

基于非合作博弈的独立售电公司最优规划方法

林伟伟,胡志坚,谢仕炜,宁月,易辰颖,郑云飞

(武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要:随着电力体制改革持续推进,电力市场进一步开放,新增售电主体接入配电网,在丰富配电侧可调配资源的同时增大了规划难度。为了指导独立售电公司合理参与配电网建设,形成良好的市场环境,提出一种基于非合作博弈的最优规划方法,以确定售电公司发电设备的投资方案。首先,提出独立售电公司综合运营策略及模型;然后,基于完全信息非合作静态博弈,以独立售电公司的综合收益作为各主体的优化目标,建立非合作博弈模型;最后,研究非合作静态博弈流程,为了求解复杂的混合整数非线性模型,采用二阶锥松弛方法将模型转化为混合整数二阶锥规划问题,提出基于数学优化的迭代搜索算法用以求解所提模型的Nash均衡解。以IEEE 33节点系统为例,仿真结果表明了所提模型的合理性与算法的有效性。

关键词:博弈论;非合作博弈;多利益主体;二阶锥规划;Nash均衡;独立售电公司;电力市场

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002028

0 引言

根据新电改“9号文”及系列配套文件提出的“管住中间,放开两端”的核心改革思想^[1],配售电侧改革主要集中在输配电价、增量配电网及电力市场等方面。随着电力市场的进一步开放,由社会资本组建的新增售电主体将参与配电网的建设与运营,在配电层形成多主体共同参与的格局。新增售电主体为配电网提供丰富的调配资源,但同时也提出了更多挑战。如何协调不同利益主体间的利益关系,构建主体间良好的互动机制,成为国内外众多学者的研究热点。

针对新增售电主体的研究^[2-6]目前主要集中在新增售电主体的经营模式与竞价策略方面。文献[2]分析了新增售电主体的竞争模式,考虑供电服务投入建立售电主体市场竞争模型,完善了售电公司的营销策略;文献[3]以用户感知价值为基础,提出了售电公司销售、回收电力设备的定价策略;文献[4-6]探讨了新增售电主体的经营模式,从用户价格机制和市场风险规避角度分别提出了售电主体的竞价交易策略。但从配电网规划角度,考虑新增售电主体间竞争合作关系的规划研究有待进一步加强。配电网规划^[7-11]的相关研究已经十分成熟,文献[7]从规划模型、方法和求解算法3个角度阐述了配电网规

划研究的丰硕成果,同时展望了人工智能、电动汽车和储能等新技术在配电网规划中的研究前景;文献[8]结合不确定随机理论,建立以经济性和最小生成树为目标的主动配电网规划模型;文献[9]建立了不同分布式电源(DG)和负荷的模型,从投资与运行角度实现网络协同规划;文献[10]站在配电网公司的角度,综合考虑了安全距离、负荷转供和不确定性等多种因素,建立了配电网规划双层模型;文献[11]提出了电力市场背景下风储混合系统的规划与运行方法。但上述研究大多基于单一主体的单个或多个目标最大化建立规划模型,无法解决多主体间的协调互动问题。借鉴博弈论在经济学中解决多主体问题的成功案例,许多学者开始研究如何将博弈论应用到电力系统。文献[12]从经济层面分析了售电企业的定价策略,同时分析了供给侧与需求侧的能量博弈关系;文献[13]将风电、光伏和储能装置组成不同的合作模式,建立混合系统的规划模型,得到综合资源利用最佳的合作模式;文献[14]引入古诺模型描述电力市场主体间的竞争关系;文献[15]在考虑用户满意度的同时,提出了一种基于博弈论的分时电价最优定制策略,可有效减小峰谷差,降低平均电价;文献[16]对用户、投资开发商和电力公司进行博弈分析,并将其应用于多级微电网的优化配置中;文献[17]将博弈论应用到电力系统的参数观测中,基于博弈演化算法提出了一种新的相量测量单元配置方法,该方法具有收敛性好、收敛速度快等优点;在利益分配方面,文献[18]为了将由电能替代产生的效益更加公平地分摊至电力用户,基于合作博弈,提出了一种新的效益分摊方法,该方法有助于激励用户参与电能替代;文献[19]利用讨价还价博弈理论,对虚拟电厂中的分布式电源收益进行合理分配,可保证分配的公平性和联盟的稳定性。上述研究为博

收稿日期:2019-07-31;修回日期:2019-12-28

基金项目:国网福建省电力有限公司重点科技项目(SGFJJY-00GHJS1800043);国网湖北省电力有限公司科技项目(SGHB-JY00PSJS1800033)

Project supported by the Key Science and Technology Project of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.(SGFJJY-00GHJS1800043) and the Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd.(SGHB-JY00PSJS1800033)

弈论应用于电力系统领域做出了贡献。

考虑电力市场背景下新增售电主体间的竞争互动关系鲜有研究。本文考虑不同利益主体的市场竞争行为,基于非合作静态博弈理论,提出独立售电公司 IERC (Independent Electricity Retail Company) 的博弈规划模型,其以各主体投资运行综合收益为目标;提出基于数学优化的迭代搜索算法,用于求解模型的 Nash 均衡解,确定 IERC 发电设备的投资方案,最后通过 IEEE 33 节点系统算例进行仿真验证所提模型的有效性 & 算法的优越性。

1 IERC 模型

根据电改“9号文”以及借鉴英国、美国等成熟的售配电市场^[1-2],我国售电市场逐步开放的同时,配售电模式将逐渐由传统电网公司承担过渡到拥有众多 IERC 共同参与的新的售配电模式,如图 1 所示。

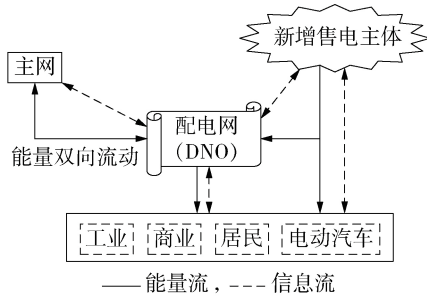


图1 新型配售电模式

Fig.1 Novel electricity allocation mode

其中,配电网运营商 DNO (Distribution Network Operator) 作为电能的中转商,通过向输电网和新增售电主体购电,经过配电网架向区域内负荷供电。图 1 涵盖了能量流与信息流,信息流传递主体信息,实现主体互动。新增售电主体根据发售电运营模式可将其划分为不同的 IERC,如表 1 所示。

表1 IERC 分类及运营模式

Table 1 Classification and operation mode of IERC

IERC	类型	运营模式
I	电网公司组建的售电公司(兜底)	向主网和其余发电企业购电
II	含分布式电源的用户,发电企业组建的售电企业,高新产业园区	自行发电上网
III	节能服务公司,社会资本建立的其他售电公司	无发电资源

具备发电能力的售电公司可选择不同的电源类型及并网策略。为了促进对风/光资源的消纳,本文假定 IERC-II 可建设包括风/光等典型的分布式电源,且暂不具备建设增量配电网的能力,IERC-II 将分布式电源的电能出售给 DNO 以获取收益。收益最大化的运营策略是 IERC-II 的电源出力应该尽

可能地由 DNO 消纳,即实际并网功率 GCP (Grid-Connected Power) 应该充分利用系统剩余的可消纳空间。系统可消纳空间由负荷水平、网架传输能力和联络线倒送功率组成,本文通过最小化网络损耗的方式计算得到。实际并网总功率 P^{GC} 的计算公式如式(1)所示。

$$P^{GC} = \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{nSc}} P_{i,s}^{gc} = \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{nSc}} (P_{i,s}^w + P_{i,s}^{pv}) \quad (1)$$

其中, $P_{i,s}^{gc}$ 为场景 s 下母线 i 处的实际并网功率,由风机并网功率 $P_{i,s}^w$ 和光伏并网功率 $P_{i,s}^{pv}$ 组成; Ω^{AP} 为配电网中允许 IERC-II 接入的母线集合; Ω^{nSc} 为场景集合, s 可在场景集合中取值,场景集合的划分可参考文献[9]。考虑到风电、光伏出力和负荷的不确定性,本文采用典型的风电、光伏出力和负荷水平模拟规划周期内相关量的变化规律,采用多场景技术将不确定量转为单一场景下的确定值进行研究。图 2 给出了春季典型场景下的实际并网功率曲线(图中功率为标幺值,后同)。

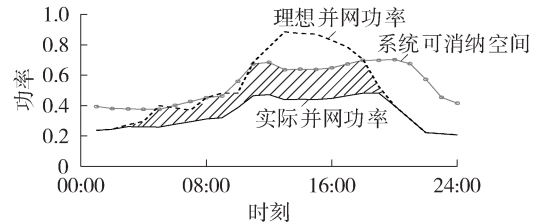


图2 实际并网功率曲线(不含储能)

Fig.2 Actual grid-connected power curve (without energy storage)

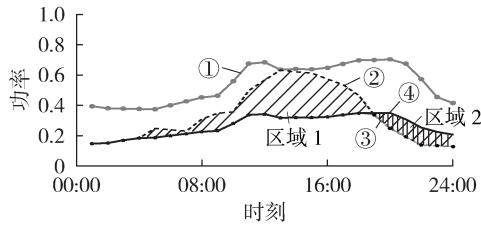
图 2 中的理想并网功率指当前风机、光伏的最大输出功率,由于可消纳空间及系统约束的限制,存在弃风、弃光现象,表现为可消纳空间利用不足,实际并网功率小于理想并网功率。本文引入蓄电池作为储能设备,储能的配置原则是尽可能地利用系统剩余可消纳空间,即缩小图 2 中的阴影部分(未利用空间),提高实际并网功率。含储能的实际并网功率的计算公式为:

$$P^{GC} = \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{nSc}} P_{i,s}^{gc} = \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{nSc}} (P_{i,s}^w + P_{i,s}^{ew,dc} + P_{i,s}^{pv} + P_{i,s}^{epv,dc}) \quad (2)$$

其中, $P_{i,s}^{ew,dc}$ 、 $P_{i,s}^{epv,dc}$ 分别为场景 s 下母线 i 处风储、光储的放电功率。

图 3 给出了春季典型场景下含储能的实际并网功率曲线。对比图 2 可知,储能有效地减小了理想并网功率超出系统可消纳空间的比例。图 3 中储能的初始能量为 0,区域 1 表示由于网架和负荷水平约束导致的弃风、弃光量,此时储能充电;区域 2 表示储能的放电功率,相比于不含储能的实际并网功率,储能增加了实际并网功率,在系统剩余可利用空间

较大时,可以有效地提升实际并网功率,增加收益。



① 系统可消纳空间, ② 理想并网功率
③ 实际并网功率(不含储能), ④ 实际并网功率(含储能)

图3 实际并网功率曲线(含储能)

Fig.3 Actual grid-connected power curves
(with energy storage)

2 考虑多主体参与的规划模型

随着配电市场的逐步开放,为了鼓励IERC的发展,形成良性的电力交易模式,未来将涌现众多的IERC开发并争夺市场资源。本文旨在解决IERC在市场竞争环境下的运营策略问题,该策略由风、光、储等设备的接入台数构成。传统的规划方法能够解决多目标优化问题,但无法刻画不同利益主体在竞争过程中的差异与联系,且易受主观因素影响不同目标之间的重要性,无法反映市场的客观性。因此本文引入经济学领域中的博弈思想,建立博弈规划模型解决IERC的运营策略问题。

2.1 博弈基本理论

经济学中的博弈论常用于解决多个主体相互竞争的问题。博弈包含参与者、策略、支付这3个要素。不同的参与者在已有的策略空间中选取策略以取得最大支付,而参与者的支付受到其余参与者的策略影响。经典Nash均衡^[20]是博弈论中较为经典且应用范围最广的理论。经典Nash理论下Nash均衡解的物理意义在于,任何参与者都无法通过改变策略以获得更大的支付。

根据博弈主体间是否存在合作协议以及主体间信息是否完全交互,可将博弈论分为合作/非合作博弈和完全信息/不完全信息博弈^[20],在本文所提模型中,各主体间在知晓对方主体的决策及成本等信息下相互竞争。因此本文所提模型为完全信息下的非合作博弈规划模型,通过求解Nash均衡解作为优化结果。博弈的参与者为各IERC(IERC-II),参与者的策略为风、光、储等设备接入数,支付为通过向DNO出售的实际并网功率获得的净收益。假定所有参与者具有完全理性,且参与者在做出决策前知晓其余参与者的策略。

2.2 博弈规划模型

首先构建博弈格局,为了方便说明,假定有2家IERC(A和B)。博弈的参与者为不同的IERC(IERC-II),IERC-II集合为 $\Omega^P = \{A, B\}$ 。本文将具有额定

容量的设备数作为参与者的决策变量,参与者的策略是风、光、储设备的接入数量,分别用 N_w, N_s, N_e 表示,因此参与者具有连续离散的决策空间为 $\Omega_A = \{N_w^A, N_s^A, N_e^A\}, \Omega_B = \{N_w^B, N_s^B, N_e^B\}$,则参与者的策略集合为 $\Omega^D = \{\Omega_A, \Omega_B\}$, Ω_A, Ω_B 分别为主体A、B的决策空间;基于全寿命周期计算IERC-II投资建设风、光、储的净收益,将其作为博弈参与者的支付,博弈的支付集合为 $\Omega^I = \{I_A, I_B\}$, I_A, I_B 分别为主体A、B的支付。

通过求解上述博弈格局的Nash均衡解,确定A和B接入的风、光、储台数。结合文献[13]求取Nash均衡解的方法,求解Nash均衡解的过程中涉及参与者的独立优化决策。需要说明的是,本文的利益主体为不同的IERC-II,各主体间虽然在决策变量和策略集合上存在差异,但仍然属于同种性质的模型,因此为了书写方便,各独立主体的优化过程采用统一的模型表征。目标函数主要包含收益 I 和成本 C ,约束条件主要包含投资约束和模拟运行约束。多主体参与的投资策略独立优化通用模型为:

$$\begin{cases} \max_{x^{inv}, x^{ope}} F(x^{inv}, x^{ope}) = I^{Profit} - C^{inv} - C^{ope} \\ \text{s.t.} \quad G(x^{inv}, x^{ope}) \leq 0 \\ \quad \quad H(x^{inv}, x^{ope}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, I^{Profit} 为售电收益; C^{inv} 为投资成本; C^{ope} 为运维成本; $G(\cdot)$ 和 $H(\cdot)$ 分别为不等式约束和等式约束,其中包含投资约束和模拟运行约束,模拟运行约束包含配电网潮流约束、系统安全约束和并网功率约束等; x^{inv}, x^{ope} 分别为投资决策变量、运行决策变量。

2.2.1 目标函数

目标函数由售电收益(I^{Profit})和投资、运维成本(C^{inv}, C^{ope})组成。IERC-II在接入点的实际并网功率由风电、光伏发电和储能状态变化量决定,风电和光伏发电的实际并网量按照现行实际上网电价计算收益,储能能 IERC 的投资运行环节主要提供辅助功能以获取辅助收益。考虑到政策对新能源发电企业的扶持,将政府补贴以补贴系数的形式统一计入售电收益。 $I^{Profit}, C^{ope}, C^{inv}$ 的表达式分别见式(4)~(6)。

$$I^{Profit} = \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{SC}} P_{i,s}^{sc} \Delta t c_s^{price} = \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{SC}} (P_{i,s}^w + P_{i,s}^{ew,dc}) \Delta t c_s^{pri,w} + \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{SC}} (P_{i,s}^{pv} + P_{i,s}^{epv,dc}) \Delta t c_s^{pri,pv} \quad (4)$$

$$C^{ope} = \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{SC}} \hat{P}_{i,s}^w \Delta t c_s^{ope,w} + \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{SC}} [(P_{i,s}^{ew,dc} + P_{i,s}^{epv,dc}) \Delta t c_s^{ope,edc} + (P_{i,s}^{ew,c} + P_{i,s}^{epv,c}) \Delta t c_s^{ope,ec}] + \sum_{i \in \Omega^{AP}} \sum_{s \in \Omega^{SC}} \hat{P}_{i,s}^{pv} \Delta t c_s^{ope,pv} \quad (5)$$

$$C^{\text{inv}} = \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} x_i^{\text{w}} c^{\text{w}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} x_i^{\text{pv}} c^{\text{pv}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} (x_i^{\text{ew}} + x_i^{\text{epv}}) c^{\text{e}} \quad (6)$$

其中, Δt 为单个场景的时间跨度; c_s^{price} 为场景 s 的综合电价系数; $c_s^{\text{pri, w}}$ 、 $c_s^{\text{pri, pv}}$ 分别为场景 s 下风机、光伏系统的综合电价系数; $\hat{P}_{i, s}^{\text{w}}$ 、 $\hat{P}_{i, s}^{\text{pv}}$ 分别为场景 s 下母线 i 处风机、光伏的发电功率; $P_{i, s}^{\text{ew, c}}$ 、 $P_{i, s}^{\text{epv, c}}$ 分别为场景 s 下母线 i 处风储、光储的充电功率; $c_s^{\text{ope, w}}$ 、 $c_s^{\text{ope, pv}}$ 、 $c_s^{\text{ope, edc}}$ 、 $c_s^{\text{ope, ec}}$ 分别为场景 s 下风机、光伏、储能放电、储能充电的运行维护费用系数; x_i^{w} 、 x_i^{pv} 、 x_i^{ew} 、 x_i^{epv} 为 IERC-II 的投资决策变量, 分别表示母线 i 处风机、光伏、风储、光储设备的投资数量; c^{w} 、 c^{pv} 分别为风机、光伏设备的单位投资费用系数; c^{e} 为储能设备的单位投资费用系数。

本文所建模型旨在为 IERC 制定运营策略, 在新型售电模式下 IERC 的成本主要考虑投资和运行维护成本。由于不涉及 IERC 直接与用户签订供电合同, 所以由 IERC-II 供电不足导致的负荷丢失成本在本文所建模型中不予考虑。

2.2.2 约束条件

(1) 模拟运行约束。

IERC-II 将电能经过配电网输送至用户端, 因此需要满足线路、变压器及潮流等约束条件。

a. 线路容量约束。

$$|I_{ij, s}| \leq I_{ij}^{\text{max}} \quad \forall ij \in \Omega^{\text{BS}}, \forall s \quad (7)$$

其中, $I_{ij, s}$ 为场景 s 下支路 ij 的电流; I_{ij}^{max} 为支路 ij 的电流幅值上限; Ω^{BS} 为支路集合。由于网络中含有分布式电源, 存在功率倒送情况, 支路倒送电流同样满足式(7)所示约束。

b. 变压器节点功率约束。

$$\begin{cases} P_i^{\text{TF, min}} \leq P_{i, s}^{\text{TF}} \leq P_i^{\text{TF, max}} \\ Q_i^{\text{TF, min}} \leq Q_{i, s}^{\text{TF}} \leq Q_i^{\text{TF, max}} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega^{\text{TF}}, \forall s \quad (8)$$

其中, $P_{i, s}^{\text{TF}}$ 、 $Q_{i, s}^{\text{TF}}$ 分别为场景 s 下变压器节点 i 的有功、无功功率; $P_i^{\text{TF, max}}$ 、 $P_i^{\text{TF, min}}$ 和 $Q_i^{\text{TF, max}}$ 、 $Q_i^{\text{TF, min}}$ 分别为变压器节点 i 的有功功率和无功功率的上、下限; Ω^{TF} 为变压器节点集合。当分布式电源可 100% 为负荷供电时, 允许将多余电量送至主网, 因此有功、无功功率的下限值为负数, 倒送比例由联络线参数决定。

c. 节点电压约束。

$$U_i^{\text{min}} \leq U_{i, s} \leq U_i^{\text{max}} \quad \forall i \in \Omega^{\text{NS}}, \forall s \quad (9)$$

其中, $U_{i, s}$ 为场景 s 下节点 i 的电压; U_i^{max} 、 U_i^{min} 分别为节点 i 电压幅值的上、下限; Ω^{NS} 为节点集合。一般配电网中仅有单变压器节点(PV 节点), 其节点电压上、下限均为 1.05 p.u.(即节点电压为恒定值 1.05 p.u.)。

d. 潮流约束。

$$\begin{cases} \sum_{k \in f(i)} P_{ik, s} + \sum_{i \in \Omega^{\text{load}}} P_{i, s}^{\text{L}} = \sum_{j \in t(i)} (P_{ji, s} - I_{ji, s}^2 r_{ji}) + \sum_{i \in \Omega^{\text{TF}}} P_{i, s}^{\text{TF}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} P_{i, s}^{\text{gc}} \\ \sum_{k \in f(i)} Q_{ik, s} + \sum_{i \in \Omega^{\text{load}}} Q_{i, s}^{\text{L}} = \sum_{j \in t(i)} (Q_{ji, s} - I_{ji, s}^2 x_{ji}) + \sum_{i \in \Omega^{\text{TF}}} Q_{i, s}^{\text{TF}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} Q_{i, s}^{\text{gc}} \end{cases} \quad (10)$$

$$U_{i, s}^2 = U_{j, s}^2 - 2(r_{ji} P_{ji, s} + x_{ji} Q_{ji, s}) + (r_{ji}^2 + x_{ji}^2) I_{ji, s}^2 \quad \forall i \in \Omega^{\text{NS}}, \forall j \in b(i), \forall s \quad (11)$$

$$I_{ji, s}^2 U_{j, s}^2 = P_{ji, s}^2 + Q_{ji, s}^2 \quad \forall i \in \Omega^{\text{NS}}, \forall j \in b(i), \forall s \quad (12)$$

其中, $P_{ik, s}$ 、 $Q_{ik, s}$ 分别为场景 s 下支路 ik (以 i 为首节点、以 k 为末节点) 的有功、无功功率; $P_{ji, s}$ 、 $Q_{ji, s}$ 分别为场景 s 下支路 ji (以 j 为首节点、以 i 为末节点) 的有功、无功功率; $P_{i, s}^{\text{L}}$ 、 $Q_{i, s}^{\text{L}}$ 分别为负荷节点 i 的有功、无功功率; r_{ji} 、 x_{ji} 分别为支路 ji 的电阻、电抗; $f(i)$ 为以 i 为首节点的支路的末节点集合; $t(i)$ 为以 i 为末节点的支路的首节点集合; Ω^{load} 为负荷节点集合; $U_{i, s}^2$ 、 $U_{j, s}^2$ 分别为场景 s 下节点 i 、 j 的电压幅值平方项; $b(i)$ 为与节点 i 相连的支路端点集合。

e. 实际并网功率约束。

IERC 在模拟运行时的实际并网功率受系统当前可消纳空间约束, 系统可消纳空间由负荷、其余发电企业的上网电量和联络线功率组成。

$$0 \leq \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} P_{i, s}^{\text{gc}} \leq P_s^{\text{space}} \quad \forall s \quad (13)$$

其中, P_s^{space} 为场景 s 下系统可消纳功率空间。

f. 储能约束。

充放电状态约束为:

$$s_{\text{sti}, s}^{\text{dc}} + s_{\text{sti}, s}^{\text{c}} \leq 1 \quad \forall i \in \Omega^{\text{AP}}, \forall s \quad (14)$$

$$\begin{cases} s_{\text{sti}, s}^{\text{c}} = 1 & \Delta P_{i, s} \geq 0, \forall i \in \Omega^{\text{AP}}, \forall s \\ \Delta P_{i, s} = \hat{P}_{i, s}^{\text{w}} + \hat{P}_{i, s}^{\text{pv}} - P_{i, s}^{\text{w}} - P_{i, s}^{\text{pv}} \end{cases} \quad (15)$$

充放电功率约束为:

$$\begin{cases} P_{i, s}^{\text{edc}} \leq P_{i, s}^{\text{edc, max}} x_i^{\text{c}} s_{\text{sti}, s}^{\text{dc}} \\ P_{i, s}^{\text{ec}} \leq P_{i, s}^{\text{ec, max}} x_i^{\text{e}} s_{\text{sti}, s}^{\text{c}} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega^{\text{AP}}, \forall s \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_{i, s}^{\text{ec}} \leq \Delta P_{i, s} \\ \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} P_{i, s}^{\text{edc}} + P_{i, s}^{\text{w}} + P_{i, s}^{\text{pv}} \leq P_s^{\text{space}} \end{cases} \quad \forall i, \forall s \quad (17)$$

储能容量约束为:

$$\begin{cases} E_{i, s}^{\text{e, min}} x_i^{\text{e}} \leq E_{i, s}^{\text{e}} \leq E_{i, s}^{\text{e, max}} x_i^{\text{e}} \\ E_{i, s}^{\text{e}} = E_{i, s-1}^{\text{e}} + \eta^{\text{c}} P_{i, s}^{\text{ec}} - \eta^{\text{d}} P_{i, s}^{\text{edc}} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega^{\text{AP}}, \forall s \quad (18)$$

其中, $s_{\text{sti}, s}^{\text{c}}$ ($s_{\text{sti}, s}^{\text{dc}}$) 为储能的充(放)电状态, 为 0-1 变量, 处于充(放)电状态时取值为 1, 不处于充(放)电状态时取值为 0; $\Delta P_{i, s}$ 为场景 s 下接入节点 i 未利用的分布式电源功率; $P_{i, s}^{\text{ec}}$ 、 $P_{i, s}^{\text{edc}}$ 分别为场景 s 下节点 i 处储能的充、放电功率; $P_{i, s}^{\text{ec, max}}$ 、 $P_{i, s}^{\text{edc, max}}$ 分别为单台储能设备的充、放电功率上限值, 储能的充电功率受设备参数和充电功率裕度限制; x_i^{e} 为节点 i 处储能的数量,

为了书写方便,此处未明确区分风储与光储设备,均采用 x_i^e 表示,后同; $E_{i,s}^e$ 为场景 s 下节点 i 处储能的状态量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; $E_{i,s}^{e,\min}$ 、 $E_{i,s}^{e,\max}$ 分别为场景 s 下节点 i 处单台储能设备的剩余最小、大容量比率; η^c 、 η^{dc} 分别为储能的充、放电效率。

(2) 投资约束。

IERC可投资的设备包含风、光、储等,假定无风机和光伏设备时不安装储能装置。

$$\begin{cases} x_i^w \leq M_i^w \\ x_i^{\text{pv}} \leq M_i^{\text{pv}} \\ x_i^{\text{ew}} P^{\text{ec},\max} \leq x_i^w P^{\text{rate},w} \\ x_i^{\text{epv}} P^{\text{ec},\max} \leq x_i^{\text{pv}} P^{\text{rate},\text{pv}} \end{cases} \quad \forall i \quad (19)$$

式(19)表示储能瞬时充电功率不能超过最大风机和光伏出力之和。其中, M_i^w 、 M_i^{pv} 分别为节点 i 处风机、光伏设备的最大可接入量; $P^{\text{rate},w}$ 、 $P^{\text{rate},\text{pv}}$ 分别为单台风机、光伏设备的额定功率。

3 博弈模型的求解方法

本文建立的独立优化模型是复杂的混合整数非线性模型,式(10)—(12)、(16)包含非线性项,难以通过数学方法直接求解。智能算法虽能够求解上述模型,但考虑到本文所求Nash均衡解对优化结果的依赖性,智能算法无法满足要求(具体将在4.2节算法性能分析处给出)。为了解决上述问题,需要对模型进行线性化处理,具体过程详见附录A。线性化后的模型可采用CPLEX求解器进行求解。

综上所述,独立优化模型目标函数 $F(\cdot)$ 由式(4)—(6)组成,约束条件 $G(\cdot)$ 、 $H(\cdot)$ 由式(8)、(13)、(14)、(17)—(19)以及附录A中的式(A2)—(A7)和式(A9)组成。基于上述独立优化模型,Nash均衡解的求解流程如图4所示。为了反映市场中主体投资的先后顺序,在后续仿真分析中,本文假定将主体 B 不参与投资的情况下主体 A 的独立优化结果作为Nash均衡点的初值。

4 算例分析

4.1 算例说明

本文采用改进的IEEE 33节点系统作为仿真算例,基准容量为 $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$,规划运行年限为10 a,折现率为0.1,系统负荷增长为原系统基值的1.5倍。以四季典型日24 h预测数据为模拟运行场景,共有96个场景。场景划分、网络参数、典型风速和光照强度曲线详见文献[9]。设备参数见附录B中表B1和表B2。

4.2 仿真结果

为了具体分析本文所提模型在电力市场改革中的适用性,设置若干案例如表2所示。

需要说明的是,本文重点研究IERC的非合作博

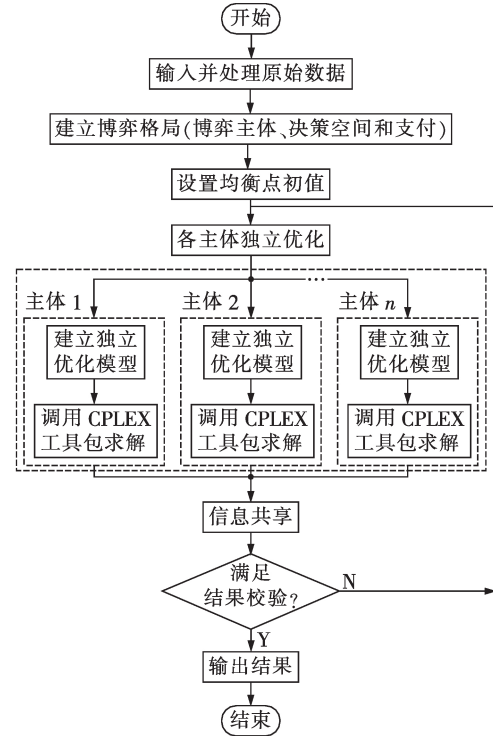


图4 非合作博弈Nash均衡解的求解流程

Fig.4 Flowchart of solving Nash equilibrium solution for non-cooperative game

表2 不同案例下博弈主体的参数设置

Table 2 Parameter setting of game players under different cases

案例	接入位置		设备成本		政府补贴	
	博弈主体A	博弈主体B	博弈主体A	博弈主体B	博弈主体A	博弈主体B
Case 1	6	6	1	1	1	1
Case 2	6	(6, 15)	1	1	1	1
Case 3	6	6	1	2	1	1
Case 4	6	6	1	1	1	0.5

弈行为。表2中,接入位置表示IERC可接入节点集合,表征配电网的开放程度;设备成本取值为1表示现有成本,取值为2表示现有成本的2倍;政府补贴取值为1表示现有补贴,取值为0.5表示现有补贴的50%。在4个案例中,保持博弈主体 A 的参数不变,调整博弈主体 B 的参数。以Case 1与Case 2相比为例,博弈主体 A 的参数不变,博弈主体 B 的接入位置参数发生变化,其余参数不变。

(1) 模型有效性分析。

为了说明本文所提博弈规划模型的有效性,在表2所示Case 1下分别采用本文所提博弈法与多目标下Pareto法和权重法求解多主体参与下的规划问题。将各主体的支付作为多目标,Pareto法采用改进粒子群优化(PSO)算法求解并利用逼近理想解法(TOPSIS)从Pareto非劣解集中筛选最优解;权重法通过权重系数设置将多目标转化为单目标进行求

解。本文方法、Pareto法和权重法的结果对比如表3所示。

表3 不同方法的优化结果对比
Table 3 Comparison of optimization results among different methods

方法	博弈主体	风机 (风储) / 台	光伏 (光储) / 台	利润 / 万元	总收益 / 万元
本文方法	A	31(5)	28(5)	974.95	2013.09
	B	36(6)	26(4)	1038.14	
Pareto法	A	21(6)	6(6)	869.93	2163.44
	B	32(13)	7(6)	1293.51	
权重法	A	20(1)	2(0)	296.69	2239.05
	B	50(8)	46(9)	1942.37	

由表3可知,上述3种方法均能有效地求解多目标优化问题。Case 1中不同博弈主体的决策变量、空间及目标完全一致,根据经济学概念,双方博弈的结果将近似相同。基于本文方法,博弈双方的优化结果基本相同,而基于其他方法,博弈主体间存在较大的差异。图5给出了采用权重法求解的多次优化结果。

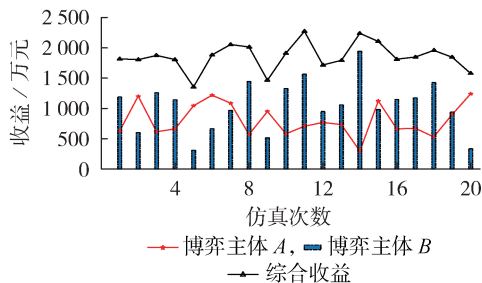


图5 权重法的优化结果

Fig.5 Optimization results of weight method

从图5中不难发现,权重法虽然能够获得总收益的较优解,但重复计算的结果并不唯一。博弈主体的优化结果差异明显,相互之间的关系无法体现且权重系数易受人为主观因素的影响。

进一步地,图6给出了Pareto解集与Nash均衡解的关系。由图6可知,虽然非合作Nash均衡解不属于Pareto非劣解集,但二者极为接近。Pareto法和权重法一样,在选取最优解时易受主观因素的影响。

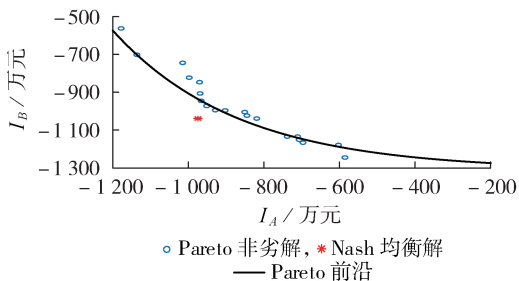


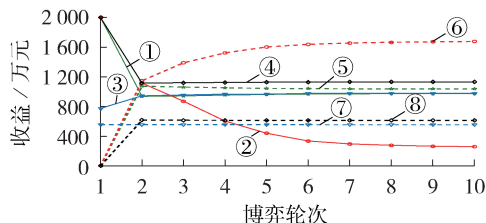
图6 Pareto前沿与Nash均衡解

Fig.6 Pareto frontier and Nash equilibrium solution

采用3种不同的方法对本文所提模型的有效性进行验证,可以得到如下结论:虽然本文所提方法不能取得最大的总收益,但其能在取得较优值的同时反映电力市场背景下相同主体的博弈客观规律,即近似均分市场利润,可以有效地避免多主体参与的规划易受主观因素影响的问题。通过上述方法的对比说明了本文所提模型及求解方法的有效性。

(2) 博弈结果分析。

图7比较了不同案例下的求解结果。由图中Case 2的结果可以看出,市场开放程度越高,则IERC在博弈过程占据主导地位的同时获得的收益也将越高;同时,在设备成本更高,政府补贴更少的情况下,售电公司的收益将降低。



① 博弈主体 A (Case 1), ② 博弈主体 A (Case 2)
③ 博弈主体 A (Case 3), ④ 博弈主体 A (Case 4)
⑤ 博弈主体 B (Case 1), ⑥ 博弈主体 B (Case 2)
⑦ 博弈主体 B (Case 3), ⑧ 博弈主体 B (Case 4)

图7 不同案例的求解结果

Fig.7 Solving results of different cases

综上所述,在补贴力度逐渐下降的未来,配电网公司应进一步开放配电网的接入权,同时售电企业自身需提高技术以降低生产成本,增强竞争力。本文所提方法可有效应对电力市场改革,反映市场规律,可为配电网规划和电力市场的建设提供指导、建议。

(3) 算法性能分析。

本文利用CPLEX工具包求解独立优化模型,为了说明本文方法与智能算法的差异与优势,分别采用数学优化算法和改进PSO算法求解独立优化模型,结果对比如表4所示。

表4 不同算法的性能参数

Table 4 Performance parameters of different algorithms

算法	博弈轮次	计算时间	平均独立优化时间/s
本文算法	10	4.5 h	810
改进PSO算法	大于700	大于7 d	720

图8对比了不同算法求解模型的收敛性能。Nash均衡解的判定指标设为相邻轮次的收益误差为0.1万元。本文算法在较少的博弈轮次下可快速达到Nash均衡解,且解的稳定性良好;相较而言,改进PSO算法的收敛速度缓慢,在博弈轮次达到700轮时达到Nash均衡解附近,但始终无法收敛。

Nash均衡解有严格的数学定义,因此对结果的

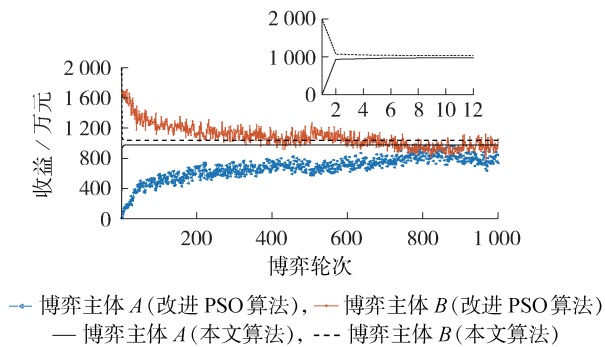


图8 本文方法与改进 PSO 算法的收敛性能对比
Fig.8 Comparison of convergence performance between proposed algorithm and improved PSO algorithm

要求更加严格,在同一情形下,数学优化算法前后2次的结果唯一,而智能算法前后2次的优化结果并不唯一,且容易陷入局部最优,造成结果偏离 Nash 均衡解。解的不唯一性是造成2种算法性能差异的根本原因,本文算法能够更加高效地求解 Nash 均衡解,且解的可信度及稳定性高。

5 结论

本文通过将经济学中的博弈论思想与配电网规划相结合,建立博弈规划模型,旨在解决电改背景下新增售电主体的规划与运行等问题,为新增售电公司提供发电设备的投资方案,由仿真结果可得主要结论如下:

(1) 博弈规划模型能够有效地解决传统多目标规划易受主观因素影响的问题,通过分析,本文模型可反映电改背景下不同投资主体的规划行为,可为电网公司指导新型售电公司的发展提供参考建议;

(2) 电改初期的政府补贴、风/光/储等新能源设备的投资成本和电网开放程度是影响投资主体参与配电网规划的主要因素;

(3) 相比于智能算法,本文所提模型求解算法在求解 Nash 均衡解时,博弈轮次及计算时间有较大幅度的缩小,具有更快的收敛速度以及良好的稳定性。

综上所述,本文所提方法在解决了 IERC 投资决策问题的同时,也为多主体博弈规划提供了一种新思路。在后续的研究中,笔者将进一步探讨博弈论在“源-荷”、“源-网”以及“源-网-荷”等多主体博弈规划中的应用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号)[Z]. 2015-03-22.
[2] 黄康任. 电力体制改革背景下售电主体竞争策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
HUANG Kangren. Electricity sell main body competition strategy under the background of electric power system reform

[D]. Beijing:North China Electric Power University,2016.
[3] 马愿谦,肖先勇,黄勇. 考虑敏感设备“以旧换新”增值服务的定价策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):164-172.
MA Yuanqian,XIAO Xianyong,HUANG Yong. Pricing strategy considering “trade-in” value-added service of sensitive equipment[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(2):164-172.
[4] 尹龙,刘继春,高红均,等. 考虑多种用户价格机制下的综合型能源售电公司购电竞价策略[J]. 电网技术,2018,42(1):88-95.
YIN Long,LIU Jichun,GAO Hongjun,et al. Study on bidding strategy of comprehensive power retailer under multiple user-price mechanisms[J]. Power System Technology,2018,42(1):88-95.
[5] 罗琴. 市场环境下售电公司购售电策略研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
LUO Qin. Study of energy procurement and marketing decision in competitive retail market[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2014.
[6] 杨萌,艾欣,唐亮,等. 计及风险规避的售电公司平衡市场优化交易策略研究[J]. 电网技术,2016,40(11):3300-3308.
YANG Meng,AI Xin,TANG Liang,et al. Optimal trading strategy in balancing market for electricity retailer considering risk aversion[J]. Power System Technology,2016,40(11):3300-3308.
[7] 肖白,郭蓓. 配电网规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):200-211,217.
XIAO Bai,GUO Bei. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):200-211,217.
[8] 谢仕炜,胡志坚,王珏莹,等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. 电工技术学报,2019,34(5):1038-1054.
XIE Shiwei,HU Zhijian,WANG Jueying,et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(5):1038-1054.
[9] 高红均,刘俊勇. 考虑不同类型 DG 和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18):4911-4922.
GAO Hongjun,LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(18):4911-4922.
[10] 刘佳,程浩忠,徐谦,等. 网源协调驱动下考虑网络转供能力的配电系统多目标双层近期规划[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):42-49.
LIU Jia,CHENG Haozhong,XU Qian,et al. Multi-objective bi-level short-term planning of distribution system considering network transfer capability under network-generation coordination drive[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):42-49.
[11] DICORATO M,FORTE G,PISANI M,et al. Planning and operating combined wind-storage system in electricity market[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2012,3(2):209-217.
[12] 李玟萱. 主动配电网下多种博弈关系建模分析[D]. 北京:华北电力大学,2017.
LI Minxuan. Modeling and analysis of multi-game relationship under active distribution network[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.
[13] 梅生伟,王莹莹,刘锋. 风-光-储混合电力系统的博弈论规划

- 模型与分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(20):13-19.
- MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13-19.
- [14] CHUANG A S, WU F, VARAIYA P. A game-theoretic model for generation expansion planning: problem formulation and numerical comparisons[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(10): 63.
- [15] 董军, 张晓虎, 李春雪, 等. 自动需求响应背景下考虑用户满意度的分时电价最优制定策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 67-73.
- DONG Jun, ZHANG Xiaohu, LI Chunxue, et al. Optimal TOU pricing strategy considering user satisfaction in automated demand response background[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 67-73.
- [16] 陈健, 刘玉田, 张文, 等. 基于博弈论的配电网中多级微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 45-52.
- CHEN Jian, LIU Yutian, ZHANG Wen, et al. Optimal sizing analysis of multilevel microgrids in distribution network based on game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 45-52.
- [17] 毛义, 吕飞鹏. 基于博弈演化算法的PMU最优配置方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 184-188.
- MAO Yi, LÜ Feipeng. Optimal PMU placement method based on evolutionary game algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 184-188.
- [18] 陈星莺, 郁清云, 谢俊, 等. 基于合作博弈论的电网替代效益分摊方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 30-35, 44.
- CHEN Xingying, YU Qingyun, XIE Jun, et al. Benefit allocation method for electric energy substitution based on cooperative game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 30-35, 44.
- [19] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于讨价还价博弈理论的分布式能源合作收益分配模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 134-140.
- QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Profit allocation model of cooperative distributed energy resources based on bargaining game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 134-140.
- [20] 梅生伟, 刘峰, 魏韩. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 56-66.

作者简介:



林伟伟

林伟伟(1995—),男,福建莆田人,硕士研究生,主要研究方向为电网规划与优化(E-mail: linweiwei_hhu@163.com);

胡志坚(1969—),男,湖北荆州人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为配电网规划与分析、新能源接入与分布式电力系统(E-mail: zhijian_hu@163.com);

谢仕炜(1993—),男,福建泉州人,博士研究生,主要研究方向为电网规划与优化(E-mail: 994927636@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Optimal planning method of independent electricity retail company based on non-cooperative game

LIN Weiwei, HU Zhijian, XIE Shiwei, NING Yue, YI Chenying, ZHENG Yunfei

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the continuous electric power system reform and the further opening up of electricity market, the newly added electricity sellers are connected to distribution network, which enrich the allocatable resources in the distribution side while increasing the planning difficulty. In order to guide the IERCs (Independent Electricity Retail Companies) to participate in the distribution network construction reasonably and form a good market environment, an optimal planning method based on non-cooperative game is proposed to determine the investment plan of power generation equipment of IERCs. Firstly, the comprehensive operation strategy and model of IERC are proposed. Then, based on the complete information non-cooperative static game, the non-cooperative game model is established by taking the comprehensive income of IERC as the optimization objective of each subject. Finally, the non-cooperative static game process is studied. In order to solve the complex mixed integer non-linear model, the second-order cone relaxation is used to transform the model into a mixed integer second-order cone programming problem, and an iterative search algorithm based on mathematical optimization is proposed to solve the Nash equilibrium solution of the model. Taking IEEE 33-bus system as an example, simulative results verify the rationality of the proposed model and the effectiveness of the algorithm.

Key words: game theory; non-cooperative game; multi-stakeholder; second-order cone programming; Nash equilibrium; independent electricity retail company; electricity market

附录 A IERC 规划模型的线性化

本文的潮流约束采用目前广泛应用于配电网的 DISTFLOW 支路潮流形式，针对式(10)–(12)所含非线性项 $I_{ji,s}^2$ 和 $U_{ji,s}^2$ ，采用文献[8-10]所提方法处理。引入新变量 $\tilde{I}_{ji,s}$ 、 $\tilde{U}_{i,s}$ ，定义如下：

$$\begin{cases} \tilde{I}_{ji,s} = I_{ji,s}^2 \\ \tilde{U}_{i,s} = U_{i,s}^2 \end{cases} \quad (\text{A1})$$

将式 (A1) 代入式 (10) – (12)，所得结果如下：

$$\begin{cases} \sum_{k \in f(i)} P_{ik,s} + \sum_{i \in \Omega^{\text{load}}} P_{i,s}^{\text{L}} = \sum_{j \in l(i)} (P_{ji,s} - \tilde{I}_{ji,s} r_{ji}) + \sum_{i \in \Omega^{\text{TF}}} P_{i,s}^{\text{TF}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} P_{i,s}^{\text{gc}} \\ \sum_{k \in f(i)} Q_{ik,s} + \sum_{i \in \Omega^{\text{load}}} Q_{i,s}^{\text{L}} = \sum_{j \in l(i)} (Q_{ji,s} - \tilde{I}_{ji,s} x_{ij}) + \sum_{i \in \Omega^{\text{TF}}} Q_{i,s}^{\text{TF}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{AP}}} Q_{i,s}^{\text{gc}} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

$$\tilde{U}_{i,s} = \tilde{U}_{j,s} - 2(r_{ji} P_{ji,s} + x_{ji} Q_{ji,s}) + (r_{ji}^2 + x_{ji}^2) \tilde{I}_{ji,s} \quad \forall i \in \Omega^{\text{NS}}, \forall j \in b(i), \forall s \quad (\text{A3})$$

$$\tilde{I}_{ji,s} \tilde{U}_{i,s} = P_{ji,s}^2 + Q_{ji,s}^2 \quad \forall i \in \Omega^{\text{NS}}, \forall j \in b(i), \forall s \quad (\text{A4})$$

同时，将式 (7) 和式 (9) 改写成如下形式：

$$\begin{cases} \tilde{I}_{ji,s} \leq (I_{ji}^{\max})^2 \\ (U_i^{\min})^2 \leq \tilde{U}_{i,s} \leq (U_i^{\max})^2 \end{cases} \quad (\text{A5})$$

由于本文研究内容不涉及线路的升级改造，模型中的线路阻抗为常数，通过上述变形，式 (A2) 和式 (A3) 不含非线性项。针对式 (A4)，通过松弛进一步将其转为如下所示二阶锥形式：

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ji,s} \\ 2Q_{ji,s} \\ \tilde{I}_{ji,s} - \tilde{U}_{i,s} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ji,s} + \tilde{U}_{i,s} \quad (\text{A6})$$

式 (15) 含有条件判断语句，通过 big-M 法将式 (15) 改写成如下所示形式：

$$\begin{cases} 0 \leq s_{sti,s}^c + \Delta P_{i,s} / M \leq 1 \\ -M \Delta P_{i,s} \leq s_{sti,s}^c \leq M \Delta P_{i,s} \end{cases} \quad (\text{A7})$$

其中， M 为数量级较大的常数。

同样地，针对式 (16) 中是双线性项 $x_i^c s_{sti,s}^{\text{dc}}$ 、 $x_i^c s_{sti,s}^c$ ，添加辅助变量 $h_{i,s}^c$ 、 $h_{i,s}^{\text{dc}}$ ，定义如下：

$$\begin{cases} h_{i,s}^c = x_i^c s_{sti,s}^c \\ h_{i,s}^{\text{dc}} = x_i^c s_{sti,s}^{\text{dc}} \end{cases} \quad (\text{A8})$$

则式 (16) 可改写为：

$$\begin{cases} -M(1 - s_{sti,s}^c) + x_i^c \leq h_{i,s}^c \leq x_i^c + M(1 - s_{sti,s}^c) \\ -Ms_{sti,s}^c \leq h_{i,s}^c \leq Ms_{sti,s}^c \\ -M(1 - s_{sti,s}^{\text{dc}}) + x_i^c \leq h_{i,s}^{\text{dc}} \leq x_i^c + M(1 - s_{sti,s}^{\text{dc}}) \\ -Ms_{sti,s}^{\text{dc}} \leq h_{i,s}^{\text{dc}} \leq Ms_{sti,s}^{\text{dc}} \end{cases} \quad (\text{A9})$$

综上所述，模型中的非线性项通过二阶锥松弛、big-M 法和添加辅助变量等方法，独立优化模型转化为混合整数二阶锥优化问题，此类问题可通过商业工具包 CPLEX 进行求解。

附录 B

表 B1 分布式电源的相关参数
Table B2 Related parameters of distributed generation

参数	取值	
	风机	光伏
单位额定功率/MW	0.1	0.1
单位运行及维护成本/(元·kW ⁻¹)	0.20	0.15
投资费用/(万元·kW ⁻¹)	0.6	0.8
售电电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.56	0.94
政府补贴电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.37	0.37

表 B2 储能相关参数
Table B2 Related parameters of energy storage

参数	取值
单台额定容量/(MW·h)	0.5
额定功率/kW	100
充电效率	0.9
放电效率	1.11
单台投资费用/万元	50