

考虑安全约束的交直流配电网多利益主体 完全信息动态博弈与协同调度方法

蔡杰¹, 尹斌鑫², 李智威¹, 李姚旺², 卢萍³, 王江华³, 程石⁴, 苗世洪²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室

电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077;

4. 国网新疆电力有限公司 乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:基于一种包含配电网运营商、微电网和负荷聚合商等利益主体的交直流配电网结构,提出了考虑多利益主体参与下的交直流配电网完全信息动态博弈与协同调度策略。在对交直流配电网中各利益主体的权益、责任和可调度资源分析的基础上,得到了交直流配电网中多利益主体的收益函数,并建立了考虑需求响应、可控分布式电源和电压源换流器等调度资源的运行约束模型。提出了一种将配电网运营商定价权分散为各利益主体议价权,同时保留配电网运营商调度权的完全信息动态博弈机制。再针对该博弈问题,提出了一种结合动态博弈粒子群优化算法和线性规划的动态博弈问题求解方法。通过仿真验证了所提方法的有效性。仿真结果表明,相较于传统交直流配电网的调度机制,采用动态博弈与协同调度机制后,各参与人的收益与其掌握资源数量的相关性增强,配电网的社会总效益有所增加,弃风、弃光与向主网倒送功率的现象减少,提升了市场公平性和系统经济性、环保性。

关键词:交直流配电网;博弈论;协同调度;安全约束;多利益主体

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202010029

0 引言

与传统交流配电网相比,交直流配电网具有以下优点:可通过电力电子器件实现对潮流的控制;直流区域不存在相位和频率的同步问题,电能质量更高;分布式电源接入更灵活,且因为省去了整流、逆变过程,可节省变流器的安装成本,并减少能量损耗^[1-3]。同时,随着电力电子技术的成熟,以上优势将更加突出,交直流配电网将受到越来越多的关注^[4-6]。

为了应对严峻的环境污染问题,并满足用户日益增长的电能需求和供电形式需求,分布式可再生能源 DRES(Distributed Renewable Energy Source)发电和微电网(MG)技术得到迅速发展,越来越多的含 DRES 的 MG 及其群落接入配电网中^[7]。MG 技术有利于提高 DRES 的渗透率,实现能源的就地生产与消纳。但由于 DRES 的不可调度性,为了提高其消纳率,需要配电网运营商 DNO(Distributed Network Operator)调度配电网内的需求响应 DR(Demand

Response)和可调度分布式电源 DDG(Dispatchable Distributed Generator)等调度资源。

随着电力体制改革的不断深化,我国电力市场进一步开放^[8-10],DR 的负荷聚合商 LA(Load Aggregator)、MG、DNO 参与电力市场后,配电网调度复杂化。以上电力市场参与者的利益往往不一致,甚至相互冲突,传统单一利益主体下的调度方法已不再适应新型配电网电力市场。而以上利益主体的市场行为关系到配电网的安全性、经济性和公平性。因此,亟需研究能同时保证各电力市场参与者合理利益与配电网安全性的交直流配电网多利益主体联合协同调度方法。

在配电网协同调度方面,文献[11]针对 MG 群和交流配电网提出了一种基于博弈论的协调能量交互策略。文献[12]提出了一种基于价格激励的多 MG 和交流配电网日前两级鲁棒优化调度方法。文献[13]针对分属不同利益主体的交流配电网和 MG,提出了一种考虑 DRES 不确定性的基于双层随机规划模型的能量交互方法。文献[14]提出了一种 LA 参与下的交流配电网完全信息动态博弈策略,兼顾各主体的利益,实现了社会总效益的提升。以上文献的研究成果主要集中在交流配电网领域,而较少涉及含 MG、LA 的交直流配电网协同调度。在交直流配电网调度方面,文献[15]针对由多个配电区域组成的交直流混合主动配电网,提出了一种分层分

收稿日期:2020-01-31;修回日期:2020-09-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903601);国家自然科学基金资助项目(51777088)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0903601) and the National Natural Science Foundation of China(51777088)

布式协调优化调度策略。文献[1]提出了一种基于二阶段鲁棒博弈模型的交直流配电网协调能量管理方法,实现了不同利益主体在DRES出力不确定性下的收益均衡化。文献[2]提出了一种基于安全约束的交直流混合配电网储能与换流站协调经济调度方法。但以上研究未考虑MG、LA同时参与交直流配电网情况下的协同调度,也未考虑各利益主体间的动态议价过程。

基于上述分析,本文基于一种包含DNO、交直流MG和LA等利益主体的交直流配电网结构,研究考虑其安全约束的协同调度方法。具体研究思路如下:首先在对交直流配电网中各利益主体的权益、责任和可调度资源分析的基础上,得到了交直流配电网中多利益主体的收益函数,并建立了考虑DR、可控分布式电源和电压源换流器(VSC)等调度资源的运行约束模型;然后设计了一种将DNO定价权分散为各利益主体议价权,同时保留DNO调度权的完全信息动态博弈机制;再针对该博弈问题,提出了一种结合动态博弈粒子群优化DGPSO(Dynamic Game Particle Swarm Optimization)算法和线性规划的动态博弈求解方法;最后基于修改后的49节点系统进行算例仿真,仿真结果验证了本文所提方法的有效性。

1 交直流配电网中的多利益主体建模

1.1 交直流配电网结构

交直流配电网结构及各利益主体间的关系见图1。由图可知,交直流配电网市场的主体主要包括DNO、交直流MG、LA、传统不可调度负荷:①DNO负责配电网的日常调度、运行与维护,向其辖区内的常规负荷供电,与上级电网及接入配电网的其他主体进行交互,DNO的可调度资源主要包括VSC、DDG、与上级电网的交换功率以及向各MG购电的功率等;②交、直流MG分别接入交直流配电网的交、直流区域,从MG内的DDG购电,向MG内的负荷供电,与DNO进行能量交互;③LA聚合大量可调节的柔性负荷资源,代表其与DNO进行交互,参加电力市场投标竞争^[16],LA的可调度资源主要包括聚合的

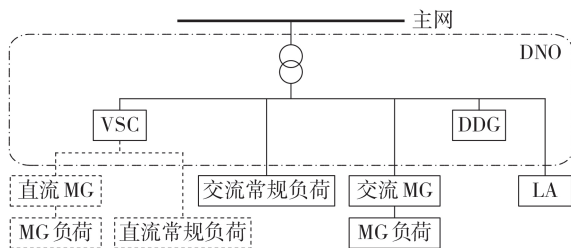


图1 交直流配电网结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of AC/DC distribution network

工业、商业等各类型柔性负荷;④传统不可调度负荷可分为接入配电网中的交直流常规负荷和MG负荷,二者分别由DNO和MG供电。

1.2 DNO运行模型

DNO负责配电网的整体调度运行,其决策变量包括与主网的交换功率、与MG的交换功率及电价、向LA售电的电价、DDG的出力和VSC传输功率。

1.2.1 收益函数

DNO的收益函数 B_{DNO} 为其净利润:

$$B_{DNO} = r_{DNO} - c_{DNO} \quad (1)$$

其中, r_{DNO} 和 c_{DNO} 分别为DNO的收入和运行成本。

r_{DNO} 主要包括向主网、MG和配电网中的负荷售电的收入,其表达式为:

$$r_{DNO} = \sum_{t=1}^{N_T} \Delta T \left(c_t^N L_t^N + c_t^{DR} L_t^{DR} + \sum_{m=1}^{N_{MG}} c_{t,m}^{MGs} P_{t,m}^{MGs} + c_t^{Gs} P_t^{Gs} \right) \quad (2)$$

其中, t 为时段; N_T 和 ΔT 分别为调度时段数和调度时长; L_t^N 和 c_t^N 分别为常规负荷大小和售电电价; L_t^{DR} 和 c_t^{DR} 分别为LA的负荷大小和电价; N_{MG} 为MG总数; $P_{t,m}^{MGs}$ 和 $c_{t,m}^{MGs}$ 分别为DNO向第 m 个MG售电的电量和电价; P_t^{Gs} 和 c_t^{Gs} 分别为DNO向主网售电的电量和电价。

c_{DNO} 主要包括从主网和MG购电的成本、DDG的运行成本,其表达式为:

$$c_{DNO} = \sum_{t=1}^{N_T} \Delta T \left(c_t^{Gb} P_t^{Gb} + C(P_t^{DDG}) + \sum_{m=1}^{N_{MG}} c_{t,m}^{MGb} P_{t,m}^{MGb} \right) \quad (3)$$

其中, P_t^{Gb} 和 c_t^{Gb} 分别为DNO从主网购电的电量和电价; $P_{t,m}^{MGb}$ 和 $c_{t,m}^{MGb}$ 分别为DNO从第 m 个MG购电的电量和电价; $C(P_t^{DDG})$ 为DDG的发电成本,与DDG的出力 P_t^{DDG} 有关,其计算方法见文献[14]。

1.2.2 运行约束

(1)购/售电电量约束。

DNO与主网和MG交换功率约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{Gb} \leq P_{\max}^{Gb} \\ 0 \leq P_t^{Gs} \leq P_{\max}^{Gs} \\ 0 \leq P_{t,m}^{MGb} \leq P_{\max}^{MGb} \\ 0 \leq P_t^{MGs} \leq P_{\max}^{MGs} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_{\max}^{Gb}$ 和 $P_{\max}^{Gs}$ 分别为DNO从主网购电和向主网售电的电量最大值; $P_{\max}^{MGb}$ 和 $P_{\max}^{MGs}$ 分别为DNO从MG购电和向MG售电的电量最大值。

(2)其他约束。

交直流配电网的其他运行约束见文献[2,17],包括交流配电网支路潮流与节点电压约束、直流配电网支路潮流与节点电压约束、VSC运行约束等。

1.3 MG模型

MG从DRES处购电,向MG负荷供电,并将多余的电量出售给DNO,或者在DRES出力不足时从DNO处购买缺额电量。MG的决策变量为向DNO

购 / 售电的电价。MG 的收益函数 $B_{MG,m}$ 为其净利润,即:

$$B_{MG,m} = r_{MG,m} - c_{MG,m} \quad (5)$$

其中, $r_{MG,m}$ 和 $c_{MG,m}$ 分别为第 m 个 MG 的收入和运行成本。 $r_{MG,m}$ 主要包括 MG 向 DNO 和 MG 负荷售电的收入,其表达式为:

$$r_{MG,m} = \sum_{t=1}^{N_T} \Delta T (c_{t,m}^{MGb} P_{t,m}^{MGb} + c_{t,m}^{MG} L_{t,m}^{MG}) \quad (6)$$

其中, $L_{t,m}^{MG}$ 和 $c_{t,m}^{MG}$ 分别为第 m 个 MG 内的负荷大小和电价。 $c_{MG,m}$ 主要包括 MG 从 DNO 和 MG 内 DRES 购电的成本,其表达式为:

$$c_{MG,m} = \sum_{t=1}^{N_T} \Delta T (c_{t,m}^{MGs} P_{t,m}^{MGs} + c_{t,m}^{res} P_{t,m}^{res}) \quad (7)$$

其中, $P_{t,m}^{res}$ 和 $c_{t,m}^{res}$ 分别为第 m 个 MG 从 MG 内 DRES 购电的电量和电价。MG 运行时要保证向 MG 负荷的供电,其运行约束为功率平衡约束和向 MG 内 DRES 的购电电量约束,表达式为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,m}^{res} \leq P_{t,m}^{res, \max} \\ P_{t,m}^{res} + P_{t,m}^{MGs} = L_{t,m}^{MG} + P_{t,m}^{MGb} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P_{t,m}^{res, \max}$ 为第 m 个 MG 内的 DRES 在 t 时段的最大出力。

1.4 LA 模型

在现有研究的常见 DR 模型中,效用函数模型可以表征电价变化对电能需求量的影响情况,还能计算用户用电的收益^[18],更适用于本文所研究的问题。此外,在传统矩形效用函数模型上进行改进,得到的梯形边际效用函数模型能够更好地确定最优用电量^[14]。因此,本文采用梯形边际效用函数模型作为 LA 的模型。梯形边际效用函数模型详见文献^[14]。

LA 的决策变量为实际用电量 L_t^{DR} 与边际效用所围成的阴影部分面积,即 LA 在 t 时段柔性负荷为 L_t^{DR} 时的用电效益函数值 $r(L_t^{DR})$ 。LA 的支出为用户缴纳电费,LA 的收益函数 B_{LA} 为其净利润,其表达式为:

$$B_{LA} = \sum_{t=1}^{N_T} (r(L_t^{DR}) + \Delta T c_t^{DR} L_t^{DR}) \quad (9)$$

1.5 DRES 模型

风电和光伏等 DRES 的出力模型已较为成熟,详见文献^[19],本文不再赘述。

2 多利益主体完全信息动态博弈模型

博弈论是现代数学的一个新分支,主要用于研究同一系统下不同决策主体之间存在利益关联或冲突时,各决策主体如何根据其掌握的信息与自身情况,做出有利于自己或群体的策略。

一般而言,博弈包含有决策权的参与者、策略与收益函数这 3 种要素。按照参与人对其他参与人的

了解程度,可分为完全信息博弈和不完全信息博弈。其中完全信息博弈是指每一位参与者完全掌握其他所有参与人的特征、策略及收益函数信息的情况;不完全信息博弈指参与者不完全掌握以上信息的情况。从博弈参与者决策的时序性来看,可以分为静态博弈和动态博弈。其中静态博弈是指博弈参与者同时做出决策,或虽非同时但后决策者并不掌握博弈的策略;与之相对的,动态博弈是指参与人的决策行为存在先后顺序,且后决策者掌握博弈的历史信息,可以根据该信息优化自身策略。

2.1 完全信息动态博弈模型

在本文所提出的交直流配电网博弈模型中,参与人为 DNO、MG 和 LA。假定参与者具有理性,以自己收益最大为目标,参与人均掌握其他所有参与人的所有策略及收益信息。

为便于叙述,规定提出新电价的参与人为议价参与者,其他参与者决定是否接受新电价提议,被称为决策参与者。由于 DNO 负责整个配电网的调度运行,因此,首先由 DNO 作为议价参与者,制定与所有参与者购 / 售电的电价。其他参与者按顺序成为议价参与者,与 DNO 商议自己的购 / 售电电价。

在每一轮博弈中,由 DNO 根据当前议价参与者所制定的电价,在保证所有参与者供电和安全运行的前提下,制定并发布配电网的运行方式。其他参与者可根据发布的配电网运行方式,计算自己的收益函数,并决定是否接受该电价与运行方式。

综上,本文将建立交直流配电网多利益主体的完全信息动态博弈模型。

(1) 博弈参与者收益函数。

各博弈参与者的收益函数为自己的净利润, DNO 的收益函数如式(1)~(3)所示, MG 的收益函数如式(5)~(7)所示, LA 的收益函数如式(9)所示。

(2) 运行约束。

运行约束是指交直流配电网在运行中,为了保证配电网整体的安全运行所需要满足的约束,包括式(4)、式(8)以及 1.2.2 节所述其他未列出的约束。

(3) 博弈变量约束。

博弈变量为 DNO 与 MG、LA 交换功率的电价。在博弈过程中,为保护各参与者的利益,对电价有如下约束。

a. DNO 从各 MG 购电的电价应不小于 MG 从 MG 内 DRES 购电的电价,以保护 MG 的获益,同时应不大于 DNO 从主网购电的电价,以保护 DNO 的获益,即:

$$c_{t,m}^{res} \leq c_{t,m}^{MGb} \leq c_t^{Gh} \quad (10)$$

b. DNO 向 MG 售电的电价应不小于向主网售电的电价,以保护 DNO 的收入,同时不大于向常规负荷售电的电价,以保护 MG 的收入,即:

$$c_t^{Gs} \leq c_{t,m}^{MGs} \leq c_t^N \quad (11)$$

c. DNO向LA售电的电价应不小于向主网售电的电价,同时不大于向常规负荷售电的电价,以保护双方的收入,即:

$$c_t^{Gs} \leq c_t^{DR} \leq c_t^N \quad (12)$$

2.2 博弈机制与流程

2.2.1 博弈机制

在本文的博弈问题中,DNO作为动态博弈中的先动方,具有先动优势。同时,DNO还负责制定交直流配电网的运行方式,从而进一步影响其他博弈参与人的收益函数,在博弈中占据较强的优势。面对该情况,其他参与人可能做出以下2种选择:①接受DNO占优的决策,则博弈结果偏向于DNO,博弈的公平性无法保证;②拒绝DNO占优的决策,此时可能导致博弈处于僵持状态,难以形成意见统一的交直流配电网运行方案,造成配电网信息阻塞和调度命令延误,危害电网的安全运行。

为了保证博弈公平性的同时,推动博弈的顺利进行,需要各博弈参与人在不严重损害自身利益的同时,做出一定的妥协与让步。本文采用文献[14]所提出的基于心理物理学韦伯-费希纳定律的序贯议价函数,来描述决策参与人判断是否做出让步并接受议价参与人所提策略的过程。

决策参与人拒绝议价参与人所提方案的概率,与决策参与人的收益降低量有关。当决策参与人收益降低量小于最小可觉差时,决策参与人接受议价参与人所提出的新策略。随着收益降低量的增多,决策参与人拒绝议价参与人所提出策略的概率逐渐升高。序贯议价函数的曲线图详见文献[14],其表达式为:

$$P(I_j) = \begin{cases} 0 & I_j \leq I_M \\ \frac{k \ln I_j + s_0}{s_0} & I_M < I_j \leq 1 \\ 1 & I_j > 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中, $P(I_j)$ 为决策参与人 j 拒绝当前议价参与人所提策略的概率; k 为韦伯系数; s_0 为刺激常数; I_j 为客观刺激量,在本文模型中指决策参与人收益减少量; I_M 为最小可觉差。 I_j 、 I_M 的表达式分别为:

$$\begin{cases} I_j = \frac{\Delta I_j}{I_{j0}} = \frac{I_{j0} - I'_j}{I_{j0}} \\ I_M = e^{-s_0/k} \end{cases} \quad (14)$$

其中, I_{j0} 为决策参与人 j 的原始收益函数值; I'_j 为议价参与人所提新策略下,决策参与人的收益函数值。

2.2.2 博弈流程

在博弈的求解方法上,文献[14]提出的DGPSO算法可用于求解动态博弈问题。同时,考虑在本文

的动态博弈问题中,当博弈变量(电价)确定之后,配电网的优化运行问题成为线性化问题。从而可以将DGPSO算法与成熟的线性规划方法结合改进,以加快博弈问题的求解速度。本文算法通过改变粒子位置和各参与人收益函数,来模拟实际过程中博弈参与人“讨价还价”的过程,具体步骤如下。

(1)输入系统参数。系统参数包括交直流配电网中各节点常规负荷、MG中负荷与DRES出力的预测曲线,设DNO为初始议价参与人,第1— n 个MG和LA为决策参与人。

(2)初始化粒子位置和粒子速度。

(3)设置粒子位置、速度约束条件。其中,粒子位置约束条件如式(10)—(12)所示。

(4)求解交直流配电网的调度运行方式,并根据调度结果确定各参与人的收益函数。由初始化的粒子位置所得到各参与人收益函数中的最优值,分别记录为各参与人收益函数的初始全局最优值 $\delta_{BGx,0}$ ($x=1,2,\dots,n+2$,为博弈参与人数量)。

(5)通过序贯议价函数,计算各决策参与人对当前运行方案的拒绝概率。其中,原始收益函数值采用上一代 $y-1$ 循环中记录的各参与人收益函数全局最优值 $\delta_{BGx,y-1}$,当 $y=1$ 时原始收益函数值采用步骤(4)的 $\delta_{BGx,0}$ 。

(6)通过抽样确定决策参与人是否拒绝议价参与人所提方案。如果所有粒子记录的方案均被拒绝,则返回步骤(3);否则,将被拒绝的方案舍弃,记录被接受的方案。

(7)根据步骤(6)记录的方案对全局、个体最优解进行更新。

(8)判断是否所有参与人都提出过自己的策略。若否,则按DNO、第1— n 个MG、LA的顺序更换议价参与人,并更新粒子位置和速度,然后返回步骤(3);否则,进入步骤(9)。

(9)将本次优化结果与上次对比,若各参与人的收益函数偏差比例小于 ε ,则博弈结束。判断博弈轮数是否达到最大值 d_{max} ,若达到,则为避免博弈过程过长而影响系统运行,终止博弈。若都为否,更换议价参与人,更新粒子位置、速度后返回步骤(3)。

当各参与人的收益函数偏差比例均小于 ε 时,可以认为当前方案为每个参与人对其他参与人策略的最优反应,即达到纳什均衡。所得结果为纳什均衡解的证明详见附录A。本文的博弈模型为有限完全信息博弈,根据文献[1],有限完全信息博弈存在纯策略纳什均衡,因此,本文的博弈模型存在纳什均衡。

需要说明的是,采用各参与人对每个粒子的策略进行判断是否拒绝的方式,可以减少当代粒子被整体拒绝的情况,提高博弈效率。但当粒子数量过

多时,拒绝概率高的方案被接受的可能性提高,可能使得博弈收敛速度变慢。因此,需要根据博弈情况,合理地设置粒子数量。此外,在本文模型中,保留了 DNO 对配电网的调度运行权。DNO 的设备信息、具体运行数据等隐私数据并不影响其他参与人的收益。在本文的博弈过程中,交换的信息主要为所有参与人各轮博弈的报价与收益数据。相比于分层分布式协调控制方法,本文所提出的完全信息动态博弈机制,能够实现各博弈参与人的动态议价过程。在博弈过程中,各参与人掌握其他参与人的报价,避免了信息不对等(DNO 掌握所有参与人的报价,而除 DNO 以外的参与人不掌握其他参与人报价)导致除 DNO 以外的参与人收益下降的情况,提升了市场公平性。

3 算例验证

3.1 系统参数

本文选取基于 IEEE 33 节点系统改造得到的 49 节点系统^[2]作为测试系统,系统拓扑图见附录 B 图 B1。在节点 9、26 处接入交流 MG(MG_1 和 MG_2),在节点 28 处接入 LA,在直流节点 47 处接入直流 MG(MG_3)。 $d_{\max}=100$ 。49 节点系统的参数选取与设定说明如下。

(1)分别选择风电和光伏作为交、直流 MG 的 DRES。由于配电网区域面积有限,本文采用相同的风电、光伏出力曲线,同时为了突出主要问题,假设系统中的常规负荷和 MG 负荷的标么值曲线相同。风电、光伏出力和负荷曲线见附录 B 图 B2^[20]。

(2)交流线路参数与交流负荷峰值采用文献^[21]的数据;直流线路参数与直流负荷峰值采用文献^[2]的数据; MG_1 — MG_3 的 DRES 出力峰值分别为 4、4、1 MW; MG_1 — MG_3 内的负荷峰值分别为 0.8、0.8、0.4 MW。

(3)安装的 4 台 VSC 参数相同^[2]。额定容量为 2 MV·A, VSC 的阻抗 $Z=0.5+j1.5 \Omega$,无功补偿区间为 $[-300, 300]$ kvar。

(4)交流配电网电压等级为 12.66 kV,直流配电网电压等级为 ± 10 kV。

(5)交直流配电网节点电压安全范围为 $[0.95, 1.05]$ p.u.;交流支路最大载流量为 6 MV·A;直流支路最大载流量为 1 MW。

(6)DNO 以节点 0 作为接口,与主网进行功率交换,功率交换范围为 $[-6, 6]$ MW,以主网流向配电网为正。

(7)DDG 的出力上、下限分别为 2.5、0.5 MW,其输出复功率最大值为 4 MV·A。

(8)固定电价的值和可变电价的范围见附录 B 表 B1。

(9)梯形 DR 效用函数参数见文献^[14]。

3.2 仿真算例与结果分析

为了验证模型的有效性,设置 3 种场景进行对比分析:①电网中所有购/售电电价均为固定电价,不对 LA 进行 DR 负荷调度,各利益主体间不进行博弈,此时 DNO 向 LA 售电的电价为 55 \$/(MW·h),DNO 向所有 MG 售电、购电的电价分别为 55、30 \$/(MW·h);②采用变化的电价,由 DNO 制定所有的电价和交直流配电网的运行方式,MG 和 LA 没有议价权,LA 可根据电价更改自己的用电量,MG 只能接受 DNO 的策略;③采用本文的完全信息动态博弈模型,由 DNO、MG 和 LA 等所有利益主体作为博弈参与人,共同决定电价。其中,场景①根据固定电价,通过 MATLAB 的 YALMIP(R20180612)工具箱调用 CPLEX 12.8.0 求解器进行求解;场景②采用传统粒子群优化算法制定电价,并根据该电价采用 CPLEX 求解配电网运行方式与各参与人的收益;场景③采用本文第 2 节建立的算法进行议价,并求解配电网运行与各参与人的收益。

同时,为了对比本文求解算法和传统粒子群优化算法的求解效率,在排除序贯议价函数和 DGPSO 算法的随机性对求解时间影响的前提下,本文以场景③的电价为例,对比了该电价下 CPLEX 和传统粒子群优化算法的求解效率,对比结果如下:CPLEX 的求解时间为 0.492 s,传统粒子群优化算法的求解时间为 6.7272 s。3 种场景下各利益主体的收益如表 1 所示,各场景的调度结果如图 2 所示。图中, P_{pv} 为光伏功率,负值表示弃光; P_{wind1} 和 P_{wind2} 分别为 MG_1 和 MG_2 的风电功率,负值表示弃风; P_{acddg} 为 DDG 的出力; P_g 为 DNO 与主网的交换功率,正值表示从主网购电,负值表示向主网售电; L_n 和 L 分别为常规负荷和总负荷。

场景①的调度结果如图 2(a)所示。由于 DNO 向 LA 售电的电价固定,DR 不参与调度,在 DRES 出力较大或常规负荷较小时,发生弃风弃光现象,或者向主网大量传输多余的 DRES 发电量。该场景下,DNO 收益、社会总效益与 DRES 消纳率在 3 种场景下均为最低,系统运行经济性与环保性不佳。场景②的调度结果如图 2(b)所示。由于引入了 DR,增大了夜间 DR 负荷,提高了对 DRES 的消纳量,减小了对主网的功率输送。相比于场景①,场景②中 DNO

表 1 3 种场景下的收益情况

Table 1 Profit situation under three scenes

场景	DNO 收益/ \$	MG_1 收益/ \$	MG_2 收益/ \$	MG_3 收益/ \$	LA 收益/ \$	社会总 效益/ \$	DRES 消纳率/ %
①	1018.0	530.0	510.7	44.5	50.4	2153.6	90.37
②	1427.1	353.7	362.6	23.5	127.7	2294.6	94.88
③	1235.8	390.6	408.5	134.2	326.7	2495.8	98.32

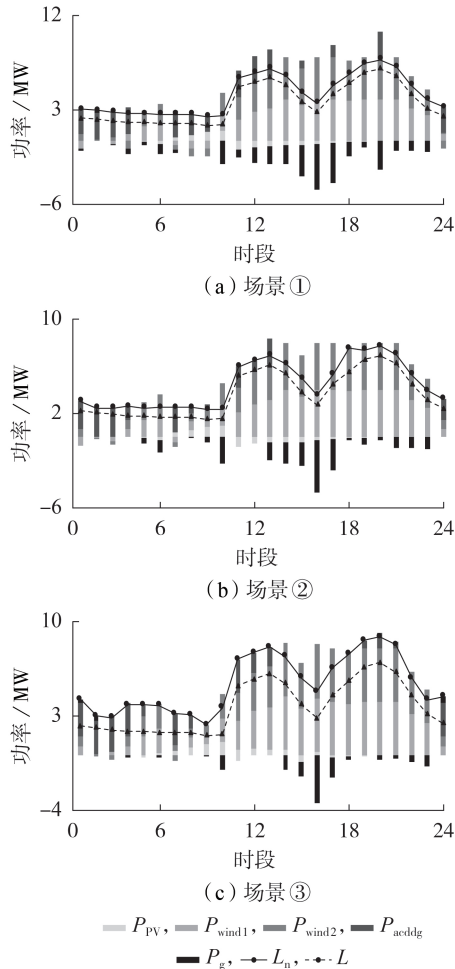


图2 场景①—③的调度结果

Fig.2 Scheduling results of Scene ①-③

收益大幅度提高,社会总效益略有提高。但因为电价由DNO制定,其他利益主体没有议价权,DNO为了使自身利益最大化,在一定程度上牺牲了其他利益主体的收益,所以MG、LA的收益与社会总效益均低于场景③。场景③的调度结果如图2(c)所示。在场景③中,所有利益主体均具有议价权,LA在调度中的参与度进一步提高,弃风、弃光现象更少,DRES的消纳情况进一步提高。同时,MG在拥有议价权后,可以更好地保障自身利益,如MG₃通过议价,提高了自身光伏消纳率,从而其收益增多。总体上,场景③中DNO的收益一定程度上有所降低(相比于场景②下降了13.40%),但其他利益主体的收益较场景②均有明显提高。同时,社会总效益进一步提升,场景③的社会总效益在所有场景中最高。

场景②和场景③的电价结果分别如图3(a)和图3(b)所示。图中, C_{dr} 为DNO向LA售电的电价; C_{mgb1} 、 C_{mgb2} 、 C_{mgb3} 和 C_{mgs1} 、 C_{mgs2} 、 C_{mgs3} 分别为3种场景下DNO从MG购电和向MG售电的电价。可以看出,为了充分调动DR的积极性,在DRES出力过剩的时段,DNO向LA售电的电价较低,而在DRES出力低

于负荷时,DNO向LA售电的电价较高,提升了DRES的消纳率和DNO的收益。此外,在场景②中,DNO为了自身获利的最大化,将向LA、MG售电的电价定得较高,将向MG购电的电价定得较低,这影响了其他参与人的利益。而在场景③中,由于其他参与人拥有议价权,DNO从各参与人购电或向各参与人售电的电价并未一直处于过高或过低的情况,保证了其他参与人的利益,维护了市场公平性。

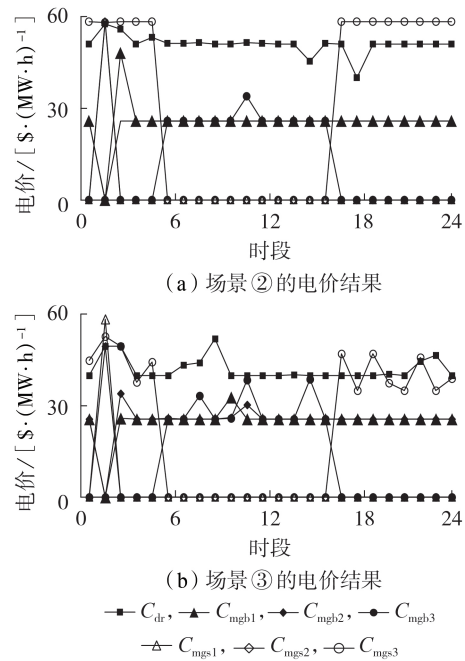


图3 场景②、③的电价结果

Fig.3 Electricity price results of Scene ② and ③

表2为DRES消纳情况,风电、光伏的预测发电总量分别为108.96、6.44 MW。从DRES消纳的角度来看,由于DR参与度最高,场景③中风电消纳量最大;由于MG₃参与议价,场景③中光伏消纳量显著提升。因此,场景③对DRES的消纳率在所有场景中最高,为98.32%。从本地消纳的角度来看,场景③中DNO向主网传输功率量的时段最少,同时段传输功率最低,说明场景③对DRES的本地消纳情况最好,对主网的影响最小。

表2 DRES消纳情况

Table 2 Consumption of DRES

场景	风电消纳量 / MW	光伏消纳量 / MW
①	101.80	2.48
②	106.64	2.85
③	108.16	5.29

4 结论

本文在开放电力市场环境中,建立了考虑安全约束的交直流配电网多利益主体完全信息动态博弈模型。并采用DGPSO算法结合线性规划的方法,对

博弈问题进行求解,对仿真结果进行分析,得到以下结论。

(1)交直流配电网的动态博弈机制削减了DNO的定价权,而维持了DNO对配电网的调度权,可以在兼顾配电网其他利益主体经济效益的同时,保证配电网的安全运行。

(2)动态博弈可能造成之前配电网电力市场的完全主导者(即DNO)的收益小幅度下降,但提高了其他主体参与调度的积极性,能够提升配电网的总效益。

(3)动态议价机制下,LA参与调度的积极性进一步提高,配电网对DRES的消纳率更高,向主网送电的情况减少。

(4)动态博弈机制下,所有参与人均具有与自身相关电价的议价权。在博弈过程中,各参与人掌握其他参与人的报价,避免了信息不对等导致部分参与人收益下降的情况,从而各参与人的收益与其掌握资源量(如MG的可再生能源、LA的柔性负荷)的相关性更强,提升了市场公平性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 符杨,张智泉,李振坤,等. 基于二阶段鲁棒博弈模型的微电网群及混合交直流配电系统协调能量管理策略研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(4):1226-1240,1413.
FU Yang,ZHANG Zhiqian,LI Zhenkun,et al. A two-stage robust game approach for coordinated energy management in hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(4):1226-1240,1413.
- [2] 王守相,陈思佳,谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):85-91.
WANG Shouxiang,CHEN Sijia,XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(11):85-91.
- [3] 施静容,李勇,王姿雅,等. 交直流混合微电网互联变换器功率流动的柔性控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):107-113.
SHI Jingrong,LI Yong,WANG Ziya,et al. Flexible power flow control strategy for interlinking converter in AC/DC hybrid microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):107-113.
- [4] 戴志辉,朱惠君,苏怀波,等. 考虑交直流侧协调的模块化多电平换流站直流线路保护方案[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):109-115.
DAI Zhihui,ZHU Huijun,SU Huaibo,et al. DC line protection scheme for modular multilevel converter station considering coordination of AC and DC sides[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):109-115.
- [5] 魏伟,赵学良,朱洁,等. 基于鲁棒优化的交直流混合配电网供电能力评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):87-93.
WEI Wei,ZHAO Xueliang,ZHU Jie,et al. Power supply capability evaluation of AC/DC hybrid distribution network based on robust optimization[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):87-93.
- [6] 彭克,张聪,陈羽,等. 多换流器并联的交直流配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):129-134.
PENG Ke,ZHANG Cong,CHEN Yu,et al. Power flow calculation method for AC-DC hybrid distribution network with multi-converter in parallel[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):129-134.
- [7] 刘念,赵璟,王杰,等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报,2018,33(8):1903-1910.
LIU Nian,ZHAO Jing,WANG Jie,et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(8):1903-1910.
- [8] 张迪,苗世洪,赵健,等. 分布式发电市场化环境下扶贫光伏布点定容双层优化模型研究[J]. 电工技术学报,2019,34(10):1999-2010.
ZHANG Di,MIAO Shihong,ZHAO Jian,et al. A bi-level locating and sizing optimal model for poverty alleviation PVs considering the marketization environment of distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(10):1999-2010.
- [9] 孔祥瑞,李鹏,严正,等. 售电侧放开环境下的电力市场压力测试分析[J]. 电网技术,2016,40(11):3279-3286.
KONG Xiangrui,LI Peng,YAN Zheng,et al. Stress testing on electricity market with retail transactions opened[J]. Power System Technology,2016,40(11):3279-3286.
- [10] 卢强,陈来军,梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5009-5017.
LU Qiang,CHEN Laijun,MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5009-5017.
- [11] LU T G,WANG Z Y,AI Q,et al. Interactive model for energy management of clustered microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2017,53(3):1739-1750.
- [12] LIU Y X,GUO L,WANG C S. A robust operation-based scheduling optimization for smart distribution networks with multi-microgrids[J]. Applied Energy,2018,228:130-140.
- [13] WANG Z Y,CHEN B K,WANG J H,et al. Coordinated energy management of networked microgrids in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(1):45-53.
- [14] 李力行,苗世洪,孙丹丹,等. 多利益主体参与下主动配电网完全信息动态博弈行为[J]. 电工技术学报,2018,33(15):3499-3509.
LI Lixing,MIAO Shihong,SUN Dandan,et al. Dynamic games of complete information in active distribution network with multi-stakeholder participation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(15):3499-3509.
- [15] 齐琛,汪可友,李国杰,等. 交直流混合主动配电网的分层分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):1909-1917.
QI Chen,WANG Keyou,LI Guojie,et al. Hierarchical and distributed optimal scheduling of AC/DC hybrid active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(7):1909-1917.
- [16] 张开宇,宋依群,严正. 考虑用户违约可能的负荷聚合商储能配置策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):127-133.
ZHANG Kaiyu,SONG Yiqun,YAN Zheng. Energy storage capacity optimization for load aggregators considering probability of demand response resources breach[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):127-133.
- [17] FERREIRA R S,BORGES C L T,PEREIRA M V F. A flexible mixed-integer linear programming approach to the

- AC optimal power flow in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2447-2459.
- [18] PARVANIA M, FOTUHI-FIRUZABAD M. Demand response scheduling by stochastic SCUC[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 89-98.
- [19] BAGAL H A, SOLTANABAD Y N, DADJUO M, et al. Risk-assessment of photovoltaic-wind-battery-grid based large industrial consumer using information gap decision theory[J]. Solar Energy, 2018, 169: 343-352.
- [20] LEI S, HOU Y, QIU F, et al. Identification of critical switches for integrating renewable distributed generation by dynamic network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 420-432.
- [21] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distri-

bution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

作者简介:



蔡 杰

蔡 杰(1985—),男,山东枣庄人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统优化规划技术、电力系统优化运行与控制技术等(**E-mail**: dtscj@163.com);

尹斌鑫(1995—),男,湖南邵阳人,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化规划与运行、压缩空气储能系统等(**E-mail**: seeeybx@hust.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Complete information dynamic games and coordinated scheduling method with multi stakeholders in AC/DC distribution network considering security constrains

CAI Jie¹, YIN Binxin², LI Zhiwei¹, LI Yaowang², LU Ping³, WANG Jianghua³, CHENG Shi⁴, MIAO Shihong²

(1. Economic Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China;

4. Urumqi Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on an AC/DC distribution network structure including DNOs (Distribution Network Operators), microgrids and load aggregators, a complete information dynamic games and coordinated scheduling method with multi stakeholders participated in AC/DC distribution network considering the security constrains is proposed. Based on the analysis of the rights, responsibilities and schedulable resources of the stakeholders in the AC/DC distribution network, the revenue function of the multi stakeholders in the AC/DC distribution network is obtained, and the operation constraint model considering the demand side response, dispatchable distributed generator and voltage source converter is established. A complete information dynamic game mechanism is proposed, which disperses the pricing power of DNO into the bargaining power of various stakeholders, while retaining the dispatching rights of DNO. Aiming at the game problem, a dynamic game problem solving method combining dynamic game particle swarm optimization and linear programming is proposed. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation. The simulation results show that compared with the traditional AC/DC distribution network scheduling mechanism, after adopting the dynamic game and coordinated scheduling mechanism, the correlation between the income and resource amount of each participant is enhanced, the total social benefit of the distribution network increases, the curtailment of wind and photovoltaic and the reversal power to the main network are reduced, and the market fairness, system economy and environmental protection are improved.

Key words: AC/DC distribution network; game theory; coordinated scheduling; security constrains; multi stakeholders

附录 A

由本文序贯议价函数的定义及博弈流程可知，博弈过程结束时议价参与人所提的任何提升己方收益的运行策略，将因大幅降低决策参与人收益而被拒绝（否则博弈将继续进行）。

在博弈结束时，任意使议价参与人 DNO 的收益上升，即 $B_{DNO}(s'_{DNO}, s_{MG}^*, s_{LA}^*) > B_{DNO}(s_{DNO}^*, s_{MG}^*, s_{LA}^*)$ 。其中，策略集 s'_{DNO} 将导致决策参与人 MG 或 LA 的收益大幅下降，即 $B_{MG}(s'_{DNO}, s_{MG}^*, s_{LA}^*) < B_{MG}(s_{DNO}^*, s_{MG}^*, s_{LA}^*)$ 或 $B_{LA}(s'_{DNO}, s_{MG}^*, s_{LA}^*) < B_{LA}(s_{DNO}^*, s_{MG}^*, s_{LA}^*)$ ，从而被决策参与人 MG 或 LA 拒绝。

由此可得，此时可行解空间内（可被决策参与人接受的解空间），任一策略集 s''_{DNO} 将使得 $B_{DNO}(s''_{DNO}, s_{MG}^*, s_{LA}^*) < B_{DNO}(s_{DNO}^*, s_{MG}^*, s_{LA}^*)$ 。

同理可证：

$$\begin{cases} B_{MG}(s_{DNO}^*, s''_{MG}, s_{LA}^*) < B_{MG}(s_{DNO}^*, s_{MG}^*, s_{LA}^*) \\ B_{LA}(s_{DNO}^*, s_{MG}^*, s''_{LA}) < B_{LA}(s_{DNO}^*, s_{MG}^*, s_{LA}^*) \end{cases} \quad (A1)$$

由纳什均衡定义可知，此时策略组合 s_{LA}^* 、 s_{DNO}^* 为当前问题纳什均衡解。

附录 B

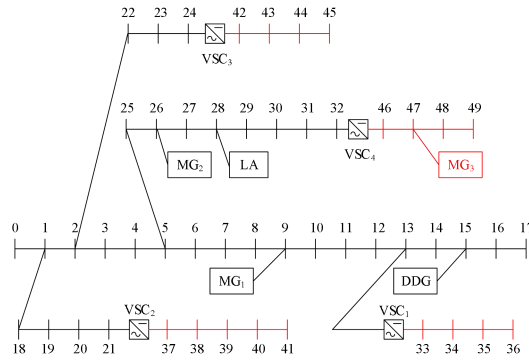


图 B1 49 节点系统

Fig.B1 49-node system

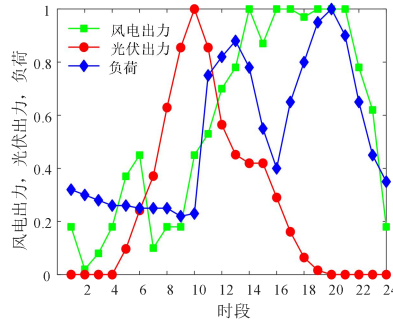


图 B2 风电、光伏、负荷曲线

Fig.B2 Curves of wind, photovoltaic and load

表 B1 电价参数

Table B1 Parameters of electricity price

参数/[$\$/(\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$]	数值	参数/[$\$/(\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$]	数值
C_t^N	60	$C_{t,m}^{\text{res}}$	25
C_t^{Gb}	55	C_t^{Gs}	35