



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109523060 A

(43)申请公布日 2019.03.26

(21)申请号 201811229820.2

(22)申请日 2018.10.22

(71)申请人 上海交通大学

地址 200030 上海市徐汇区华山路1954号

申请人 国网河北省电力有限公司

(72)发明人 张程铭 柳璐 程浩忠 唐亮

孙辰军 王卓然 辛洁晴

(74)专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限

公司 31225

代理人 翁惠瑜

(51)Int.Cl.

G06Q 10/04(2012.01)

G06Q 10/06(2012.01)

G06Q 50/06(2012.01)

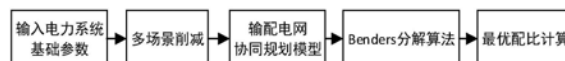
权利要求书3页 说明书15页 附图5页

(54)发明名称

高比例可再生能源在输配电网协同接入下的  
配比优化方法

(57)摘要

本发明涉及一种高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法,包括以下步骤:1)获取基础数据;2)基于所述基础数据进行聚类,获得典型规划场景;3)针对所述典型规划场景,建立输配电网协同规划模型,该输配电网协同规划模型以成本最低为目标,考虑的约束条件包括输配电网独立约束条件和输配电网协同约束条件,决策变量包括输配电网中可再生能源机组投资容量、常规机组发电功率、可再生能源弃能功率和切负荷功率;4)求解所述输配电网协同规划模型获得最优可再生能源投资容量方案;5)基于所述最优可再生能源投资容量方案获得高比例可再生能源在输配电网的最优配比。与现有技术相比,本发明具有准确性高、实用性强、效率高等优点。



1. 一种高比例可再生能源在输电网协同接入下的配比优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 获取基础数据;

2) 基于所述基础数据进行聚类,获得典型规划场景;

3) 针对所述典型规划场景,建立输电网协同规划模型,该输电网协同规划模型以成本最低为目标,考虑的约束条件包括输电网独立约束条件和输电网协同约束条件,决策变量包括输电网中可再生能源机组投资容量、常规机组发电功率、可再生能源弃能功率和切负荷功率;

4) 求解所述输电网协同规划模型获得最优可再生能源投资容量方案;

5) 基于所述最优可再生能源投资容量方案获得高比例可再生能源在输电网的最优配比。

2. 根据权利要求1所述的高比例可再生能源在输电网协同接入下的配比优化方法,其特征在于,所述基础数据包括网架相关数据、机组相关数据、负荷相关数据和风电出力数据。

3. 根据权利要求1所述的高比例可再生能源在输电网协同接入下的配比优化方法,其特征在于,所述步骤2)中,采用谱聚类方法对负荷、可再生能源出力时序数据进行聚类,实现场景削减,获得典型规划场景。

4. 根据权利要求3所述的高比例可再生能源在输电网协同接入下的配比优化方法,其特征在于,所述谱聚类方法具体步骤包括:

201) 根据每个负荷点最高负荷与风电场容量对时序数据标准化处理;

202) 形成相似度矩阵W和度矩阵D,并计算拉普拉斯矩阵L;

203) 通过对L标准化处理得到L',并计算对应的特征值 $\lambda$ 和特征向量 $V_e = \{v_{e1}, v_{e2}, \dots, v_{en}\}$ ,其中:

$$L' = D^{-\frac{1}{2}} L D^{-\frac{1}{2}}$$

204) 取出前k小的特征值所对应的特征向量作为列向量形成向量矩阵 $V_k$ ,通过k-means方法对特征向量聚类得到m个聚类中心 $C = \{x_1^c, x_2^c, \dots, x_m^c\}$ ;

205) 利用概率再分配方法计算各典型规划场景概率,计算式如下:

$$p^{x_i^c} = \sum_{x \in \Omega_i} p^x$$

$$x_i^c \in C, i = 1, 2, \dots, m$$

式中, $p^{x_i^c}$ 为典型规划场景 $x_i^c$ 再分配概率; $p^x$ 为场景x发生的概率; $\Omega_i$ 为第i类场景集合。

5. 根据权利要求1所述的高比例可再生能源在输电网协同接入下的配比优化方法,其特征在于,所述输电网协同规划模型的目标函数表示为:

$$\min F = f_{inv} + f_{tran} + f_{dist}$$

$$f_{inv} = \sum_{i \in T} c_i x_i + \sum_{j \in D} c_j x_j$$

$$f_{tran} = \sum_s (T_s \sum_{i \in T} (c_{q,i} P_{q,i,s} + c_{r,i} P_{rs,i,s} + c_{d,i} P_{d,i,s}))$$

$$f_{dist} = \sum_s (T_s \sum_{i \in D} (c_{q,i} p_{q,i,s} + c_{r,i} p_{rs,i,s} + c_{d,i} p_{d,i,s}))$$

式中,  $f_{inv}$ 、 $f_{tran}$ 和 $f_{dist}$ 分别为输配电网可再生能源机组投资费用、输电网运行费用和配电网运行费用;  $c_i$ 和 $x_i$ 分别表示输电网可再生能源机组*i*的单位容量投资费用和最优投资容量;  $c_j$ 和 $x_j$ 分别表示配电网可再生能源机组*j*的单位容量投资费用和投资容量;  $c_{q,i}$ 和 $p_{q,i,t}$ 分别为常规机组单位发电成本以及最优出力;  $c_{r,i}$ 和 $p_{rs,i,t}$ 为可再生能源机组单位弃能成本和最优弃能功率;  $c_{d,i}$ 和 $p_{d,i,t}$ 分别为负荷节点单位切负荷成本和最优切负荷功率;  $T_s$ 为场景*s*的持续时间;  $T$ 为输电网节点集合;  $D$ 为配电网节点集合。

6. 根据权利要求1所述的高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法, 其特征在于, 所述输配电网协同规划模型的约束条件包括节点功率平衡约束、线路潮流约束、相角约束、可再生能源机组弃能电量约束、切负荷功率约束、燃煤机组出力约束、燃煤机组爬坡约束、微型燃气轮机约束、电压幅值约束、主动断线数量约束、机组投资容量约束、高比例可再生能源发电量占比约束和边界传输功率约束。

7. 根据权利要求1所述的高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法, 其特征在于, 所述步骤4) 中, 利用Benders分解算法将所述输配电网协同规划模型分解为规划层和运行层, 求解获得最优可再生能源投资容量方案, 在规划层中求解获得输配电网分别接入的可再生能源机组容量, 在运行层中求解特定规划方案下的输配电网最优运行方案。

8. 根据权利要求7所述的高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法, 其特征在于, 利用所述Benders分解算法求解最优可再生能源投资容量方案的具体步骤包括:

401) 设定迭代次数 $v=1$ , 初始化目标函数下边界 $F_{down}^{(1)} = -\infty$ , 目标函数上边界 $F_{up}^{(1)} = +\infty$ , 基于规划层可再生能源机组投资容量的可行域给定初始值 $x_{i,t}^{(1)} = x_0$ ;

402) 在运行层中, 利用HGD异质分解算法求解输配电网运行优化子问题, 优化获得运行层决策变量, 并更新第*v*次迭代的目标函数上边界 $F_{up}^{(v)}$ ;

403) 判断当前的目标函数上下边界是否满足如下可行性检验条件:

$$|F_{up}^{(v)} - F_{down}^{(v)}| \leq \eta$$

其中,  $\eta$ 为给定阈值, 若是, 则输出最优可再生能源投资容量方案 $x^*$ , 求解结束, 若否, 则基于Benders最优割对规划层进行修正处理, 执行步骤404);

404) 在规划层中, 求解修正后的规划主问题, 更新目标函数下边界值 $F_{down}^{(v+1)}$ , 设定迭代次数 $v=v+1$ , 返回步骤402)。

9. 根据权利要求8所述的高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法, 其特征在于, 所述步骤402) 中, 求解输配电网运行优化子问题的收敛条件表示为:

$$|pb_t - pb_{t-1}| \leq \varepsilon$$

式中,  $pb_t$ 和 $pb_{t-1}$ 分别为第*t*、*t-1*次迭代的输配电网边界传输功率;  $\varepsilon$ 为收敛阈值。

10. 根据权利要求8所述的高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法, 其特征在于, 所述Benders最优割的形式如下:

$$\gamma \geq \sum_s O_s(y^{(v)}) + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{i \in T \cup D} \rho_s(x_i - x_i^{(v)})$$

$$\rho_s = - \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} \Big|_{(x^{(v)}, y^{(v)})}$$

式中,  $\sum_s O_s(y^{(v)})$  为输配电网协同规划目标函数值;  $\gamma$  为一个连续性决策变量, 代表运行费用的最小值;  $x$  表示规划决策变量,  $y$  表示运行层决策变量;  $\Omega_s$  表示随机场景集合;  $T$  为输电网节点集合;  $D$  为配电网节点集合;  $x^{(v)}$  和  $y^{(v)}$  分别为第  $v$  迭代时求得的最优规划方案 and 最优运行方案变量。

## 高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统规划技术领域,尤其是涉及一种高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法。

### 背景技术

[0002] 日益严重的能源危机和环境污染问题使以传统能源为基础的能源生产和消费方式难以为继,以风能、太阳能为代表的可再生能源正逐步成为人类能源可持续发展的重要选择。预计至2050年,中国总发电量将达15.2万亿千瓦时,其中水电、风电、太阳能等可再生能源发电量将占总发电量的85.8%,高比例可再生能源并网将成为未来电力系统的重要特征。高比例可再生能源的随机性和间歇性给电力系统带来强不确定性,传统输配独立规划以等效方法考虑相互影响,忽略了输配电网之间的双向交互过程,无法体现输配电网各自的灵活调节能力以及相互支撑作用,在高比例可再生能源接入背景下已无法满足系统运行的经济性和灵活性要求。同时,在面对一定容量的可再生能源机组投资时,可同时选择集中式接入和分布式接入,将直接影响输配电网的结构形态和实际运行效果,因此有必要对可再生能源的优化配比进行研究。

[0003] 国内对于高比例可再生能源接入下的输配电网优化规划问题的研究,在文献方面主要有以下成果。张衡、程浩忠等在《电机工程学报》(2018,1-9)上发表的《高比例风电背景下计及N-1安全网络约束的发输电优化规划》利用多场景技术对风电、负荷的不确定性进行建模,在此基础上建立了计及N-1安全网络约束的发输电双层随机规划模型,该模型可同时考虑发电机组的开停机和输电网拓扑结构的改变,同时计及了机组爬坡/下坡速率和备用,并以N-1为纽带连接双层模型。该文关注高比例可再生能源下电源和电网侧的协同优化,对于配电网仍以等效负荷处理,对于实际运行下的电网潮流估计不准确,且无法充分利用配电网灵活调节性能和反向输送潮流的能力。赵昱宣、孙磊等在《电力系统自动化》(2018,42:1-10)上发表的《计及微网作为黑启动电源的电力系统网架重构优化策略》分析了含高比例可再生能源微网作为黑启动电源的优势及其可行性,同时以最大化恢复系统的发电量和最小化微网内的负荷损失量为目标构建计及微网作为黑启动电源的网架重构优化模型,并基于节点重要度和路径恢复时间构建综合路径评价指标以优化待恢复机组的恢复路径。该文献充分利用了微网作为黑启动电源的优势,但是其未考虑在严重故障下对主网的恢复作用以及主网对其限制约束,因此在实际采取该策略时与优化结果存在一定偏差。韩为超、刘俊勇等在《电力建设》(2017,38(4):71-78)发表的《基于目标机会约束规划的储能容量优化配置模型》针对高比例可再生能源的不确定性给主动配电网的电力平衡与灵活性运行带来的影响,提出了一种基于目标机会约束规划的储能容量配置方法,分析了含高比例可再生能源的主动配电网中典型“鸭型净负荷曲线”场景下的电力需求与灵活性需求问题,并由此引入目标机会约束规划方法,建立了考虑电力需求裕度、灵活性需求裕度的目标机会约束规划模型。同样,该文只针对配电网侧,未计及高比例可再生能源下输电网对配电网的支撑作用,实际运行偏差较明显。李海波、鲁宗相等在《电力系统自动化》(2017,41(21):46-54)上

发表的《源荷储一体化的广义灵活电源双层统筹规划》首先基于灵活性供需平衡机理提出了源荷储一体化的广义灵活电源概念,并建立了含资源投资决策和运行模拟校验的双层统筹规划模型,并最终基于最大净收益增量比优化目标设计了两阶段迭代求解优化算法。该文以灵活性为分析指标,对高比例可再生能源下的电源规划做出指导,但其未考虑电网约束,只对源荷两端进行平衡计算,忽略电网侧影响时电源实际运行中若发生输电线路阻塞,则对广义灵活电源投资效果将产生很大影响。对于输配电网协同下的研究,主要集中于输配电网潮流计算和优化调度方面。高明、赵月辉等在《电力系统保护与控制》(2014,42(23):63-68)上发表的《基于网络分区的多适配性输配网协同潮流算法研究》针对传统算法不适用于输配电网一体化潮流计算这一情况,提出输配协同潮流算法。该算法基于输配电网之间的电气连接关系及其各自网络结构特点,对整个网络进行区域划分,建立输配电网边界映射区,处理其失配功率,给出收敛判据。根据配电网部分不同地区的网络结构特征,采用适合的算法对配电网进行分区计算。针对一体化潮流计算时电网中负荷功率被人工置数的情况,给出相应处理方法。陈羽、刘东等在《电力系统保护与控制》(2012,40(5):42-47)上发表的《网格计算环境下输配电网联合潮流计算》在网格计算环境下基于配电网的结构特点对配电线路按空间划分来进行并行化处理,在输配电网的边界进行功率交换与迭代,构造了输配电网联合潮流并行算法。鲁跃峰、刘东等在《华东电力》(2010,38(3):0345-0348)上发表的《全电压序列电网规划中的输配电网联合潮流计算》根据全电压序列规划的需求,提出了在电网规划平台中嵌入输配电网联合潮流计算,其根据实际电网的特点,首先对电网拓扑进行了收缩简化,在此基础上,将规模庞大的输配电网联合潮流分解成输电潮流和一系列小规模配电馈线潮流子问题,并统一了输配电网潮流算法。以上潮流计算方法虽然适用于输配电网协同的情况,但均未考虑高比例可再生能源接入时的迭代求解方法,对于强不确定性和随机性特点均无法处理。同时,丰颖、俞志皓等在《电力系统自动化》(2016,40(12):37-44)上发表的《输配协同的配电网快速感知方法》针对预估的配电网负荷变化计算输电电网的状态,并从配电网根节点处将输电电网进行戴维南等值并辨识等值参数,最后,将戴维南等值后的输电电网接入配电网感知配电网负荷变化后的态势。该方法利用戴维南等值方法根据输电电网拓扑结构对输电电网进行等值计算,在一定程度上等值后的网络可以反映输电电网的一些特性,但是由于其没有计及潮流,因此对于实际的运行考虑不足。叶畅、苗世洪等在《电工技术学报》上发表的《基于改进并行子空间算法的输配两级电网协同优化调度》针对传统输配分离调度可能产生的边界功率不平衡、资源利用不充分等问题,提出一种从全局角度对系统进行优化的输配两级电网协同调度策略。具体地,该文以输配系统整体供电成本最低为目标函数,建立了输配两级电网基础调度模型,并讨论了相应的约束条件。为了降低该模型求解的复杂度,引入改进并行子空间算法对该模型进行标准化处理,进而建立了基于改进并行子空间算法的输配两级电网协同调度通用模型。该模型将输电电网和各配电网作为并行子空间进行学科分析,并在系统层统一完成优化设计,可有效避免优化过程中输配网频繁地进行信息交互。该文同样未考虑高比例可再生能源接入对电力系统优化运行的影响,结果均只对传统确定性下的情况进行考虑。在现有专利中,林振智、赵昱宣等发明人申请的发明专利《一种高比例可再生能源电力系统的骨干网架优化方法》提出了一种高比例可再生能源电力系统的骨干网架优化方法,来考虑高比例可再生能源在电力系统核心骨干网架中的作用和对电力系统的影响。该方法实施流程首先包括电力系统拓扑结构和电气特性参数

的输入,然后分别对负荷节点、光伏、风电节点、常规机组节点计算相对重要度,之后采用改进的熵权-理想解法来求取不同类型节点间的相对重要度,最后采用分阶段骨干网架构建策略,利用蜂群算法结合贪心策略进行求解。王晞、雷斌和张全明发明人申请的发明专利《一种高比例清洁能源接入下的输电网规划方法》通过建立并求解双层规划模型,而得到使上、下两层规划模型相对最优的规划方案。该规划模型上层以待建线路、待建灵活性机组和灵活性资源调用量为变量,以规划总投资、网架灵活性指标为目标函数进行决策,决策结果通过系统导纳矩阵传递给下层规划模型,而下层规划模型通过不同模拟场景的运行检验,以待建灵活性机组容量与灵活性调用量为变量,优化灵活性指标和灵活性机组配置,并通过灵活性资源的调用总量和待建可调机组建设容量返回给上层规划模型,从而影响上层规划模型的可变参数。陈磊、路晓敏等发明人申请的发明专利《一种电源容量配比的优化方法》提供了一种电源容量配比的优化方法,该方法基于电网系统中各类电源和热源的运行特性和约束条件,以系统总化石能源消耗最少为目标,对所述电网系统中各类电源容量配比进行优化。该方法虽然对电源配比进行优化,但是没有考虑电网侧的约束限制,因此仍然存在实际运行的偏差。以上专利均只针对于输电网进行研究,同时不涉及输配电网之间的协同优化,因此无法满足高比例可再生能源接入下的灵活性要求。

## 发明内容

[0004] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法。

[0005] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0006] 一种高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 获取基础数据;

[0008] 2) 基于所述基础数据进行聚类,获得典型规划场景;

[0009] 3) 针对所述典型规划场景,建立输配电网协同规划模型,该输配电网协同规划模型以成本最低为目标,考虑的约束条件包括输配电网独立约束条件和输配电网协同约束条件,决策变量包括输配电网中可再生能源机组投资容量、常规机组发电功率、可再生能源弃能功率和切负荷功率;

[0010] 4) 求解所述输配电网协同规划模型获得最优可再生能源投资容量方案;

[0011] 5) 基于所述最优可再生能源投资容量方案获得高比例可再生能源在输配电网的最优配比。

[0012] 进一步地,所述基础数据包括网架相关数据、机组相关数据、负荷相关数据和风电出力数据。

[0013] 进一步地,所述步骤2)中,采用谱聚类方法对负荷、可再生能源出力时序数据进行聚类,实现场景削减,获得典型规划场景。

[0014] 进一步地,所述谱聚类方法具体步骤包括:

[0015] 201) 根据每个负荷点最高负荷与风电场容量对时序数据标准化处理;

[0016] 202) 形成相似度矩阵W和度矩阵D,并计算拉普拉斯矩阵L;

[0017] 203) 通过对L标准化处理得到L',并计算对应的特征值 $\lambda$ 和特征向量 $V_e = \{v_{e1}, v_{e2}, \dots, v_{en}\}$ ,其中:

$$[0018] \quad L' = D^{-\frac{1}{2}} L D^{-\frac{1}{2}}$$

[0019] 204) 取出前k小的特征值所对应的特征向量作为列向量形成向量矩阵 $V_k$ ,通过k-means方法对特征向量聚类得到m个聚类中心 $C = \{x_1^c, x_2^c, \dots, x_m^c\}$ ;

[0020] 205) 利用概率再分配方法计算各典型规划场景概率,计算式如下:

$$[0021] \quad p^{x_i^c} = \sum_{x \in \Omega_i} p^x$$

$$[0022] \quad x_i^c \in C, i = 1, 2, \dots, m$$

[0023] 式中, $p^{x_i^c}$ 为典型规划场景 $x_i^c$ 再分配概率; $p^x$ 为场景x发生的概率; $\Omega_i$ 为第i类场景集合。

[0024] 进一步地,所述输配电网协同规划模型的目标函数表示为:

$$[0025] \quad \min F = f_{inv} + f_{tran} + f_{dist}$$

$$[0026] \quad f_{inv} = \sum_{i \in T} c_i x_i + \sum_{j \in D} c_j x_j$$

$$[0027] \quad f_{tran} = \sum_s (T_s \sum_{i \in T} (c_{q,i} p_{q,i,s} + c_{r,i} p_{rs,i,s} + c_{d,i} p_{d,i,s}))$$

$$[0028] \quad f_{dist} = \sum_s (T_s \sum_{i \in D} (c_{q,i} p_{q,i,s} + c_{r,i} p_{rs,i,s} + c_{d,i} p_{d,i,s}))$$

[0029] 式中, $f_{inv}$ 、 $f_{tran}$ 和 $f_{dist}$ 分别为输配电网可再生能源机组投资费用、输电网运行费用和配电网运行费用; $c_i$ 和 $x_i$ 分别表示输电网可再生能源机组i的单位容量投资费用和最优投资容量; $c_j$ 和 $x_j$ 分别表示配电网可再生能源机组j的单位容量投资费用和投资容量; $c_{q,i}$ 和 $p_{q,i,t}$ 分别为常规机组单位发电成本以及最优出力; $c_{r,i}$ 和 $p_{rs,i,t}$ 为可再生能源机组单位弃能成本 and 最优弃能功率; $c_{d,i}$ 和 $p_{d,i,t}$ 分别为负荷节点单位切负荷成本和最优切负荷功率; $T_s$ 为场景s的持续时间; $T$ 为输电网节点集合; $D$ 为配电网节点集合。

[0030] 进一步地,所述输配电网协同规划模型的约束条件包括节点功率平衡约束、线路潮流约束、相角约束、可再生能源机组弃能电量约束、切负荷功率约束、燃煤机组出力约束、燃煤机组爬坡约束、微型燃气轮机约束、电压幅值约束、主动断线数量约束、机组投资容量约束、高比例可再生能源发电量占比约束和边界传输功率约束。

[0031] 进一步地,所述步骤4)中,利用Benders分解算法将所述输配电网协同规划模型分解为规划层和运行层,求解获得最优可再生能源投资容量方案,在规划层中求解获得输配电网分别接入的可再生能源机组容量,在运行层中求解特定规划方案下的输配电网最优运行方案。

[0032] 进一步地,利用所述Benders分解算法求解最优可再生能源投资容量方案的具体步骤包括:

[0033] 401) 设定迭代次数 $v = 1$ ,初始化目标函数下边界 $F_{down}^{(1)} = -\infty$ ,目标函数上边界 $F_{up}^{(1)} = +\infty$ ,基于规划层可再生能源机组投资容量的可行域给定初始值 $x_{i,t}^{(1)} = x_0$ ;

[0034] 402) 在运行层中,利用HGD异质分解算法求解输配电网运行优化子问题,优化获得运行层决策变量,并更新第v次迭代的目标函数上边界 $F_{up}^{(v)}$ ;

[0035] 403) 判断当前的目标函数上下边界是否满足如下可行性检验条件:



$$[0036] \quad |F_{up}^{(v)} - F_{down}^{(v)}| \leq \eta$$

[0037] 其中,  $\eta$  为给定阈值, 若是, 则输出最优可再生能源投资容量方案  $x^*$ , 求解结束, 若否, 则基于 Benders 最优割对规划层进行修正处理, 执行步骤 404);

[0038] 404) 在规划层中, 求解修正后的规划主问题, 更新目标函数下边界值  $F_{down}^{(v+1)}$ , 设定迭代次数  $v = v + 1$ , 返回步骤 402)。

[0039] 进一步地, 所述步骤 402) 中, 求解输配电网运行优化子问题的收敛条件表示为:

$$[0040] \quad |pb_t - pb_{t-1}| \leq \varepsilon$$

[0041] 式中,  $pb_t$  和  $pb_{t-1}$  分别为第  $t$ 、 $t-1$  次迭代的输配电网边界传输功率;  $\varepsilon$  为收敛阈值。

[0042] 进一步地, 所述 Benders 最优割的形式如下:

$$[0043] \quad \gamma \geq \sum_s O_s(y^{(v)}) + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{i \in T \cup D} \rho_s(x_i - x_i^{(v)})$$

$$[0044] \quad \rho_s = - \left. \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} \right|_{(x^{(v)}, y^{(v)})}$$

[0045] 式中,  $\sum_s O_s(y^{(v)})$  为输配电网协同规划目标函数值;  $\gamma$  为一个连续性决策变量, 代表运行费用的最小值;  $x$  表示规划决策变量,  $y$  表示运行层决策变量;  $\Omega_s$  表示随机场景集合;  $T$  为输电网节点集合;  $D$  为配电网节点集合;  $x^{(v)}$  和  $y^{(v)}$  分别为第  $v$  迭代时求得的最优规划方案和最优运行方案变量。

[0046] 本发明针对于高比例可再生能源在输配电网协同接入的场景, 研究了一定可再生能源投资容量下的输配电网最优投资容量配比, 该方法可充分考虑输配电网间的相互支撑作用, 通过边界节点处的潮流双向流动可实现各随机场景下的电力互补, 从而达到充分消纳可再生能源以及保证负荷供电的目的。同时, 为结合输配分离实际, 利用异质分解算法和 Benders 分解算法形成双向迭代后得到最优规划方案和最优运行方案。

[0047] 与现有技术相比, 本发明具有以如下有益效果:

[0048] 一、准确性高。输配电网协同规划模型充分考虑了实际当中输配电网之间相连的拓扑结构, 能够实现两者之间的电力互补, 对于各随机规划场景可利用输配电网之间的双向潮流达到充分消纳可再生能源和保障负荷供电的目的, 实现实际电网运行的经济性和灵活性, 与传统输配独立规划方法相比, 更加贴近于实际。

[0049] 二、实用性强。本发明在电源规划之前首先利用基于谱聚类的聚类方法对 8760 小时的随机场景进行聚类, 得到的典型规划场景能够保留原有随机场景的特征, 且通过降维技术可实现快速聚类并保证聚类的高精度, 并且该方法广泛适用于各类数据的削减处理;

[0050] 三、效率高。对于本发明的输配电网协同规划模型, 为避免大规模变量导致的求解速度慢的缺点, 利用 Benders 分解方法可实现规划问题和运行问题的解耦求解, 并通过不断加入最优割和可行割实现快速寻优。同时, HGD 异质分解算法基于 KKT 条件, 通过加入平方惩罚函数可增加优化问题凸性和大大提高收敛速度。

## 附图说明

[0051] 图1为本发明的流程示意图;

[0052] 图2为 Benders 分解法求解最优规划方案流程图;

- [0053] 图3为T6D2输配电系统示意图；  
 [0054] 图4为不同投资容量下的输配电网投资容量配比；  
 [0055] 图5为不同可再生能源占比约束下的输配电网投资容量和最优配比；  
 [0056] 图6为不同最小可再生能源占比下的投资费用和运行费用；  
 [0057] 图7为不同最小占比下的实际运行占比；  
 [0058] 图8为不同负荷系数下的最优配比；  
 [0059] 图9为不同负荷系数和不同方案号下的总发电费用。

### 具体实施方式

[0060] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。本实施例以本发明技术方案为前提进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程，但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0061] 本发明提供一种高比例可再生能源在输配电网协同接入下的配比优化方法，包括：

[0062] 步骤1)，获取基础数据。

[0063] 所述基础数据包括网架相关数据、机组相关数据、负荷相关数据和风电出力数据。其中机组相关数据主要指机组类型、单机容量、装机台数、火电机组煤耗系数、年利用小时数、最小技术出力、调峰速率、每单位容量投资费用等，网架数据包括架设线路导纳参数、线路节点参数，负荷相关数据指年最大负荷、年用电量等，风电出力数据包括全年8760小时的出力数据。

[0064] 步骤2)，基于基础数据进行聚类，获得典型规划场景。

[0065] 该步骤中，利用基于谱聚类的聚类方法对负荷、可再生能源出力时序数据进行聚类，得到典型场景以及对应的场景概率。谱聚类是根据点之间权值进行划分的方法，其特点在于通过降维运算可以保留原始数据信息并加快聚类速度，特别适用于稀疏数据点集合。该方法需求取数据之间的相似矩阵W和度矩阵D，一般可采用基于高斯核函数的全连接方法和邻接权值相加方法分别获得，计算式如下：

$$[0066] \quad w_{ij} = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|_2^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$[0067] \quad d_i = \sum_{j \in \Omega_i^n} w_{ij}$$

[0068] 式中： $w_{ij}$ 为数据点i和j之间的相似系数； $x_i$ 、 $x_j$ 分别表示数据点i和j的值， $\|\cdot\|_2$ 表示欧拉距离； $\sigma$ 为函数宽度参数； $d_i$ 是数据点i的度值； $\Omega_i^n$ 为与数据点i相邻的数据点集合。利用相似矩阵和度矩阵计算拉普拉斯矩阵L如下：

$$[0069] \quad L = D - W$$

[0070] 式中：相似矩阵W为对角元素为零的对称矩阵；度矩阵D为仅有对角元素大于零的稀疏矩阵。

[0071] 基于谱聚类的场景削减方法步骤如下：

[0072] Step1:根据每个负荷点最高负荷与风电场容量对时序数据标准化处理；

[0073] Step2:形成相似度矩阵W和度矩阵D，并计算拉普拉斯矩阵L；

[0074] Step3:通过对L标准化处理得到L',并计算对应的特征值 $\lambda$ 和特征向量 $V_e = \{v_{e1}, v_{e2}, \dots, v_{en}\}$ 。其中:

$$[0075] \quad L' = D^{-\frac{1}{2}} L D^{-\frac{1}{2}}$$

[0076] Step4:取出前k小的特征值所对应的特征向量作为列向量形成向量矩阵 $V_k$ ,通过k-means方法对特征向量聚类得到m个聚类中心 $C = \{x_1^c, x_2^c, \dots, x_m^c\}$ 。该聚类结果即为原数据点聚类结果。此步骤将原来高维的数据降维得到新低维数据,并能保留原数据信息,低维数据点聚类结果与高维数据点相同。

[0077] Step5:利用概率再分配方法计算各典型规划场景概率,计算式如下:

$$[0078] \quad p^{x_i^c} = \sum_{x \in \Omega_i} p^x$$

$$[0079] \quad x_i^c \in C, i = 1, 2, \dots, m$$

[0080] 式中: $p^{x_i^c}$ 为典型规划场景 $x_i^c$ 再分配概率; $p^x$ 为规划场景x发生的概率; $\Omega_i$ 为第i类场景集合。

[0081] 步骤3),针对所述典型规划场景,建立输电网协同规划模型,该输电网协同规划模型以成本最低为目标,考虑的约束条件包括输电网独立约束条件和输电网协同约束条件。该模型中决策变量为输电网中可再生能源机组投资容量、常规机组发电功率、可再生能源弃能功率和切负荷功率。

[0082] 针对一定容量的可再生能源机组,将其分别投入输电网与配电网构成高比例可再生能源系统,考虑的成本输电网的可再生能源机组投资成本、机组运行成本、可再生能源弃能成本以及切负荷成本。目标函数具体表示为:

$$[0083] \quad \min F = f_{inv} + f_{tran} + f_{dist}$$

$$[0084] \quad f_{inv} = \sum_{i \in T} c_i x_i + \sum_{j \in D} c_j x_j$$

$$[0085] \quad f_{tran} = \sum_s (T_s \sum_{i \in T} (c_{q,i} p_{q,i,s} + c_{r,i} p_{rs,i,s} + c_{d,i} p_{d,i,s}))$$

$$[0086] \quad f_{dist} = \sum_s (T_s \sum_{i \in D} (c_{q,i} p_{q,i,s} + c_{r,i} p_{rs,i,s} + c_{d,i} p_{d,i,s}))$$

[0087] 式中, $f_{inv}$ 、 $f_{tran}$ 和 $f_{dist}$ 分别为输电网可再生能源机组投资费用、输电网运行费用和配电网运行费用; $c_i$ 和 $x_i$ 分别表示输电网可再生能源机组i的单位容量投资费用和最优投资容量; $c_j$ 和 $x_j$ 分别表示配电网可再生能源机组j的单位容量投资费用和最优投资容量; $c_{q,i}$ 和 $p_{q,i,s}$ 分别为常规机组单位发电成本以及最优出力; $c_{r,i}$ 和 $p_{rs,i,s}$ 为可再生能源机组单位弃能成本和最优弃能功率; $c_{d,i}$ 和 $p_{d,i,s}$ 分别为负荷节点单位切负荷成本和最优切负荷功率; $T_s$ 为场景s的持续时间; $T$ 为输电网节点集合; $D$ 为配电网节点集合。

[0088] 输电网协同规划模型的约束条件包括节点功率平衡约束、线路潮流约束、相角约束、可再生能源机组弃能电量约束、切负荷功率约束、燃煤机组出力约束、燃煤机组爬坡约束、微型燃气轮机约束、电压幅值约束、主动断线数量约束、机组投资容量约束、高比例可再生能源发电量占比约束和边界传输功率约束。

[0089] (1) 节点功率平衡约束。

$$[0090] \quad \sum_r (p_{r,i,s} - p_{rs,i,s}) + \sum_q p_{q,i,s} + \sum_j f_{j,i,s}$$

$$[0091] \quad - \sum_j f_{i,j,s} = d_i - p_{d,i,s} + p_{b,i,s}, \quad i \in T, s \in \Omega_S$$

$$[0092] \quad \sum_r (p_{r,i,s} - p_{rs,i,s}) + \sum_q p_{q,i,s} + \sum_j f_{j,i,s} - \sum_j f_{i,j,s} + p_{b,i,s} = d_i - p_{d,i,s}, \quad i \in D, s \in \Omega_S$$

[0093] 式中： $p_{r,i,s}$ 为可再生能源最大出力； $f_{j,i,s}$ 为从节点j流向节点i的潮流； $f_{i,j,s}$ 为从节点i流向节点j的潮流； $d_i$ 为节点i的负荷值； $p_{b,i,s}$ 为输配电网， $p_{b,i,s}$ 为边界传输功率； $\Omega_S$ 表示随机场景集合。

[0094] (2) 线路潮流约束。

$$[0095] \quad \begin{cases} f_{i,j,s} = B_{i,j}(\theta_{i,s} - \theta_{j,s}), \forall i, j \in L_T \\ f_{i,j}^{\min} \leq f_{i,j,s} \leq f_{i,j}^{\max}, \forall i, j \in L_T \end{cases}$$

$$[0096] \quad \begin{cases} |f_{i,j,s} - B_{i,j}(\theta_{i,s} - \theta_{j,s})| \leq M(1 - u_{i,j}) \\ u_{i,j} f_{i,j}^{\min} \leq f_{i,j,s} \leq u_{i,j} f_{i,j}^{\max}, \forall i, j \in L_D \end{cases}$$

[0097] 式中： $B_{i,j}$ 为节点i和节点j之间的电纳标么值； $\theta_{i,s}$ 和 $\theta_{j,s}$ 分别为节点i和节点j的电压相角值； $f_{i,j}^{\min}$ 和 $f_{i,j}^{\max}$ 分别为线路潮流最小值和最大值； $u_{i,j}$ 为配电网主动断线决策变量；M为一个很大值，在此采用大M方法进行线性化； $L_D$ 为配电网线路集合； $L_T$ 为输网线路集合。

[0098] (3) 相角约束。

$$[0099] \quad \begin{cases} \theta_{ref,i} = 0, \quad i \in T \cup D \\ \theta_i^{\min} \leq \theta_{i,s} \leq \theta_i^{\max}, \quad s \in \Omega_S \end{cases}$$

[0100] 式中： $\theta_{ref,i}$ 为平衡相角； $\theta_i^{\min}$ 为电压相角最小值约束； $\theta_i^{\max}$ 为电压相角最大值约束。

[0101] (4) 可再生能源机组弃能电量约束。

$$[0102] \quad 0 \leq \sum_s T_s p_{rs,i,s} + \sum_s T_s x_i p_{rs,i,s} \leq \Delta E, \quad \forall i \in T \cup D, \quad s \in \Omega_S$$

[0103] 式中： $\Delta E$ 为输配电系统最大弃能电量，其中包括已建和待建可再生能源机组的弃能电量约束。

[0104] (5) 切负荷功率约束。

$$[0105] \quad 0 \leq p_{d,i,t} \leq p_{d,i,t}, \quad \forall i \in T \cup D, \quad t \in TL$$

[0106] (6) 燃煤机组出力约束。

$$[0107] \quad p_{q,i,t}^{\min} u_{q,i,t} \leq p_{q,i,t} \leq p_{q,i,t}^{\max} u_{q,i,t}, \quad \forall q, i \in T$$

[0108] 式中： $u_{q,i,t}$ 为燃煤机组启停指示变量； $p_{q,i,t}^{\min}$ 和 $p_{q,i,t}^{\max}$ 分别为常规机组的出力最小值和最大值。

[0109] (7) 燃煤机组爬坡约束。

$$[0110] \quad -r_{di} \Delta T \leq p_{q,i,t} - p_{q,i,t-1} \leq r_{ui} \Delta T, \quad \forall q, i \in T$$

[0111] 式中： $r_{di}$ 为下坡速率值； $r_{ui}$ 为爬坡速率值； $\Delta T$ 为相邻时刻的时间间隔。

[0112] (8) 微型燃气轮机约束。

$$[0113] \quad p_{q,i,t}^{\min} \leq p_{q,i,t} \leq p_{q,i,t}^{\max}, \forall q, i \in D$$

[0114] 式中： $p_{q,i,t}$ 为微型燃气轮机的出力值； $p_{q,i,t}^{\min}$ 和 $p_{q,i,t}^{\max}$ 为微型燃气轮机的出力最小和最大值。

[0115] (9) 电压幅值约束。

$$[0116] \quad \begin{cases} \mathbf{V}_N = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}_N + \mathbf{F}\boldsymbol{\theta}_M + \mathbf{b} \\ \mathbf{V}_{\min} \leq \mathbf{V}_N \leq \mathbf{V}_{\max} \end{cases}$$

$$[0117] \quad \begin{cases} \mathbf{C} + j\mathbf{D} = 2(\mathbf{Y}_{NN} + [\mathbf{S}_N^*])^{-1}[\mathbf{S}_N^*] \\ \mathbf{E} + j\mathbf{F} = (\mathbf{Y}_{NN} + [\mathbf{S}_N^*])^{-1}\mathbf{Y}_{NM}[\mathbf{V}_M] \end{cases}$$

$$[0118] \quad \begin{cases} H_{ii} = -D_{ii} + \sum_{k=1}^n D_{ik} - \sum_{k=1}^m F_{ik} \\ H_{ik} = -D_{ik} \\ b_i = \sum_{k=1}^n C_{ik} - \sum_{k=1}^m E_{ik} \end{cases}$$

[0119] 式中： $\mathbf{V}_N$ 和 $\boldsymbol{\theta}_N$ 分别为PQ节点电压幅值和相角向量； $\boldsymbol{\theta}_M$ 为PV节点和平衡节点共同构成的电压相角向量， $\boldsymbol{\theta}_M = [\theta_{PV} \theta_{ref}]$ ； $\mathbf{V}_{\max}$ 和 $\mathbf{V}_{\min}$ 分别为PQ节点电压上下限值向量； $\mathbf{Y}_{NN}$ 为PQ节点内部导纳矩阵； $\mathbf{S}_N^*$ 为PQ节点形成的复功率矩阵； $\mathbf{Y}_{NM}$ 为PQ节点与PV节点、平衡节点相关的导纳元素矩阵； $\mathbf{V}_M$ 为PV节点和平衡节点构成的电压幅值向量； $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$ 均为常系数矩阵，与导纳矩阵、PQ节点复功率直接相关，其中 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{b}$ 计算方法如上式， $\mathbf{H}$ 由矩阵 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{F}$ 计算获得， $\mathbf{b}$ 矩阵 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{E}$ 计算获得； $n$ 为PQ节点个数； $m$ 为PV节点和PQ节点个数之和。

[0120] (10) 主动断线数量约束。

$$[0121] \quad \sum_{i,j} (1 - u_{i,j,s}) \leq \psi_n, \quad i, j \in L_D$$

[0122] 式中： $\psi_n$ 为主动断线最大数量； $u_{i,j,s}$ 表示第 $s$ 个场景下支路 $ij$ 的开断状态。

[0123] (11) 机组投资容量约束。

$$[0124] \quad \begin{cases} 0 \leq x_k \leq x_k^{\max}, k \in T \cup D \\ \sum_i x_i + \sum_j x_j = C_r, i \in T, j \in D \end{cases}$$

[0125] 式中： $x_k^{\max}$ 为电源容量最大值； $C_r$ 表示投资总容量。

[0126] (12) 高比例可再生能源发电量占比约束。

$$[0127] \quad \frac{\sum_t \sum_{i \in R^E} \tau_{r,i,t} (p_{r,i,t} - p_{rs,i,t}) + \sum_t \sum_{i \in R^{NE}} \tau'_{r,i,t} x_i (p_{r,i,t} - p_{rs,i,t})}{\sum_t \sum_{i \in R^E} \tau_{r,i,t} (p_{r,i,t} - p_{rs,i,t}) + \sum_t \sum_{i \in R^{NE}} \tau'_{r,i,t} x_i (p_{r,i,t} - p_{rs,i,t}) + \sum_i \sum_{\forall q} \tau_{q,i,t} p_{q,i}} \geq \delta$$

[0128] 式中： $\tau_{r,i}$ 为已建可再生能源机组 $t$ 时间段的持续时间； $\tau'_{r,i,t}$ 为待建可再生能源机组 $t$ 时间段的持续时间； $\tau_{q,i,t}$ 为常规机组在 $t$ 时间段的持续时间； $\delta$ 为可再生能源发电量占比最小值。

[0129] 若令 $x_i p_{rs,i,t} = p_{rs,i,t}^z$ ，则上述约束条件可以化成如下组合约束式：

$$[0130] \quad \frac{\sum_t \sum_{i \in R^E} \tau_{r,i,t} (p_{r,i,t} - p_{rs,i,t}) + \sum_t \sum_{i \in R^{NE}} \tau'_{r,i,t} x_i p_{r,i,t} - p_{rs,i,t}^z}{\sum_t \sum_{i \in R^E} \tau_{r,i,t} (p_{r,i,t} - p_{rs,i,t}) + \sum_t \sum_{i \in R^{NE}} \tau'_{r,i,t} x_i p_{r,i,t} - p_{rs,i,t}^z + \sum_i \sum_{\forall q} \tau_{q,i,t} p_{q,i}} \geq \delta$$

$$[0131] \quad 0 \leq p_{rs,i,t}^z \leq x_i^{\max} p_{r,i,t}$$

[0132] (13) 边界传输功率约束。

$$[0133] \quad \begin{cases} pb_{i,j} = b_{i,j} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \\ pb_{\min} \leq pb_{i,j} \leq pb_{\max} \\ i \in T, j \in D, t \in TL \end{cases}$$

[0134] 式中： $pb_{\min}$ 和 $pb_{\max}$ 分别代表输配电网边界传输功率最小值和最大值； $b_{i,j}$ 为输配电网边界节点*i*和*j*之间的电纳值。

[0135] 上述输配电网协同规划模型基于直流潮流方法，约束条件分为输配电网独立约束和输配电网协同约束条件，其中独立约束条件中除传统潮流约束外，还计及弃能约束和配电网电压约束，以减少可再生能源弃能和防止电压越限严重事故的发生；对于输配电网协同约束，主要通过输配边界处的变电站功率耦合连接，必须满足协同条件下的边界传输功率潮流约束。

[0136] 输配电网协同规划模型以投入输配电网的可再生能源机组容量为决策变量，在满足一定总投资容量限制条件下，通过优化规划得到最优配比。除此之外，为使输配电系统在实际运行时满足高比例可再生能源接入的前提条件，在协同约束条件中加入输配电网可再生能源占比约束。

[0137] 步骤4)，求解所述输配电网协同规划模型获得最优可再生能源投资容量方案。

[0138] 在该步骤中，利用Benders分解算法将所述输配电网协同规划模型分解为规划层和运行层，求解获得最优可再生能源投资容量方案，在规划层中求解获得输配电网分别接入的可再生能源机组容量，在运行层中求解特定规划方案下的输配电网最优运行方案。

[0139] 为充分保护输配电网各自网架参数等隐私信息，将运行优化子问题分解为输电网子问题和配电网子问题，两者之间通过交换信息迭代至收敛。

[0140] (1) 输电网子问题：

$$[0141] \quad \min f_{\text{tran}}(x_T)$$

$$[0142] \quad \text{s. t. } h(x_T, x_B, x_D) = 0$$

$$[0143] \quad h(x_T) = 0$$

$$[0144] \quad g(x_T) \leq 0$$

$$[0145] \quad x_B = \hat{x}_B^{(v)}$$

[0146] 该子问题中目标函数对应输电网综合运行成本，约束条件分别包含输配电网耦合约束条件和输电网内部约束条件。 $x_T$ 表示输电网变量， $x_D$ 表示配电网变量， $x_B = \hat{x}_B^{(v)}$ 表示在求解第*v*次迭代的输电网子问题时，需将第*v*次迭代的边界传输功率变量 $\hat{x}_B^{(v)}$ 代入模型，则此时输电网子问题只是关于其内部优化变量 $x_T$ 的优化问题。

[0147] (2) 配电网子问题：

$$[0148] \quad \min f_{\text{dist}}(x_D) + \hat{\lambda}^{(v)} x_B$$

[0149]  $s.t. h(x_D, x_B, x_T) = 0$

[0150]  $h(x_D) = 0$

[0151]  $g(x_D) \leq 0$

[0152]  $g(x_B) \leq 0$

[0153] 该子问题中目标函数包括配电网综合运行成本以及配电网购电费用,其中 $\hat{\lambda}^{(v)}$ 表示输电网传递给配电网的最优拉格朗日乘子,其物理意义为不同场景下的节点电价。约束条件也包括输配电网耦合约束条件和配电网内部约束条件。与前述同理,此时配电网子问题只是关于其内部优化变量 $x_D$ 的优化问题。

[0154] (3) Benders分解法求解规划方案:

[0155] Step1:初始化。

[0156] 设定迭代次数 $v = 1$ ,系统目标函数下边界 $F_{down}^{(1)} = -\infty$ ,系统目标函数上边界 $F_{up}^{(1)} = +\infty$ ,基于规划层可再生能源机组投资容量的可行域给定初始值 $x_{i,t}^{(1)} = x_0$ 。

[0157] Step2:输配电网运行优化子问题求解。

$$[0158] \begin{cases} \min F(x, y) \\ s.t. b(y) \leq 0 \\ d(x, y) \leq 0 \\ x = x^{(v)} : \alpha^{(v)} \end{cases}$$

[0159] 式中: $x$ 表示规划决策变量, $y$ 表示运行层决策变量。

[0160] 求解输配电网优化运行子问题时,目标函数和运行约束中可再生能源机组投资容量已确定,优化仅与运行层决策变量相关,调用异质分解算法进行求解,在此设定算法收敛条件为前后两次迭代的边界传输功率差值小于给定阈值。最终更新第 $v$ 次迭代的目标函数上边界 $F_{up}^{(v)} = F(x^{(v)}, y^{(v)})$ , $x^{(v)}$ 和 $y^{(v)}$ 分别为第 $v$ 迭代时求得的最优规划方案和最优运行方案变量。其中, $\alpha^{(v)}$ 表示第 $v$ 次迭代时输配电网耦合约束所对应的对偶乘子。

[0161]  $|pb_t - pb_{t-1}| \leq \varepsilon$

[0162] 式中: $\varepsilon$ 为输配电网边界传输功率收敛阈值。

[0163] Step3:解的可行性检验。

[0164] 在完成输配电网子问题求解之后,需要检验解的可行性。判断子问题所求得的目标函数上边界 $F_{up}^{(v)}$ 和规划主问题得出的目标函数下边界 $F_{down}^{(v)}$ 公差是否小于给定阈值 $\eta$ ,解的可行性检验条件如下:

[0165]  $|F_{up}^{(v)} - F_{down}^{(v)}| \leq \eta$

[0166] 若结果满足解的可行性检验条件,则输出最优规划方案 $x^*$ ,无需产生Benders割。若最终结果不满足可行性检验条件,则需要由输配电网子问题返回Benders割进行修正。由于本发明所提模型中可以同时进行切负荷以及弃能,因此优化模型必定有解存在且目标函数有界,因此只需引入最优割与对上层规划问题进行修正。Benders最优割形式如下:

[0167] 
$$\gamma \geq \sum_s O_s(y^{(v)}) + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{i \in T \cup D} \rho_s(x_i - x_i^{(v)})$$

$$[0168] \quad \rho_s = -\frac{\partial F(x, y)}{\partial x} \Big|_{(x^{(v)}, y^{(v)})}$$

[0169] 式中： $\sum_s O_s(y^{(v)})$ 为输电网协同规划目标函数值； $\gamma$ 为一个连续性决策变量，代表运行费用的最小值。

[0170] 求解添加运行层返回Benders割后的规划主问题，更新目标函数下边界值  $F_{down}^{(v+1)} = cx + \gamma$ 和迭代次数  $v = v + 1$ 。

$$[0171] \quad \begin{cases} \min & cx + \gamma \\ s.t. & \gamma \geq \sum_s O_s(y^{(v)}) + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{i \in TUD} \rho_s (x_i - x_i^{(v)}) \\ & a(x) \leq 0 \end{cases}$$

[0172] 式中： $a(x) \leq 0$ 表示规划主问题约束； $c$ 表示机组投资成本向量。

[0173] 利用Benders分解方法求解最优可再生能源机组投资问题，可将原始问题分解为规划主问题和输电网优化运行子问题，通过反复迭代求解，不断修正目标函数上边界  $F_{up}^{(v)}$ 和下边界  $F_{down}^{(v)}$ 直到满足收敛条件。

[0174] 基于Benders分解法和HGD异质分解算法的输电网协同规划模型求解过程如图2所示。

[0175] 上述模型求解过程中，为实现输电网优化问题的分解计算，首先利用Benders分解算法将规划问题分解为规划层和运行层，其中运行层利用HGD异质分解算法实现输电网的分布式优化，两者之间仅需交换边界节点的状态变量、传输功率、最优拉格朗日乘子和拉格朗日函数梯度，可充分保护输电网的数据私密性。同时，通过运行层向规划层反馈的最优割约束，可在保证高效求解速度的基础上得到最优解。

[0176] 步骤5)，基于所述最优可再生能源投资容量方案获得高比例可再生能源在输电网的最优配比。

[0177] 输电网可再生能源配比定义为可再生能源机组分别在输电网和配电网的投资容量比值：

$$[0178] \quad \lambda = \frac{\sum_{i \in T} x_i}{\sum_{j \in D} x_j}$$

$$[0179] \quad \bar{\lambda} = \frac{\int_{\lambda=1}^{+\infty} \lambda d\lambda}{\int_{\lambda=0}^1 \lambda d\lambda}$$

[0180] 式中： $\lambda$ 为输电网可再生能源机组在不同投资总容量下的投资配比； $\bar{\lambda}$ 为输电网平均投资配比； $\sum_{i \in T} x_i$ 为输电网投资总容量； $\sum_{j \in D} x_j$ 为配电网投资总容量。

[0181] 实施例

[0182] 为了验证所提输配协同规划模型和分解算法的有效性，本实施例采用改进的T6D2



算例系统进行分析说明。算例示意如图3所示,可看出其由1个输电系统和2个配电系统组成,接入节点分别为3和4。为获得规划典型场景,在此将输配电系统与西北某地区3个区域相对应,以实际的各区域总负荷与风电场出力数据构成全年8760时序数据,并采用谱聚类方法得到10个典型场景作为随机规划场景,各场景负荷数据和风机出力数据分别见表1和2所示。假定在未来规划水平年,输配电系统总负荷值增加至250MW,为考虑负荷预测的不确定性,在此加入负荷系数以研究不同负荷条件下的输配电系统最优投资容量配比。同时,本模型考虑在总投资一定的情况下计算最优配比,因此需要研究不同投资总容量对优化配比的影响。为形成高比例可再生能源系统,在约束条件中加入了高比例可再生能源发电量占比的约束条件,但最小占比值将会影响最优配比的计算结果,故在此考虑不同最小发电量占比下的最优配比情况。

[0183] 表1各地区负荷典型场景

[0184]

场景	负荷标么值			时间(h)
	I(输电网)	II(配电网1)	III(配电网2)	
1	0.680	0.724	0.778	884
2	0.747	0.746	0.784	407
3	0.774	0.745	0.763	359
4	0.645	0.681	0.738	1574
5	0.723	0.731	0.769	875
6	0.686	0.692	0.730	452
7	0.700	0.702	0.754	730
8	0.772	0.795	0.847	1931
9	0.749	0.748	0.799	842
10	0.748	0.731	0.763	706

[0185] 表2各地区风机出力典型场景

[0186]

场景	风机出力标么值			时间(h)
	I(输电网)	II(配电网1)	III(配电网2)	
1	0.610	0.163	0.089	884
2	0.328	0.271	0.207	407
3	0.213	0.389	0.773	359
4	0.091	0.094	0.077	1574
5	0.141	0.597	0.129	875
6	0.516	0.730	0.433	452
7	0.127	0.166	0.571	730
8	0.071	0.075	0.060	1931
9	0.267	0.108	0.270	842
10	0.226	0.261	0.124	706

[0187]

1	0.610	0.163	0.089	884
2	0.328	0.271	0.207	407
3	0.213	0.389	0.773	359
4	0.091	0.094	0.077	1574
5	0.141	0.597	0.129	875
6	0.516	0.730	0.433	452
7	0.127	0.166	0.571	730
8	0.071	0.075	0.060	1931
9	0.267	0.108	0.270	842
10	0.226	0.261	0.124	706

[0188] 当可再生能源发电量最小占比为0.3,负荷系数为1时,不同投资总容量下的输配

电网可再生能源配比示意如图4所示。根据定义可知,当输配电网可再生能源配比大于1时,输电网投资可再生能源更占优势,而当配比小于1时配电网可再生能源投资更占优势。分析图4可知,投资容量配比与输配电网投资容量有关且在一定区间上表现为输配电网的各自投资倾向。在本算例中,当投资总容量为0-40MW时,该输配电网协同规划模型中无可再生能源机组投入,此时原有的电源即可满足负荷的需求,同时当投资容量超过720MW时,待选可再生能源机组可装机容量小于需投资总容量,此种情况下无法满足投资需求,故最优配比为0。该输配电网结构下,容量平均投资配比为0.72,配电网在大部分投资总容量下占优势。因此,对于该算例可知可再生能源主要以配电网分布式能源接入的形态为主。对比协同和不协同下的情况,两者均以分布式接入为主,但不协同时由于配电网以等值负荷接入,需增大输电网侧电源投入,故配比曲线整体上移,可再生能源向集中式转移。投资容量较小时,协同方式下可通过配电网反送潮流满足负荷需求,非协同方式下只能通过加大电源投入,故在一定范围内可以延缓电源投资建设。当投入总容量超过一定值时(610MW),输配协同对投资影响逐渐减弱,输配电网投资方案趋于相同。在一定投资容量范围内(40-270MW),协同规划较独立规划可大大节省运行费用,同时随投资容量上升两者运行费用趋于定值且相互靠近,两者稳定容量分别为140MW和270MW。

[0189] 当负荷系数设定为1,投资总容量为200MW时,不同最小可再生能源占比约束下的输配电网投资容量和最优配比分别如图5所示。从图中可发现,该系统无法实现可再生能源发电量占比大于55%的情况,且在0~41%之间该结构输配电网最优配比保持在0.778,从41%~42%时,最优配比从0.778下降到0.6052,而在41~53%时最优配比保持在0.6052,之后逐渐下降到0.3591。总体来看,该结构可再生能源在各最小占比情况下均保持主要以分布式电源接入的形态。从输配电网各自投资容量来看,配电网可再生能源投资容量随可再生能源最小占比提升首先保持不变,后面呈现分段增长的趋势,而相反地,输电网则首先保持不变,然后呈现分段下降的趋势。图6为不同最小发电量占比下的输配电网投资费用、运行费用变化趋势,根据图可知,当最小占比在0-41%之间时,其最优投资方案均保持不变,且在实际运行时可以满足最小占比的约束条件,但当最小可再生能源发电量占比要求大于41%时,原先最经济投资方案已无法满足最小占比要求,只能以牺牲经济性的方式来提升实际运行发电量占比。同理,当最小占比要求大于51%时,又再次通过调整投资方案以增加可再生能源发电量占比。从图7可知,输电网实际可再生能源发电量充足,制约输配电网系统整体发电量占比的主要为配电系统,因此在占比提升后期,投资容量逐渐向增大配电系统可再生能源投资容量转变,而此时由于输电网投资容量较少,因此将会出现大量反向潮流的需求,通过配电网向输电网进行送电,但由于受到配电网网络约束限制,配电网送电能力有限,因此只能加大输电网常规机组出力而导致运行费用上升。

[0190] 当投资总容量为250MW,可再生能源占比需要大于30%时,不同负荷系数下的输配电网投资最优配比如图8所示。从图中可知,当负荷系数大于3.2时,待选可再生能源机组容量已经无法满足负荷的增长,即使全部投入可再生能源机组后模型仍然无最优解的产生。从不同负荷系数可看出,可再生能源在该电网结构中仍然主要是以分布式电源的形式接入,随着负荷系数增大,该优化配比分别保持一段0.9215、0.8521和0.7892的平稳期,同时,根据计算结果可知各个点处的投资费用均保持相同,并且无弃能和切负荷的情况发生,故引起总费用成本变化的主要因素为燃料费用。根据分析可知,三种方案投资成本均相同,并

且无弃能和切负荷情况发生,运行费用完全由燃料成本决定,负荷系数由1.4增大至1.5时,规划方案由1转变为2,燃料成本下降600880\$,负荷系数由2.7转变为2.8,投规划方案由2转变为3,燃料费用下降991192\$。因此,优化配比转变的过程是寻求燃料费用减少的过程。

[0191] 以上详细描述了本发明的较佳具体实施例。应当理解,本领域的普通技术人员无需创造性劳动就可以根据本发明的构思作出诸多修改和变化。因此,凡本技术领域中技术人员依本发明的构思在现有技术的基础上通过逻辑分析、推理或者有限的实验可以得到的技术方案,皆应在由权利要求书所确定的保护范围内。

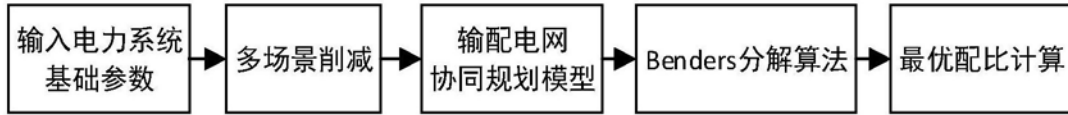


图1

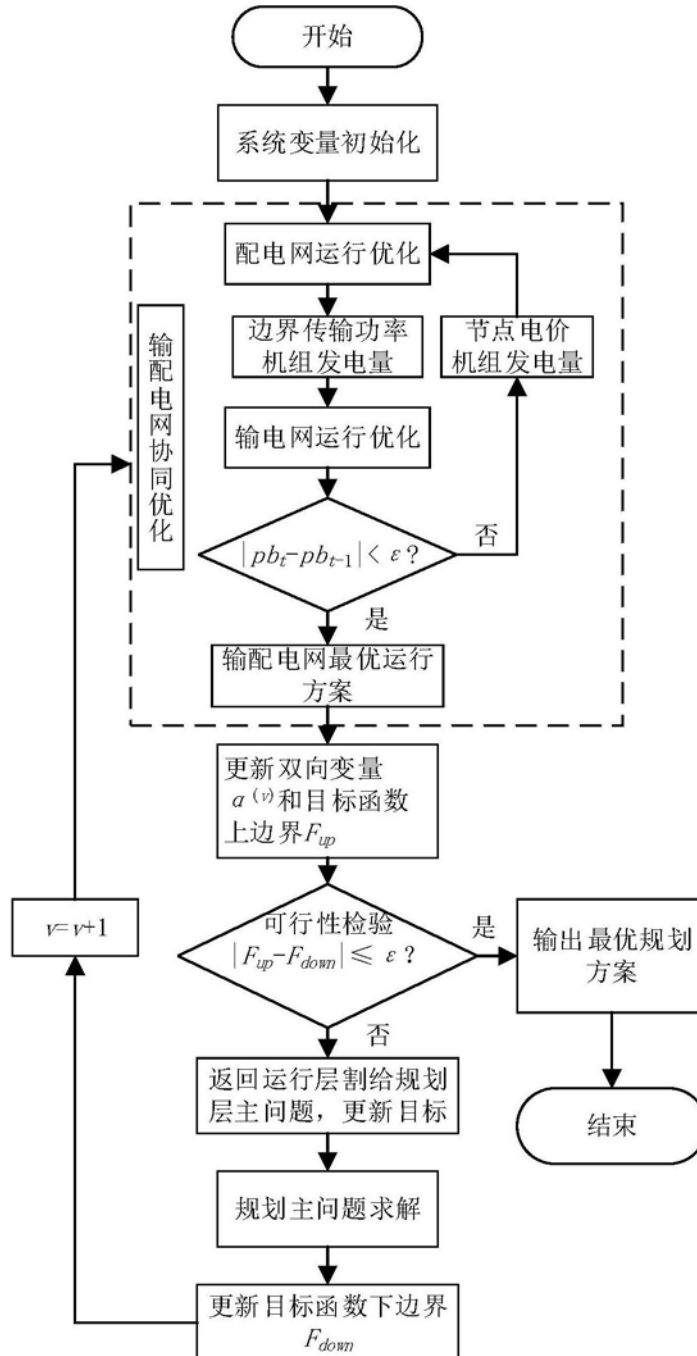


图2

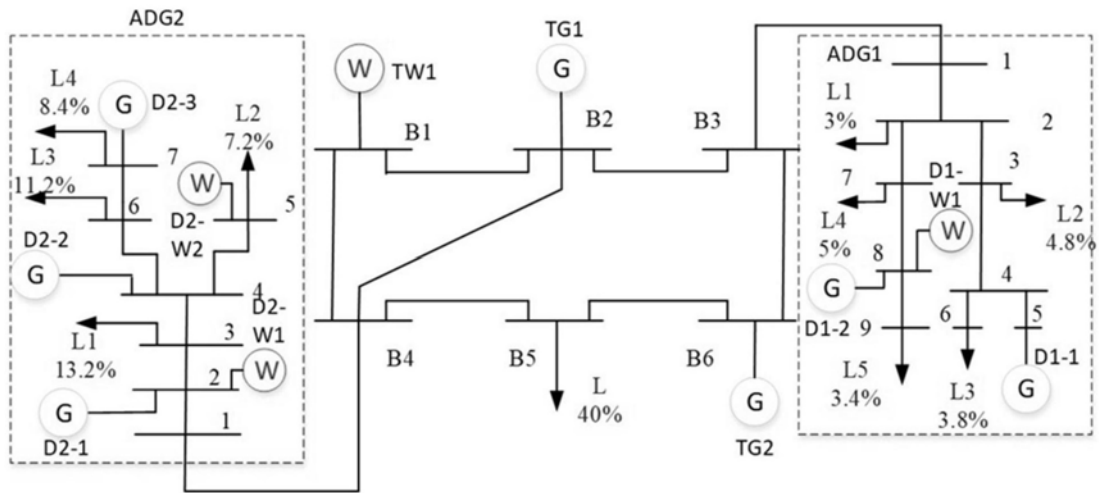


图3

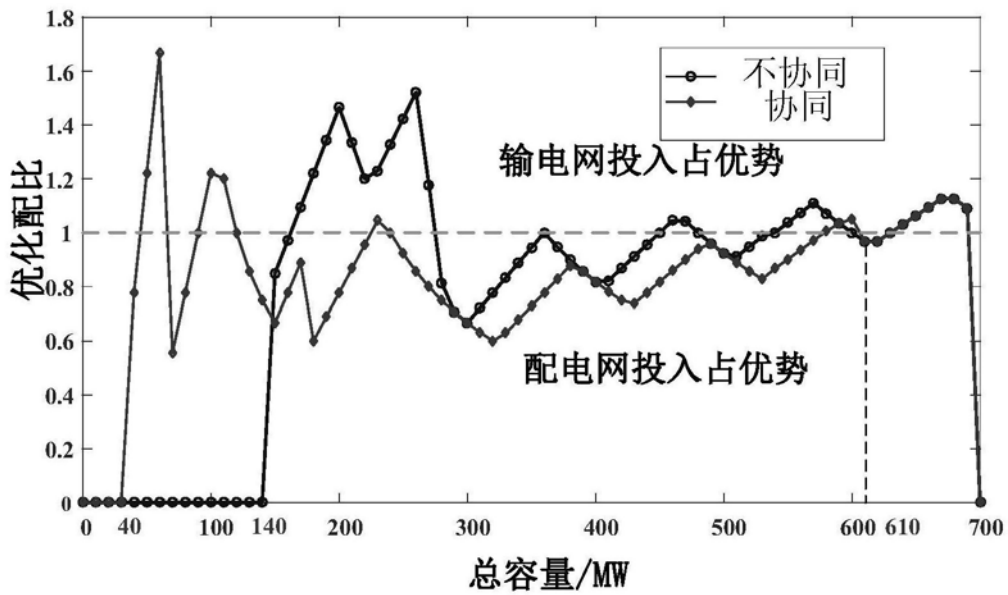


图4

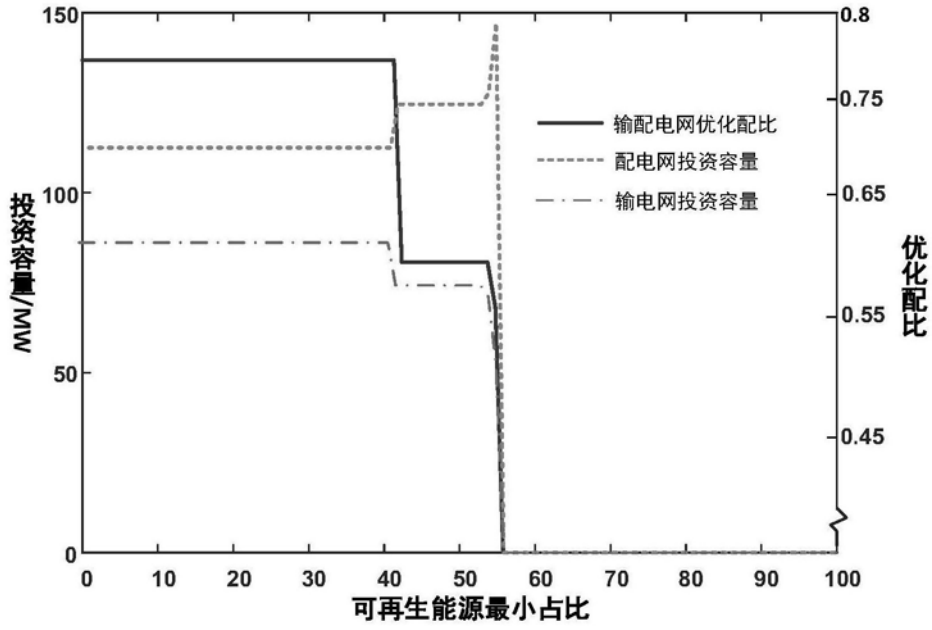


图5

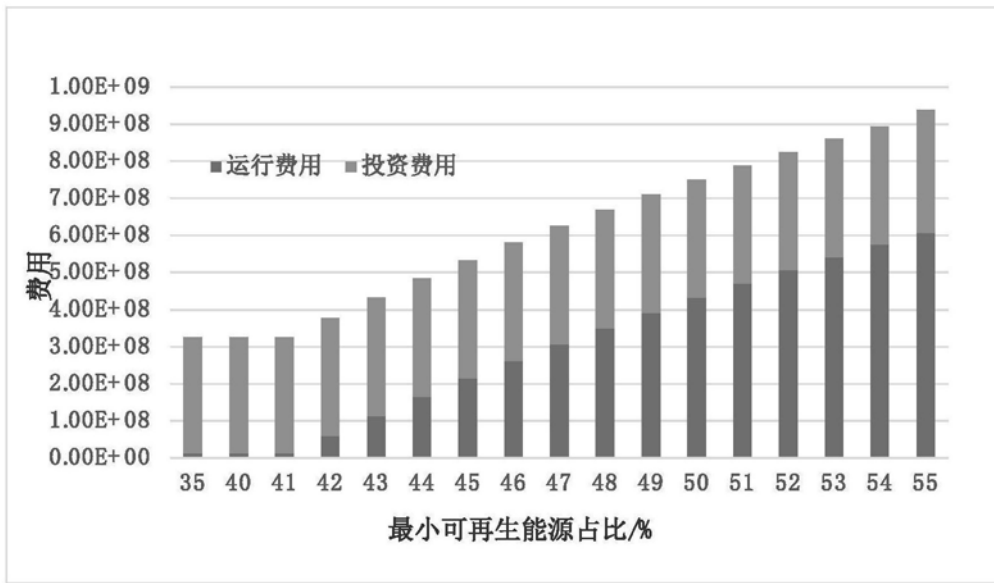


图6

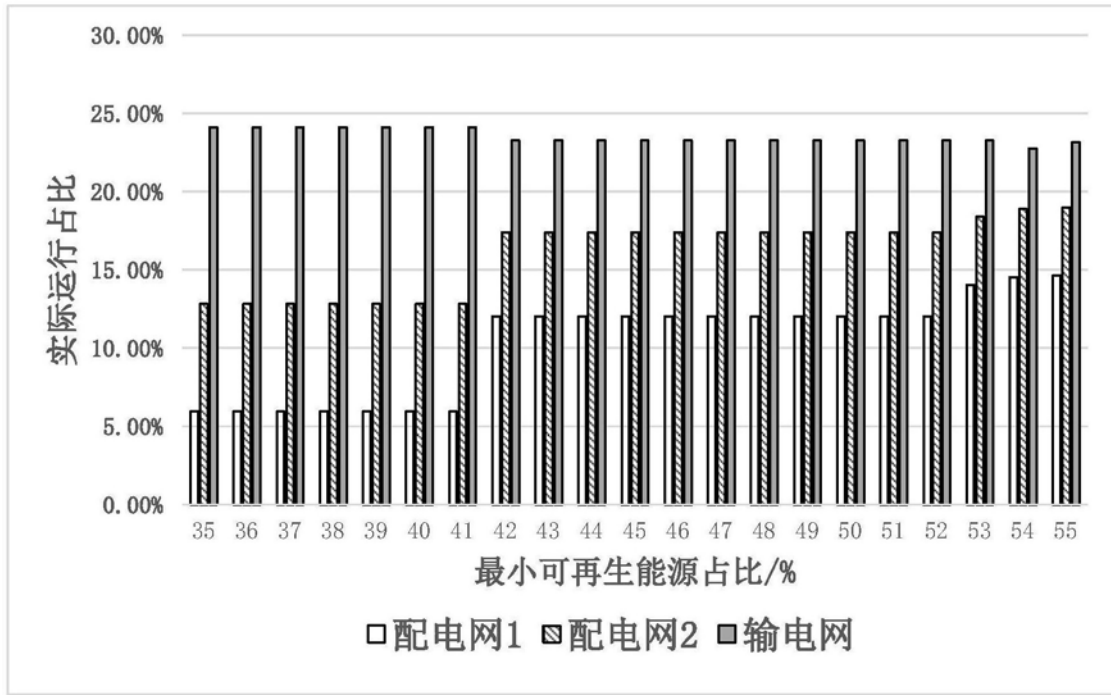


图7

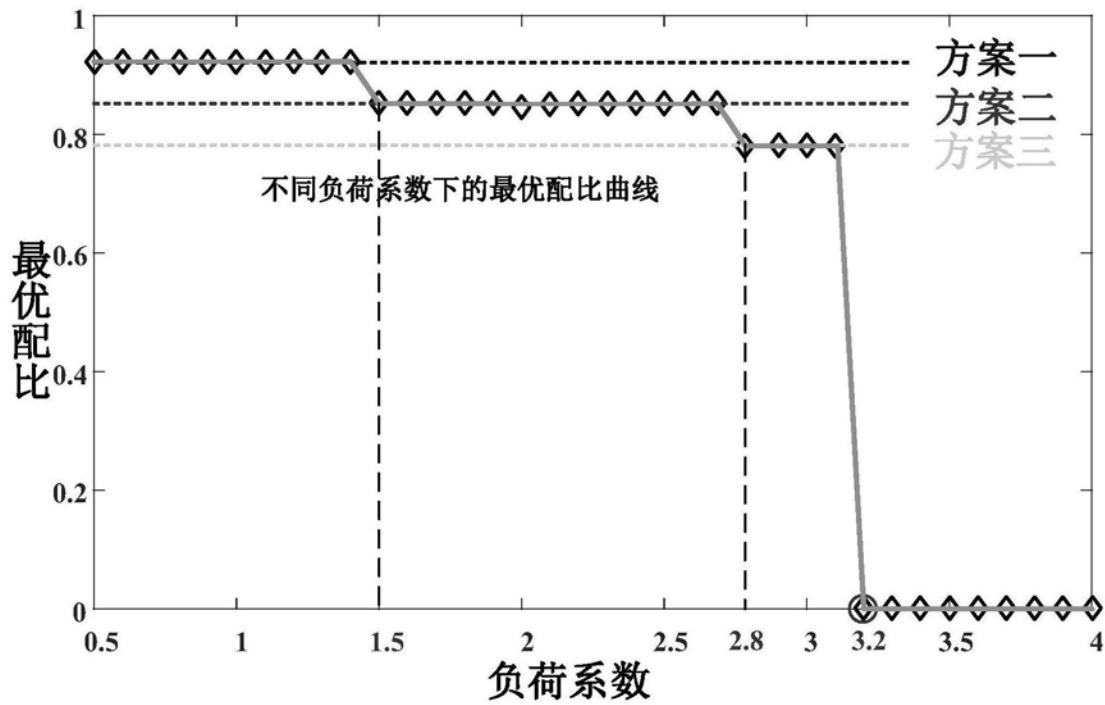


图8

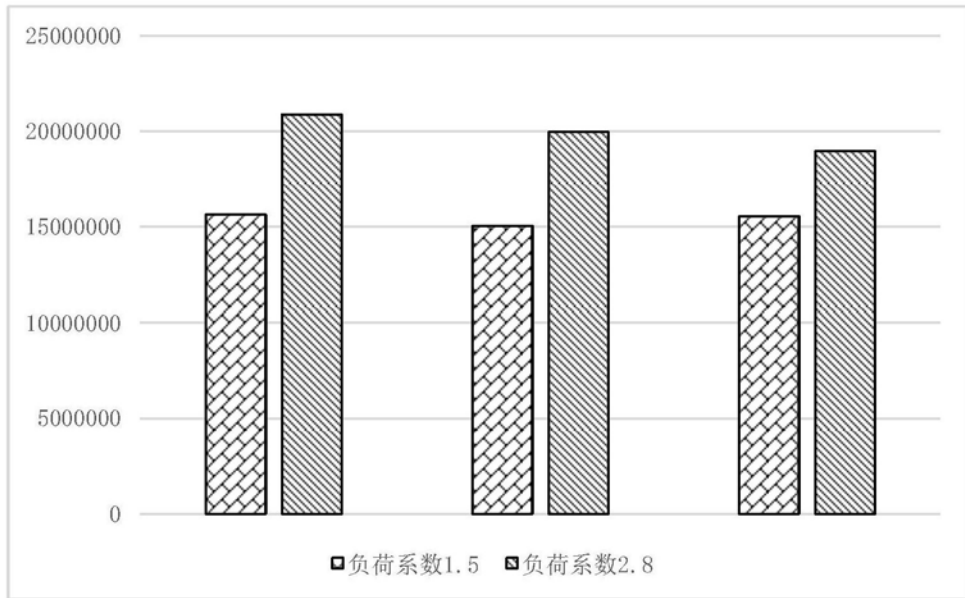


图9