

(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105140971 A

(43) 申请公布日 2015. 12. 09

(21) 申请号 201510595842. 0

(22) 申请日 2015. 09. 17

(71) 申请人 浙江工商大学

地址 310018 浙江省杭州市下沙高教园区学
正街 18 号

(72) 发明人 李静 戴文战 赵忠伟 沈忱

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公
司 33200

代理人 邱启旺

(51) Int. Cl.

H02J 3/46(2006. 01)

H02J 3/00(2006. 01)

权利要求书5页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流
微电网分布式调度方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流微电网分布式调度方法，该方法建立包含换流器潮流约束的交直流混合微电网线性锥最优潮流模型，利用虚拟辅助变量法使交直流混合微电网分解交流微网和直流微网子系统，提出了基于局域重加权 Lagrangian 的分散式协调优化方法，实施全网资源调度的分散式协调优化。该方法使得各子系统可并行同步迭代求解，无需全局协调且邻近子系统间仅需少量的信息交互，本发明方法计算效率较高且收敛特性良好。

1. 一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流微电网分布式调度方法, 其特征在于, 该方法包括以下步骤:

1) 交直流混合微电网中交流支路与直流支路的潮流解耦;

2) 建立交直流混合锥最优潮流模型;

3) 采用基于局域重加权增广 Lagrangian 的分布式优化方法, 将交直流混合微电网分解成 AC 微网和 DC 微网子系统, 求解交直流混合微电网线性锥最优潮流, 实施全网能量调度的分布式协调优化。

2. 根据权利要求 1 所述一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流微电网分布式调度方法, 其特征在于, 步骤 1) 中所述的交直流混合微电网主要由交流 (AC) 微网、直流 (DC) 微网以及 ACDC 换流器组成; 交直流混合微电网中, AC 微网中某交流母线节点 a1 和 DC 微网中某直流母线的节点 b 之间通过换流器连接, 假设 ACDC 换流器本身的运行是完全平衡对称且令 $R = 0$, 即不考虑换流器内部的耗损, 则该换流器支路 (b, a1) 的稳态物理模型潮流, 如下所示:

$$P_s = P_d \quad (1)$$

$$Q_s = Q_d - (P_d^2 + Q_d^2)X/V_{ab}^2 \quad (2)$$

式中, V_{ab} 表示换流器输出电压, $R+jX$ 表示换流器等效电抗, P_s 和 Q_s 分别表示交流系统与换流器之间传输的有功和无功功率, P_d 和 Q_d 分别表示换流器输出的有功和无功功率; 同时 $P_d = V_b I_b$, V_b 表示直流母线电压, I_b 表示直流母线电流; $V_{ab} = kMV_b$ 表示直流母线电压与换流器输出电压的关系且 $k = \sqrt{3}/(2\sqrt{2})$ 为直流电压利用率; M 为调制系数;

换流器采用定直流电压和交流无功功率的控制方式, 在换流器支路 (b, a1) 处将混合微电网潮流分解为 AC 微网与 DC 微网部分; 解耦后, AC 微网中连接换流器的节点 a1 处添加了虚拟辅助有功负载和虚拟辅助无功发电机, 在交直流混合微电网做全网潮流分析时, 有功功率满足公式 (1), 虚拟辅助无功发电机的输出无功恒定且满足公式 (2), DC 微网中连接换流器的节点 b 处电压恒定;

根据换流器支路的潮流解耦方法, 交直流混合微电网, 解耦为 AC 微网为子系统 a, DC 微网为子系统 b, AC 微网与 DC 微网解耦后连接通信线路, 表示在各个子系统微网内部进行优化调度时, 交流部分与直流部分需要交换信息。

3. 根据权利要求 1 所述一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流微电网分布式调度方法, 其特征在于, 步骤 2) 中所述的交直流混合锥最优潮流以电网有功损耗和运行成本最小为目标函数, 即:

$$\text{minimize } f_0 = \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_a \times \Psi_d} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t))R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_a \times \Psi_d} C_j(p_j(t)) \quad (3)$$

式中 T 表示运行优化周期; Ψ_a 和 Ψ_d 分别表示交直流混合微电网中 AC 微网和 DC 微网的支路集; (i, j) 表示配电网中从节点 i (相比于节点 j 距离根节点较近) 指向节点 j 的支路; $C_j()$ 表示节点 j 的电源运行成本函数; $p_j(t)$ 表示节点 j 在 t 时刻注入的有功功率; γ 表示权重因子; R_{ij} 表示支路 (i, j) 的电阻; $w_{ij}(t)$ 和 $l_{ij}(t)$ 分别为定义的两个支路附加变量, 满足以下等式:

$$w_{ij}(t) := 0.5 * (|V_i(t)|^2 + |I_{ij}(t)|^2), l_{ij}(t) := 0.5 * (|V_i(t)|^2 - |I_{ij}(t)|^2) \quad (4)$$

式中, $I_{ij}(t)$ 表示在 t 时刻支路 (i, j) 上流过的电流; $V_i(t)$ 表示在 t 时刻支路 (i, j) 母节点 i 的电压; 符号 $|\cdot|$ 表示求解变量幅值的算子。因此 $(w_{ij}(t) - l_{ij}(t))R_{ij} = |I_{ij}(t)|^2 R_{ij}$, 即为支路 (i, j) 的有功损耗。

步骤 2) 中所述的交直流混合微网最优潮流模型包含 AC 微网线性锥潮流约束、DC 微网线性锥潮流约束、电网安全运行电压水平约束、馈线电流容量约束、机组出力约束、储能设备能量约束及 ACDC 换流器支路潮流约束, 具体如下:

2.1) 所述的 AC 微网线性锥潮流约束包含两部分: 交流支路潮流线性等式约束和潮流二阶锥不等式约束。所述的交流支路潮流线性等式约束表示为:

$$P_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_a} P_{jk}(t) - R_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = p_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (5)$$

$$Q_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_a} Q_{jk}(t) - X_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = q_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (6)$$

$$w_{ij}(t) + l_{ij}(t) - v_j(t) - 2(R_{ij}P_{ij}(t) + X_{ij}Q_{ij}(t)) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = 0, \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (7)$$

$$w_{ij}(t) + l_{ij}(t) = v_i(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (8)$$

式中, Ψ_a 表示交直流混合微电网中 AC 微网的支路集; X_{ij} 表示支路 (i, j) 的电抗; v_i 和 v_j 表示分别表示支路 (i, j) 节点 i 和 j 的电压幅值的平方, 即 $v_i = |V_i(t)|^2$ 和 $v_j = |V_j(t)|^2$; $P_{ij}(t)$ 和 $Q_{ij}(t)$ 分别表示在 t 时刻在支路 (i, j) 母节点 i 端流过该支路的有功功率和无功功率; $p_j(t)$ 和 $q_j(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 注入的净负荷有功功率和无功功率, 其中分布式电源发电功率可看做是负的负载功率, 即

$$\begin{cases} p_j(t) = p_{jD}(t) - p_{jG}(t) - p_{jE}(t) \\ q_j(t) = q_{jD}(t) - q_{jC}(t) - q_{jE}(t) \end{cases}, \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (9)$$

式中, $p_{jD}(t)$ 和 $q_{jD}(t)$ 分别表示在 t 时刻节点 j 处交流负载消耗的有功和无功功率; $p_{jG}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处分布式电源输出的有功功率; $p_{jE}(t)$ 和 $q_{jE}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处柴油机输出的有功和无功功率; $q_{jC}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处无功补偿装置输出的无功功率。

所述的支路潮流二阶锥不等式, 如下所示:

$$\sqrt{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2} \leq w_{ij}(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (10)$$

2.2) 所述的 DC 微网线性锥潮流约束包含两部分: 直流支路潮流线性等式约束和潮流二阶锥不等式约束。所述的直流支路潮流线性等式约束表示为:

$$P_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_d} P_{jk}(t) - R_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = p_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_d, t \in T \quad (11)$$

$$w_{ij}(t) + l_{ij}(t) - v_j(t) - 2R_{ij}P_{ij}(t) + R_{ij}^2(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = 0, \quad \forall (i,j) \in \Psi_d, t \in T \quad (12)$$

$$w_{ij}(t) + l_{ij}(t) = v_i(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_d, t \in T \quad (13)$$

式中, Ψ_d 表示交直流混合微电网中 DC 微网的支路集; v_i 和 v_j 表示分别表示支路 (i, j) 节点 i 和 j 的直流电压的平方, 即 $v_i = |V_i(t)|^2$ 和 $v_j = |V_j(t)|^2$; $P_{ij}(t)$ 分别表示在 t 时

刻在支路 (i, j) 母节点 i 端流过该支路的有功功率 ; $p_j(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 注入的净负荷有功功率, 其中分布式电源发电功率可看做是负的负载功率, 即

$$p_j(t) = p_{jD}(t) - p_{jG}(t) - p_{jB}(t), \quad \forall(i, j) \in \Psi_b, t \in T \quad (14)$$

式中, $p_{jD}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处直流负载消耗的有功功率 ; $p_{jG}(t)$ 在 t 时刻节点 j 处分布式电源注入的有功功率 ; $p_{jB}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处分布式储能作为可控负荷所提供的有功功率。

所述的支路潮流二阶锥不等式, 如下所示 :

$$\sqrt{(P_{ij}(t))^2 + (I_{ij}(t))^2} \leq w_{ij}(t), \quad \forall(i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (15)$$

2.3) 所述的电网安全运行电压水平约束, 表示为 :

$$|V_{a\min}|^2 \leq v_j(t) \leq |V_{a\max}|^2, \quad \forall(i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (16)$$

$$|V_{d\min}|^2 \leq v_j(t) \leq |V_{d\max}|^2, \quad \forall(i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (17)$$

式中, $V_{a\min}$ 和 $V_{a\max}$ 分别为 AC 微网中节点 j 电压的上下限 ; $V_{d\min}$ 和 $V_{d\max}$ 分别为 DC 微网中节点 j 电压的上下限。

2.4) 所述的馈线电流容量约束, 表示为 :

$$w_{ij}(t) - I_{ij}(t) \leq |I_{a\max}|^2, \quad \forall(i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (18)$$

$$w_{ij}(t) - I_{ij}(t) \leq |I_{d\max}|^2, \quad \forall(i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (19)$$

式中, $I_{a\max}$ 和 $I_{d\max}$ 分别表示 AC 微网和 DC 微网中支路允许流过的电流上限。

2.5) 所述的储能设备能量约束, 表示为 :

$$\begin{cases} E_{j\min} \leq E_j(0) + \sum_{\tau=1}^T p_{jB}(\tau) \cdot \Delta t \leq E_{j\max}, & \forall(i, j) \in \Psi_d, t \in T \\ -p_{jBm} \leq p_{jB}(t) \leq p_{jBm} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $E_j(0)$ 表示储能设备优化周期开始时的荷电状态, $E_{j\min}$ 和 $E_{j\max}$ 分别表示第 j 个分布式储能运行时其荷电状态的上下限 ; p_{jBm} 表示储能设备允许的最大充放电功率 ; Δt 表示 t 到 $t+1$ 时刻的时间间隔。

2.6) 所述的机组出力约束, 表示为 :

$$p_{j\min} \leq p_{jE}(t) \leq p_{j\max}, \quad \forall(i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (21)$$

$$-\Delta p_{jd} \leq p_{jE}(t+1) - p_{jE}(t) \leq \Delta p_{ju}, \quad \forall(i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (22)$$

$$q_{j\min} \leq q_{jC}(t) \leq q_{j\max}, \quad \forall(i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (23)$$

式中, $p_{j\min}$ 和 $p_{j\max}$ 分别表示节点 j 处传统柴油机输出的最小和最大有功功率, 若节点 j 处没有柴油机则令 $p_{j\min} = p_{j\max} = 0$; Δp_{ju} 和 Δp_{jd} 分别表示节点 j 处柴油机的上下爬坡速率 ; $q_{j\min}$ 和 $q_{j\max}$ 分别表示节点 j 处无功补偿装置最小和最大输出无功, 同理若节点 j 处没有柴油机则令 $q_{j\min} = q_{j\max} = 0$ 。

2.7) 所述的 ACDC 换流器支路潮流约束, 根据步骤 1) 中所述的潮流解耦, 表示为 :

$$q_i(t) = q_{di}(t), \quad \forall(i, j) \in \Psi_p, t \in T \quad (24)$$

$$p_i(t) = P_{jk}(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_p, (j, k) \in \Psi_d, t \in T \quad (25)$$

式中, Ψ_p 表示交直流混合微电网中连接换流器的支路集; $p_i(t)$ 和 $q_i(t)$ 分别表示 t 时刻连接换流器支路 (i, j) 的 AC 微网 i 节点的虚拟注入有功和无功功率, $P_{jk}(t)$ 表示 t 时刻 DC 微网支路 (j, k) 上的有功功率且 j 节点连接换流器; $q_{di}(t)$ 表示 t 时刻换流器支路 (i, j) 等效的无功发电机输出功率, 根据步骤 1) 所述的换流器控制方式可知其值恒定。

步骤 2) 所建立的交直流混合微电网线性锥最优潮流的优化变量为 $y := (y_{ij}(t), (i, j) \in \Psi, t \in T)$, 其中 $\Psi = \Psi_a \times \Psi_d$ 表示交直流混合微电网中交流支路和直流支路集; 支路变量 $y_{ij}(t) := (P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), q_j(t))$, 交直流混合微电网线性锥最优潮流的可行域为 $D := \{y | y \text{ 满足约束 (5) } \sim (25)\}$ 且可行域 D 是凸集。如公式 (10) 和 (15) 所示, 优化变量 $(P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t))$ 分别构成了四维和三维的二阶锥空间。对于交直流混合微电网, 该问题的最优解 $(\tilde{P}_{ij}(t), \tilde{Q}_{ij}(t), \tilde{l}_{ij}(t), \tilde{w}_{ij}(t))$ 能够满足等式 $(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2 = (w_{ij}(t))^2$ 和 $(P_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2 = (w_{ij}(t))^2$, 交直流混合微电网线性锥支路潮流是原非线性潮流的准确凸松弛。

4. 根据权利要求 1 所述一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流微电网分布式调度方法, 其特征在于, 步骤 3) 中, 若交直流混合微电网中含有 $n (n > 2)$ 个 DC 微网, 定义 E_d 表示换流器支路的直流母线节点集, E_a 表示换流器支路的交流母线节点集。应用步骤 1) 所述的交流和直流潮流解耦方法, 该混合微电网解耦成 $n+1$ 个子系统, 给解耦后的 AC 和 DC 微网子系统之间建立一条通信线路。

定义如下所示变量:

$$y_a := (P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), q_j(t), j \neq E_a, (i, j) \in \Psi_a, t \in T)$$

$$y_d := (P_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), i \neq E_d, (i, j) \in \Psi_d, t \in T)$$

$$z_a := (p_i(t), i = E_a, t \in T)$$

$$z_d := (P_{ij}(t), i = E_d, (i, j) \in \Psi_d, t \in T)$$

则步骤 2) 所述的交直流混合微电网线性锥最优潮流模型描述为交直流可分解的形式, 如下所示:

$$\text{minimize} \quad f_{0a}(y_a) + f_{0b}(y_d) \quad (26a)$$

$$\text{s. t. } (y_a, z_a) \in D_a; (y_d, z_d) \in D_d \quad (26b)$$

$$z_a = z_d \quad (26c)$$

式中 $D_a := \{(y_a, z_a) | (y_a, z_a) \text{ 满足约束 (5) } \sim (10), (16), (18), (21) \sim (23)\}$ 和 $D_d := \{(y_d, z_d) | \text{满足约束 (11) } \sim (15), (17), (19), (20)\}$ 分别表示原问题可行域 D 的子集且满足 $D = D_a \times D_d$; $f_{0a}(y_a)$ 和 $f_{0b}(y_d)$ 分别表示交流子系统 a 和直流子系统 d 的目标函数, 即:

$$f_{0a}(y_a) = \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_a} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_a} C_f(p_j(t)) \quad (27a)$$

$$f_{0d}(y_d) = \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_d} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_d} C_f(p_j(t)) \quad (27b)$$

可见, $f_0 = f_{0a} + f_{0b}$ 。

步骤 3) 所述的局域重加权增广 Lagrangian 函数, 如下所示:

$$L_\rho(\mathbf{y}_a, \mathbf{z}_a, \mathbf{y}_d, \mathbf{z}_d, \lambda) = f_{0a}(\mathbf{y}_a) + f_{0d}(\mathbf{y}_d) + \lambda^T (\mathbf{z}_a - \mathbf{z}_d) + \frac{\rho\sigma}{2} \|\mathbf{z}_a - \mathbf{z}_d\|_2^2 \quad (28)$$

式中 λ 表示问题 (26) 中等式约束 (26c) 对偶变量, $\rho > 0$ 表示惩罚参数, $1 > \sigma > 0$ 表示加权因子。

步骤 3) 所述的基于局域重加权增广 Lagrangian 的分布式优化方法, 包含如下几个步骤 :

3. 1) 初始化 : $k \leftarrow 1$ 和虚拟辅助变量初始值 \mathbf{z}^1 、对偶变量初始值 λ^1 。

3. 2) 分别更新 AC 微网子系统和 DC 微网子系统的变量 $(\mathbf{y}_a^{d+1}, \mathbf{z}_a^{d+1})$, 如下所示 :

$$(\mathbf{y}_a^{k+1}, \hat{\mathbf{z}}_a^k) = \arg \min_{(\mathbf{y}_a, \mathbf{z}_a) \in D_a} L_\rho(\mathbf{y}_a, \mathbf{z}_a, \mathbf{y}_d^k, \mathbf{z}_d^k, \lambda^k) \quad (29a)$$

$$(\mathbf{y}_d^{k+1}, \hat{\mathbf{z}}_d^k) = \arg \min_{(\mathbf{y}_d, \mathbf{z}_d) \in D_d} L_\rho(\mathbf{y}_a^k, \hat{\mathbf{z}}_a^k, \mathbf{y}_d, \mathbf{z}_d, \lambda^k) \quad (29b)$$

$$\mathbf{z}_a^{k+1} = \hat{\mathbf{z}}_a^k + \sigma(\hat{\mathbf{z}}_a^k - \mathbf{z}_a^k) \quad (29c)$$

$$\mathbf{z}_d^{k+1} = \hat{\mathbf{z}}_d^k + \sigma(\hat{\mathbf{z}}_d^k - \mathbf{z}_d^k) \quad (29d)$$

3. 3) 更新对偶变量 λ^{k+1} , 如下所示 :

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \rho\sigma(\hat{\mathbf{z}}_a^{k+1} - \mathbf{z}_d^{k+1}) \quad (29e)$$

3. 4) 计算残差迭代, 如下所示 :

$$\Delta\tau_1 = \max\left(\|\hat{\mathbf{z}}_a^k - \mathbf{z}_a^k\|_\infty, \|\hat{\mathbf{z}}_d^k - \mathbf{z}_d^k\|_\infty\right), \quad \Delta\tau_2 = \|\mathbf{z}_a^k - \mathbf{z}_d^k\|_\infty \quad (29f)$$

3. 5) 判断 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ 是否小于 ϵ (这里 ϵ 的值取 0.00001), 若 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ 不小于 ϵ 则令 $t \leftarrow t+1$ 并跳转到步骤 3. 2) 继续重复执行步骤 3. 2) ~ 步骤 3. 5), 直到 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ 均小于 ϵ , 得到问题的最优解, 从而实现交直流混合微电网调度的分布式协调优化。

5. 根据权利要求 4 所述一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流微电网分布式调度方法, 其特征在于, 各个子系统的更新优化及对偶变量的更新可以并行操作, 即在每次迭代时, AC 微网子系统根据上一次迭代得到的换流器潮流信息 \mathbf{z}_a^k 和 \mathbf{z}_d^k , 求解公式 (29a) 和 (29c) 来更新自身的最优解 $(\mathbf{y}_a^{k+1}, \mathbf{z}_a^{k+1})$, 同理, DC 微网子系统也根据上一次迭代得到的换流器潮流信息 \mathbf{z}_a^k 和 \mathbf{z}_d^k , 求解公式 (29b) 和 (29d) 来更新自身的最优解 $(\mathbf{y}_d^{k+1}, \mathbf{z}_d^{k+1})$, 两个子系统的更新优化可以并行进行, 优化完成后仅需要传输换流器潮流信息即可进行下一次的更新优化。当残差 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ 小于 ϵ , 即可得到使目标函数最优的交直流混合微电网能量调度解。

一种基于重加权加速 Lagrangian 的交直流微电网分布式调度方法

技术领域

[0001] 本发明属于微电网能量优化调度技术领域，尤其涉及一种含风机、太阳能光伏电池、传统柴油机和储能设备的交直流混合微电网分布式自律经济调度方法。

背景技术

[0002] 21世纪末，可再生能源将在世界能源结构中起主导作用。可再生能源的发展同时引起了微电网的发展，微电网可以经济、高效的实现对用户的多样化且高可靠性供电的要求，作为电网的一种有益的补充。由于光伏电池初始产生直流电，且办公和住宅楼宇用电多为直流负荷，将光伏和储能组成直流微电网给直流负荷供电，省略了许多变换环节，提高了电网的经济性和可靠性。因此，结合交流微网和直流微网各自优点的交直流混合微电网开始受到重视。研究交直流混合微电网的优化调度技术，能够在确保系统满足高供电可靠性需求的同时，实现系统运行总成本最小。

[0003] 交直流混合微电网最优潮流问题除了考虑交流母线潮流平衡约束和直流母线的潮流平衡约束外，还包括 AC-DC 变换环节的潮流约束。这些给交直流混合微电网的能量调度问题带来了大量的非线性约束。因此，将混合微电网中交流部分和直流部分解耦，并分别对各个部分的非线性约束进行合理凸松弛，采用分布式协调迭代的方法，对交直流混合微电网调度分布式优化的研究具有重要意义。

发明内容

[0004] 本发明旨在克服现有技术的不足，提供一种面向交直流混合微电网能量经济调度的分布式优化技术，该技术基于局域重加权 Lagrangian 分布式优化方法求解交直流混合微电网最优潮流问题，确保系统在稳定可靠运行基础上实现总运行成本最小。

[0005] 为达到上述目的，本发明采取的技术方案具体包括以下几个步骤：

[0006] 1) 交直流混合微电网中交流支路与直流支路的潮流解耦；

[0007] 步骤 1) 所述的交直流混合微电网主要由交流 (AC) 微网、直流 (DC) 微网以及 ACDC 换流器组成，如图 1 所示例的交直流混合微电网中，1#DC 微网的节点 b 通过 ACDC 换流器与交流微网的节点 a1 相连，2#DC 微网的节点 c 通过 ACDC 换流器与交流微网的节点 a2 相连。

[0008] 所述的 ACDC 换流器支路 (b, a1) 的稳态物理模型如图 2 所示，其中 V_{a1} 表示交流母线电压， V_{ab} 表示换流器输出电压， V_b 表示直流母线电压， I_b 表示直流母线电流， $R+jX$ 表示换流器等效电抗， P_s 和 Q_s 分别表示交流系统与换流器之间传输的有功和无功功率， P_d 和 Q_d 分别表示换流器输出的有功和无功功率。假设 ACDC 换流器本身的运行是完全平衡对称且令 $R = 0$ ，即不考虑换流器内部的耗损，则 ACDC 换流器的潮流方程为：

$$P_s = P_d \quad (1)$$

$$Q_s = Q_d - (P_d^2 + Q_d^2)X/V_{ab}^2 \quad (2)$$

[0011] 式中, $P_d = V_b I_b$ 表示换流器直流母线传输的有功功率; $V_{ab} = kMV_b$ 表示直流母线电压与换流器输出电压的关系且 $k = \sqrt{3}/(2\sqrt{2})$ 为直流电压利用率; M 为调制系数。

[0012] 换流器采用定直流电压和交流无功功率的控制方式,在换流器支路(b, a1)处将混合微电网潮流分解为AC微网与DC微网部分,如图3所示。解耦后, AC微网中连接换流器的节点a1处添加了虚拟辅助有功负载和虚拟辅助无功发电机,在交直流混合微电网做全网潮流分析时,有功功率满足公式(1),虚拟辅助无功发电机的输出无功 q_b 恒定且满足公式(2),DC微网中连接换流器的节点b处电压恒定。

[0013] 根据换流器支路的潮流解耦方法,图1所示的交直流混合微电网,解耦为三部分,AC微网为子系统a,1#DC微网为子系统b,2#DC微网为子系统c,如图4所示,AC微网与DC微网解耦后连接通信线路(如图4中子系统之间的实线),表示在各个子系统微网内部进行优化调度时,交流部分与直流部分需要交换信息。

[0014] 2) 建立交直流混合锥最优潮流模型;

[0015] 步骤2)中所述的交直流混合锥最优潮流以电网有功损耗和运行成本最小为目标函数,即:

$$[0016] \text{minimize } f_0 = \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_a \times \Psi_d} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_a \times \Psi_d} C_j(p_j(t)) \quad (3)$$

[0017] 式中T表示运行优化周期; Ψ_a 和 Ψ_d 分别表示交直流混合微电网中AC微网和DC微网的支路集;(i, j)表示配电网中从节点i(相比于节点j距离根节点较近)指向节点j的支路; $C_j()$ 表示节点j的电源运行成本函数; $p_j(t)$ 表示节点j在t时刻注入的有功功率; γ 表示权重因子; R_{ij} 表示支路(i, j)的电阻; $w_{ij}(t)$ 和 $l_{ij}(t)$ 分别为定义的两个支路附加变量,满足以下等式:

$$[0018] w_{ij}(t) := 0.5 * (|V_i(t)|^2 + |I_{ij}(t)|^2), \quad l_{ij}(t) := 0.5 * (|V_i(t)|^2 - |I_{ij}(t)|^2) \quad (4)$$

[0019] 式中, $I_{ij}(t)$ 表示在t时刻支路(i, j)上流过的电流; $V_i(t)$ 表示在t时刻支路(i, j)母节点i的电压;符号 $|\cdot|$ 表示求解变量幅值的算子。因此 $(w_{ij}(t) - l_{ij}(t))R_{ij} = |I_{ij}(t)|^2 R_{ij}$, 即为支路(i, j)的有功损耗。

[0020] 步骤2)中所述的交直流混合锥最优潮流模型包含AC微网线性锥潮流约束、DC微网线性锥潮流约束、电网安全运行电压水平约束、馈线电流容量约束、机组出力约束、储能设备能量约束及ACDC换流器支路潮流约束,具体如下:

[0021] 2.1) 所述的AC微网线性锥潮流约束包含两部分:交流支路潮流线性等式约束和潮流二阶锥不等式约束。所述的交流支路潮流线性等式约束表示为:

$$[0022] P_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_a} P_{jk}(t) - R_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = p_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (5)$$

$$[0023] Q_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_a} Q_{jk}(t) - X_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = q_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (6)$$

$$[0024] w_{ij}(t) + l_{ij}(t) - v_j(t) - 2(R_{ij}P_{ij}(t) + X_{ij}Q_{ij}(t)) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = 0, \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (7)$$

$$[0025] w_{ij}(t) + l_{ij}(t) = v_i(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (8)$$

式中, Ψ_a 表示交直流混合微电网中AC微网的支路集; X_{ij} 表示支路(i, j)的电抗;

v_i 和 v_j 表示分别表示支路 (i, j) 节点 i 和 j 的电压幅值的平方, 即 $v_i = |V_i(t)|^2$ 和 $v_j = |V_j(t)|^2$; $P_{ij}(t)$ 和 $Q_{ij}(t)$ 分别表示在 t 时刻在支路 (i, j) 母节点 i 端流过该支路的有功功率和无功功率; $p_j(t)$ 和 $q_j(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 注入的净负荷有功功率和无功功率, 其中分布式电源发电功率可看做是负的负载功率, 即

$$\begin{cases} p_j(t) = p_{jd}(t) - p_{jG}(t) - p_{je}(t) \\ q_j(t) = q_{jd}(t) - q_{jc}(t) - q_{je}(t) \end{cases}, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (9)$$

[0027] 式中, $p_{jd}(t)$ 和 $q_{jd}(t)$ 分别表示在 t 时刻节点 j 处交流负载消耗的有功和无功功率; $p_{jG}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处分布式电源输出的有功功率; $p_{je}(t)$ 和 $q_{je}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处柴油机输出的有功和无功功率; $q_{jc}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处无功补偿装置输出的无功功率。

[0028] 所述的支路潮流二阶锥不等式, 如下所示:

$$\sqrt{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2} \leq w_{ij}(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (10)$$

[0030] 2.2) 所述的 DC 微网线性锥潮流约束包含两部分: 直流支路潮流线性等式约束和潮流二阶锥不等式约束。所述的直流支路潮流线性等式约束表示为:

$$P_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_d} P_{jk}(t) - R_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = p_j(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (11)$$

$$w_{ij}(t) + l_{ij}(t) - v_j(t) - 2R_{ij}P_{ij}(t) + R_{ij}^2(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = 0, \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (12)$$

$$w_{ij}(t) + l_{ij}(t) = v_i(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (13)$$

[0034] 式中, Ψ_d 表示交直流混合微电网中 DC 微网的支路集; v_i 和 v_j 表示分别表示支路 (i, j) 节点 i 和 j 的直流电压的平方, 即 $v_i = |V_i(t)|^2$ 和 $v_j = |V_j(t)|^2$; $P_{ij}(t)$ 分别表示在 t 时刻在支路 (i, j) 母节点 i 端流过该支路的有功功率; $p_j(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 注入的净负荷有功功率, 其中分布式电源发电功率可看做是负的负载功率, 即

$$p_j(t) = p_{jd}(t) - p_{jG}(t) - p_{jb}(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_b, t \in T \quad (14)$$

[0036] 式中, $p_{jd}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处直流负载消耗的有功功率; $p_{jG}(t)$ 在 t 时刻节点 j 处分布式电源注入的有功功率; $p_{jb}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处分布式储能作为可控负荷所提供的有功功率。

[0037] 所述的支路潮流二阶锥不等式, 如下所示:

$$\sqrt{(P_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2} \leq w_{ij}(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (15)$$

[0039] 2.3) 所述的电网安全运行电压水平约束, 表示为:

$$|V_{a\min}|^2 \leq v_j(t) \leq |V_{a\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (16)$$

$$|V_{d\min}|^2 \leq v_j(t) \leq |V_{d\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (17)$$

[0042] 式中, $V_{a\min}$ 和 $V_{a\max}$ 分别为 AC 微网中节点 j 电压的上下限; $V_{d\min}$ 和 $V_{d\max}$ 分别为 DC 微网中节点 j 电压的上下限。

[0043] 2.4) 所述的馈线电流容量约束, 表示为:

[0044] $w_{ij}(t) - l_{ij}(t) \leq |I_{a\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (18)$

[0045] $w_{ij}(t) - l_{ij}(t) \leq |I_{d\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (19)$

[0046] 式中, $I_{a\max}$ 和 $I_{d\max}$ 分别表示 AC 微网和 DC 微网中支路允许流过的电流上限。

[0047] 2.5) 所述的储能设备能量约束, 表示为 :

[0048]
$$\begin{cases} E_{j\min} \leq E_j(0) + \sum_{\tau=1}^t p_{jB}(\tau) \cdot \Delta t \leq E_{j\max}, & \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \\ -p_{jBm} \leq p_{jB}(t) \leq p_{jBm} \end{cases} \quad (20)$$

[0049] 式中, $E_j(0)$ 表示储能设备优化周期开始时的荷电状态, $E_{j\min}$ 和 $E_{j\max}$ 分别表示第 j 个分布式储能运行时其荷电状态的上下限; p_{jBm} 表示储能设备允许的最大充放电功率; Δt 表示 t 到 $t+1$ 时刻的时间间隔。

[0050] 2.6) 所述的机组出力约束, 表示为 :

[0051] $p_{j\min} \leq p_{jE}(t) \leq p_{j\max}, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (21)$

[0052] $-\Delta p_{jd} \leq p_{jE}(t+1) - p_{jE}(t) \leq \Delta p_{ju}, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (22)$

[0053] $q_{j\min} \leq q_{jC}(t) \leq q_{j\max}, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (23)$

[0054] 式中, $p_{j\min}$ 和 $p_{j\max}$ 分别表示节点 j 处传统柴油机输出的最小和最大有功功率, 若节点 j 处没有柴油机则令 $p_{j\min} = p_{j\max} = 0$; Δp_{ju} 和 Δp_{jd} 分别表示节点 j 处柴油机的上下爬坡速率; $q_{j\min}$ 和 $q_{j\max}$ 分别表示节点 j 处无功补偿装置最小和最大输出无功, 同理若节点 j 处没有柴油机则令 $q_{j\min} = q_{j\max} = 0$ 。

[0055] 2.7) 所述的 ACDC 换流器支路潮流约束, 根据步骤 1) 中所述的潮流解耦, 表示为 :

[0056] $q_i(t) = q_{di}(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_p, t \in T \quad (24)$

[0057] $p_i(t) = P_{jk}(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_p, (j, k) \in \Psi_d, t \in T \quad (25)$

[0058] 式中, Ψ_p 表示交直流混合微电网中连接换流器的支路集; $p_i(t)$ 和 $q_i(t)$ 分别表示 t 时刻连接换流器支路 (i, j) 的 AC 微网 i 节点的虚拟注入有功和无功功率, $P_{jk}(t)$ 表示 t 时刻 DC 微网支路 (j, k) 上的有功功率且 j 节点连接换流器; $q_{di}(t)$ 表示 t 时刻换流器支路 (i, j) 等效的无功发电机输出功率, 根据步骤 1) 所述的换流器控制方式可知其值恒定。

[0059] 步骤 2) 所建立的交直流混合微电网线性锥最优潮流模型, 不仅考虑了单个时间断面内电力潮流约束、机组出力约束、分布式储能充放电功率和荷电状态运行约束, 还考虑了储能荷电状态跨时间断面间变化的连续性运行要求。

[0060] 步骤 2) 所建立的交直流混合微电网线性锥最优潮流的优化变量为 $y = (y_{ij}(t), (i, j) \in \Psi, t \in T)$, 其中 $\Psi = \Psi_a \times \Psi_d$ 表示交直流混合微电网中交流支路和直流支路集; 支路变量 $y_{ij}(t) := (P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), q_j(t))$, 交直流混合微电网线性锥最优潮流的可行域为 $D = \{y | y \text{ 满足约束 (5) } \sim (25)\}$ 且可行域 D 是凸集。如公式 (10) 和 (15) 所示, 优化变量 $(P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t))$ 分别构成了四维和三维的二阶锥空间。对于交直流混合微电网, 该问题的最优解 $(\hat{P}_{ij}(t), \hat{Q}_{ij}(t), \hat{l}_{ij}(t), \hat{w}_{ij}(t))$ 能够满足等式 $(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2 = (w_{ij}(t))^2$ 和 $(P_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2 = (w_{ij}(t))^2$, 交直流

混合微电网线性锥支路潮流是原非线性潮流的准确凸松弛。

[0061] 3) 采用基于局域重加权增广 Lagrangian 的分布式优化方法, 将交直流混合微电网分解成 AC 微网和 DC 微网子系统, 求解交直流混合微电网线性锥最优潮流, 实施全网能量调度的分布式协调优化。

[0062] 若交直流混合微电网中含有 $n (n > 2)$ 个 DC 微网, 定义 E_d 表示换流器支路的直流母线节点集, E_a 表示换流器支路的交流母线节点集。应用步骤 1) 所述的交流和直流潮流解耦方法, 该混合微电网解耦成 $n+1$ 个子系统, 给解耦后的 AC 和 DC 微网子系统之间建立一条通信线路。

[0063] 定义如下所示变量 :

[0064] $y_a := (P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), q_j(t), j \neq E_a, (i, j) \in \Psi_a, t \in T)$

[0065] $y_d := (P_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), i \neq E_d, (i, j) \in \Psi_d, t \in T)$

[0066] $z_a := (p_i(t), i = E_a, t \in T)$

[0067] $z_d := (P_{ij}(t), i = E_d, (i, j) \in \Psi_d, t \in T)$

[0068] 则步骤 2) 所述的交直流混合微电网线性锥最优潮流模型描述为交直流可分解的形式, 如下所示 :

$$\text{minimize } f_{0a}(y_a) + f_{0b}(y_d) \quad (26a)$$

$$\text{s. t. } (y_a, z_a) \in D_a; (y_d, z_d) \in D_d \quad (26b)$$

$$z_a = z_d \quad (26c)$$

[0072] 式中 $D_a := \{(y_a, z_a) | (y_a, z_a) \text{ 满足约束 (5) } \sim (10), (16), (18), (21) \sim (23)\}$ 和 $D_d := \{(y_d, z_d) | \text{满足约束 (11) } \sim (15), (17), (19), (20)\}$ 分别表示原问题可行域 D 的子集且满足 $D = D_a \times D_d$; $f_{0a}(y_a)$ 和 $f_{0b}(y_d)$ 分别表示交流子系统 a 和直流子系统 d 的目标函数, 即 :

$$f_{0a}(y_a) = \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_a} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_a} C_j(p_j(t)) \quad (27a)$$

$$f_{0d}(y_d) = \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_d} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_d} C_j(p_j(t)) \quad (27b)$$

[0075] 可见, $f_0 = f_{0a} + f_{0b}$ 。

[0076] 步骤 3) 所述的局域重加权增广 Lagrangian 函数, 如下所示 :

$$L_\rho(y_a, z_a, y_d, z_d, \lambda) = f_{0a}(y_a) + f_{0d}(y_d) + \lambda^T (z_a - z_d) + \frac{\rho\sigma}{2} \|z_a - z_d\|_2^2 \quad (28)$$

[0078] 式中 λ 表示问题 (26) 中等式约束 (26c) 对偶变量, $\rho > 0$ 表示惩罚参数, $1 > \sigma > 0$ 表示加权因子。

[0079] 步骤 3) 所述的基于局域重加权增广 Lagrangian 的分布式优化方法, 包含如下几个步骤 :

[0080] 3. 1) 初始化 : $k \leftarrow 1$ 和虚拟辅助变量初始值 z^1 、对偶变量初始值 λ^1 。

[0081] 3. 2) 分别更新 AC 微网子系统和 DC 微网子系统的变量 (y_g^{d+1}, z_g^{d+1}) , 如下所示 :

$$(y_a^{k+1}, z_a^k) = \arg \min_{(y_a, z_a) \in D_a} L_\rho(y_a, z_a, y_d^k, z_d^k, \lambda^k) \quad (29a)$$

[0083] $(y_d^{k+1}, \hat{z}_d^k) = \arg \min_{(y_d, \hat{z}_d) \in D_d} L_\rho(y_a^k, z_a^k, y_d, z_d, \lambda^k)$ (29b)

[0084] $z_a^{k+1} = z_a^k + \sigma(\hat{z}_a^k - z_a^k)$ (29c)

[0085] $z_d^{k+1} = z_d^k + \sigma(\hat{z}_d^k - z_d^k)$ (29d)

[0086] 3.3) 更新对偶变量 λ^{k+1} , 如下所示 :

[0087] $\lambda^{k+1} = \lambda^k + \rho \sigma(\hat{z}_a^{k+1} - z_d^{k+1})$ (29e)

[0088] 3.4) 计算残差迭代, 如下所示 :

[0089] $\Delta \tau_1 = \max\left(\|\hat{z}_a^k - z_a^k\|_\infty, \|\hat{z}_d^k - z_d^k\|_\infty\right), \Delta \tau_2 = \|z_a^k - z_d^k\|_\infty$ (29f)

[0090] 3.5) 判断 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 是否小于 ϵ (这里 ϵ 的值取 0.00001), 若 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 不小于 ϵ 则令 $t \leftarrow t+1$ 并跳转到步骤 3.2) 继续重复执行步骤 3.2) ~ 步骤 3.5), 直到 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 均小于 ϵ , 得到问题的最优解, 从而实现交直流混合微电网调度的分布式协调优化。

[0091] 本发明提出的方法中, 各个子系统的更新优化及对偶变量的更新可以并行操作, 即在每次迭代时, AC 微网子系统根据上一次迭代得到的换流器潮流信息 z_a^k 和 z_d^k , 求解公式 (29a) 和 (29c) 来更新自身的最优解 (y_a^{k+1}, z_a^{k+1}) , 同理, DC 微网子系统也根据上一次迭代得到的换流器潮流信息 z_a^k 和 z_d^k , 求解公式 (29b) 和 (29d) 来更新自身的最优解 (y_d^{k+1}, z_d^{k+1}) , 两个子系统的更新优化可以并行进行, 优化完成后仅需要传输换流器潮流信息即可进行下一次的更新优化。当残差 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 小于 ϵ , 即可得到使目标函数最优的交直流混合微电网能量调度解。

[0092] 本发明的有益效果是 : 本发明方法建立包含换流器潮流约束的交直流混合微电网线性锥最优潮流模型, 利用虚拟辅助变量法使交直流混合微电网分解交流微网和直流微网子系统, 提出了基于局域重加权 Lagrangian 的分散式协调优化方法, 实施全网资源调度的分散式协调优化。该方法使得各子系统可并行同步迭代求解, 无需全局协调且邻近子系统间仅需少量的信息交互, 本发明方法计算效率较高且收敛特性良好。

附图说明

[0093] 图 1 为交直流混合微电网。

[0094] 图 2 为 ACDC 换流器的稳态物理模型。

[0095] 图 3 为换流器支路潮流解耦。

[0096] 图 4 为基于换流器潮流解耦的交直流子系统分解。

[0097] 图 5 为 9 节点交直流混合微电网。

[0098] 具体实施方法

[0099] 为了更清晰直观的表达本发明的思路, 对交直流混合微电网能量调度分布式协调优化过程进行详细说明, 以如图 5 所示交直流混合微电网为例, 该网络中包括柴油机、异步风机、无功补偿装置、光伏电池和蓄电池等, 0 节点为微电网并网的主节点, AC 微网部分的支路集 $\Psi_a := \{(0, 1), (1, 2), (2, 3), (3, 4), (1, 5)\}$, DC 微网部分 $\Psi_b := \{(6, 7), (7, 8)\}$,

支路 (1, 6) 为 ACDC 换流器支路。柴油机出力的最大、最小限制分别为 :6kW、3kW ; 上下爬坡速率分别为 10kW/min、5kW/min ; 无功输出功率的最大、最小限制分别为 :19.7kVar、0.986kVar ; $\Delta t = 15\text{min}$; 蓄电池总容量为 60kWh。

[0100] 交直流混合微电网系统的能量调度分布式协调优化的实施, 包含如下步骤 :

[0101] 1) 利用基于虚拟辅助变量原理, 对连接 ACDC 换流器的支路 (1, 6) 进行交直流潮流解耦。

[0102] 2) 建立交直流混合微电网线性锥最优潮流模型 : 以系统网损和发电成本为目标函数, 约束条件包括 :0 ~ 5 节点 AC 微网的线性锥潮流约束约束、6 ~ 7 节点 DC 微网的线性锥潮流约束约束、电网安全运行电压水平约束、馈线电流容量约束、机组出力约束、储能设备能量约束及 ACDC 换流器支路 (1, 6) 解耦后的潮流约束。

[0103] 3) 采用基于局域重加权增广 Lagrangian 的分布式优化方法, 将交直流混合微电网分解成 AC 微网和 DC 微网子系统, 求解交直流混合微电网线性锥最优潮流, 实施全网能量调度的分布式协调优化。

[0104] 如步骤 1) 所述的交直流潮流解耦, 假设 ACDC 换流器本身的运行是完全平衡对称且令 $R = 0$, 即不考虑换流器内部的耗损, 则 ACDC 换流器支路 (1, 6) 的潮流方程为 :

$$[0105] P_{s1} = P_{d6} \quad (1)$$

$$[0106] Q_{s1} = Q_{d6} - (P_{d6}^2 + Q_{d6}^2)X/V_{ab}^2 \quad (2)$$

[0107] 式中, P_{s1} 和 Q_{s1} 分别表示交流系统与换流器之间传输的有功和无功功率 ; P_{d6} 和 Q_{d6} 分别表示换流器输出的有功和无功功率 ; $P_{d6} = V_{b6}I_{b6}$, V_{b6} 和 I_{b6} 分别表示直流母线节点 6 处的直流电压和电流 ; $V_{ab} = kMV_{b6}$ 表示直流母线电压与换流器输出电压的关系, $k = \sqrt{3}/(2\sqrt{2})$ 为直流电压利用率 ; M 为调制系数。

[0108] 换流器采用定直流电压和交流无功功率的控制方式, 在换流器处将交流微网与直流微网的潮流解耦, 解耦后, AC 微网中连接换流器的节点 1 处添加了虚拟辅助有功负载和虚拟辅助无功发电机, 在交直流混合微电网做全网潮流分析时, 有功功率满足公式 (1), 虚拟辅助无功发电机的输出无功公式 (2), DC 微网中连接换流器的节点 6 处电压恒定。

[0109] 如步骤 2) 所述建立交直流混合锥最优潮流模型 ; 步骤 2) 中所述的交直流混合锥最优潮流以电网有功损耗和运行成本最小为目标函数, 即 :

$$[0110] \underset{\Psi_a \times \Psi_d}{\text{minimize}} \quad f_0 = \sum_{i \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_a \times \Psi_d} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t))R_{ij} + \gamma \sum_{i \in T} \sum_{(i,j) \in \Psi_a \times \Psi_d} C_j(p_j(t)) \quad (3)$$

[0111] 式中 T 表示运行优化周期 ; Ψ_a 和 Ψ_d 分别表示交直流混合微电网中 AC 微网和 DC 微网的支路集 ; Ψ 表示配电网的支路集 ; (i, j) 表示配电网中从节点 i (相比于节点 j 距离根节点较近) 指向节点 j 的支路 ; $C_j()$ 表示节点 j 的发电机成本函数 ; $p_j(t)$ 表示节点 j 的发电机在 t 时刻输出的有功功率 ; γ 表示权重因子 ; R_{ij} 表示支路 (i, j) 的电阻 ; $w_{ij}(t)$ 和 $l_{ij}(t)$ 分别为定义的两个支路附加变量, 满足以下等式 :

$$[0112] w_{ij}(t) := 0.5 * (|V_i(t)|^2 + |I_{ij}(t)|^2), l_{ij}(t) := 0.5 * (|V_i(t)|^2 - |I_{ij}(t)|^2) \quad (4)$$

[0113] 式中, $I_{ij}(t)$ 表示在 t 时刻支路 (i, j) 上流过的电流 ; $V_i(t)$ 表示在 t 时刻支路 (i, j) 母节点 i 的电压 ; 符号 $| \cdot |$ 表示求解变量幅值的算子。因此 $(w_{ij}(t) - l_{ij}(t))R_{ij} = |I_{ij}(t)|^2 R_{ij}$, 即为支路 (i, j) 的有功损耗。

[0114] 建立步骤 2) 中所述的交直流混合锥最优潮流的约束条件 : 包含 AC 微网线性锥潮流约束、DC 微网线性锥潮流约束、电网安全运行电压水平约束、馈线电流容量约束、机组出力约束、储能设备能量约束及 ACDC 换流器解耦后的潮流约束, 具体如下 :

[0115] 建立 2.1) 所述的 AC 微网线性锥潮流约束包含两部分 : 交流支路潮流线性等式约束和潮流二阶锥不等式约束。所述的交流支路潮流线性等式约束表示为 :

$$[0116] P_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_a} P_{jk}(t) - R_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = p_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (5)$$

$$[0117] Q_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_a} Q_{jk}(t) - X_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = q_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (6)$$

$$[0118] w_{ij}(t) + l_{ij}(t) - v_i(t) - 2(R_{ij}P_{ij}(t) + X_{ij}Q_{ij}(t)) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = 0, \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (7)$$

$$[0119] w_{ij}(t) + l_{ij}(t) = v_i(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (8)$$

式中, X_{ij} 表示支路 (i, j) 的电抗; v_i 和 v_j 表示分别表示支路 (i, j) 节点 i 和 j 的电压幅值的平方, 即 $v_i = |V_i(t)|^2$ 和 $v_j = |V_j(t)|^2$; $P_{ij}(t)$ 和 $Q_{ij}(t)$ 分别表示在 t 时刻在支路 (i, j) 母节点 i 端流过该支路的有功功率和无功功率; $p_j(t)$ 和 $q_j(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 注入的净负荷有功功率和无功功率, 其中分布式电源发电功率可看做是负的负载功率, 即

$$[0120] \begin{cases} p_j(t) = p_{jD}(t) - p_{jG}(t) - p_{jE}(t) \\ q_j(t) = q_{jD}(t) - q_{jC}(t) - q_{jE}(t) \end{cases}, \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (9)$$

[0121] 式中, $p_{jD}(t)$ 和 $q_{jD}(t)$ 分别表示在 t 时刻节点 j 处交流负载消耗的有功和无功功率; $p_{jG}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处分布式电源输出的有功功率; $p_{jE}(t)$ 和 $q_{jE}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处柴油机输出的有功和无功功率; $q_{jC}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处无功补偿装置输出的无功功率。

[0122] 所述的支路潮流二阶锥不等式, 如下所示 :

$$[0123] \sqrt{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2} \leq w_{ij}(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_a, t \in T \quad (10)$$

[0124] 建立 2.2) 所述的 DC 微网线性锥潮流约束包含两部分 : 交流支路潮流线性等式约束和潮流二阶锥不等式约束。所述的交流支路潮流线性等式约束表示为 :

$$[0125] P_{ij}(t) - \sum_{k:(j,k) \in \Psi_d} P_{jk}(t) - R_{ij}(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = p_j(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_d, t \in T \quad (11)$$

$$[0126] w_{ij}(t) + l_{ij}(t) - v_i(t) - 2R_{ij}P_{ij}(t) + R_{ij}^2(w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) = 0, \quad \forall (i,j) \in \Psi_d, t \in T \quad (12)$$

$$[0127] w_{ij}(t) + l_{ij}(t) = v_i(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_d, t \in T \quad (13)$$

[0128] 式中, v_i 和 v_j 表示分别表示支路 (i, j) 节点 i 和 j 的直流电压的平方, 即 $v_i = |V_i(t)|^2$ 和 $v_j = |V_j(t)|^2$; $P_{ij}(t)$ 分别表示在 t 时刻在支路 (i, j) 母节点 i 端流过该支路的有功功率; $p_j(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 注入的净负荷有功功率, 其中分布式电源发电功率可看做是负的负载功率, 即

$$[0129] p_j(t) = p_{jD}(t) - p_{jG}(t) - p_{jB}(t), \quad \forall (i,j) \in \Psi_b, t \in T \quad (14)$$

[0130] 式中, $p_{jD}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处直流负载消耗的有功功率; $p_{jG}(t)$ 在 t 时刻节

点 j 处分布式电源注入的有功功率 ; $p_{jb}(t)$ 表示在 t 时刻节点 j 处分布式储能作为可控负荷所提供的有功功率。

[0131] 所述的支路潮流二阶锥不等式, 如下所示 :

$$[0132] \sqrt{(P_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2} \leq w_{ij}(t), \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (15)$$

[0133] 建立 2.3) 所述的电网安全运行电压水平约束, 表示为 :

$$[0134] |V_{a\min}|^2 \leq v_j(t) \leq |V_{a\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (16)$$

$$[0135] |V_{d\min}|^2 \leq v_j(t) \leq |V_{d\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (17)$$

[0136] 式中, $V_{a\min}$ 和 $V_{a\max}$ 分别为 AC 微网中节点 j 电压的上下限 ; $V_{d\min}$ 和 $V_{d\max}$ 分别为 DC 微网中节点 j 电压的上下限。

[0137] 建立 2.4) 所述的馈线电流容量约束, 表示为 :

$$[0138] w_{ij}(t) - l_{ij}(t) \leq |I_{a\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (18)$$

$$[0139] w_{ij}(t) - l_{ij}(t) \leq |I_{d\max}|^2, \quad \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \quad (19)$$

[0140] 式中, $I_{a\max}$ 和 $I_{d\max}$ 分别表示 AC 微网和 DC 微网中支路允许流过的电流上限。

[0141] 建立 2.5) 所述的储能设备能量约束, 表示为 :

$$[0142] \begin{cases} E_{j\min} \leq E_j(0) + \sum_{\tau=1}^t p_{jb}(\tau) \cdot \Delta t \leq E_{j\max}, & \forall (i, j) \in \Psi_d, t \in T \\ -p_{jb\min} \leq p_{jb}(t) \leq p_{jb\max} \end{cases} \quad (20)$$

[0143] 式中, $E_j(0)$ 表示储能设备优化周期开始时的荷电状态, $E_{j\min}$ 和 $E_{j\max}$ 分别表示第 j 个分布式储能运行时其荷电状态的上下限 ; $p_{jb\min}$ 表示储能设备允许的最大充放电功率 ; Δt 表示 t 到 $t+1$ 时刻的时间间隔。

[0144] 建立 2.6) 所述的机组出力约束, 表示为 :

$$[0145] p_{j\min} \leq p_{je}(t) \leq p_{j\max}, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (21)$$

$$[0146] -\Delta p_{jd} \leq p_{je}(t+1) - p_{je}(t) \leq \Delta p_{je}, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (22)$$

$$[0147] q_{j\min} \leq q_{jc}(t) \leq q_{j\max}, \quad \forall (i, j) \in \Psi_a, t \in T \quad (23)$$

[0148] 式中, $p_{j\min}$ 和 $p_{j\max}$ 分别表示节点 j 处传统柴油机输出的最小和最大有功功率, 若节点 j 处没有柴油机则令 $p_{j\min} = p_{j\max} = 0$; Δp_{ju} 和 Δp_{jd} 分别表示节点 j 处柴油机的上下爬坡速率 ; $q_{j\min}$ 和 $q_{j\max}$ 分别表示节点 j 处无功补偿装置最小和最大输出无功, 同理若节点 j 处没有柴油机则令 $q_{j\min} = q_{j\max} = 0$ 。

[0149] 建立 2.7) 所述的 ACDC 换流器潮流约束, 根据步骤 1) 中所述的潮流解耦, 表示为 :

$$[0150] q_1(t) = q_d(t), \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$[0151] p_1(t) = P_{67}(t), \quad \forall t \in T \quad (25)$$

[0152] 式中, $q_d(t)$ 表示 t 时刻换流器支路 (1, 6) 等效的无功发电机输出功率 ; $p_1(t)$ 和 $q_1(t)$ 分别表示 t 时刻 AC 微网 1 节点注入的有功和无功功率 ; $P_{67}(t)$ 表示 t 时刻 DC 微网支路 (6, 7) 上的有功功率。

[0153] 步骤 2) 所建立的交直流混合微电网线性锥最优潮流模型,不仅考虑了单个时间断面内电力潮流约束、机组出力约束、分布式储能充放电功率和荷电状态运行约束,还考虑了储能荷电状态跨时间断面间变化的连续性运行要求。

[0154] 步骤 2) 所建立的交直流混合微电网线性锥最优潮流的优化变量为 $y = (y_{ij}(t), (i, j) \in \Psi, t \in T)$, 其中 $\Psi = \Psi_a \times \Psi_d$ 表示交直流混合微电网中交流支路和直流支路集; 支路变量 $y_{ij}(t) := (P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), q_j(t))$, 交直流混合微电网线性锥最优潮流的可行域为 $D = \{y | y \text{ 满足约束 (5) } \sim (25)\}$ 且可行域 D 是凸集。如公式 (10) 和 (15) 所示, 优化变量 $(P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t))$ 分别构成了四维和三维的二阶锥空间。对于交直流混合微电网, 该问题的最优解 $(\hat{P}_{ij}(t), \hat{Q}_{ij}(t), \hat{l}_{ij}(t), \hat{w}_{ij}(t))$ 能够满足等式 $(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2 = (w_{ij}(t))^2$ 和 $(P_{ij}(t))^2 + (l_{ij}(t))^2 = (w_{ij}(t))^2$, 交直流混合微电网线性锥支路潮流是原非线性潮流的准确凸松弛。

[0155] 步骤 3) 所述的用基于局域重加权增广 Lagrangian 的分布式优化方法, 将交直流混合微电网分解成 AC 微网和 DC 微网子系统, 求解交直流混合微电网线性锥最优潮流, 实施全网能量调度的分布式协调优化。

[0156] 定义如下所示变量:

[0157] $y_a := (P_{ij}(t), Q_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), q_j(t), j \neq 1, (i, j) \in \Psi_a, t \in T)$

[0158] $y_d := (P_{ij}(t), l_{ij}(t), w_{ij}(t), v_j(t), p_j(t), i \neq 6, (i, j) \in \Psi_d, t \in T)$

[0159] $z_a := (p_1(t), t \in T)$

[0160] $z_d := (P_{67}(t), t \in T)$

[0161] 则步骤 2) 所述的交直流混合微电网线性锥最优潮流模型描述为交直流系统可分解的形式, 如下所示:

$$\text{minimize} \quad f_{0a}(y_a) + f_{0b}(y_d) \quad (26a)$$

$$\text{s. t. } (y_a, z_a) \in D_a; (y_d, z_d) \in D_d \quad (26b)$$

$$z_a = z_d. \quad (26c)$$

[0165] 式中 $D_a := \{(y_a, z_a) | (y_a, z_a) \text{ 满足约束 (5) } \sim (10), (16), (18), (21) \sim (23)\}$ 和 $D_d := \{(y_d, z_d) | \text{满足约束 (11) } \sim (15), (17), (19), (20)\}$ 分别表示原问题可行域 D 的子集且满足 $D = D_a \times D_d$; $f_{0a}(y_a)$ 和 $f_{0b}(y_d)$ 分别表示交流子系统 a 和直流子系统 d 的目标函数, 即:

$$f_{0a}(y_a) = \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_a} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_a} C_j(p_j(t)) \quad (27a)$$

$$f_{0d}(y_d) = \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_d} (w_{ij}(t) - l_{ij}(t)) R_{ij} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{(i, j) \in \Psi_d} C_j(p_j(t)) \quad (27b)$$

[0168] 可见, $f_0 = f_{0a} + f_{0b}$ 。

[0169] 建立步骤 3) 所述的局域重加权增广 Lagrangian 函数, 如下所示:

$$L_p(\bar{y}_a, z_a, y_d, z_d, \lambda) = f_{0a}(y_a) + f_{0d}(y_d) + \lambda^T (z_a - z_d) + \frac{\rho\sigma}{2} \|z_a - z_d\|_2^2 \quad (28)$$

[0171] 式中 λ 表示问题 (26) 中等式约束 (26c) 对偶变量, $\rho > 0$ 表示惩罚参数, $1 > \sigma > 0$ 表示加权因子。

[0172] 步骤 3) 所述的基于局域重加权增广 Lagrangian 的分布式优化方法, 包含如下几个步骤 :

[0173] 3. 1) 初始化 : $k \leftarrow 1$ 和虚拟辅助变量初始值 z^1 、对偶变量初始值 λ^1 。

[0174] 3. 2) 分别更新 AC 微网子系统和 DC 微网子系统的变量 (y_a^{k+1}, z_a^{k+1}) , (y_d^{k+1}, z_d^{k+1}) , 如下所示 :

$$[0175] (y_a^{k+1}, \hat{z}_a^k) = \arg \min_{(y_a, z_a) \in D_a} L_\rho(y_a, z_a, y_d^k, z_d^k, \lambda^k) \quad (29a)$$

$$[0176] (y_d^{k+1}, \hat{z}_d^k) = \arg \min_{(y_d, z_d) \in D_d} L_\rho(y_a^k, z_a^k, y_d, z_d, \lambda^k) \quad (29b)$$

$$[0177] z_a^{k+1} = \hat{z}_a^k + \sigma(\hat{z}_a^k - z_a^k) \quad (29c)$$

$$[0178] z_d^{k+1} = \hat{z}_d^k + \sigma(\hat{z}_d^k - z_d^k) \quad (29d)$$

[0179] 3. 3) 更新对偶变量 λ^{k+1} , 如下所示 :

$$[0180] \lambda^{k+1} = \lambda^k + \rho \sigma(z_a^{k+1} - z_d^{k+1}) \quad (29e)$$

[0181] 3. 4) 计算残差迭代, 如下所示 :

$$[0182] \Delta \tau_1 = \max\left(\|z_a^k - \hat{z}_a^k\|_\infty, \|z_d^k - \hat{z}_d^k\|_\infty\right), \quad \Delta \tau_2 = \|z_a^k - z_d^k\|_\infty \quad (29f)$$

[0183] 3. 5) 判断 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 是否小于 ϵ (这里 ϵ 的值取 0.00001), 若 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 不小于 ϵ 则令 $t \leftarrow t+1$ 并跳转到步骤 3. 2) 继续重复执行步骤 3. 2) ~ 步骤 3. 5), 直到 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 均小于 ϵ , 得到问题的最优解, 从而实现交直流混合微电网调度的分布式协调优化。

[0184] 本发明提出的方法中, 各个子系统的更新优化及对偶变量的更新可以并行操作, 即在每次迭代时, AC 微网子系统根据上一次迭代得到的换流器潮流信息 z_a^k 和 z_d^k , 求解公式 (28a) 和 (29c) 来更新自身的最优解 (y_a^{k+1}, z_a^{k+1}) , 同理, DC 微网子系统也根据上一次迭代得到的换流器潮流信息 z_a^k 和 z_d^k , 求解公式 (29b) 和 (29d) 来更新自身的最优解 (y_d^{k+1}, z_d^{k+1}) , 两个子系统的更新优化可以并行进行, 优化完成后仅需要传输换流器潮流信息即可进行下一次的更新优化。当残差 $\Delta \tau_1$ 和 $\Delta \tau_2$ 小于 ϵ , 即可得到使目标函数最优的交直流混合微电网能量调度解。

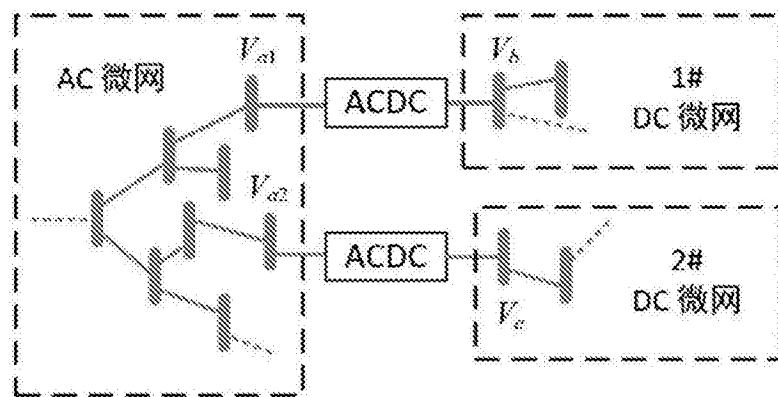


图 1

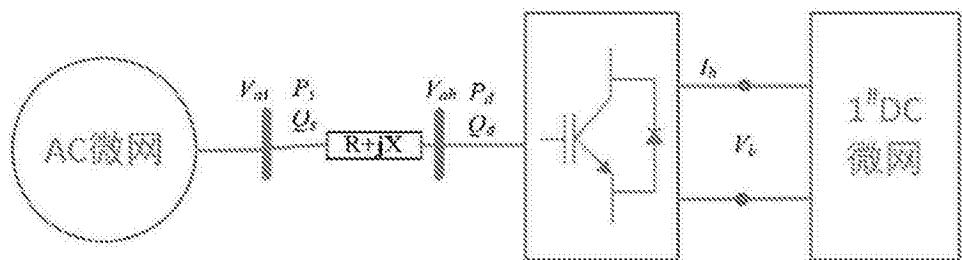


图 2

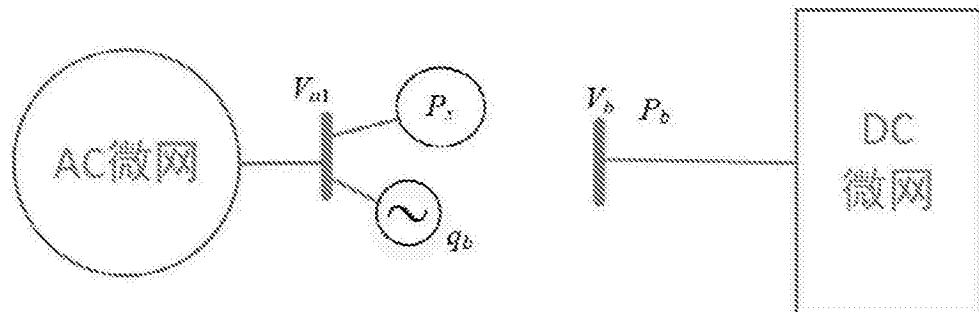


图 3

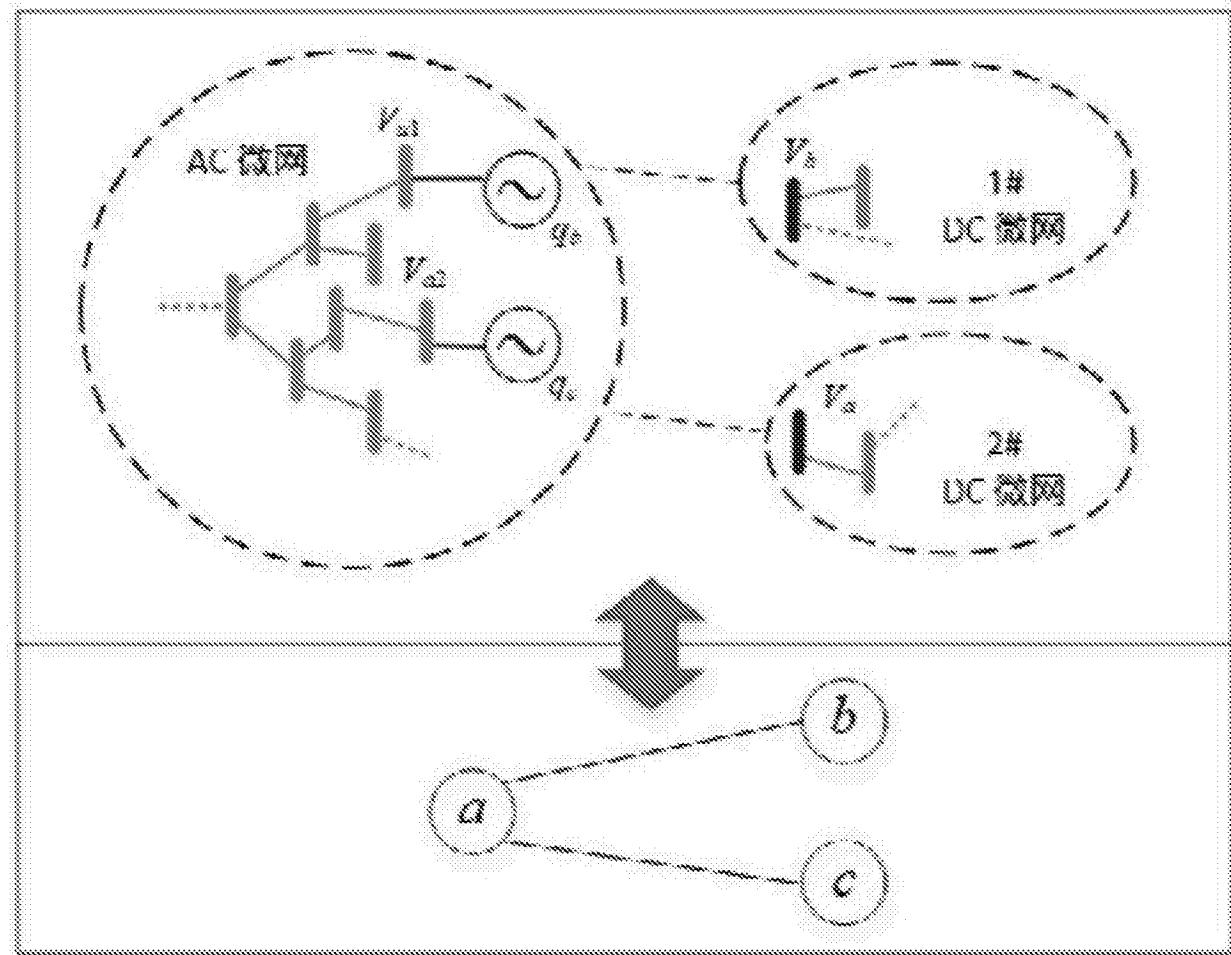


图 4

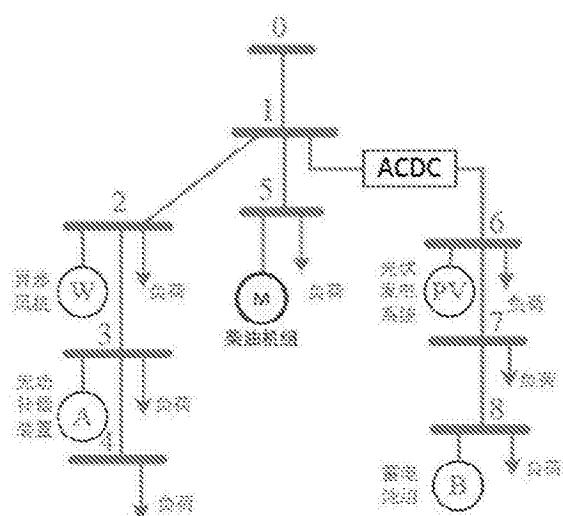


图 5