分别为第k个CHP机组、燃气锅炉、电锅炉、P2G装置、变压器、压缩机、风机和光伏板t时刻的元件运行状态;

储能设备出力约束

$$\begin{cases} P_{\text{dis},k}^t = P_{\text{O},k}^t - P_{\text{I},k}^t \\ E_k^{t+1} = (1-\gamma_k)E_k^t + (\eta_{\text{c},k}P_{\text{I},k}^t\Delta t - P_{\text{O},k}^t\Delta t/\eta_{\text{d},k}) \\ 0 \leq P_{\text{O},k}^t \leq P_{\text{O},k}^{\max} \alpha_k^t \\ 0 \leq P_{\text{I},k}^t \leq P_{\text{I},k}^{\max} \beta_k^t \\ 0 \leq \alpha_k^t + \beta_k^t \leq 1 \\ E_k^{\min} \leq E_k^t \leq E_k^{\max} \end{cases}$$

式中,  $P_{\text{dis},k}^t$ 为第k台储能装置t时刻对微能源网的净能源交换功率;  $P_{\text{I},k}^t$ 和 $P_{\text{O},k}^t$ 分别为第k台储能装置t时刻的充能和放能功率;  $E_k^t$ 为第k台储能装置t时刻的存储能量;  $\gamma_k$ 为第k台储能装置的能量自损率;  $\eta_{\text{c},k}$ 和 $\eta_{\text{d},k}$ 为第k台储能装置的能量充放效率;  $P_{\text{I},k}^{\max}$ 和 $P_{\text{O},k}^{\max}$ 为第k台储能装置的最大充放功率限制;  $E_k^{\min}$ 和 $E_k^{\max}$ 分别为储能装置的最大和最小容量限制;  $\alpha_k^t$ 和 $\beta_k^t$ 分别为储能装置充放状态,0表示不进行能量充放,1表示能量充放;

$$\alpha_{\text{es},k}^t \leq \xi_{\text{es},k}^t$$

$$\beta_{es,k}^t \leq \xi_{es,k}^t$$

$$\alpha_{hs,k}^t \leq \xi_{hs,k}^t$$

$$\beta_{hs,k}^t \leq \xi_{hs,k}^t$$

$$\alpha_{gs,k}^t \leq \xi_{gs,k}^t$$

$$\beta_{gs,k}^t \leq \xi_{gs,k}^t$$

式中,  $\xi_{es,k}^t$ 、 $\xi_{hs,k}^t$  和  $\xi_{gs,k}^t$  分别为第k个电储能、热储能和天然气储能装置t时刻的元件运行状态;

系统运行约束

微能源网与主网和天然气网进行能量交互的功率约束:

$$G^{\min} \leq G^t \leq G^{\max}$$

$$P^{\min} \leq P^t \leq P^{\max}$$

式中,  $G^{\min}$  和  $G^{\max}$  分别为系统天然气输入端口的最小输入功率和最大输入功率;  $P^{\min}$  和  $P^{\max}$  分别为系统电能输入端口的最小输入功率和最大输入功率;

弃风量和弃光量的约束:

$$P_{WT,k}^t + P_{WTc,k}^t = P_{WT,k}^{t,\max}$$

$$0 \leq P_{WT,k}^t \leq P_{WT,k}^{t,\max}$$

$$P_{PV,k}^t + P_{PVc,k}^t = P_{PV,k}^{t,\max}$$

$$0 \leq P_{PV,k}^t \leq P_{PV,k}^{t,\max}$$

式中,  $P_{WT,k}^{t,\max}$  为第k台风机t时刻的最大输出功率;  $P_{PV,k}^{t,\max}$  为第k台光伏板t时刻的最大输出功率;

为了使供热管网更加经济可靠地运行,需要限制供、回水管道的出入口温度:

$$T_{sp}^{\min} \leq T_{in,s}^t \leq T_{sp}^{\max}$$

$$T_{sp}^{\min} \leq T_{out,s}^t \leq T_{sp}^{\max}$$

$$T_{rp}^{\min} \leq T_{in,r}^t \leq T_{rp}^{\max}$$

$$T_{rp}^{\min} \leq T_{out,r}^t \leq T_{rp}^{\max}$$

式中,  $T_{sp}^{\min}$  和  $T_{sp}^{\max}$  分别为热网供水管道水的最小温度和最大温度;  $T_{rp}^{\min}$  和  $T_{rp}^{\max}$  分别为热网回水管道水的最小温度和最大温度。

6. 根据权利要求5所述的一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,其特征在于, S4步骤的具体实现如下:

采用序贯蒙特卡罗模拟法进行多微能源网系统可靠性评估,并结合最有切负荷模型,计及热动态特性和微能源网间能量交互因素对系统运行年度可靠性指标进行计算;

具体还包括如下步骤:

S401、输入微能源网基础数据,包括:微能源网拓扑结构、能量转换装置和存储装置参数、负荷曲线、外部环境温度参数,并初始化微能源网各元件的状态;

S402、使用序贯蒙特卡罗法模拟抽样得到研究周期(Y)内每小时的微能源网内能量转换和存储装置的状态持续时间,得到每小时的系统状态;

S403、初始化区块计数( $d=1$ )和模拟年数( $y=1$ );

S404、根据风机和光伏电池的状态计算此区块内的可再生能源出力,并根据微能源网间能量交互的状态设定微能源网交互能力;

S405、更新最优切负荷模型,并求解第d天的微能源网协调优化问题,得到第d天每小时的负荷削减状态和最优负荷削减量;

S406、若模拟区块计数达到一年( $d=365$ ),转向步骤S406;否则,令 $d=d+1$ ,转向步骤S404;

S407、计算该年的微能源网可靠性指标,并令 $y=y+1$ ;

S408、若模拟年数到达上限( $y>Y$ )或微能源网EENS指标的方差系数达到精度要求( $\epsilon < \epsilon_0$ ),转向步骤S408;否则,令 $d=1$ ,转向步骤S404;

S409、计算微能源网的可靠性指标,包括负荷削减频率、负荷削减概率和能量供应不足期望值。



## 一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于多微能源网技术领域,具体涉及一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法。

### 背景技术

[0002] 微能源网是集电、热和天然气等多种能源的产生、传输、转换、存储和消耗于一体的能源产供销一体化系统。在能源存储过程中,储能装置可以调整能量转换装置的处理水平,实现能量不同时间段的转移,提升微能源网的经济性、灵活性和可靠性。在能源传输过程中,不同能源网络具有不同的时间动态特性。其中,电网潮流响应速度最快,几秒钟就可以达到准稳态,气网潮流可以在几分钟内达到准稳态,而热网潮流速度最慢,需要几小时才能达到准稳态。由此可见,对于微能源网的长期可靠性评估来讲,电网和气网的动态特性影响较小,热网动态特性对系统可靠性会产生较大影响。此外,在热能消耗过程中,相比于热网传输的动态特性,热负荷具有更明显的惯性。因此,在微能源网可靠性评估中考虑多能存储和热动态特性的影响至关重要。

[0003] 在单个微能源网发生故障导致供能不足时,多微能源网可以通过能量交互,从供给源和负荷需求两方面进行调整,以降低系统故障带来的影响。在供给源方面,考虑微能源网间的能量交互,增加了微能源网的能源供应来源,在提高系统的可再生能源利用率和经济性的同时,缓解因主网故障而导致微能源网供能不足的压力。在负荷需求方面,引导用户参与综合需求响应,调整负荷需求,共同维持系统的供需平衡。

[0004] 目前现有技术中未考虑热动态特性和微能源网间能量交互等因素对多微能源网系统可靠性的影响,从而导致现有评估方法准确性较低,参考价值有限。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是:旨在提供一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,用于解决现有可靠性评估方法准确性低,不能真实反映多微能源网系统对故障变化情况的问题。

[0006] 为实现上述技术目的,本发明采用的技术方案如下:

[0007] 一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,包括如下步骤:

[0008] S1、计及微能源网间多种能量之间的功率交互,基于能源集线器构建多微能源网系统;

[0009] S2、利用节点法建立供热管网模型,并依照热负荷特性将热负荷分为常年性热负荷和季节性热负荷,建立热负荷动态特性模型;

[0010] S3、考虑供热管网的传输延迟和温度损耗以及季节性热负荷的惯性,考虑各微能源网之间的电能和天然气能量交互及其对系统运行工况的影响,建立计及热动态特性的多微能源网最优切负荷模型;

[0011] S4、采用序贯蒙特卡洛模拟法评估多微能源网系统的可靠性,计算该多微能源网

系统的年度可靠性指标。

[0012] 微能源网是微电网和综合能源系统的有机结合体,本质是含有分布式能源(包括风机和光伏发电、CHP机组发电产热、P2G装置产气等)的微型综合能源系统。本发明基于能源集线器设计微能源网,并将多个微能源网集合形成多微能源网系统。多微能源网可实现微能源网和主网之间以及各微能源网之间的能量交互。对可再生能源发电充足的微能源网,其可以合理调度微能源网内各设备的出力以及同主网和其它微能源网间的能量交互,在保证可再生能源最大消纳的同时,使得微能源网的经济性最高。对于可再生能源发电稀缺的微能源网,其也可以合理调度微能源网内各设备的出力以及选择从主网和其它微能源网的购能配比,降低微能源网的经济成本。

[0013] 进一步,S1步骤中所述微能源网由输入侧、分布式发电装置、能量转换装置、储能装置和输出侧构成;

[0014] 微能源网间可自由进行电和天然气能源的交互,不能进行热能的交互,微能源网之间电能和天然气的功率交互受到输电线路或输气管道的额定流量的限制,其约束条件如下:

$$[0015] \quad P_{m,n}^{\min} \leq P_{m,n}^t \leq P_{m,n}^{\max}$$

$$[0016] \quad G_{m,n}^{\min} \leq G_{m,n}^t \leq G_{m,n}^{\max}$$

[0017] 式中,  $P_{m,n}^t$  为第m个微能源网向第n个微能源网输送的电功率;  $G_{m,n}^t$  为第m个微能源网向第n个微能源网输送天然气功率;  $P_{m,n}^{\min}$  和  $P_{m,n}^{\max}$  分别为第m个微能源网向第n个微能源网输送的最小和最大电功率;  $G_{m,n}^{\min}$  和  $G_{m,n}^{\max}$  分别为第m个微能源网向第n个微能源网输送的最小和最大天然气功率。

[0018] 在微能源网中,热动态特性主要体现在热网动态特性和热负荷动态特性两方面,两者均具有较大的惯性。当系统状态发生变化时,由于供热管网和热需求响应速度较慢,导致微源的影响并不会立即对用户供能起作用,负荷的波动也不会即刻引起微源的响应。因此,热动态特性对微能源网的运行和可靠性均会产生影响。

[0019] 热网的动态特性主要体现在热水的传输延时和温度损耗中。在集中供热系统中,由于热源一般距离热用户较远,导致热水在经过一段时间后才能供给用户,产生时间延迟;与此同时,热水在管道传输过程中,会与外部环境通过管壁进行热交换,产生热量损失,导致管道热水的流出温度小于流入温度。

[0020] 节点法考虑管道由入口和出口两个节点组成的管道流量,并为其分配工质流量和温度。通过考虑从一个节点到另一个节点水流时间和流速的变化,以入口节点的温度和工质流量来估计管道的出口温度。 $t$ 时刻内流出管道的热水平均温度由 $t-\gamma$ 时刻到 $t-\lambda$ 时刻内流入管道的水温温度融合而成,与此时间段内的热水温度和工质流量有关。

[0021] 进一步,S2步骤中供热管网模型建立如下:

[0022] 采用管道热平衡节点法和苏霍夫温降模型进行建模,建模如下:

$$[0023] \quad m_p^t \Delta t T_{p,outs}^t = \left( \sum_{l=t-\lambda_p^t}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p \right) T_{p,ins}^{t-\lambda_p^t} + \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^{t-\lambda_p^t-1} m_p^l \Delta t T_{p,ins}^l + \left( m_p^t \Delta t + \rho A_p L_p - \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^t m_p^l \Delta t \right) T_{p,ins}^{t-\gamma_p^t}$$

$$[0024] \quad m_p^t \Delta t T_{p,outr}^t = \left( \sum_{l=t-\lambda_p^t}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p \right) T_{p,inr}^{t-\lambda_p^t} + \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^{t-\lambda_p^t-1} m_p^l \Delta t T_{p,inr}^l + \left( m_p^t \Delta t + \rho A_p L_p - \sum_{l=t-\gamma_p^t+1}^t m_p^l \Delta t \right) T_{p,inr}^{t-\gamma_p^t}$$

[0025] 其中,  $\gamma_p^t$  和  $\lambda_p^t$  为热水从流进管道至流出管道的时间间隔数, 可用下式表达:

$$[0026] \quad \lambda_p^t = \min_{n \in \mathbb{N}} \left\{ n : s.t. \sum_{l=t-n}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p \geq 0 \right\}$$

$$[0027] \quad \gamma_p^t = \min_{n \in \mathbb{N}} \left\{ n : s.t. \sum_{l=t-n}^t m_p^l \Delta t - \rho A_p L_p - m_p^t \Delta t \geq 0 \right\}$$

[0028] 式中,  $\rho$  为水的密度;  $A_p$  和  $L_p$  分别为管道  $p$  的横截面积和长度;  $m_p^t$  为管道  $p$  在  $t$  时刻的工质流量;  $T_{p,outs}^t$  和  $T_{p,ins}^t$  分别为供水管道  $p$  在  $t$  时刻的进水温度和出水温度;  $T_{p,outr}^t$  和  $T_{p,inr}^t$  分别为回水管道  $t$  时刻的进水温度和出水温度;

[0029] 在传输过程中, 热水与管壁进行热交换, 产生温损, 计及温损后, 输出温度为:

$$[0030] \quad T_{outs}^t = T_a^t + J(T_{outs}^t - T_a^t)$$

$$[0031] \quad T_{outr}^t = T_a^t + J(T_{outr}^t - T_a^t)$$

$$[0032] \quad J = \exp\left(-\frac{\zeta \Delta t}{A \rho c}(\lambda + 0.5)\right)$$

[0033] 式中,  $T_{outs}^t$  和  $T_{outr}^t$  分别为供水管道和回水管道计及温损后  $t$  时刻的出水温度; 为管道外部环境温度;  $J$  为热水流经管道的温损系数;  $\zeta$  为管道的导热系数;  $c$  为水的比热容。

[0034] 进一步, S2 步骤中热负荷动态特性模型建立如下:

[0035] 季节性热负荷主要指采暖、通风、空气调节系统的热负荷, 其与室外温度息息相关, 其全年变化幅度较大, 日内波动较小, 采用建筑热负荷模型进行建模:

$$[0036] \quad T_{in}^{t+1} = T_{in}^t \cdot e^{-\Delta t / RC} + (R \cdot L_{sh}^t + T_{out}^t)(1 - e^{-\Delta t / RC})$$

[0037] 根据上式易得到:

$$[0038] \quad L_{sh}^t = \frac{1}{R} \left( \frac{T_{in}^{t+1} - T_{in}^t \cdot e^{-\Delta t / RC}}{1 - e^{-\Delta t / RC}} - T_{out}^t \right)$$

[0039] 式中,  $L_{sh}^t$  为热网在  $t$  时刻向用户季节性热负荷提供的热功率;  $T_{in}^t$  为用户在  $t$  时刻的室内温度;  $T_{out}^t$  为  $t$  时刻的室外温度;  $R$  为建筑物的热阻;  $C$  为室内空气热容。

[0040] 进一步,S3步骤中计及热动态特性的多微能源网最优切负荷模型建立如下:

[0041] 根据计及微能源网与主网、微能源网与微能源网间的能量交互和热动态特性,建立多微能源网的最优负荷削减模型;

[0042] 在最优负荷削减模型中,考虑能量交互、需求响应和负荷削减,以微能源网的能量交互成本、弃风弃光惩罚成本和负荷削减惩罚成本之和最小为该模型的目标函数:

$$[0043] \quad C = \min \left[ \sum_{n=1}^N (C_{\text{epc},n} + C_{\text{gpc},n} + C_{\text{mepc},n} + C_{\text{mgpc},n} + C_{\text{rcc},n} + C_{\text{lcc},n}) \right]$$

[0044] 式中,N为多微能源网中的微能源网数量; $C_{\text{epc},n}$ 和 $C_{\text{gpc},n}$ 分别为第n个微能源网与主网电能和天然气的交互成本; $C_{\text{mepc},n}$ 和 $C_{\text{mgpc},n}$ 分别为第n个微能源网与其它微能源网电能和天然气的交互成本; $C_{\text{rcc},n}$ 为第n个微能源网的弃风弃光惩罚成本; $C_{\text{lcc},n}$ 分别为第n个微能源网的负荷削减惩罚成本;

$$[0045] \quad C_{\text{epc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{epc}}^t P_n^t \Delta t$$

$$[0046] \quad C_{\text{gpc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{gpc}}^t G_n^t \Delta t$$

$$[0047] \quad C_{\text{mepc},n} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^N p_{\text{mepc}}^t P_{m,n}^t \Delta t$$

$$[0048] \quad C_{\text{mgpc},n} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^N p_{\text{mgpc}}^t G_{m,n}^t \Delta t$$

$$[0049] \quad C_{\text{rcc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{rcc}}^t (P_{\text{WTc},k,n}^t + P_{\text{PVC},k,n}^t) \Delta t$$

$$[0050] \quad C_{\text{lcc},n} = \sum_{t=1}^T p_{\text{elcc}}^t L_{\text{ec},n}^t \Delta t + \sum_{t=1}^T p_{\text{yhlcc}}^t L_{\text{yhc},n}^t \Delta t + \sum_{t=1}^T p_{\text{shlcc}}^t L_{\text{shc},n}^t \Delta t$$

[0051] 式中, $p_{\text{mepc}}^t$ 为微能源网间t时刻的电能交互价格; $p_{\text{mgpc}}^t$ 为微能源网间t时刻的天然气的交互价格; $L_{\text{ec},n}^t$ 、 $L_{\text{yhc},n}^t$ 和 $L_{\text{shc},n}^t$ 分别为第n个微能源网的电负荷削减量、常年性热负荷削减量和季节性热负荷削减量;

[0052] 约束条件包含如下:

[0053] 电功率平衡约束

$$[0054] \quad P^t = \sum_{k=1}^{K_{\text{tr}}} P_{\text{tr},k}^t$$

$$[0055] \quad \sum_{k=1}^{K_{\text{WT}}} P_{\text{WT},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{PV}}} P_{\text{PV},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{tr}}} P_{\text{trO},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{chp}}} P_{\text{chp},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{es}}} P_{\text{edis},k}^t + \sum_{m=1}^N P_m^t = L_{\text{e}}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{eb}}} P_{\text{eb},k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{p2g}}} P_{\text{p2g},k}^t$$

[0056] 式中, $L_{\text{e}}^t$ 为系统电输出端口t时刻的输出功率; $P_{\text{WT},k}^t$ 为第k台风机t时刻的输出功率; $P_{\text{PV},k}^t$ 为第k台光伏板t时刻的输出功率; $P_{\text{edis},k}^t$ 为第k台电储能装置t时刻与微能源网的净交换功率; $K_{\text{tr}}$ 、 $K_{\text{chp}}$ 、 $K_{\text{es}}$ 、 $K_{\text{eb}}$ 和 $K_{\text{p2g}}$ 分别为变压器、CHP机组、电储能、电锅炉和P2G装置的数量;

[0057] 天然气功率平衡约束

$$[0058] \quad G^t = \sum_{k=1}^{K_{cp}} G_{cpI,k}^t$$

$$[0059] \quad \sum_{k=1}^{K_{cp}} G_{cpO,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{p2g}} G_{p2g,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{gs}} G_{gdis,k}^t + \sum_{m=1}^N G_m^t = \sum_{k=1}^{K_{chp}} G_{chp,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{ab}} G_{ab,k}^t$$

[0060] 式中,  $G_{gdis,k}^t$  为第k台气储能装置t时刻与微能源网的净交换功率;  $K_{cp}$ 、 $K_{gs}$ 和 $K_{ab}$ 分别为压缩机、气储能和燃气锅炉的数量;

[0061] 热功率平衡约束

$$[0062] \quad \sum_{k=1}^{K_{ab}} H_{ab,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{chp}} H_{chp,k}^t = c_w m (T_{ins}^t - T_{out}^t)$$

$$[0063] \quad c_w m (T_{outs}^t - T_{inr}^t) + \sum_{k=1}^{K_{eb}} H_{eb,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{hs}} H_{hdis,k}^t = L_{sh}^t + L_{yh}^t$$

[0064] 式中,  $L_h^t$  为系统热输出端口t时刻的输出功率;  $H_{hdis,k}^t$  为第k台热储能装置t时刻与微能源网的净交换功率;  $K_{hs}$  为热储能数量,  $c_w$  为水的比热容;  $L_{yh}^t$  为微能源网t时刻向用户常年性热负荷提供的热功率;

[0065] 需求侧功率平衡约束

[0066] 在设备故障导致负荷削减后,微能源网提供的能量不足以满足负荷需求,需在需求侧增设负荷削减的决策变量;

[0067] 对于电负荷和常年性热负荷,需求侧功率平衡中需增设负荷削减变量,以及负荷削减量的限制约束:

$$[0068] \quad L_e^t + L_{ec}^t = L_{D,e}^t$$

$$[0069] \quad L_{yh}^t + L_{yhc}^t = L_{D,yh}^t$$

$$[0070] \quad 0 \leq L_e^t \leq L_{D,e}^t$$

$$[0071] \quad 0 \leq L_{ec}^t \leq L_{D,e}^t$$

$$[0072] \quad 0 \leq L_{yh}^t \leq L_{D,yh}^t$$

$$[0073] \quad 0 \leq L_{yhc}^t \leq L_{D,yh}^t$$

[0074] 式中,  $L_{D,e}^t$  为系统t时刻的电负荷需求量;  $L_{D,yh}^t$  为系统t时刻的常年性热负荷需求量;

[0075] 季节性热负荷削减是由于热网向用户提供的热功率致使室内温度超出适宜温度区间引起的,其削减量等于热网向用户提供的理论热功率和实际热功率之差的绝对值:

$$[0076] \quad L_{shc}^t = \begin{cases} 0, & T_{com,min} \leq T_{in}^t \leq T_{com,max} \\ |L_{shr}^t - L_{sh}^t|, & T_{in}^t < T_{com,min}, T_{in}^t > T_{com,max} \end{cases}$$

[0077] 式中,  $T_{com,min}$  和  $T_{com,max}$  分别为微能源网室内最小适宜温度和最大适宜温度;  $L_{shr}^t$  为热网向用户t时刻提供的理论热功率;理论热功率是指从现有温度调整到适宜温度区间内

温度所需的最小热功率；

$$[0078] \quad L_{\text{shr}}^t = \begin{cases} \frac{1}{R} \left( \frac{T_{\text{com,min}} - T_{\text{in}}^t \cdot e^{-\Delta t/RC}}{1 - e^{-\Delta t/RC}} - T_{\text{out}}^t \right), & T_{\text{in}}^t < T_{\text{com,min}} \\ \frac{1}{R} \left( \frac{T_{\text{com,max}} - T_{\text{in}}^t \cdot e^{-\Delta t/RC}}{1 - e^{-\Delta t/RC}} - T_{\text{out}}^t \right), & T_{\text{in}}^t > T_{\text{com,max}} \end{cases}$$

[0079] 易可推导出,季节性热负荷削减量为:

$$[0080] \quad L_{\text{shc}}^t = \begin{cases} \frac{1}{R} \left( \frac{T_{\text{com,min}} - T_{\text{in}}^t}{1 - e^{-\Delta t/RC}} \right), & T_{\text{in}}^t < T_{\text{com,min}} \\ 0, & T_{\text{com,min}} \leq T_{\text{in}}^t \leq T_{\text{com,max}} \\ \frac{1}{R} \left( \frac{T_{\text{in}}^t - T_{\text{com,max}}}{1 - e^{-\Delta t/RC}} \right), & T_{\text{in}}^t > T_{\text{com,max}} \end{cases}$$

[0081] 能量转换设备出力约束

[0082] 最优负荷削减模型中,需考虑能量转换装置的运行状态及其出力能力,故在模型中增设一组二进制变量,用于表示能量转换装置的运行状态,0表示元件故障,1表示元件运行;

$$[0083] \quad P_{\text{chp},k}^{\min} \xi_{\text{chp},k}^t \leq P_{\text{chp},k}^t \leq P_{\text{chp},k}^{\max} \xi_{\text{chp},k}^t$$

$$[0084] \quad H_{\text{chp},k}^{\min} \xi_{\text{chp},k}^t \leq H_{\text{chp},k}^t \leq H_{\text{chp},k}^{\max} \xi_{\text{chp},k}^t$$

$$[0085] \quad H_{\text{ab},k}^{\min} \xi_{\text{ab},k}^t \leq H_{\text{ab},k}^t \leq H_{\text{ab},k}^{\max} \xi_{\text{ab},k}^t$$

$$[0086] \quad H_{\text{eb},k}^{\min} \xi_{\text{eb},k}^t \leq H_{\text{eb},k}^t \leq H_{\text{eb},k}^{\max} \xi_{\text{eb},k}^t$$

$$[0087] \quad G_{\text{p2g},k}^{\min} \xi_{\text{p2g},k}^t \leq G_{\text{p2g},k}^t \leq G_{\text{p2g},k}^{\max} \xi_{\text{p2g},k}^t$$

$$[0088] \quad P_{\text{trO},k}^{\min} \xi_{\text{tr},k}^t \leq P_{\text{trO},k}^t \leq P_{\text{trO},k}^{\max} \xi_{\text{tr},k}^t$$

$$[0089] \quad G_{\text{cpO},k}^{\min} \xi_{\text{cp},k}^t \leq G_{\text{cpO},k}^t \leq G_{\text{cpO},k}^{\max} \xi_{\text{cp},k}^t$$

$$[0090] \quad 0 \leq P_{\text{WT},k}^t \leq P_{\text{WT},k}^{\max} \xi_{\text{WT},k}^t$$

$$[0091] \quad 0 \leq P_{\text{PV},k}^t \leq P_{\text{PV},k}^{\max} \xi_{\text{PV},k}^t$$

[0092] 式中,  $\xi_{\text{chp},k}^t$ 、 $\xi_{\text{ab},k}^t$ 、 $\xi_{\text{eb},k}^t$ 、 $\xi_{\text{p2g},k}^t$ 、 $\xi_{\text{tr},k}^t$ 、 $\xi_{\text{cp},k}^t$ 、 $\xi_{\text{WT},k}^t$  和  $\xi_{\text{PV},k}^t$  分别为第k个CHP机组、燃气锅炉、电锅炉、P2G装置、变压器、压缩机、风机和光伏板t时刻的元件运行状态;

[0093] 储能设备出力约束

$$[0094] \quad \begin{cases} P_{\text{dis},k}^t = P_{\text{O},k}^t - P_{\text{I},k}^t \\ E_k^{t+1} = (1 - \gamma_k) E_k^t + (\eta_{\text{c},k} P_{\text{I},k}^t \Delta t - P_{\text{O},k}^t \Delta t / \eta_{\text{d},k}) \\ 0 \leq P_{\text{O},k}^t \leq P_{\text{O},k}^{\max} \alpha_k^t \\ 0 \leq P_{\text{I},k}^t \leq P_{\text{I},k}^{\max} \beta_k^t \\ 0 \leq \alpha_k^t + \beta_k^t \leq 1 \\ E_k^{\min} \leq E_k^t \leq E_k^{\max} \end{cases}$$

[0095] 式中,  $P_{\text{dis},k}^t$  为第k台储能装置t时刻对微能源网的净能源交换功率;  $P_{\text{I},k}^t$  和  $P_{\text{O},k}^t$  分别为第k台储能装置t时刻的充能和放能功率;  $E_k^t$  为第k台储能装置t时刻的存储能量;  $\gamma_k$  为第k台储能装置的能量自损率;  $\eta_{\text{c},k}$  和  $\eta_{\text{d},k}$  为第k台储能装置的能量充放效率;  $P_{\text{I},k}^{\text{max}}$  和  $P_{\text{O},k}^{\text{max}}$  为第k台储能装置的最大充放功率限制;  $E_k^{\text{min}}$  和  $E_k^{\text{max}}$  分别为储能装置的最大和最小容量限制;  $\alpha_k^t$  和  $\beta_k^t$  分别为储能装置充放状态, 0表示不进行能量充放, 1表示能量充放;

$$[0096] \quad \alpha_{\text{es},k}^t \leq \xi_{\text{es},k}^t$$

$$[0097] \quad \beta_{\text{es},k}^t \leq \xi_{\text{es},k}^t$$

$$[0098] \quad \alpha_{\text{hs},k}^t \leq \xi_{\text{hs},k}^t$$

$$[0099] \quad \beta_{\text{hs},k}^t \leq \xi_{\text{hs},k}^t$$

$$[0100] \quad \alpha_{\text{gs},k}^t \leq \xi_{\text{gs},k}^t$$

$$[0101] \quad \beta_{\text{gs},k}^t \leq \xi_{\text{gs},k}^t$$

[0102] 式中,  $\xi_{\text{es},k}^t$ 、 $\xi_{\text{hs},k}^t$  和  $\xi_{\text{gs},k}^t$  分别为第k个电储能、热储能和天然气储能装置t时刻的元件运行状态;

[0103] 系统运行约束

[0104] 微能源网与主网和天然气网进行能量交互的功率约束:

$$[0105] \quad G^{\text{min}} \leq G^t \leq G^{\text{max}}$$

$$[0106] \quad p^{\text{min}} \leq p^t \leq p^{\text{max}}$$

[0107] 式中,  $G^{\text{min}}$  和  $G^{\text{max}}$  分别为系统天然气输入端口的最小输入功率和最大输入功率;  $p^{\text{min}}$  和  $p^{\text{max}}$  分别为系统电能输入端口的最小输入功率和最大输入功率;

[0108] 弃风量和弃光量的约束:

$$[0109] \quad P_{\text{WT},k}^t + P_{\text{WTc},k}^t = P_{\text{WT},k}^{t,\text{max}}$$

$$[0110] \quad 0 \leq P_{\text{WT},k}^t \leq P_{\text{WT},k}^{t,\text{max}}$$

$$[0111] \quad P_{\text{PV},k}^t + P_{\text{PVc},k}^t = P_{\text{PV},k}^{t,\text{max}}$$

$$[0112] \quad 0 \leq P_{\text{PV},k}^t \leq P_{\text{PV},k}^{t,\text{max}}$$

[0113] 式中,  $P_{\text{WT},k}^{t,\text{max}}$  为第k台风机t时刻的最大输出功率;  $P_{\text{PV},k}^{t,\text{max}}$  为第k台光伏板t时刻的最大输出功率;

[0114] 为了使供热管网更加经济可靠地运行, 需要限制供、回水管道的出入口温度:

$$[0115] \quad T_{\text{sp}}^{\text{min}} \leq T_{\text{in},s}^t \leq T_{\text{sp}}^{\text{max}}$$

$$[0116] \quad T_{\text{sp}}^{\text{min}} \leq T_{\text{out},s}^t \leq T_{\text{sp}}^{\text{max}}$$

$$[0117] \quad T_{\text{rp}}^{\text{min}} \leq T_{\text{in},r}^t \leq T_{\text{rp}}^{\text{max}}$$

$$[0118] \quad T_{\text{rp}}^{\text{min}} \leq T_{\text{out},r}^t \leq T_{\text{rp}}^{\text{max}}$$

[0119] 式中,  $T_{\text{sp}}^{\text{min}}$  和  $T_{\text{sp}}^{\text{max}}$  分别为热网供水管道水的最小温度和最大温度;  $T_{\text{rp}}^{\text{min}}$  和  $T_{\text{rp}}^{\text{max}}$  分别

为热网回水管道水的最小温度和最大温度。

[0120] 进一步,S4步骤的具体实现如下:

[0121] 采用序贯蒙特卡罗模拟法进行多微能源网系统可靠性评估,并结合最有切负荷模型,计及热动态特性和微能源网间能量交互因素对系统运行年度可靠性指标进行计算;

[0122] 具体还包括如下步骤:

[0123] S401、输入微能源网基础数据,包括:微能源网拓扑结构、能量转换装置和存储装置参数、负荷曲线、外部环境温度参数,并初始化微能源网各元件的状态;

[0124] S402、使用序贯蒙特卡罗法模拟抽样得到研究周期(Y)内每小时的微能源网内能量转换和存储装置的状态持续时间,得到每小时的系统状态;

[0125] S403、初始化区块计数( $d=1$ )和模拟年数( $y=1$ );

[0126] S404、根据风机和光伏电池的状态计算此区块内的可再生能源出力,并根据微能源网间能量交互的状态设定微能源网交互能力;

[0127] S405、更新最优切负荷模型,并求解第d天的微能源网协调优化问题,得到第d天每小时的负荷削减状态和最优负荷削减量;

[0128] S406、若模拟区块计数达到一年( $d=365$ ),转向步骤S406;否则,令 $d=d+1$ ,转向步骤S404;

[0129] S407、计算该年的微能源网可靠性指标,并令 $y=y+1$ ;

[0130] S408、若模拟年数到达上限( $y>Y$ )或微能源网EENS指标的方差系数达到精度要求( $\varepsilon<\varepsilon_0$ ),转向步骤S408;否则,令 $d=1$ ,转向步骤S404;

[0131] S409、计算微能源网的可靠性指标,包括负荷削减频率、负荷削减概率和能量供应不足期望值。

[0132] 采用上述技术方案的发明,具有如下优点:

[0133] 1.本发明充分考虑了热动态特性和微能源网间能量交互等因素对多微能源网系统可靠性的影响,更加准确地反映出系统应对故障的真实变化情况,从而得到更加真实的可靠性结果;

[0134] 2.本发明计及热网的动态特性和热负荷的惯性显著提高多微能源网系统的可靠性;

[0135] 3.本发明通过微能源网间能量交互为微能源网的能源供应提供非单一选择,使得多微能源网的可靠性得到明显改善。

## 附图说明

[0136] 本发明可以通过附图给出的非限定性实施例进一步说明;

[0137] 图1为多微能源网模型;

[0138] 图2各微能源网的风电、光伏出力和电、热负荷曲线;

[0139] 图3微能源网的电价和气价;

[0140] 图4为热网动态特性的可靠性影响分析;

[0141] 图5为热负荷动态特性的可靠性影响分析;

[0142] 图6综合能源系统可靠性评估流程图。



## 具体实施方式

[0143] 以下将结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明,需要说明的是,在附图或说明书描述中,相似或相同的部分都使用相同的图号,附图中未绘示或描述的实现方式,为所属技术领域中普通技术人员所知的形式。另外,实施例中提到的方向用语,例如“上”、“下”、“顶”、“底”、“左”、“右”、“前”、“后”等,仅是参考附图的方向,并非用来限制本发明的保护范围。

[0144] 一种计及热动态特性的多微能源网系统可靠性评估方法,包括如下步骤:

[0145] S1、计及微能源网间多种能量之间的功率交互,基于能源集线器构建多微能源网系统;

[0146] S2、利用节点法建立供热管网模型,并依照热负荷特性将热负荷分为常年性热负荷和季节性热负荷,建立热负荷动态特性模型;

[0147] S3、考虑供热管网的传输延迟和温度损耗以及季节性热负荷的惯性,考虑各微能源网之间的电能和天然气能量交互及其对系统运行工况的影响,建立计及热动态特性的多微能源网最优切负荷模型;

[0148] S4、采用序贯蒙特卡洛模拟法评估多微能源网系统的可靠性,计算该多微能源网系统的年度可靠性指标。

[0149] 微能源网参数设定

[0150] 微能源网由输入侧(电网、天然气网)、分布式发电装置(风机和光伏)、能量转换装置(变压器、压缩机、P2G装置、CHP机组、燃气锅炉和电锅炉)、储能装置(储热、储电和储气装置)和输出侧(电负荷和热负荷)构成。

[0151] 如图1所示。其元件参数均根据负荷需求设定,具体参数详见表1和表2。三个微能源网典型日的风电、光伏出力和电、热负荷曲线如图2所示。图3给出了微能源网从主网购买电能和天然气的价格。

[0152] 表1各微能源网能量转换装置的相关参数

微能源网	能量转换装置	数量	最大输入功	能量转换效率(%)			
			率 (MW)	产电	产气	产热	
[0153]	MEG1	变压器	1	0.3	0.98	0	0
		CHP 机组	2	1	0.3	0	0.4
		燃气锅炉	1	0.6	0	0	0.9
		电锅炉	1	0.5	0	0	0.8
		压缩机	2	1.5	0	0.96	0
		P2G 装置	1	0.7	0	0.7	0
	MEG2	变压器	2	1	0.98	0	0
		CHP 机组	3	1	0.35	0	0.45
		燃气锅炉	1	1	0	0	0.9
		电锅炉	1	0.5	0	0	0.8

[0154]	MEG3	压缩机	2	2.5	0	0.96	0
		变压器	1	0.5	0.98	0	0
		CHP 机组	2	1	0.3	0	0.4
		燃气锅炉	1	0.8	0	0	0.9
		电锅炉	1	0.3	0	0	0.9
		压缩机	2	2	0	0.96	0
		P2G 装置	1	0.5	0	0.7	0

[0155] 表2各微能源网储能装置的相关参数

	微能 源网	储能 装置	最大放 电功率 (MW)	最大充 电功率 (MW)	最大容 量 (MWh)	最小容 量 (MWh)	充放效 率(%)	自损系 数(%)
[0156]	MEG1	电储 能	0.4	0.4	1.6	0.1	95	5
		气储 能	0.6	0.6	3	0.2	92	8
		热储 能	0.25	0.25	1	0.05	90	10
	MEG2	电储 能	0.4	0.4	2	0.1	95	5
		气储 能	1	1	5	0.5	92	8
		热储 能	0.4	0.4	2	0.1	90	10
	MEG3	电储 能	0.3	0.3	1.8	0.1	95	5
		气储 能	1	1	4	0.5	92	8
		热储 能	0.3	0.3	1.5	0.1	90	10

[0157] 以需求较大的单个微能源网为例,设置4个实施例分析热动态特性对微能源网可靠性和经济性的影响,如表3所示。

[0158] 表3微能源网可靠性评估研究实施例

	实施例	热网特性	热负荷特性
[0159]	1	×	×
	2	√	×
	3	×	√
[0160]	4	√	√

[0161] 表4给出了每个实施例微能源网的年度可靠性指标,并以实施例1为参考,分析不同储能和热动态特性对微能源网可靠性的影响。

[0162] 表4不同实施例的微能源网可靠性指标

	实施例	负荷	PLC (%)	FLC (次)	EENS (MWh)
[0163]	实施例 1	电负荷	5.52	17.84	9.51
		热负荷	8.11	18.55	13.90
	实施例 2	电负荷	4.81	15.69	7.86
		热负荷	2.53	2.71	6.69
	实施例 3	电负荷	5.35	17.42	9.01
		热负荷	3.45	6.29	7.24
	实施例 4	电负荷	4.76	14.87	7.33
		热负荷	1.42	1.33	4.09

[0164] 从表4可以看出:实施例2考虑热网特性,即供热管网的管储和延时特性。在故障发生后,通过调整CHP机组和燃气锅炉的出力和供水管道和回水管道的温度,使负荷需求削减得到短时间内的缓解,其特性与热储能相似,对电负荷可靠性的影响较小,电和热负荷削减量分别降低1.65MWh和7.21MWh,降幅达17.32%和51.82%。

[0165] 实施例3考虑热负荷特性,通过对室内温度的调节,改变了各时刻的热负荷需求,系统可以通过温度调度提前应对系统故障,将热负荷损失量降至最低,但由于系统中不存在热转电装置,所以热负荷特性对热负荷可靠性的提升率高达47.89%,对电负荷的提升率仅有5.28%。

[0166] 由实施例4的结果可知:综合考虑热网的管储、延时特性和热负荷的温度可调特性,微能源网的可靠性可得到显著改善,电和热负荷的可靠性提升率分别达到22.89%和70.54%。

[0167] 然后,以多微能源网为例,设置4个实施例分析各类能量交互对多微能源网可靠性的影响,如表5所示。

[0168] 表5多微能源网可靠性评估研究场景

	实施例	电能功率交互	天然气功率交互
[0169]	1	×	×
	2	√	×
	3	×	√
	4	√	√

[0170] 表6给出了每个实施例下的多微能源网的年度可靠性指标,并以实施例1为参考,分析不同能量交互对多微能源网可靠性的影响。

[0171] 表6不同实施例下多微能源网MMEG1的可靠性指标

	实施例	负荷	表6不同实施例下多微能源网MMEG1的可靠性指标		
			PLC (%)	FLC (次)	EENS (MWh)
[0172]	实施例 1	电负荷	3.12	9.82	5.53
		热负荷	4.78	6.82	8.99
	实施例 2	电负荷	1.29	4.34	2.21
		热负荷	4.47	5.83	8.16
	实施例 3	电负荷	2.78	9.07	4.99
		热负荷	3.97	4.74	7.61
	实施例 4	电负荷	1.10	3.77	1.78
		热负荷	3.83	4.60	7.14

[0173] 实施例2和3分别考虑微能源网间电能和天然气的功率交互,多微能源网的负荷削减概率、频率和能量均得到降低。①电能功率交互与电负荷直接相连,为电负荷的供应源增加另一种选择,可有效降低风机、光伏电池和与主网相连的变压器故障给系统带来的影响,使电负荷的可靠性得到明显改善,负荷削减概率、频率和能量均降低60%以上。此外,可以通过电锅炉间接供应热负荷,或通过P2G装置转换成天然气增加CHP机组和燃气锅炉的供应,提高热源出力,但是由于能量转换装置输出功率有限,故其对热负荷可靠性的提升只有9.27%。②天然气功率交互为微能源网增加另一种气源,可应对压缩机故障引起的天然气供应不足,其作用和气储能相似,但可持续为微能源网天然气,由于微能源网中存在气转电和气转热的能量转换装置,因此可改善电负荷和热负荷的可靠性,但是天然气作为热源的主要消耗能源,其故障对热负荷的可靠性影响较大,电负荷的负荷削减频率、概率和能量分别降低11.02%、7.63%和9.87%,热负荷的负荷削减频率、概率和能量分别降低16.94%、30.42%和15.32%。

[0174] 实施例4同时计及了微能源网间电能和天然气的功率交互,由表4、2可知:相比于仅考虑单一能量交互,协调优化微能源网间的多种能量交互使得电和热负荷的可靠性分别提升67.82%和20.62%,大幅改善微能源网可靠性。

[0175] 本发明对多微能源网系统可靠性评估方法进行了详细介绍。具体实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想。应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以对本发明进行若干改进和修饰,这些改进和修饰也落入本发明权利要求的保护范围内。

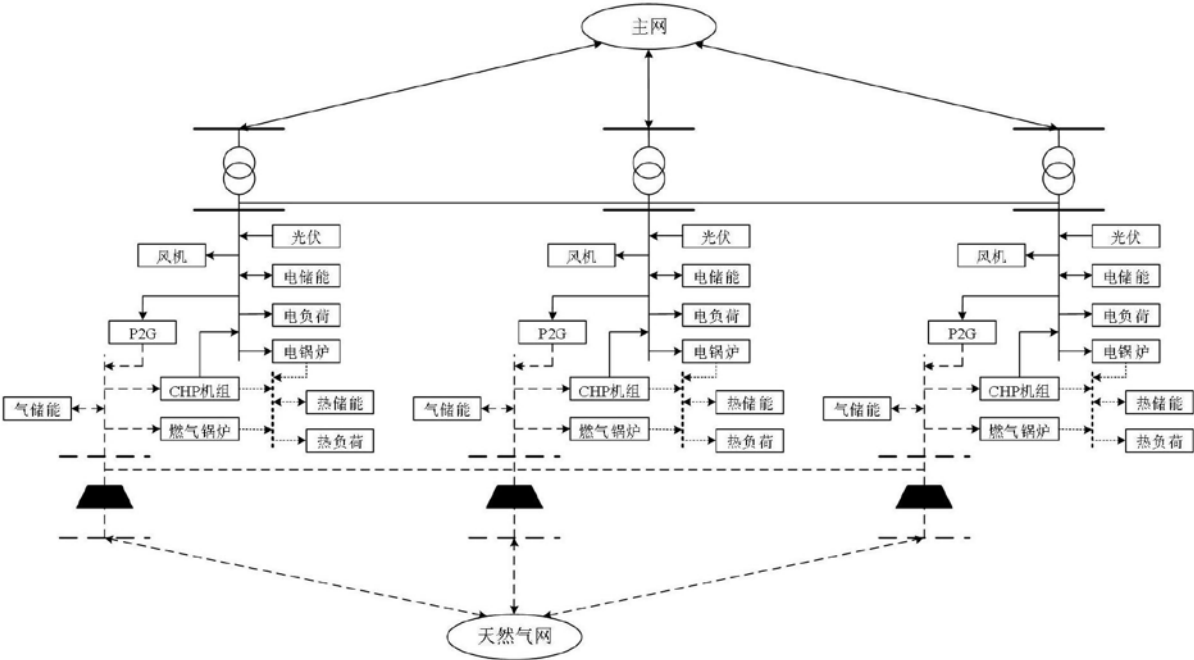


图1

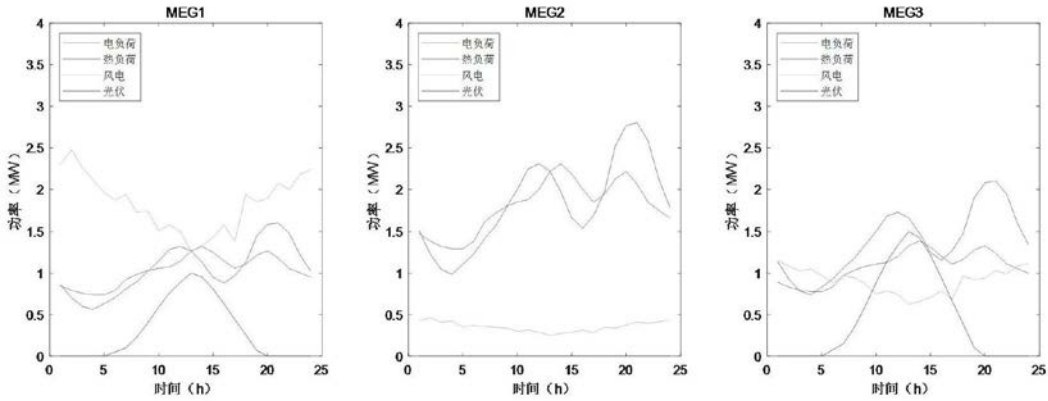


图2

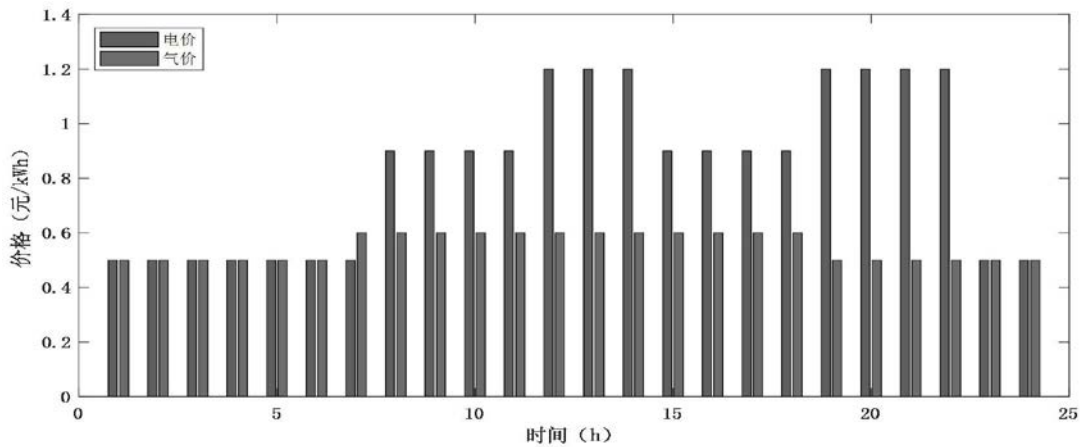


图3

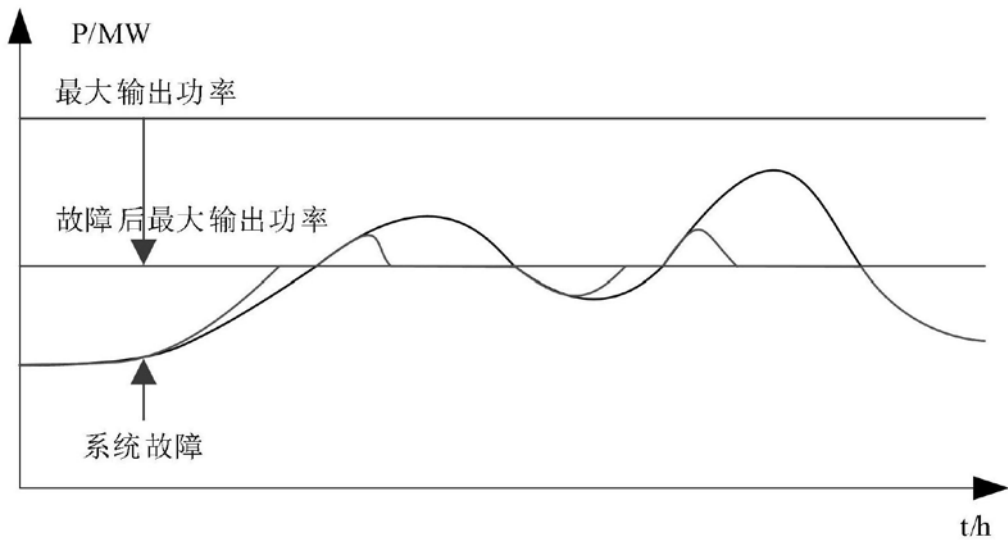


图4

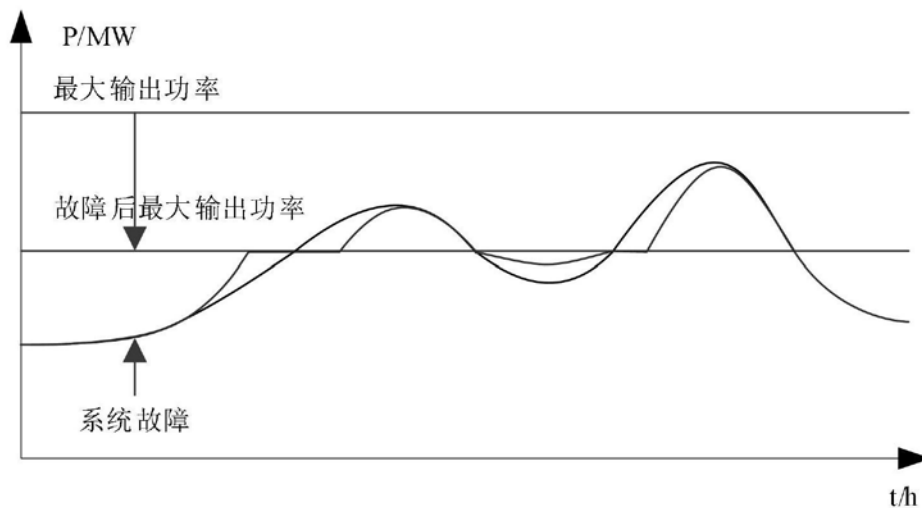


图5

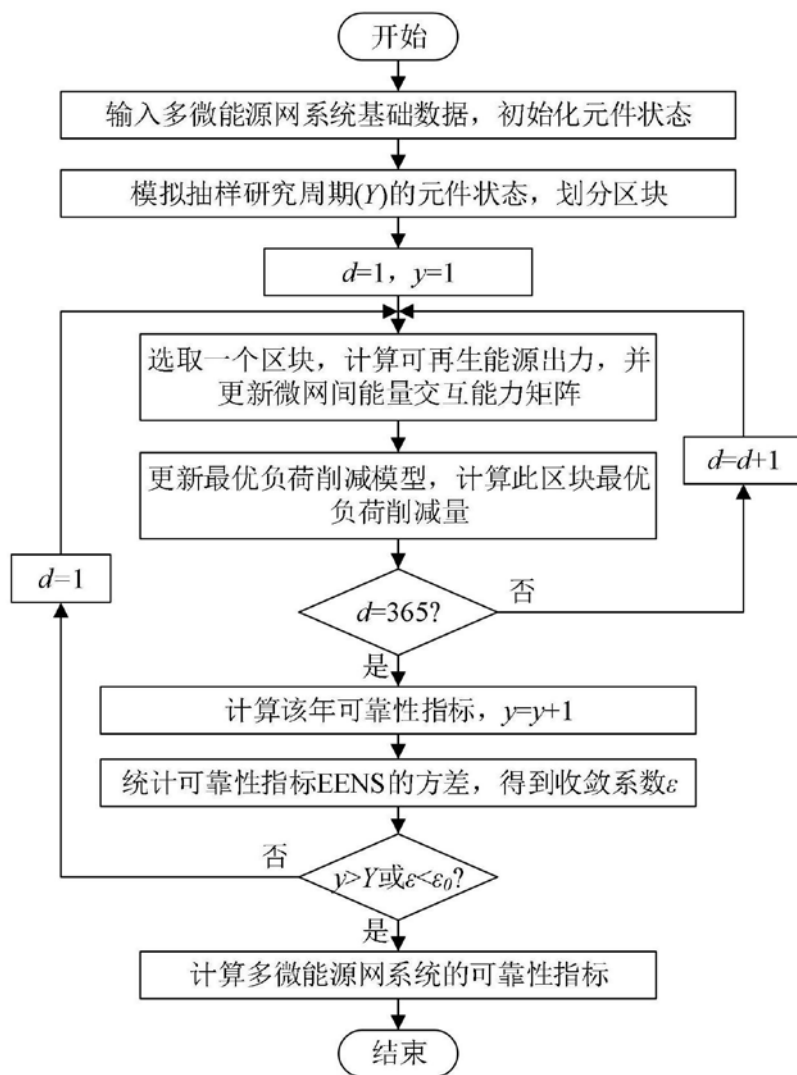


图6