



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108039741 A

(43)申请公布日 2018.05.15

(21)申请号 201711360241.7

(22)申请日 2017.12.15

(71)申请人 华北电力大学(保定)

地址 071003 河北省保定市莲池区永华北大街619号

(72)发明人 李鹏 郑苗苗 李国杰 张新宗 张斌

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201

代理人 杜文茹

(51)Int.Cl.

H02J 4/00(2006.01)

H02J 3/38(2006.01)

H02J 3/00(2006.01)

权利要求书4页 说明书11页 附图5页

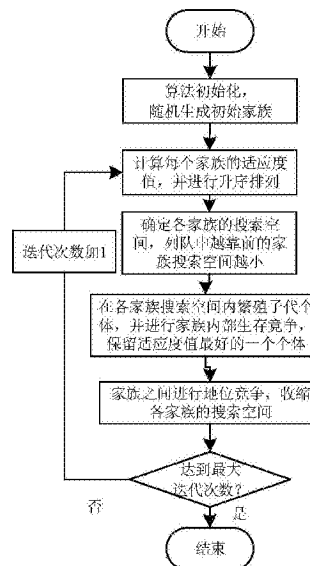
(54)发明名称

计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法

(57)摘要

一种计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法;建立包含风力发电、光伏发电、蓄电池、柴油发电机、燃料电池的交直流混合微网优化运行数学模型,交直流混合微网数学模型包含考虑电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益构建的多目标、多约束及非线性的目标函数,且数学模型服从微网内部功率平衡、可控微源爬坡率、单位时间蓄电池充放电上下限、蓄电池荷电状态上下限、蓄电池前后时间段功率平衡及蓄电池荷电状态不变的约束条件;对基本列队竞争算法进行改进,得到改进列队竞争算法;用改进列队竞争算法求解交直流混合微网优化运行数学模型。本发明能有效减少微网运行成本,促进新能源消纳率。

CN 108039741 A



1. 一种计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法,其特征在于,包括如下步骤:

1) 计及微源余电上网,建立包含风力发电、光伏发电、蓄电池、柴油发电机、燃料电池的交直流混合微网优化运行数学模型,所述的交直流混合微网数学模型包含考虑电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益,所构建的多目标、多约束及非线性的目标函数,且所述的交直流混合微网优化运行数学模型服从微网内部功率平衡、可控微源爬坡率、单位时间蓄电池充放电上下限、蓄电池荷电状态上下限、蓄电池前后时间段功率平衡及蓄电池荷电状态不变的约束条件;

2) 对基本列队竞争算法进行改进,得到改进列队竞争算法;

3) 用改进列队竞争算法求解交直流混合微网优化运行数学模型。

2. 根据权利要求1所述的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法,其特征在于,步骤1)所述的电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益,具体如下:

(1) 电网购电成本 $F_{Grid}$ :

$$F_{Grid} = \Delta T \sum_{t=1}^T (P_{Grid}^t c_0^t)$$

式中, $\Delta T$ 为向电网购电的时间段; $T$ 为一天内总时段; $t$ 为一天内各时段; $P_{Grid}^t$ 为交直流混合微网向电网购电电量; $c_0^t$ 为相应时间段内电网售电价格;

(2) 微源燃料成本 $F_{fuel}$ :

$$F_{fuel} = F_{FCfuel} + F_{DEGfuel} = \frac{C_{FC} P_{FC}}{LHV \eta_{FC}} + a + bP_{DEG} + cP_{DEG}^2$$

$$\eta_{FC} = -0.0023 \times P_{FC} + 0.6735$$

式中, $F_{FCfuel}$ 为燃料电池的燃料成本; $F_{DEGfuel}$ 为柴油发电机的燃料成本; $C_{FC}$ 为燃料电池的燃料单价; $LHV$ 为燃料气体的低热值; $P_{FC}$ 为燃料电池的输出功率; $P_{DEG}$ 为柴油发电机的输出功率; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为柴油发电机发电系数,由柴油机生产厂家给出; $\eta_{FC}$ 为燃料电池的发电效率;

(3) 环境效益成本 $F_{en}$ :

$$F_{en} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_j \times EF_{i,j} \times P_i$$

式中, $N$ 为微源个数, $M$ 为污染物的类型, $\alpha_j$ 为相应污染物的折算成本,单位为元/kg, $EF_{i,j}$ 为第*i*个微源产生的第*j*种污染物的单位排放量,kg/kW, $P_i$ 为第*i*个微源的输出功率;

(4) 网损 $F_{loss}$ :

$$F_{loss} = F_{ILCloss} + F_{ACloss} + F_{DCloss} = \sum_{i \in \{WT, PV, ES, FC\}} (1 - \eta_i) |P_i^t| + \sum_{k=1}^l \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} R_k + \sum_{k=l+1}^L \frac{P_k^2}{U_k^2} R_k$$

式中, $F_{ILCloss}$ 为换流器损耗; $F_{ACloss}$ 为交流区网损; $F_{DCloss}$ 为直流区网损; $WT$ 为风力发电; $PV$ 为光伏发电; $ES$ 为蓄电池; $FC$ 为燃料电池; $\eta_i$ 为微源*i*的发电效率; $P_k$ 、 $Q_k$ 为支路*k*传输的有功、无功功率; $l$ 为交流区支路总数; $L$ 为交直流混合微网支路总数,则直流区支路数为*L*-1; $R_k$ 为支路*k*的电阻; $U_k$ 为支路*k*的电压有效值;

(5) 运行维护成本 $F_{om}$ :

$$F_{om} = \sum_{i=1}^N \beta_i \times P_i$$

式中： $\beta_i$ 为第*i*个微源的运行维护成本系数。

(6) 微源余电上网收益 $F_{GRID}$ ：

$$F_{GRID} = \Delta T \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N1} (P_{MSk}^t a_s^t - F_{MSk}^t)$$

式中： $\Delta T$ 表示微源可以实现余电上网时的时间段； $T$ 是微源余电上网的总时间段； $N1$ 是可以实现余电上网的微源的个数； $P_{MSk}^t$ 是在第*t*个时段内发电成本小于电网上网费用的微源*k*输出功率； $a_s^t$ 为第*t*个时段内微源余电上网价格； $F_{MSk}^t$ 是第*k*个可以实现余电上网的微源在第*t*个时段内的发电成本。

3. 根据权利要求1所述的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法，其特征在于，步骤1)所述的目标函数 $F$ 表示如下：

$$F = (1-\lambda) \times (F_{Grid} + F_{fuel} + F_{en} + F_{om} - F_{GRID}) + \lambda \times F_{loss}$$

式中， $\lambda$ 为网损成本系数； $F_{Grid}$ 为电网购电成本； $F_{fuel}$ 为微源燃料成本； $F_{en}$ 为环境效益成本； $F_{om}$ 为运行维护成本； $F_{GRID}$ 为微源余电上网收益； $F_{loss}$ 为网损折算成本。

4. 根据权利要求1所述的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法，其特征在于，步骤1)所述的约束条件包括：

微网内部功率平衡约束条件：

$$\sum_{i=1}^N P_{MSi}^t + P_G^t + P_{ES}^t = P_{ACL}^t + P_{DCL}^t + \sum_{k=1}^{N1} P_{MSk}^t$$

可控微源爬坡率约束条件：

$$P_i^t - P_i^{t-1} \leq r_i \Delta t$$

单位时间蓄电池充放电上下限约束条件。

$$|P_{ES}^t| \leq P_{ES,max}^t$$

蓄电池荷电状态上下限约束条件。

$$SoC_{min} \leq SoC^t \leq SoC_{max}$$

蓄电池前后时间段功率平衡约束条件：

$$SoC^{t+1} = SoC^t + uu \times \eta_{ES} \times P_{ES}^t \Delta T / Q_{ES}$$

蓄电池荷电状态不变约束条件：

$$SoC_{initial} = SoC_{end}$$

其中， $N$ 为微源个数； $P_{MSi}^t$ 表示第*t*个时段第*i*个微源出力； $P_G^t$ 表示第*t*个时段从电网购电功率； $P_{ES}^t$ 为第*t*个时段蓄电池功率变化量，放电为正，充电为负； $P_{ACL}^t$ 、 $P_{DCL}^t$ 分别表示第*t*个时段交、直流区负荷； $N1$ 为第*t*个时段可以实现余电上网的微源个数； $P_{MSk}^t$ 为第*k*个可以实现余电上网的微源在第*t*个时段的上网电量； $P_i^t$ 表示第*t*个时段微源*i*的输出功率； $r_i$ 为第*i*个微源的单位时间爬坡率； $\Delta t$ 表示在可控微源出力时段内的单位时间段； $|P_{ES}^t|$ 为第*t*个时段蓄电池功率变化量的绝对值； $P_{ES,max}^t$ 为第*t*个时段蓄电池功率变化量的限值； $SoC^t$ 为第*t*个时段蓄电池的荷电状态； $SoC_{min}$ 、 $SoC_{max}$ 分别为荷电状态的上下限值； $uu$ 表示充放电系数，

充电时为1,放电时为-1; $\eta_{ES}$ 为蓄电池充放电效率,这里取95%; $\Delta T$ 表示蓄电池充放电时间内单位时间段; $Q_{ES}$ 为蓄电池额定容量; $SoC_{initial}$ 、 $SoC_{end}$ 为荷电状态的初始值和最终值。

5. 根据权利要求1所述的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法,其特征在于,步骤2)所述的对本列队竞争算法进行改进是:

(1) 将基本列队竞争算法的单向繁殖迭代公式:

$$x_{wc} = a_c + C_c \times rand \quad w=1, 2, \dots, W, c=1, 2, \dots, s$$

改进为双向繁殖公式如下:

$$\begin{cases} x_{wc} = a_c + C_c \times rand \\ x_{w,s+c} = b_{s+c} - C_{s+c} \times rand \end{cases} \quad w=1, 2, \dots, W, c=1, 2, \dots, s$$

式中, $x_{wc}$ 表示第 $w$ 个家族产生的第 $c$ 个家族子代个体; $a_c$ 表示第 $c$ 个家族子代个体的取值下限; $b_c$ 表示第 $c$ 个家族子代个体的取值上限; $W$ 表示家族总个数; $s$ 表示每个家族中的子代个体总数。

(2) 将基本列队竞争算法中的收缩迭代公式:

$$D_w(G+1) = \varepsilon \times D_w(G) \quad w=1, 2, \dots, W$$

改进为:

$$D_w(G+1) = (W-w) \div W \times \varepsilon \times D_w(G) \quad w=1, 2, \dots, W$$

式中, $\varepsilon$ 表示收缩比; $D_w(G)$ 表示第 $G$ 次迭代的搜索区域的边长; $W$ 表示家族总个数。

6. 根据权利要求1所述的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法,其特征在于,步骤3)所述的用改进列队竞争算法求解交直流混合微网优化运行数学模型,包括:

(1) 随机生成 $W$ 个家族父代,代入交直流混合微网优化运行数学模型中,计算每个家族父代的适应度值;

(2) 采用升序排列,对 $W$ 个家族父代进行排序;

(3) 确定每个家族父代的搜索空间,列队中越靠前的家族父代搜索空间越小, $L_w$ 和 $H_w$ 分别为第 $w$ 个家族父代的搜索下限和搜索上限,在求解过程中, $L_w$ 和 $H_w$ 分别为各微源的出力范围, $D_w = H_w - L_w, w=1, 2, \dots, W$ ,则第 $w$ 个家族父代的搜索空间 $S_w$ 为:

$$S_w = w \times D_w \div W$$

第 $w$ 个家族父代的搜索空间是以家族父代 $w$ 为中心,以 $D_w$ 为边长向量的一个矩形区域, $W$ 取值范围为5~10。

(4) 每个家族在各自搜索空间内繁殖,按照双向繁殖公式随机产生 $2s$ 个均匀分布的家族子代个体, $A = a_1, a_2, \dots, a_s$ 和 $B = b_1, b_2, \dots, b_s$ 分别为家族子代的取值下限和上限,搜索空间大小 $C = B - A$ ,繁殖迭代公式如下:

$$\begin{cases} x_{wc} = a_c + C_c \times rand \\ x_{w,s+c} = b_{s+c} - C_{s+c} \times rand \end{cases} \quad w=1, 2, \dots, W, c=1, 2, \dots, s$$

式中, $x_{wc}$ 为第 $w$ 个家族中生成的第 $c$ 个个体; $rand$ 为区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数;

(5)  $2s$ 个家族子代与家族父代一起进行纵向生存竞争,即将家族子代和父代分别代入到交直流混合微网优化运行数学模型的目标函数中,保留适应度值最好的1个个体,代表家族进行横向地位竞争;

(6) 进行第 $k$ 次迭代之后,所有家族收缩搜索空间,通过减少搜索区域的边长来实现收

缩搜索空间：

$$D_w(G+1) = (W-w) \div W \times \varepsilon \times D_w(G)$$

其中， $D_w(G)$  表示第  $G$  次迭代的搜索区域的边长； $\varepsilon$  为收缩比，取值范围在  $(0, 1)$  之间， $\varepsilon$  值越小收缩越快；

(7) 判断算法是否达到设定的迭代次数，若否则回到第 (2) 步，若是算法结束，此时列队中剩余一个个体，该个体即为交直流混合微网优化运行数学模型的解。

## 计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种交直流混合微网优化运行方法。特别是涉及一种计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法。

### 背景技术

[0002] 随着社会的进步和发展 and 人们日益增长的物质需求, 电力行业面临传统能源的枯竭和电力需求的增长之间的矛盾, 寻求新型发电能源迫在眉睫。光伏发电 (photovoltaics, PV)、风力发电 (wind turbine, WT)、燃料电池 (fuel cell, FC) 及柴油发电机 (diesel generator, DEG) 由于具有对可再生能源的高效利用、环境效益较好、安装地点灵活等优点受到广泛关注, 并把这类电源统称为分布式电源 (distributed generation, DG)。虽然分布式发电就有显著的优势, 但是其输出功率的不确定性和间歇性限制了大规模的开发利用。微网 (microgrid, MG) 可以对分布式电源统一管理控制, 促进新能源的大规模消纳利用, 国内外已建立多个微网示范工程用于微网控制和可靠运行技术的研究。交直流混合微网包含分布式电源、交直流负荷、储能装置和电力电子设备, 能够实现对分布式电源的统一管理调度, 同时满足交流和直流负荷的用电需求, 减少电力电子设备的使用, 降低谐波污染, 是当前研究的重点和难点。

[0003] 目前常用的智能算法寻优效果良好, 但仍存在一些收敛速度慢或者达不到收敛精度要求等问题, 因此需要尝试新的智能算法。列队竞争算法 (Line-up Competition Algorithm, LCA) 由武汉理工大学鄢烈祥教授于1998年首次提出, 算法模拟进化过程中始终保持独立并行进化的家族, 通过家族内部的纵向生存竞争和家族之间的横向地位竞争双重竞争方法, 来提高算法收敛精度。生存竞争指同一家族内繁殖的子代为生存进行的竞争, 最后只剩下一个最优秀的个体代表自己的家族, 地位竞争指不同家族之间的地位竞争, 根据各个家族目标函数值的大小排列成一个列队, 越优秀的家族在列队中越靠前。经过双重竞争之后, 列队中的首位个体不断更新被其他家族个体所取代, 提高了算法的收敛精度。

### 发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是, 提供一种能有效减少微网运行成本, 促进新能源消纳率的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法。

[0005] 本发明所采用的技术方案是: 一种计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法, 包括如下步骤:

[0006] 1) 计及微源余电上网, 建立包含风力发电、光伏发电、蓄电池、柴油发电机、燃料电池的交直流混合微网优化运行数学模型, 所述的交直流混合微网数学模型包含考虑电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益, 所构建的多目标、多约束及非线性的目标函数, 且所述的交直流混合微网优化运行数学模型服从微网内部功率平衡、可控微源爬坡率、单位时间蓄电池充放电上下限、蓄电池荷电状态上下限、蓄电池前后时间段功率平衡及蓄电池荷电状态不变的约束条件;

[0007] 2) 对基本列队竞争算法进行改进,得到改进列队竞争算法;

[0008] 3) 用改进列队竞争算法求解交直流混合微网优化运行数学模型。

[0009] 步骤1)所述的电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益,具体如下:

[0010] (1) 电网购电成本 $F_{Grid}$ :

$$[0011] \quad F_{Grid} = \Delta T \sum_{t=1}^T (P_{Grid}^t c_0^t)$$

[0012] 式中, $\Delta T$ 为向电网购电的时间段; $T$ 为一天内总时段; $t$ 为一天内各时段; $P_{Grid}^t$ 为交直流混合微网向电网购电电量; $c_0^t$ 为相应时间段内电网售电价格;

[0013] (2) 微源燃料成本 $F_{fuel}$ :

$$[0014] \quad F_{fuel} = F_{FCfuel} + F_{DEGfuel} = \frac{C_{FC}}{LHV} \frac{P_{FC}}{\eta_{FC}} + a + bP_{DEG} + cP_{DEG}^2$$

$$[0015] \quad \eta_{FC} = -0.0023 \times P_{FC} + 0.6735$$

[0016] 式中, $F_{FCfuel}$ 为燃料电池的燃料成本; $F_{DEGfuel}$ 为柴油发电机的燃料成本; $C_{FC}$ 为燃料电池的燃料单价; $LHV$ 为燃料气体的低热值; $P_{FC}$ 为燃料电池的输出功率; $P_{DEG}$ 为柴油发电机的输出功率; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为柴油发电机发电系数,由柴油机生产厂家给出; $\eta_{FC}$ 为燃料电池的发电效率;

[0017] (3) 环境效益成本 $F_{en}$ :

$$[0018] \quad F_{en} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_j \times EF_{i,j} \times P_i$$

[0019] 式中, $N$ 为微源个数, $M$ 为污染物的类型, $\alpha_j$ 为相应污染物的折算成本,单位为元/kg, $EF_{i,j}$ 为第*i*个微源产生的第*j*种污染物的单位排放量,kg/kW, $P_i$ 为第*i*个微源的输出功率;

[0020] (4) 网损 $F_{loss}$ :

$$[0021] \quad F_{loss} = F_{ILCloss} + F_{ACloss} + F_{DCloss} = \sum_{i \in \{WT, PV, ES, FC\}} (1 - \eta_i) |P_i^t| + \sum_{k=1}^L \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} R_k + \sum_{k=L+1}^L \frac{P_k^2}{U_k^2} R_k$$

[0022] 式中, $F_{ILCloss}$ 为换流器损耗; $F_{ACloss}$ 为交流区网损; $F_{DCloss}$ 为直流区网损; $WT$ 为风力发电; $PV$ 为光伏发电; $ES$ 为蓄电池; $FC$ 为燃料电池; $\eta_i$ 为微源*i*的发电效率; $P_k$ 、 $Q_k$ 为支路*k*传输的有功、无功功率; $L$ 为交流区支路总数; $L$ 为交直流混合微网支路总数,则直流区支路数为*L*-1; $R_k$ 为支路*k*的电阻; $U_k$ 为支路*k*的电压有效值;

[0023] (5) 运行维护成本 $F_{om}$ :

$$[0024] \quad F_{om} = \sum_{i=1}^N \beta_i \times P_i$$

[0025] 式中: $\beta_i$ 为第*i*个微源的运行维护成本系数。

[0026] (6) 微源余电上网收益 $F_{GRID}$ :

$$[0027] \quad F_{GRID} = \Delta T \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N1} (P_{MSk}^t a_s^t - F_{MSk}^t)$$

[0028] 式中: $\Delta T$ 表示微源可以实现余电上网时的时间段; $T$ 是微源余电上网的总时间段; $N1$ 是可以实现余电上网的微源的个数; $P_{MSk}^t$ 是在第*t*个时段内发电成本小于电网上网费用的

微源k输出功率; $a_s^t$ 为第t个时段内微源余电上网价格; $F_{MSk}^t$ 是第k个可以实现余电上网的微源在第t个时段内的发电成本。

[0029] 步骤1)所述的目标函数F表示如下:

$$[0030] \quad F = (1-\lambda) \times (F_{Grid} + F_{fuel} + F_{en} + F_{om} - F_{GRID}) + \lambda \times F_{loss}$$

[0031] 式中, $\lambda$ 为网损成本系数; $F_{Grid}$ 为电网购电成本; $F_{fuel}$ 为微源燃料成本; $F_{en}$ 为环境效益成本; $F_{om}$ 为运行维护成本; $F_{GRID}$ 为微源余电上网收益; $F_{loss}$ 为网损折算成本。

[0032] 步骤1)所述的约束条件包括:

[0033] 微网内部功率平衡约束条件:

$$[0034] \quad \sum_{i=1}^N P_{MSi}^t + P_G^t + P_{ES}^t = P_{ACL}^t + P_{DCL}^t + \sum_{k=1}^{N1} P_{MSk}^t$$

[0035] 可控微源爬坡率约束条件:

$$[0036] \quad P_i^t - P_i^{t-1} \leq r_i \Delta t$$

[0037] 单位时间蓄电池充放电上下限约束条件。

$$[0038] \quad |P_{ES}^t| \leq P_{ES,max}^t$$

[0039] 蓄电池荷电状态上下限约束条件。

$$[0040] \quad Soc_{min} \leq Soc^t \leq Soc_{max}$$

[0041] 蓄电池前后时间段功率平衡约束条件:

$$[0042] \quad Soc^{t+1} = Soc^t + uu \times \eta_{ES} \times P_{ES}^t \Delta T / Q_{ES}$$

[0043] 蓄电池荷电状态不变约束条件:

$$[0044] \quad Soc_{initial} = Soc_{end}$$

[0045] 其中,N为微源个数; $P_{MSi}^t$ 表示第t个时段第i个微源出力; $P_G^t$ 表示第t个时段从电网购电功率; $P_{ES}^t$ 为第t个时段蓄电池功率变化量,放电为正,充电为负; $P_{ACL}^t$ 、 $P_{DCL}^t$ 分别表示第t个时段交、直流区负荷;N1为第t个时段可以实现余电上网的微源个数; $P_{MSk}^t$ 为第k个可以实现余电上网的微源在第t个时段的上网电量; $P_i^t$ 表示第t个时段微源i的输出功率; $r_i$ 为第i个微源的单位时间爬坡率; $\Delta t$ 表示在可控微源出力时段内的单位时间段; $|P_{ES}^t|$ 为第t个时段蓄电池功率变化量的绝对值; $P_{ES,max}^t$ 为第t个时段蓄电池功率变化量的限值; $Soc^t$ 为第t个时段蓄电池蓄电的荷电状态; $Soc_{min}$ 、 $Soc_{max}$ 分别为荷电状态的上下限值; $uu$ 表示充放电系数,充电时为1,放电时为-1; $\eta_{ES}$ 为蓄电池充放电效率,这里取95%; $\Delta T$ 表示蓄电池充放电时间内单位时间段; $Q_{ES}$ 为蓄电池额定容量; $Soc_{initial}$ 、 $Soc_{end}$ 为荷电状态的初始值和最终值。

[0046] 步骤2)所述的对基本列队竞争算法进行改进是:

[0047] (1)将基本列队竞争算法的单向繁殖迭代公式:

$$[0048] \quad x_{wc} = a_c + C_c \times rand \quad w=1,2,\dots,W, c=1,2,\dots,s$$

[0049] 改进为双向繁殖公式如下:

$$[0050] \quad \begin{cases} x_{wc} = a_c + C_c \times rand \\ x_{w,s+c} = b_{s+c} - C_{s+c} \times rand \end{cases} \quad w=1,2,\dots,W, c=1,2,\dots,s$$

[0051] 式中, $x_{wc}$ 表示第w个家族产生的第c个家族子代个体; $a_c$ 表示第c个家族子代个体的取值下限; $b_c$ 表示第c个家族子代个体的取值上限;W表示家族总个数;s表示每个家族中的



子代个体总数。

[0052] (2) 将基本列队竞争算法中的收缩迭代公式:

$$[0053] \quad D_w(G+1) = \varepsilon \times D_w(G) \quad w=1, 2, \dots, W$$

[0054] 改进为:

$$[0055] \quad D_w(G+1) = (W-w) \div W \times \varepsilon \times D_w(G) \quad w=1, 2, \dots, W$$

[0056] 式中,  $\varepsilon$  表示收缩比;  $D_w(G)$  表示第  $G$  次迭代的搜索区域的边长;  $W$  表示家族总个数。

[0057] 步骤3) 所述的用改进列队竞争算法求解交直流混合微网优化运行数学模型, 包括:

[0058] (1) 随机生成  $W$  个家族父代, 代入交直流混合微网优化运行数学模型中, 计算每个家族父代的适应度值;

[0059] (2) 采用升序排列, 对  $W$  个家族父代进行排序;

[0060] (3) 确定每个家族父代的搜索空间, 列队中越靠前的家族父代搜索空间越小,  $L_w$  和  $H_w$  分别为第  $w$  个家族父代的搜索下限和搜索上限, 在求解过程中,  $L_w$  和  $H_w$  分别为各微源的出力范围,  $D_w = H_w - L_w$ ,  $w=1, 2, \dots, W$ , 则第  $w$  个家族父代的搜索空间  $S_w$  为:

$$[0061] \quad S_w = w \times D_w \div W$$

[0062] 第  $w$  个家族父代的搜索空间是以家族父代  $w$  为中心, 以  $D_w$  为边长向量的一个矩形区域,  $W$  取值范围为  $5 \sim 10$ 。

[0063] (4) 每个家族在各自搜索空间内繁殖, 按照双向繁殖公式随机产生  $2s$  个均匀分布的家族子代个体,  $A = a_1, a_2, \dots, a_s$  和  $B = b_1, b_2, \dots, b_s$  分别为家族子代的取值下限和上限, 搜索空间大小  $C = B - A$ , 繁殖迭代公式如下:

$$[0064] \quad \begin{cases} x_{wc} = a_c + C_c \times rand \\ x_{w,s+c} = b_{s+c} - C_{s+c} \times rand \end{cases} \quad w=1, 2, \dots, W, \quad c=1, 2, \dots, s$$

[0065] 式中,  $x_{wc}$  为第  $w$  个家族中生成的第  $c$  个个体;  $rand$  为区间  $[0, 1]$  上均匀分布的随机数;

[0066] (5)  $2s$  个家族子代与家族父代一起进行纵向生存竞争, 即将家族子代和父代分别代入到交直流混合微网优化运行数学模型的目标函数中, 保留适应度值最好的 1 个个体, 代表家族进行横向地位竞争;

[0067] (6) 进行第  $k$  次迭代之后, 所有家族收缩搜索空间, 通过减少搜索区域的边长来实现收缩搜索空间:

$$[0068] \quad D_w(G+1) = (W-w) \div W \times \varepsilon \times D_w(G)$$

[0069] 其中,  $D_w(G)$  表示第  $G$  次迭代的搜索区域的边长;  $\varepsilon$  为收缩比, 取值范围在  $(0, 1)$  之间,  $\varepsilon$  值越小收缩越快;

[0070] (7) 判断算法是否达到设定的迭代次数, 若否则回到第 (2) 步, 若是算法结束, 此时列队中剩余一个个体, 该个体即为交直流混合微网优化运行数学模型的解。

[0071] 本发明的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法, 能有效减少微网运行成本, 促进新能源消纳率。本发明具有如下优点:

[0072] 1、本发明建立的交直流混合微网数学模型, 考虑了电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益, 目标函数服从微网内部功率平衡、可控微源爬坡率、单位时间蓄电池充放电上下限、蓄电池荷电状态上下限、蓄电池前后

时间段功率平衡及蓄电池荷电状态不变的约束条件,便于方法应用到实际工程中;

[0073] 2、将改进列队竞争算法成功应用到交直流混合微网优化运行的目标函数求解中,为交直流混合微网优化运行提供一种新方法和新思路;

[0074] 3、计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法具有显著的有效性和经济性,有利于交直流混合微网的经济运行。

### 附图说明

[0075] 图1是本发明中列队竞争算法流程图;

[0076] 图2是本发明中交直流混合微网典型网架结构;

[0077] 图3本发明改进列队竞争算法收敛情况图;

[0078] 图4是本发明交流区各微源出力情况图;

[0079] 图5是本发明交流区运行成本曲线;

[0080] 图6是本发明直流区各微源出力情况图;

[0081] 图7是本发明直流区运行成本曲线;

[0082] 图8是蓄电池SOC变化曲线;

[0083] 图9是本发明中微源余电上网的电量;

[0084] 图10是本发明中交直流混合微网的运行成本及微源余电上网收益曲线。

### 具体实施方式

[0085] 下面结合实施例和附图对本发明的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法做出详细说明。

[0086] 本发明的一种计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法,以交直流混合微网的经济优化运行行为研究重点,通过建立经济优化运行数学模型,并应用改进列队竞争算法求解目标函数,验证数学模型的可行性。

[0087] 本发明的计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法,包括如下步骤:

[0088] 1) 计及微源余电上网,针对包含风力发电、光伏发电、蓄电池、柴油发电机、燃料电池的交直流混合微网,建立交直流混合微网优化运行数学模型,所述的交直流混合微网数学模型包含考虑电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益,所构建的多目标、多约束及非线性的目标函数,且所述的交直流混合微网优化运行数学模型服从微网内部功率平衡、可控微源爬坡率、单位时间蓄电池充放电上下限、蓄电池荷电状态上下限、蓄电池前后时间段功率平衡及蓄电池荷电状态不变的约束条件,其中:

[0089] 所述的电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益,具体如下:

[0090] (1) 电网购电成本 $F_{Grid}$ :

$$[0091] \quad F_{Grid} = \Delta T \sum_{t=1}^T (P_{Grid}^t c_0^t)$$

[0092] 式中, $\Delta T$ 为向电网购电的时间段; $T$ 为一天内总时段; $t$ 为一天内各时段; $P_{Grid}^t$ 为交直流混合微网向电网购电电量; $c_0^t$ 为相应时间段内电网售电价格;

[0093] (2) 微源燃料成本 $F_{fuel}$ :

$$[0094] \quad F_{fuel} = F_{FCfuel} + F_{DEGfuel} = \frac{C_{FC}}{LHV} \frac{P_{FC}}{\eta_{FC}} + a + bP_{DEG} + cP_{DEG}^2$$

$$[0095] \quad \eta_{FC} = -0.0023 \times P_{FC} + 0.6735$$

[0096] 式中, $F_{FCfuel}$ 为燃料电池的燃料成本; $F_{DEGfuel}$ 为柴油发电机的燃料成本; $C_{FC}$ 为燃料电池的燃料单价; $LHV$ 为燃料气体的低热值; $P_{FC}$ 为燃料电池的输出功率; $P_{DEG}$ 为柴油发电机的输出功率; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为柴油发电机发电系数,由柴油机生产厂家给出; $\eta_{FC}$ 为燃料电池的发电效率;

[0097] (3) 环境效益成本 $F_{en}$ :

$$[0098] \quad F_{en} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_j \times EF_{i,j} \times P_i$$

[0099] 式中, $N$ 为微源个数, $M$ 为污染物的类型, $\alpha_j$ 为相应污染物的折算成本,单位为元/kg, $EF_{i,j}$ 为第*i*个微源产生的第*j*种污染物的单位排放量,kg/kW, $P_i$ 为第*i*个微源的输出功率;不同污染物的折算成本和不同微源的排放因子如表1所示。

[0100] 表1折算成本和排放因子

排放类型	折算成本/(元/kg)	柴油发电机排放因子/(kg/kW)	燃料电池排放因子/(kg/kW)
NO <sub>x</sub>	26.04	$2.18 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-6}$
SO <sub>2</sub>	6.138	$4.54 \times 10^{-4}$	$2.25 \times 10^{-6}$
CO <sub>2</sub>	0.0868	$1.40 \times 10^{-3}$	$4.275 \times 10^{-3}$

[0102] (4) 网损 $F_{loss}$ :

$$[0103] \quad F_{loss} = F_{ILClass} + F_{AClass} + F_{DCClass} = \sum_{i \in \{WT, PV, ES, FC\}} (1 - \eta_i) |P_i^l| + \sum_{k=1}^l \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} R_k + \sum_{k=l+1}^L \frac{P_k^2}{U_k^2} R_k$$

[0104] 式中, $F_{ILClass}$ 为换流器损耗; $F_{AClass}$ 为交流区网损; $F_{DCClass}$ 为直流区网损; $WT$ 为风力发电; $PV$ 为光伏发电; $ES$ 为蓄电池; $FC$ 为燃料电池; $\eta_i$ 为微源*i*的发电效率; $P_k$ 、 $Q_k$ 为支路*k*传输的有功、无功功率; $l$ 为交流区支路总数; $L$ 为交直流混合微网支路总数,则直流区支路数为 $L-1$ ; $R_k$ 为支路*k*的电阻; $U_k$ 为支路*k*的电压有效值;

[0105] (5) 运行维护成本 $F_{om}$ :

$$[0106] \quad F_{om} = \sum_{i=1}^N \beta_i \times P_i$$

[0107] 式中: $\beta_i$ 为第*i*个微源的运行维护成本系数。 $\beta_i$ 具体数值可取:

$$[0108] \quad \begin{cases} \beta_{FC} = 0.02933 \\ \beta_{DEG} = 0.08249 \\ \beta_{ES} = 0.02748 \end{cases}$$

[0109] 其中,  $\beta_{FC}$ 为燃料电池的运行维护成本系数;  $\beta_{DEG}$ 为柴油发电机的运行维护成本系数;  $\beta_{ES}$ 为蓄电池的运行维护成本系数。

[0110] (6) 微源余电上网收益  $F_{GRID}$ :

$$[0111] \quad F_{GRID} = \Delta T \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N1} (P_{MSk}^t a_s^t - F_{MSk}^t)$$

[0112] 式中:  $\Delta T$ 表示微源可以实现余电上网时的时间段;  $T$ 是微源余电上网的总时间段;  $N1$ 是可以实现余电上网的微源的个数;  $P_{MSk}^t$ 是在第  $t$  个时段内发电成本小于电网上网费用的微源  $k$  输出功率;  $a_s^t$ 为第  $t$  个时段内微源余电上网价格;  $F_{MSk}^t$ 是第  $k$  个可以实现余电上网的微源在第  $t$  个时段内的发电成本。

[0113] 所述的目标函数  $F$  表示如下:

$$[0114] \quad F = (1-\lambda) \times (F_{Grid} + F_{fuel} + F_{en} + F_{om} - F_{GRID}) + \lambda \times F_{loss}$$

[0115] 式中,  $\lambda$ 为网损成本系数;  $F_{Grid}$ 为电网购电成本;  $F_{fuel}$ 为微源燃料成本;  $F_{en}$ 为环境效益成本;  $F_{om}$ 为运行维护成本;  $F_{GRID}$ 为微源余电上网收益;  $F_{loss}$ 为网损折算成本。

[0116] 所述的约束条件包括:

[0117] 微网内部功率平衡约束条件:

$$[0118] \quad \sum_{i=1}^N P_{MSi}^t + P_G^t + P_{ES}^t = P_{ACL}^t + P_{DCL}^t + \sum_{k=1}^{N1} P_{MSk}^t$$

[0119] 可控微源爬坡率约束条件:

$$[0120] \quad P_i^t - P_i^{t-1} \leq r_i \Delta t$$

[0121] 单位时间蓄电池充放电上下限约束条件。

$$[0122] \quad |P_{ES}^t| \leq P_{ES,max}^t$$

[0123] 蓄电池荷电状态上下限约束条件。

$$[0124] \quad Soc_{min} \leq Soc^t \leq Soc_{max}$$

[0125] 蓄电池前后时间段功率平衡约束条件:

$$[0126] \quad Soc^{t+1} = Soc^t + uu \times \eta_{ES} \times P_{ES}^t \Delta T / Q_{ES}$$

[0127] 蓄电池荷电状态不变约束条件:

$$[0128] \quad Soc_{initial} = Soc_{end}$$

[0129] 其中,  $N$ 为微源个数;  $P_{MSi}^t$ 表示第  $t$  个时段第  $i$  个微源出力;  $P_G^t$ 表示第  $t$  个时段从电网购电功率;  $P_{ES}^t$ 为第  $t$  个时段蓄电池功率变化量, 放电为正, 充电为负;  $P_{ACL}^t$ 、 $P_{DCL}^t$ 分别表示第  $t$  个时段交、直流区负荷;  $N1$ 为第  $t$  个时段可以实现余电上网的微源个数;  $P_{MSk}^t$ 为第  $k$  个可以实现余电上网的微源在第  $t$  个时段的上网电量;  $P_i^t$ 表示第  $t$  个时段微源  $i$  的输出功率;  $r_i$ 为第  $i$  个微源的单位时间爬坡率;  $\Delta t$ 表示在可控微源出力时段内的单位时间段;  $|P_{ES}^t|$ 为第  $t$  个时段蓄电池功率变化量的绝对值;  $P_{ES,max}^t$ 为第  $t$  个时段蓄电池功率变化量的限值;  $Soc^t$ 为第  $t$  个时段蓄电池的荷电状态;  $Soc_{min}$ 、 $Soc_{max}$ 分别为荷电状态的上下限值;  $uu$ 表示充放电系

数,充电时为1,放电时为-1; $\eta_{ES}$ 为蓄电池充放电效率,这里取95%; $\Delta T$ 表示蓄电池充放电时间内单位时间段; $Q_{ES}$ 为蓄电池额定容量; $SoC_{initial}$ 、 $SoC_{end}$ 为荷电状态的初始值和最终值。

[0130] 2)对基本列队竞争算法进行改进,得到改进列队竞争算法,如图1所示,所述的对基本列队竞争算法进行改进是:

[0131] (1)基本列队竞争算法的繁殖迭代是从各变量的下限加一个随机位移量产生的 $s$ 个子代个体,将基本列队竞争算法的单向繁殖迭代公式:

[0132]  $x_{wc} = a_c + C_c \times rand \quad w=1, 2, \dots, W, c=1, 2, \dots, s$

[0133] 改进列队竞争算法增加一倍数量的家族子代个体,在基本列队竞争的基础上再通过各变量的上限减去一个随机位移量产生家族子代个体,由双向繁殖共产生 $2s$ 个家族子代个体,改进为双向繁殖公式如下:

[0134] 
$$\begin{cases} x_{wc} = a_c + C_c \times rand \\ x_{w,s+c} = b_{s+c} - C_{s+c} \times rand \end{cases} \quad w=1, 2, \dots, W, c=1, 2, \dots, s$$

[0135] 式中, $x_{wc}$ 表示第 $w$ 个家族产生的第 $c$ 个家族子代个体; $a_c$ 表示第 $c$ 个家族子代个体的取值下限; $b_c$ 表示第 $c$ 个家族子代个体的取值上限; $W$ 表示家族总个数; $s$ 表示每个家族中的子代个体总数。

[0136] 这 $2s$ 个家族子代个体与家族父代一起进行纵向生存竞争,保留最优秀的家族个体,代表家族进行横向地位竞争。

[0137] (2)基本列队竞争算法第 $w$ 个家族从第 $G$ 代到第 $G+1$ 代的繁殖迭代,收缩比 $\varepsilon$ 取值范围在 $(0, 1)$ 之间的定值,为了增加搜索区域较大的家族进行家族内部的全局搜索的机会,将基本列队竞争算法中的收缩迭代公式:

[0138]  $D_w(G+1) = \varepsilon \times D_w(G) \quad w=1, 2, \dots, W$

[0139] 改进为:

[0140]  $D_w(G+1) = (W-w) \div W \times \varepsilon \times D_w(G) \quad w=1, 2, \dots, W$

[0141] 式中, $\varepsilon$ 表示收缩比; $D_w(G)$ 表示第 $G$ 次迭代的搜索区域的边长; $W$ 表示家族总个数。可以看出列队中越靠前的家族搜索空间越小,其收缩速度越慢,列队中越靠后的家族搜索空间越大,其收缩速度越快,有利于算法找到全局最优解。

[0142] 3)用改进列队竞争算法求解交直流混合微网优化运行数学模型,验证计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法的有效性和经济性。包括:

[0143] (1)随机生成 $W$ 个家族父代,代入交直流混合微网优化运行数学模型中,计算每个家族父代的适应度值;

[0144] (2)采用升序排列,对 $W$ 个家族父代进行排序;

[0145] (3)确定每个家族父代的搜索空间,列队中越靠前的家族父代搜索空间越小, $L_w$ 和 $H_w$ 分别为第 $w$ 个家族父代的搜索下限和搜索上限,在求解过程中, $L_w$ 和 $H_w$ 分别为各微源的出力范围, $D_w = H_w - L_w, w=1, 2, \dots, W$ ,则第 $w$ 个家族父代的搜索空间 $S_w$ 为:

[0146]  $S_w = w \times D_w \div W$

[0147] 第 $w$ 个家族父代的搜索空间是以家族父代 $w$ 为中心,以 $D_w$ 为边长向量的一个矩形区域,当家族数量 $W$ 较大时,会使各家族的搜索空间重叠,降低搜索效率。 $W$ 取值范围为 $5 \sim 10$ 。

[0148] (4)每个家族在各自搜索空间内繁殖,按照双向繁殖公式随机产生 $2s$ 个均匀分布的家族子代个体, $A = a_1, a_2, \dots, a_s$ 和 $B = b_1, b_2, \dots, b_s$ 分别为家族子代的取值下限和上限,搜

搜索空间大小 $C=B-A$ ,繁殖迭代公式如下:

$$[0149] \quad \begin{cases} x_{wc} = a_c + C_c \times rand \\ x_{w,s+c} = b_{s+c} - C_{s+c} \times rand \end{cases} \quad w=1,2,\dots,W, \quad c=1,2,\dots,s$$

[0150] 式中, $x_{wc}$ 为第 $w$ 个家族中生成的第 $c$ 个个体; $rand$ 为区间 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数;

[0151] (5)  $2s$ 个家族子代与家族父代一起进行纵向生存竞争,即将家族子代和父代分别代入到交直流混合微网优化运行数学模型的目标函数中,保留适应度值最好的1个个体,代表家族进行横向地位竞争;

[0152] (6) 进行第 $k$ 次迭代之后,所有家族收缩搜索空间,通过减少搜索区域的边长来实现收缩搜索空间:

$$[0153] \quad D_w(G+1) = (W-w) \div W \times \varepsilon \times D_w(G)$$

[0154] 其中, $D_w(G)$ 表示第 $G$ 次迭代的搜索区域的边长; $\varepsilon$ 为收缩比,取值范围在 $(0,1)$ 之间, $\varepsilon$ 值越小收缩越快;

[0155] (7) 判断算法是否达到设定的迭代次数,若否则回到第(2)步,若是算法结束,此时列队中剩余一个个体,该个体即为交直流混合微网优化运行数学模型的解。

[0156] 下面给出实例:

[0157] 本发明的实例考虑如图2所示的交直流混合微网,图中MS代表微源,Load代表负荷。对于交流区与直流区之间的潮流控制器采用双向潮流控制器,实现交流区和直流区之间的功率流通,从而降低微网运行成本,提高对微源的利用率。算例中直流区包含燃料电池、光伏发电及蓄电池,交流区包含柴油发电机和风力发电,交流区和直流区之间通过换流器连接,各微源参数如表2所示。蓄电池容量为 $250\text{kW}\cdot\text{h}$ ,始末时刻的荷电状态为 $0.3$ ,SOC变化范围为 $0.3\sim 0.9$ 。本发明微源余电上网电量由各时刻单位电量电网购电成本和微源发电成本比较得出。为促进可再生能源消纳,本文确定微源余电上网价格时,不考虑大电网收益,上网价格由各时刻电网购电成本和微源发电成本比较得出:在微网内部负荷满足需求的前提下,如果前者小于后者,则该微源余电不上网,否则为促进微源的消纳率,将微源余电以同时刻电网售电价格上网,将微源余电以同时刻电网购电价格上网,具体数值如表3所示。

[0158] 表2各微源的参数

供电区	微源	输出功率上		爬坡率 上限/ (kW/mi n)	运行维 护成本 系数/(元 /kW)
		下限/kW	上限		
交流区	DEG	120	10	2	0.078 99
	WT	40	0	—	—
直流区	BAT	30	30	—	0.027 48
	PV	40	0	—	—
	FC	150	10	2	0.025 98

[0160] 表3大电网分时电价

时段类型	时段	电价(元 /kWh)
峰时	10:00-15:00 与 18:00-21:00	0.83
谷时	00:00-07:00 与 23:00-24:00	0.17
平时	其余时段	0.49

[0162] (1) 对交直流混合微网未来一天内24小时各微源出力进行优化,建立考虑电网购电成本、微源燃料成本、环境效益成本、网损、运行维护成本及微源余电上网收益的目标函数,且服从微网内部功率平衡、公共连接点传输容量、可控微源爬坡率、单位时间蓄电池充放电上下限、蓄电池荷电状态上下限、蓄电池前后时间段功率平衡及蓄电池荷电状态不变的约束条件。本发明用改进列队竞争算法进行求解,图3为算法中家族个数收敛情况;

[0163] (2) 如图4-图7所示的交直流混合微网交流区和直流区的各微源出力情况曲线及成本曲线。可以看出,由于直流区微源燃料电池、蓄电池和光伏发电环境效益较好,所以环保折算成本接近于零;

[0164] (3) 图8为优化后的蓄电池SOC变化曲线,可以看出其变化在约束范围之内,满足各约束条件。

[0165] (4) 计及微源余电上网的交直流混合微网在运行过程中,要将可以获得利润的微源尽量多发,得到图9为向电网售电的电量;

[0166] (5) 图10为交直流混合微网总运行成本曲线,通过对比交直流混合微网的运行成本曲线和微源余电上网收益曲线,可以看出计及微源余电上网的交直流混合微网在运行过程中,能有效减少其运行总成本。经过运行算法程序,得到运行结果为:交直流混合微网优化运行总成本为1480.4元,其中交流区运行成本为1268.6元,直流区运行成本为696.8元,微源余电上网收益为484.9元。从运行结果看出,计及微源余电上网的交直流混合微网通过微源余电上网获得收益,降低交直流混合微网运行成本,具有显著的经济性。

[0167] 综上所述,通过本实施例的测试结果,说明本发明的一种计及微源余电上网的交

直流混合微网优化运行方法在满足交直流混合微网内部负荷需求的前提下,通过微源余电上网促进微源消纳率,并获得微源余电上网收益,能有效降低微网运行成本,验证了计及微源余电上网的交直流混合微网优化运行方法的有效性和经济性。



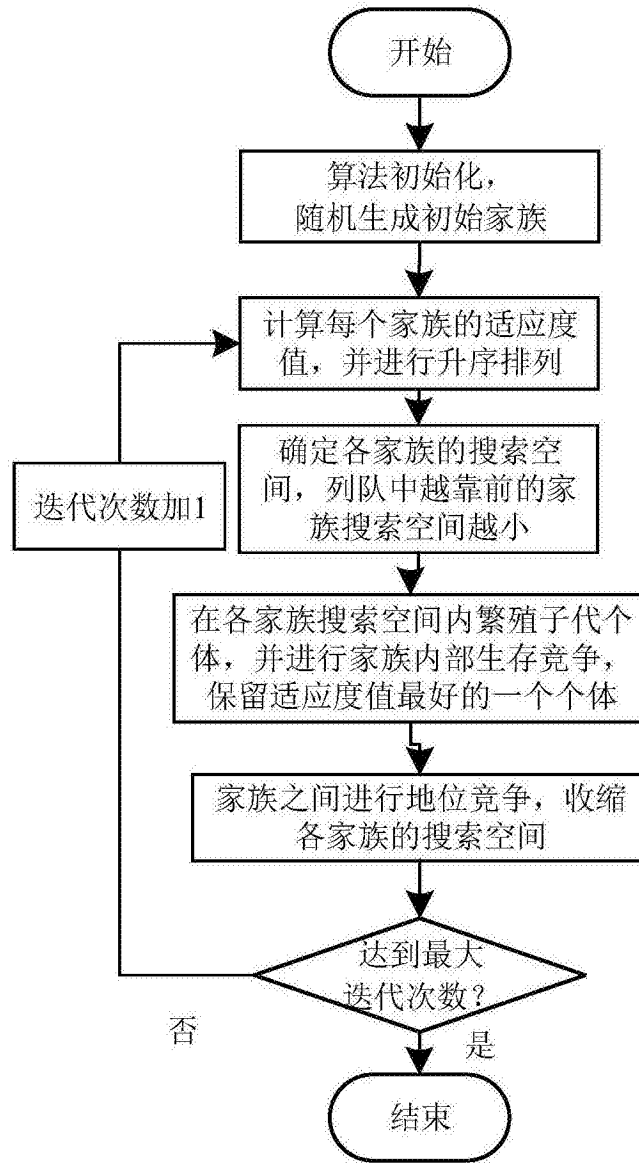


图1

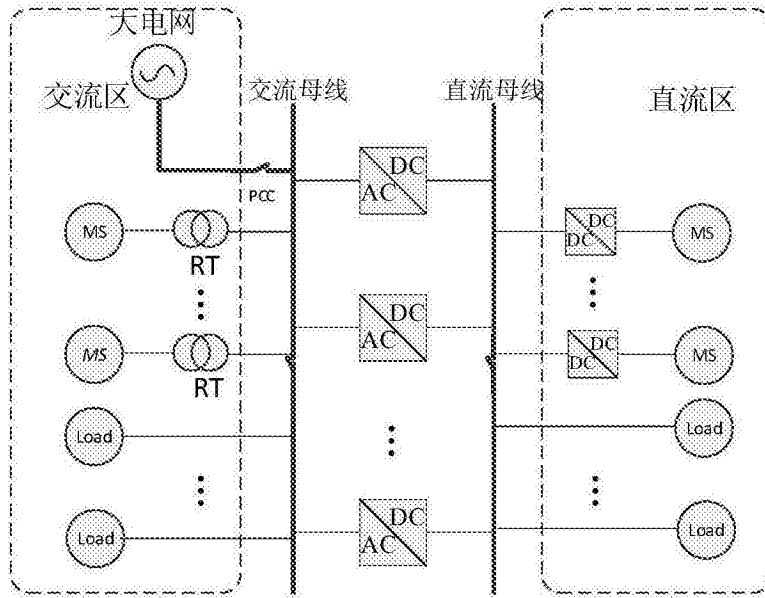


图2

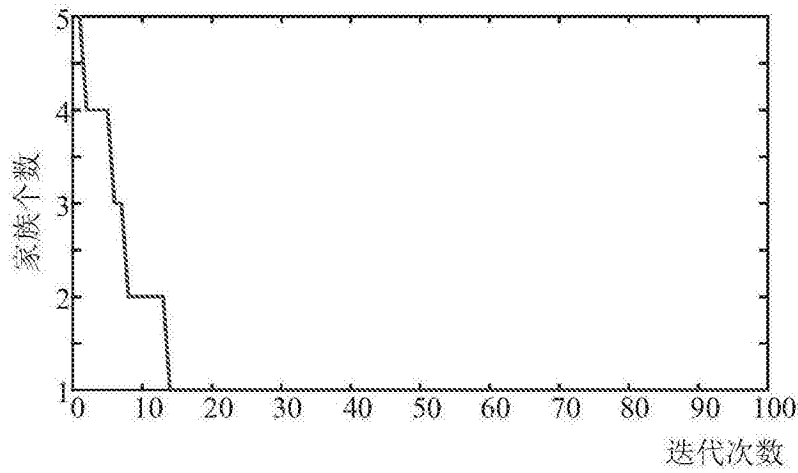


图3

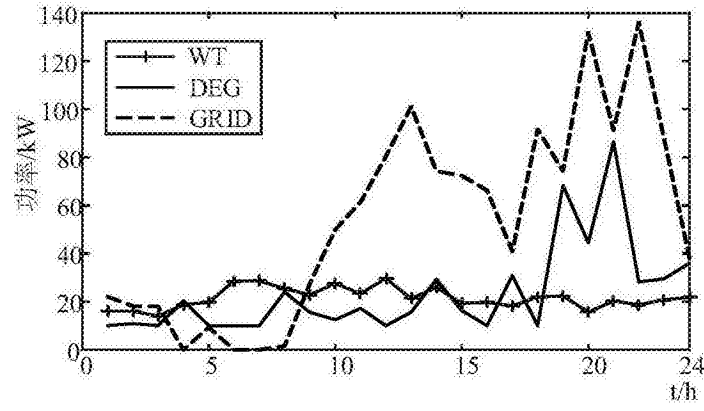


图4

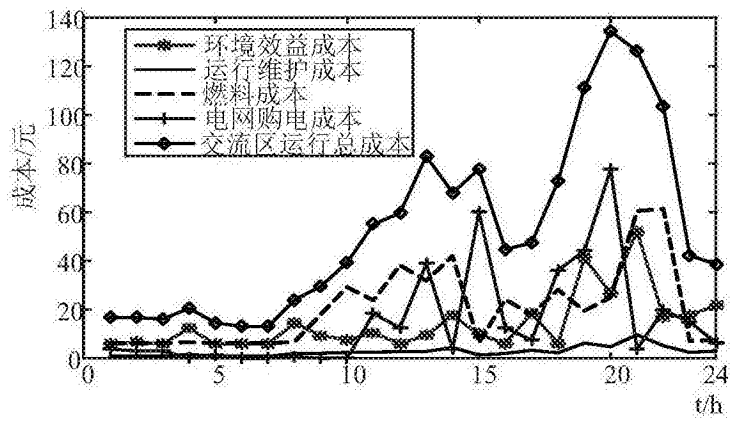


图5

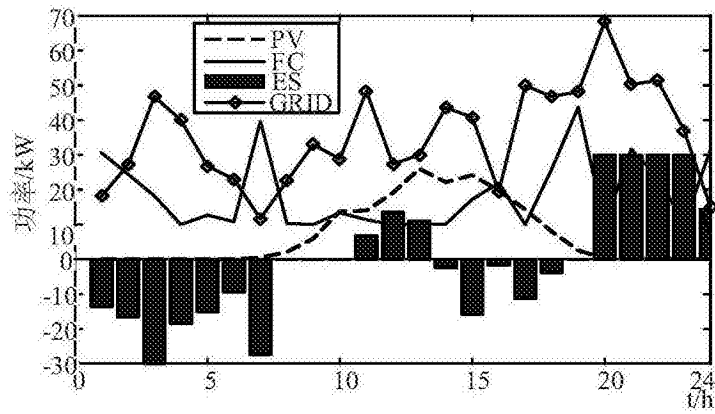


图6

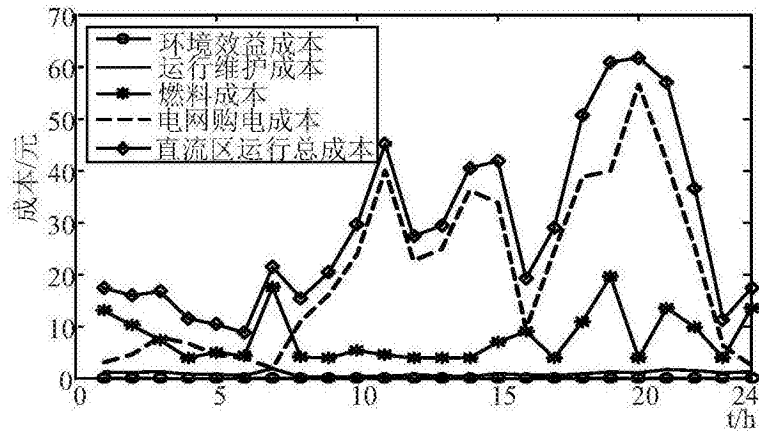


图7

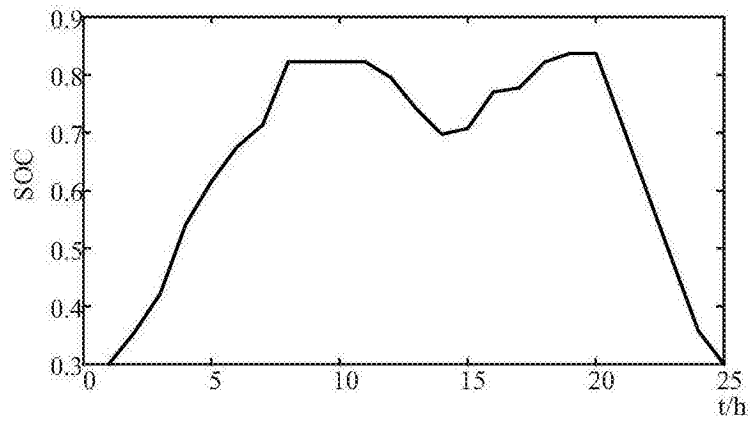


图8

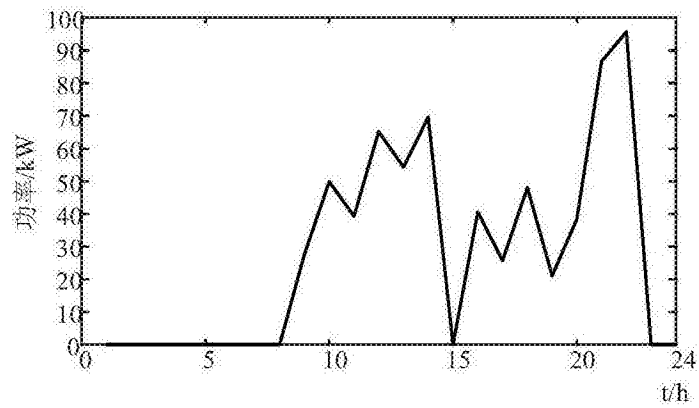


图9

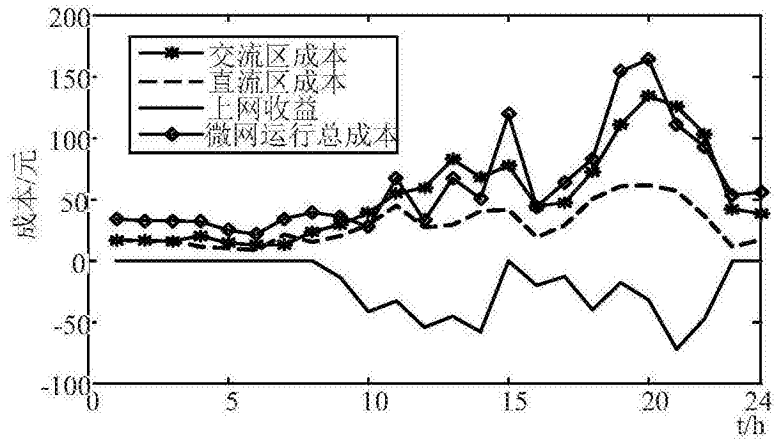


图10