

基于Stackelberg博弈的配电网分布式光伏低碳化消纳方法

张涛¹,杨建华¹,靳开元²,李嘉彬³,杨志杰⁴

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083;2. 国网天津市电力公司,天津 300010;
3. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院,北京 100038;4. 普洱市公安局,云南 普洱 665000)

摘要:为促进配电网分布式光伏发电功率就地消纳,缓解弃光、电压越限等问题,提出了一种利用交易电价和低碳农业用电设备进行就地消纳的方法,构建了低碳化源荷协调双层优化模型。上层模型以光伏发电和农业园区方整体综合收益最大为目标,通过Stackelberg博弈模型,确定最优交易电价和各园区时移消纳功率;下层模型综合考虑低碳农业用电设备的低碳效益、配置数量等信息,以不同计量时段的最大低碳消纳效益为目标,农业园区控制就地消纳违约率,确定可时移负荷的优化控制方案和不同园区的最大低碳消纳效益。配电网仿真结果表明,采用交易电价和可时移低碳负荷消纳模型后,配电网分布式光伏就地消纳情况得到改善,弃光电量减少,电压质量得到改善,光伏发电和农业园区方综合收益均得到提升。

关键词:交易电价;可时移负荷;低碳;Stackelberg博弈;分布式光伏;就地消纳

中图分类号:TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202210007

0 引言

在“双碳”战略目标下,新能源发电以及低碳化消纳方法将成为一个重要研究方向。然而,受电网自我调节能力和不完善市场机制的限制,大规模光伏(photovoltaic, PV)发电消纳问题日益突出。为应对节能减排和大规模光伏发电消纳困境,许多学者进行了相关研究。文献[1]采用发电量收入、光伏成本、损失效率改善和储备容量成本4个指标,分析光伏发电的碳排放特征和经济效益。文献[2]分析需求侧资源参与电网调度的可行性,考虑多种低碳化途径,建立基于柔性负荷分类的综合低碳效益模型。文献[3]量化评估电力系统关键技术进步与低碳转型经济可行性的耦合与匹配关系,提出了二者协同优化的框架和方法。文献[4]研究碳交易机制的引入对电力系统优化运行的影响,基于电网基准线排放因子,对初始碳排放额度进行分配,提出低碳经济下含光伏发电的优化调度模型。文献[5]将低碳手段与市场机制相结合,搭建考虑碳交易的光热电站与风电系统运行框架,并分析其运行机理。文献[6]为实现系统低碳经济调度,综合考虑低碳性和经济性,提出包含阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度模型。文献[7]通过模糊层次分析法对发展态势与市场状态2个指标进行赋权,对“双碳”目标下共享储能模式应用于新能源消纳进行评价。

为使得售电公司购售电收益和居民用户综合效用最大,可以建立售电公司与居民用户的非完全信息Stackelberg博弈模型^[8]。文献[9]为最大化微电网收益,建立基于Stackelberg博弈的双层优化调度模型,得到最优内部电价和充换储一体化电站的最优充、放电计划。采用逆向归纳法获取博弈模型的纳什均衡解,并对比分析不同电价策略下的最优电价与最优用电量,能够确定基于分时电价的最优制定策略^[10]。分时电价对提高电力系统的整体经济效益具有一定作用^[11]。通过制定分时电价,可以进一步提高农业园区用户利用时移负荷进行大规模分布式光伏就地消纳的意愿,构建园区分时电价优化模型^[12]。已有学者从宏观方面对光伏的低碳化概念以及评估理论进行了研究,但是,对于低碳化背景下的分布式光伏发电,还缺乏交易电价与可时移低碳化负荷协调消纳的相关研究。

因此,本文针对配电网分布式光伏发电功率不能大量就地消纳的问题,以最优交易电价为变量构建配电网的农业园区方综合收益函数,研究分布式光伏就地消纳的低碳运行效益;以光伏发电和农业园区方整体综合收益最大为目标函数,通过Stackelberg博弈模型确定最优交易电价和各农业园区的最优时移消纳功率;在满足就地消纳违约率约束要求的情况下,确定不同农业园区的最大低碳消纳效益。

1 光伏就地消纳收益模型

1.1 农业园区收益模型

1.1.1 可时移负荷消纳光伏电量收益

根据农业生产用电特性,综合西部多省峰谷电价的划分,给出农业园区峰谷电价如附录A表A1

收稿日期:2022-02-16;修回日期:2022-06-18

在线出版日期:2022-10-14

基金项目:国家电网公司科技项目(5400-202133157A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5400-202133157A-0-0-00)

所示。

以 15 min 为一个计量时段 T , 认为此时段内用电设备功率和光伏出力不变。农业园区 i 在 T 内从电网购电的综合收益 A_i^T 如式(1)所示, 与光伏电站以交易电价直接交易的综合收益 $A_{use,i}^T$ 如式(2)所示^[13]。

$$A_i^T = k_i^T \ln(1 + x_i^T) - p_g' x_i^T \quad (1)$$

$$A_{use,i}^T = k_i^T \ln(1 + x_{pv,i}^T) - p_s x_{pv,i}^T \quad (2)$$

式中: k_i^T 为农业园区 i 在 T 内的效益系数^[14]; p_g' 为农业园区平均电价, 取 0.4489 元 / (kW·h); p_s 为交易电价; x_i^T 和 $x_{pv,i}^T$ 分别为农业园区 i 在 T 内的正常用电量 and 消纳的分布式光伏电量。

1.1.2 低碳化农业用电收益

光伏发电功率不能大量就地消纳的时段通常是农业用电的平时段, 以平时段电价参与用电设备的低碳效益计算。农业园区用电设备的低碳效益包括两部分: 一部分是通过提高生产效率来减少电能和农药化肥用量的低碳效益; 另一部分是处理动物粪便避免的碳排放和加工售卖收益。参考国内碳交易价格, 本文取 CO₂ 的碳交易价格为 0.0528 元 / kg。已知生产 1 kW·h 的煤电, 需要排放 CO₂ 约 0.997 kg, 排放粉尘 0.272 kg, 排放 SO₂ 约 0.03 kg, 排放 NO_x 约 0.015 kg。而煤电生产时 CO₂、粉尘、SO₂、NO_x 的环境价值分别 0.023、2.2、6、8 元 / (kW·h)^[15], 则传统煤电生产单位电能的环境价值为 0.9739 元 / (kW·h)。

以种马铃薯为例, 在温室中其生长周期一般为 2.5 个月。通常化肥使用量约为 0.03285 kg / m²^[16], 杀虫农药使用量约为 0.0075 kg / m²。化肥市场价约为 20 元 / kg, 并且使用 1 kg 化肥的 CO₂ 排放量为 0.8956 kg; 农药市场价约为 0.3750 元 / m², 并且使用 1 kg 农药的 CO₂ 排放量为 4.9341 kg^[17]。

种植温室部分设备配置情况为: 空气源热泵 2 台, 额定功率为 8 kW; 蓄水泵 1 台, 额定功率为 2.2 kW; 水肥一体化机 1 台, 额定功率为 1.5 kW; 远红外加热装置 1 台, 额定功率为 3 kW; 等离子固氮机 1 台, 额定功率为 0.3 kW; 物理杀虫器 2 台, 额定功率为 0.35 kW; 声波助长设备 2 台, 额定功率为 0.35 kW。

取空气源热泵冬季的能效比为 3^[18], 认为电加热能效比为 1, 则相比于电加热方式, 其低碳效益为 2.865 元 / (kW·h); 蓄水泵与水肥一体化结合使用可降低灌溉用水量 50%^[19], 提高化肥利用率 21.67%^[20], 则两者低碳效益均为 0.825 元 / (kW·h); 远红外加热相比于电加热节能 50%^[21], 则其低碳效益为 0.711 元 / (kW·h); 物理杀虫器可节省农药 40%^[22], 则低碳效益为 0.478 元 / (kW·h); 声波助长设备可使农作物增产 10%^[23], 减少病虫害 8.4%^[24],

则其低碳效益为 0.446 元 / (kW·h)。

在养殖过程中, 每头牛每天产生约 21.09 kg 粪便^[25], CO₂ 含量约 67.2 g。牛粪烘干处理后含水量约 50%, 售价约 250 元 / t。有机肥加工的原料为干牛粪, 加工设备的处理能力取决于牛粪烘干机, 有机肥售价约 600 元 / t, 忽略加工中的损耗, 则所有加工设备的低碳效益为 350 元 / t。

养殖温室按照养牛数量配置用电设备。通常, 每 300 头牛配置 10 台牛粪清理机和 1 台牛粪烘干机, 单台额定功率分别为 2.2 kW 和 7.5 kW, 清理与烘干处理能力为 2 t / h; 有机肥加工设备包括翻堆、粉碎、搅拌、造粒、包装机, 额定功率分别为 18、22、7.5、22、3 kW, 加工处理能力为 1 t / h; 空气源热泵 2 台, 额定功率为 8 kW; 蓄水泵 2 台, 额定功率为 2.2 kW。其中, 养殖园区一般只配备一套有机肥加工设备, 与养牛数量无明显增长关系。

本文不考虑粪污处理过程对牛类生长的影响, 牛粪清理机与烘干机配套使用生产可以进行售卖的干牛粪, 构成其低碳效益, 两者的低碳效益均为 8.486 元 / (kW·h); 所有加工设备的加工能力取值为 1 t / h, 则低碳效益为 4.827 元 / (kW·h)。

1.2 光伏发电方收益模型

1.2.1 就地消纳的低碳效益

若仅考虑光伏发电相对煤电在同等电量下节省的污染物环境价值, 假设共有 n 个农业园区, 则光伏发电方在 T 内的低碳效益 Y_1^T 如式(3)所示。

$$Y_1^T = e_1 \sum_{i=1}^n x_{pv,i}^T \quad (3)$$

式中: e_1 为传统煤电生产单位电能的环境价值, 由上述讨论可知, e_1 取值为 0.9739 元 / (kW·h)。

1.2.2 光伏发电碳成本

光伏板的生产需要使用传统煤电, 运输安装时也会产生 CO₂, 假设此部分碳排放通过参与碳交易成为光伏发电的固定碳成本。光伏电站运行维护阶段的碳成本主要是破损光伏板的替换和光伏设备维护的碳排放, 研究表明光伏电站运维可变成本为 0.0042 元 / (kW·h)^[26], 将其作为光伏发电的运维可变碳成本。生产和运输 1 MW 光伏系统所产生 CO₂ 约为 1924.378 t^[27], 因此, 光伏发电碳成本折算到 T 内为 Y_2^T , 如式(4)所示。

$$Y_2^T = \frac{(1+\beta) \times 1924.378 e_2}{96 y_{pv} \times 365} \sum_{j=1}^m P_{pv,j} + e_3 \sum_{i=1}^n x_{pv,i}^T \quad (4)$$

式中: β 为运维过程与生产运输过程碳排放的比例, 取 5%^[27]; y_{pv} 为光伏有效使用年限, 一般为 25 a; $P_{pv,j}$ 为第 j 个光伏电站的接入容量; e_2 为 CO₂ 的碳交易价格, 根据上海环境能源交易所公布的数据, 其值为 0.0528 元 / kg; e_3 为光伏发电的运行可变碳成本, 取

0.0042元/(kW·h); m 为光伏电站的数量。

光伏发电方在 T 内的低碳运行效益 Y_3^T 如式(5)所示。

$$Y_3^T = Y_1^T - Y_2^T \quad (5)$$

1.2.3 光伏发电方售电收益

光伏发电方的售电收益包括采用交易电价 p_A 就地消纳的收益和电网收购的收益,其中光伏上网电价需要考虑指导电价、补贴电价和过网费。设定光伏并网母线电压越限时段为光伏控制消纳时段 T_{pv} ,则 m 个光伏发电方在 T_{pv} 内的售电收益 $\sum_{T=1}^{n_{pv}} \sum_{j=1}^m A_{pv,j}^T$ 如式(6)所示。

$$\sum_{T=1}^{n_{pv}} \sum_{j=1}^m A_{pv,j}^T = \begin{cases} p_s \sum_{T=1}^{n_{pv}} \sum_{i=1}^n x_{pv,i}^T + p_A \sum_{T=1}^{n_{pv}} \left(\sum_{j=1}^m E_{gen,j}^T - \sum_{i=1}^n x_{pv,i}^T \right) \\ \sum_{j=1}^m E_{gen,j}^T \geq \sum_{i=1}^n x_{pv,i}^T \\ p_s \sum_{T=1}^{n_{pv}} \sum_{i=1}^n x_{pv,i}^T + \sum_{j=1}^m E_{gen,j}^T \leq \sum_{i=1}^n x_{pv,i}^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: n_{pv} 为 T_{pv} 内包含的计量时段个数; $E_{gen,j}^T$ 为光伏发电方 j 在 T 内的发电量; p_A 为光伏上网电价,如式(7)所示。

$$p_A = p_{gs} + p_{pol} - p_{\mu} \quad (7)$$

式中: p_{gs} 为集中式光伏电站指导电价; p_{pol} 为补贴电价; p_{μ} 为过网费。

国家能源局出台的《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》指出,过网费可以取为10 kV与35 kV输配电价之差,以甘肃省输配电价为例,此时 $p_{\mu} = 0.2965 - 0.2865 = 0.010$ 元/(kW·h)。

2 最优交易电价和低碳消纳控制双层优化模型

2.1 最优交易电价就地消纳模型

采用Stackelberg博弈模型证明存在纳什均衡,以光伏发电方为领导者、农业园区方为跟随者,通过最大化两者整体综合收益,确定最优交易电价^[28-29]。为节省农业园区的用电成本,需要满足 $p_s \leq p'_g$ 。

在 T_{pv} 内,以最大化光伏发电方和农业园区方整体综合收益 F_1 为目标函数,如式(8)所示。

$$\max F_1 = \sum_{T=1}^{n_{pv}} \left(\sum_{i=1}^n A_{use,i}^T + \sum_{j=1}^m A_{pv,j}^T \right) \quad (8)$$

并非所有的博弈都存在数值解,但可以证明该博弈模型存在最优解,即存在最优交易电价,其证明的过程如附录B所示。

证明最优交易电价 $p_{s,best}$ 存在后,确定光伏发电方最优博弈策略为 $\Omega^T(p_{s,best})$ 。光伏发电方收集博弈信息后,根据式(9)判断最优时移消纳光伏电量

$x_{pv,best,i}^T$ 是否满足农业园区当前时段最大负荷限制,根据式(10)判断其是否满足当前时段光伏最大待消纳电量限制,若越限则取临界值。

$$x_{min,pv,i}^T \leq x_{pv,best,i}^T \leq x_{max,pv,i}^T \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{pv,best,i}^T \leq \sum_{j=1}^m E_{gen,j}^T \quad (10)$$

式中: $x_{max,pv,i}^T$ 、 $x_{min,pv,i}^T$ 分别是农业园区 i 在 T 内消纳光伏电量的上、下限。

按照电压质量的相关标准,光伏并网母线电压偏移不得超过额定电压 U_N 的 $\pm 7\%$,如式(11)所示。

$$0.93U_N \leq U_{pv,j} \leq 1.07U_N \quad (11)$$

式中: $U_{pv,j}$ 为第 j 个分布式光伏电站的并网母线电压。

采用最优交易电价 $p_{s,best}$ 进行光伏发电功率就地消纳时,农业园区 i 在 T 内存在最优时移消纳功率 $P_{pv,best,i}^T$,可以确定农业园区方最优博弈策略 $\Omega^T(p_{s,best}, P_{pv,best,i}^T)$,计算 T_{pv} 内各光伏电站正常出力;根据各光伏并网母线的电压波动情况,令不满足式(11)所示约束的光伏并网母线取电压临界值,并重新计算 T_{pv} 内各光伏电站正常出力;最后确定满足式(11)所示约束的各光伏电站在 T_{pv} 内的弃光电量。

2.2 农业负荷低碳消纳控制模型

通过控制农业负荷可以确保农业园区获得最大低碳消纳效益。以农业园区 i 在 T 内的最大低碳消纳效益 $F_{arg,i}^T$ 为目标函数,如式(12)所示。

$$\max F_{arg,i}^T = 0.25 \sum_{s=1}^{n_{arg}} P_{arg,s} N_{arg,s}^T A_{arg,s} \quad (12)$$

式中: n_{arg} 为农业园区的时移设备种类数; $P_{arg,s}$ 为第 s 类时移设备的额定功率; $N_{arg,s}^T$ 为第 s 类时移设备在 T 内的使用数量; $A_{arg,s}$ 为第 s 类时移设备的低碳效益。

农业园区按照生产需求配备不同的用电设备,在 T 内控制时移设备进行光伏发电功率就地消纳时,不能超过其最大配置数量,如式(13)所示。

$$0 \leq N_{arg,s}^T \leq N_{max,s} \quad (13)$$

式中: $N_{max,s}$ 为农业园区内第 s 类时移设备的配置数量。

最优时移消纳功率 $P_{pv,best,i}^T$ 完成度用就地消纳违约率 δ_i^T 来衡量,见式(14)。为更好地完成最优时移消纳功率策略,给出 δ_i^T 的限制条件见式(15)。

$$\delta_i^T = \left| \left(\sum_{s=1}^{n_{arg}} P_{arg,s} N_{arg,s}^T - P_{pv,best,i}^T \right) / P_{pv,best,i}^T \right| \times 100\% \quad (14)$$

$$0 \leq |\delta_i^T| \leq 20\% \quad (15)$$

3 仿真分析

3.1 双层控制仿真流程

上层为最优交易电价就地消纳模型,控制模型以 $\max F_1$ 为目标函数,考虑光伏并网母线电压限制

条件,采用 Stackelberg 博弈求解 $p_{s,best}$ 以及各农业园区 $P_{pv,best,i}^T$ 。求解流程图见附录 C 图 C1。

下层为农业负荷低碳消纳控制模型,优化模型以 $\max F_{arg,i}^T$ 为目标函数,采用改进的非支配排序遗传算法(non-dominated sorted genetic algorithm- II, NSGA- II)以实数形式编码 $F_{arg,i}^T$ 和 δ_i^T ,求解 Pareto 最优解。求解流程图见附录 C 图 C2。

3.2 最优交易电价仿真

以 IEEE 33 节点配电网为例进行仿真分析,如图 1 所示,该配电区域总负荷为 $3.78+j1.135 \text{ MV}\cdot\text{A}$,线电压的基准值为 12.66 kV 。

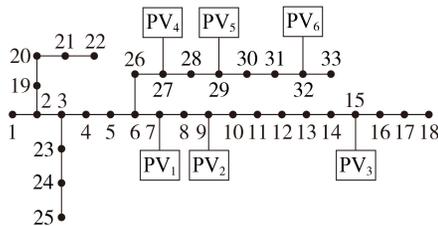


图 1 IEEE 33 节点配电网结构

Fig.1 Structure of IEEE 33-bus distribution network

假设有 6 个集中式并网的村级光伏电站,安装在节点 7、9、15、27、29、32,接入容量分别为 1 100、1 100、600、1 000、900、600 kW。假定有 32 个农业用户,其中节点 11 和节点 12 分别为种植园区 1 和园区 2,节点 29 和节点 30 分别为养殖园区 1 和园区 2,其余节点为普通农业居民用户,负荷信息见附录 C 表 C1。

为保证农作物在冬季能够正常生长,温室需要使用电加热设备。本文以冬季典型日为例,给出养殖园区、种植园区、普通农业居民负荷曲线和不考虑电压越限时光伏出力曲线如图 2 所示,图中功率为标幺值。由于分布式光伏安装处相距不远,所以认为所有光伏的发电特性相似。

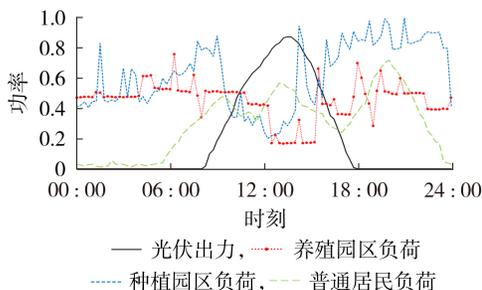


图 2 不同类型负荷以及光伏出力的曲线

Fig.2 Curves of different types of loads and PV output

假定 IEEE 33 节点配电网位于第 II 类资源区,根据国家发展改革委出台的《关于 2020 年光伏发电上网电价政策有关事项的通知》可知,集中式光伏电站指导价 p_{gs} 为 $0.40 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,补贴电价 p_{pol} 调

整为 0,则光伏上网电价 p_A 为 $0.39 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

通过仿真计算,确定最优交易电价和农业园区最优时移消纳光伏功率;对比在采用所提分布式光伏就地消纳方法前后,光伏发电方和农业园区方整体综合收益、光伏电站弃光电量、低碳运行效益等方面的变化。

在引入最优交易电价就地消纳模型前,光伏出力时段 08:00—18:00 内各光伏并网母线电压波动如图 3 所示,图中电压为标幺值,后同。

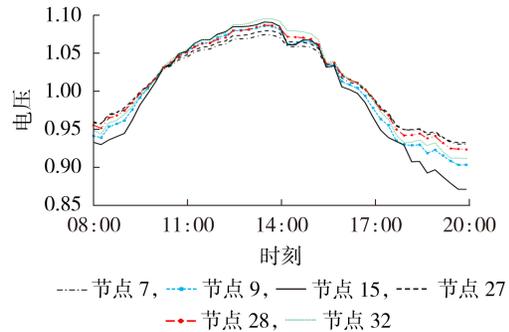


图 3 光伏并网母线电压波动

Fig.3 Grid-connected bus voltage fluctuation of PV

由图 3 可知,光伏并网母线电压在时段 12:00—14:45 之间出现越限,电压偏移超过规定值 7%。为保证电压质量,分布式光伏电站不得限制出力。为确保所有时段内各光伏并网母线电压波动均在正常范围内,分布式光伏电站 PV_1 — PV_6 在时段 12:00—14:45 之间的弃光电量分别为 730.664、487.109、243.554、487.109、243.554、487.109 $\text{kW}\cdot\text{h}$,弃光现象比较严重。取 T_{pv} 为 12:00—14:45,在该时段内对分布式光伏电站待消纳电量进行就地待消纳控制。

配电网在典型日通过支路 1-2 的功率变化情况如附录 C 图 C3 所示,可见在 T_{pv} 内的倒送功率为 19418.847 kW 。

设置 p_s 的仿真步长为 $0.001 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,光伏发电方选择交易电价 p_s 从 $0.350 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 变化到 $0.450 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,在整个 T_{pv} 内, F_1 与 p_s 的关系如图 4 所示。

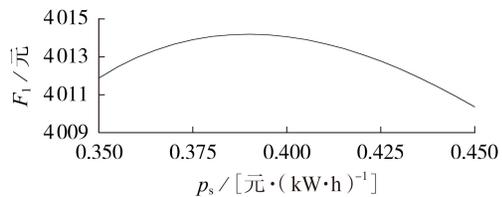


图 4 F_1 与 p_s 的关系曲线

Fig.4 Curve of relationship between F_1 and p_s

由图 4 可知,当光伏发电方选择最优交易电价 $p_{s,best} = 0.390 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时, F_1 取得最大值,为 $4\ 014.222 \text{ 元}$,即光伏发电方最优博弈策略为

$\Omega^T(0.390)$ 。由于所选计量时段为 15 min,且认为此时段内用电设备功率和光伏出力不变,则有 $x_{pvbest,i}^T = 0.25P_{pvbest,i}^T$,根据博弈关系式(14),确定各农业园区满足约束的最优时移消纳功率 $P_{pvbest,i}^T$ 如表 1 所示。

表 1 农业园区最优时移消纳功率
Table 1 Optimal time-shifted power consumption of agricultural parks

时刻	最优时移消纳功率 / kW			
	种植园区 1	种植园区 2	养殖园区 1	养殖园区 2
12:00	98.363	112.394	127.033	151.434
12:15	81.082	92.644	124.491	148.404
12:30	88.476	101.095	50.989	60.767
12:45	94.343	107.800	66.632	79.418
13:00	92.977	106.238	50.531	60.220
13:15	127.135	145.276	49.698	59.227
13:30	115.079	131.497	50.393	60.056
13:45	130.028	148.583	50.752	60.484
14:00	156.149	178.435	51.656	61.561
14:15	18.410	21.041	96.561	115.102
14:30	54.181	61.921	50.244	59.878
14:45	159.880	182.720	51.347	61.193

将农业园区部分用电负荷转移至时段 T_{pv} 后,选择光伏并网节点 7、9、15、27、28、32,判断农业园区方最优博弈策略 $\Omega^T(p_{s,best}, P_{pvbest,i}^T)$ 能否维持光伏并网母线电压在允许范围内,弃光电量问题是否得到缓解。在 $\Omega^T(p_{s,best}, P_{pvbest,i}^T)$ 情况下的光伏并网母线如图 5 所示。

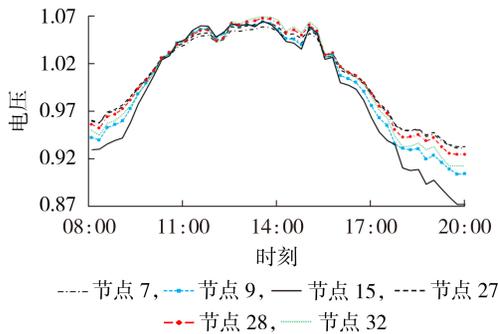


图 5 最优博弈策略下光伏并网母线的电压波动
Fig.5 Voltage fluctuation of PV grid-connected bus under optimal game strategy

对比图 3 和图 5 可知,各农业园区在 $p_{s,best}$ 的激励下时移自身负荷,就地消纳了分布式光伏发电功率,缓解了光伏并网母线电压越限的问题,增加了光伏电站出力,弃光电量大幅减少。

在农业园区方最优博弈策略下,考虑农业园区用电成本,通常选择将高峰时段的用电设备负荷转移到时段 T_{pv} ,光伏电站整体就地消纳功率 4413.965 kW。根据高峰时段电价、最优交易电价和最优时移消纳功率,从农业园区整体的用电成本、光伏电站整体弃光电量以及低碳运行效益 3 个方面,

采用最优交易电价就地消纳模型之后,农业园区和光伏发电方的经济效益如表 2 所示。

表 2 采用就地消纳模型前后的经济效益对比
Table 2 Comparison of economic benefits between with and without local consumption model

模型	用电成本 / 元	弃光电量 / (kW·h)	低碳运行效益 / 元
采用就地消纳模型	740.884	2679.101	-7.628
不采用就地消纳模型	430.361	1475.585	1062.427
变化量	310.523	1203.516	1070.055

由表 2 可知,采用最优交易电价就地消纳模型可促进农业园区方的就地消纳意愿,光伏电站通过减少弃光电量产生的额外收益为 355.037 元,增加了低碳运行效益。

3.3 低碳消纳控制仿真

3.3.1 种植园区低碳消纳控制

选取种植园区 2 为例进行控制,已知该农业园区冬季最大负荷为 400 kW,根据已有种植温室用电信息,确定种植园区 2 的规模为 10 个设施农业种植温室。采用 NSGA-II,相关参数如下:种群规模为 300;最大迭代次数为 200;交叉概率 $p_c=1$;变异概率 $p_m=1/x_{num}$,其中 x_{num} 为农业园区可供时移设备种类数,种植园区取 7。时移设备的功率、数量以及低碳效益见 1.1 节。

经过仿真,在满足约束式(15)时,以 $F_{arg,i}^T$ 、 δ_i^T 分别为横、纵轴,确定在时段 T_{pv} 内各计量时段 T 中的 Pareto 前沿,如图 6 所示。

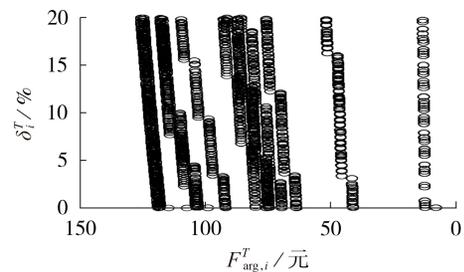


图 6 种植园区 Pareto 前沿
Fig.6 Pareto frontier of plantation agricultural park

由图 6 可知,种植园区在各计量时段的 Pareto 前沿变化趋势都是倾向于左下方,表明最优解集在各个计量时段内都互不支配,满足非支配解定义,从而证明采用 NSGA-II 求解出的最优解是可信任的。

在满足约束式(15)时,种植园区 2 在时段 T_{pv} 内的整体最大低碳消纳效益 $\sum_{T=1}^{n_{pv}} F_{arg,i}^T = 1096.876$ 元,此时 δ_i^T 的平均值为 19.903%。

3.3.2 养殖园区低碳消纳控制

选取养殖园区 2 为例进行控制,已知该农业园

区冬季最大负荷为 310 kW,根据已有养殖温室用电信息,确定此养殖园区养殖规模为 900 头牛。采用 NSGA-II,养殖园区可供时移设备种类为 8,其他仿真参数与种植园区相同。

与种植园区类似,经过仿真,在满足约束式(15)时,以 $F_{arg,i}^T$ 、 δ_i^T 分别为横、纵轴,确定养殖农业园在光伏控制消纳时段 T_{PV} 内各计量时段 T 中的 Pareto 前沿,如图 7 所示。

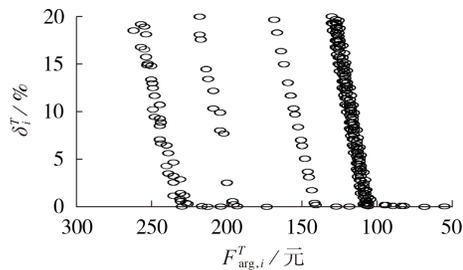


图 7 养殖园区 Pareto 前沿

Fig.7 Pareto frontier of breeding agricultural park

对比图 6 和图 7 可知,在满足就地消纳违约率约束的情况下,种植园区在各计量时段的 Pareto 前沿更加离散,养殖园区则较为均匀,不同农业园区在各个计量时段 T 内的 $F_{arg,i}^T$ 和 δ_i^T 都相差较大,不再密集分布。

在满足约束式(15)时,养殖园区 2 在时段 T_{PV} 内的整体最大低碳消纳效益 $\sum_{T=1}^{n_{PV}} F_{arg,i}^T = 1930.329$ 元,此时 δ_i^T 的平均值为 19.097%。

对比 2 种农业园区的 $\sum_{T=1}^{n_{PV}} F_{arg,i}^T$,在满足约束式(15)时,养殖园区的 $\sum_{T=1}^{n_{PV}} F_{arg,i}^T$ 明显大于种植园区,这与实际生产中种植与养殖农业生产特点相符。

4 结论

本文提出了基于 Stackelberg 博弈的分布式光伏低碳化消纳方法,构建了低碳化源荷协调双层优化模型以提高配电网的分布式光伏就地消纳能力。通过所建立的最优交易电价就地消纳模型,基于 Stackelberg 博弈模型,确定了最优交易电价;通过该交易电价有效促进了农业园区时移负荷消纳光伏电量的意愿。根据不同农业用电设备的低碳效益,在确定最优时移消纳功率的基础上,可以对不同类型的农业园区进行低碳消纳控制;以低碳消纳效益最大为目标,通过就地消纳违约率进行约束,能够获得不同农业园区的最大低碳消纳效益。采用 IEEE 33 节点配电网进行仿真验证,以光伏发电和农业园区方整体综合收益最大为目标函数,通过光伏并网母

线电压波动进行检验,确定了最优交易电价和各农业园区不同时段的最优时移消纳功率。仿真结果表明光伏发电与农业园区各方的收益均得到提高,减少了弃光电量,增加了低碳效益;各农业园区具有就地消纳光伏发电功率的能力,且附加低碳效益得到有效提高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] LUO Fengzhang, ZHANG Tianyu, WEI Wei, et al. Models and methods for low-carbon footprint analysis of grid-connected photovoltaic generation from a distribution network planning perspective [J]. Energy Science & Engineering, 2017, 5 (5): 290-301.
- [2] 褚艺. 低碳背景下基于多类型 DR 的风电就地消纳措施研究 [D]. 北京:华北电力大学,2017.
CHU Yi. Wind power elimination on spot based on multiple demand responses under low-carbon [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [3] 侯金鸣,孙蔚,肖晋宇,等. 电力系统关键技术进步与低碳转型的协同优化 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 1-9.
HOU Jinming, SUN Wei, XIAO Jinyu, et al. Collaborative optimization of key technology progress and low-carbon transition of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 1-9.
- [4] 胡斌. 低碳经济下含大规模光伏发电的电力系统优化运行 [D]. 武汉:华中科技大学,2015.
HU Bin. Power system optimal operation with large scale photovoltaic generation under low carbon economy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [5] 崔杨,邓贵波,王铮,等. 计及碳交易的光热电站与风电系统低碳经济调度策略 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 232-239.
CUI Yang, DENG Guibo, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic scheduling strategy for power system with concentrated solar power plant and wind power considering carbon trading [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 232-239.
- [6] 崔杨,曾鹏,仲悟之,等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.
- [7] 邱伟强,王茂春,林振智,等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.
QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255.
- [8] 王刚,宋艺航,黄博,等. 基于非完全信息 Stackelberg 博弈的居民用户分时电价定价策略研究 [J]. 供用电, 2021, 38(2): 46-52.
WANG Gang, SONG Yihang, HUANG Bo, et al. Research on time-of-use pricing strategy for residential customers based on uncompleted information Stackelberg game [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(2): 46-52.

- [9] 程杉,倪凯旋,赵孟雨. 基于Stackelberg博弈的充换储一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):49-55.
CHENG Shan, NI Kaixuan, ZHAO Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):49-55.
- [10] 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.
- [11] 杨贺钧,时瑞廷,马英浩,等. 考虑多重分时电价和效益潜力的电力储能系统调度策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):130-137.
YANG Hejun, SHI Ruiting, MA Yinghao, et al. Scheduling strategy of electric storage system considering multiple time-of-use electricity prices and potential benefit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):130-137.
- [12] 刘敦楠,徐尔丰,刘明光,等. 面向分布式电源就地消纳的园区分时电价定价方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(20):19-28.
LIU Dunnan, XU Erfeng, LIU Mingguang, et al. TOU pricing method for park considering local consumption of distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20):19-28.
- [13] 靳开元,杨建华,陈正,等. 基于区块链的分布式光伏就地消纳交易模式研究[J]. 中国电力,2021,54(5):8-16.
JIN Kaiyuan, YANG Jianhua, CHEN Zheng, et al. Blockchain-based transaction model of distributed photovoltaic generation for local power consumption[J]. Electric Power, 2021, 54(5):8-16.
- [14] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4):2487-2498.
- [15] 王广霞. 燃煤火电企业环境成本核算与报告研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.
WANG Guangxia. Study on the environmental cost accounting and reporting of coal-fired thermal power enterprises[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [16] 中华人民共和国农业部. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. (2017-11-29)[2022-05-22]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/san/201711/120171129_5923401.htm.
- [17] 胡婉玲,张金鑫,王红玲. 中国种植业碳排放时空分异研究[J]. 统计与决策,2020,36(15):92-95.
HU Wanling, ZHANG Jinxin, WANG Hongling. Research on the temporal and spatial differentiation of carbon emissions from China's planting industry[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(15):92-95.
- [18] 艾淞卉,吴成斌,石文星. 低环境温度空气源热泵机组在北京冬季运行的性能[J]. 暖通空调,2015,45(3):52-58.
AI Songhui, WU Chengbin, SHI Wenxing. Running performance of low-temperature air-source heat pump applied in winter of Beijing[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(3):52-58.
- [19] 潘静,葛雯,叶永伟. 水肥一体化技术的优点、机理与意义研究[J]. 新农业,2022(3):16.
- [20] 高陆旭. 基于水肥一体化的饲用玉米高效栽培技术与效益分析[D]. 宁夏:宁夏大学,2017.
GAO Luxu. High-efficiency cultivation and benefit analysis of forage corn based on integration of water and fertilizer[D]. Ningxia: Ningxia University, 2017.
- [21] 任松伟,李传峰,李博,等. 红外加热技术在红枣加工中的应用[J]. 食品工业,2020,41(5):250-253.
- [22] 管必莲,徐丹,肖海亮,等. 太阳能杀虫灯在绿色农业上的应用[J]. 农村实用技术,2021(10):63-64.
- [23] 刘晓明,张艳红,秦贵,等. 声波助长技术对果类蔬菜的影响试验[J]. 农业工程,2015,5(增刊1):30-36.
LIU Xiaoming, ZHANG Yanhong, QIN Gui, et al. Experimental effects of acoustic fuelling technology on fruit vegetable[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(Supplement 1):30-36.
- [24] 侯天侦,李保明,滕光辉,等. 植物声频控制技术的研究及应用进展[J]. 中国农业大学学报,2010,15(1):106-110.
HOU Tianjing, LI Baoming, TENG Guanghui, et al. Research and application progress of plant acoustic frequency technology[J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(1):106-110.
- [25] 刘翌晨,郭辣娜,朱法江,等. 规模化奶牛养殖场温室气体排放研究:以山西省某奶牛养殖场为例[J]. 环境保护与循环经济,2020,40(6):56-60.
LIU Yichen, GUO Suna, ZHU Fajiang, et al. Study on greenhouse gas emissions from large-scale dairy farms: taking a dairy farm in Shanxi province as an example[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2020, 40(6):56-60.
- [26] 吴耀文,马溪原,孙元章,等. 微网高渗透率接入后的综合经济效益评估与分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(13):49-54.
WU Yaowen, MA Xiyuan, SUN Yuanzhang, et al. Overall economic evaluation and analysis of accession of microgrids with high penetration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13):49-54.
- [27] 罗凤章,米肇丰,王成山,等. 并网光伏发电工程的低碳综合效益分析模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(17):163-169.
LUO Fengzhang, MI Zhaofeng, WANG Chengshan, et al. Comprehensive low-carbon benefit analysis models of grid-connected photovoltaic power generation projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17):163-169.
- [28] 钟永洁,李玉平,胡兵,等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度[J]. 电力自动化设备,2022,42(1):55-64.
ZHONG Yongjie, LI Yuping, HU Bing, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in energy internet based on cooperative game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1):55-64.
- [29] ZHANG Tao, YANG Jianhua, LI Jiabin, et al. Research on local consumption method of distributed photovoltaic generation for benefits of multi parties based on blockchain[C]//2021 the 4th International Conference on Electrical Engineering and Green. Munich, Germany: Energy Reports, 2021:185-190.

作者简介:



张涛

张涛(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电技术(E-mail: s201930-81355@cau.edu.cn);

杨建华(1963—),男,教授,通信作者,主要研究方向为电力系统规划与仿真、新能源发电技术等(E-mail: yang.haag@163.com)。

(编辑 李玮)

(下转第63页 continued on page 63)

Hierarchical distributed coordinated optimal dispatch of active distribution network considering frequency regulation reserve benefits

DONG Lu¹, BIAN Xiaoyan¹, ZHOU Bo¹, XU Bo¹, XU Zhao², LI Dongdong¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The construction and development of new-type power grid with high proportion of new energy has put forward higher demands for frequency regulation ancillary services. To solve this problem, a hierarchical distributed coordinated optimal dispatch method of active distribution network considering the frequency regulation reserve benefits is proposed, which can provide the frequency regulation reserve capacity for transmission network while satisfying the optimal operation economy of distribution network. The hierarchical distributed dispatch architecture is established, and both the coordinated dispatch layer and the cluster autonomy layer adopt the distributed topology structure. Each agent communicates with the neighboring agents and completes individual computing tasks. The flexibility characteristics are used to characterize the ability of distributed energy resources to respond to frequency regulation ancillary service request, and the corresponding rule of mapping between the two sets is constructed. The coordinated optimal dispatch model is established, and a consensus algorithm is applied to solve the problem to obtain the optimal power scheme, consensus price and clusters' reserve capacity. An example is given to verify the effectiveness of the proposed coordinated optimal dispatch method, and the robustness of the hierarchical distributed algorithm is analyzed with typical communication fault scenarios.

Key words: active distribution network; frequency regulation ancillary service; distributed energy resource cluster; flexibility characteristics; coordinated optimal dispatch; consensus algorithm

(上接第 54 页 continued from page 54)

Low-carbon consumption method of distributed photovoltaic for distribution network based on Stackelberg game

ZHANG Tao¹, YANG Jianhua¹, JIN Kaiyuan², LI Jiabin³, YANG Zhijie⁴

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China;

3. State Grid Jibei Electric Economic Research Institute, Beijing 100038, China;

4. Public Security Bureau of Puer City, Puer 665000, China)

Abstract: In order to promote the local consumption of distributed photovoltaic generation power in distribution network, and alleviate the problems of solar energy abandoning and voltage limit exceeding, a local consumption method by using transaction electricity price and low-carbon agricultural electro-equipment is proposed, and the bi-level optimization model for low-carbon source-load coordination is constructed. In the upper-level model, the optimal transaction electricity price and the time-shifted consumption power of each park are determined by the Stackelberg game model with the goal of maximizing the overall comprehensive income of the photovoltaic generation companies and agricultural parks. The low-carbon benefit, configuration quantity and other information of the low-carbon agricultural electro-equipment are comprehensively considered in the lower-level model. The maximum low-carbon consumption benefit is taken as the target in different metering periods, and the local consumption default rate is controlled in the agricultural parks for confirming the optimal control scheme of the time-shifted load and determining the maximum low-carbon consumption benefits of different parks. The simulative results of a distribution network show that the local consumption situation of distributed photovoltaic generation is improved when adopting the transaction electricity price and the time-shifted low-carbon load consumption model. Meanwhile, the abandoned photovoltaic electricity quantity is reduced, the voltage quality is improved, and the overall comprehensive income of the photovoltaic generation companies and agricultural parks are both promoted.

Key words: transaction electricity price; time-shifted load; low-carbon; Stackelberg game; distributed photovoltaic; local consumption

附录 A

表 A1 农业园区峰谷电价

Table A1 Peak-valley electricity price of agricultural park

类型	时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
高峰时段	08:00-11:30; 18:30-23:00	0.6714
平段	07:00-8:00; 11:30-18:30	0.4489
低谷时段	23:00-07:00	0.2265

附录 B

农业园区 i 在 T 内从电网购电的综合收益 A_i^T 如式(1)所示, 对 A_i^T 求关 x_i^T 于一阶偏导得到式(B1)。

$$\frac{\partial A_i^T}{\partial x_i^T} = \frac{k_i^T}{1+x_i^T} - p_g' \quad (\text{B1})$$

农业园区 i 正常使用电量 x_i^T 时, 存在效益系数 k_i^T 使农业园区 i 的综合收益 A_i^T 最大。令式(B1)为 0, 得到式(B2)。

$$k_i^T = p_g'(1+x_i^T) \quad (\text{B2})$$

假定 k_i^T 不变, 参与最优交易电价就地消纳模型中各方收益的计算。计算 $A_{\text{use},i}^T$ 关于 $x_{\text{pv},i}^T$ 的一阶和二阶导数分别如式(B3)和式(B4)所示。

$$\frac{\partial A_{\text{use},i}^T}{\partial x_{\text{pv},i}^T} = \frac{k_i^T}{1+x_{\text{pv},i}^T} - p_s \quad (\text{B3})$$

$$\frac{\partial^2 A_{\text{use},i}^T}{\partial x_{\text{pv},i}^T{}^2} = \frac{-k_i^T}{(1+x_{\text{pv},i}^T)^2} < 0 \quad (\text{B4})$$

由式(B3)和式(B4)可知 $A_{\text{use},i}^T$ 是关于 $x_{\text{pv},i}^T$ 的严格凸函数, 因此, 存在 $x_{\text{pv},i}^T$ 使得 $A_{\text{use},i}^T$ 最大。令式(B3)为 0 可得式(B5), 将式(B2)代入式(B5), 简化 p_s 与 $x_{\text{pv},i}^T$ 的博弈关系, 如式(B6)所示。

$$x_{\text{pv},i}^T = \frac{k_i^T}{p_s} - 1 \quad (\text{B5})$$

$$x_{\text{pv},i}^T = \frac{p_g'(1+x_i^T)}{p_s} - 1 \quad (\text{B6})$$

将式(B6)代入式(8), 计算 F_1 关于 p_s 的二阶导数如式(B7)所示。

$$\frac{\partial^2 F_1}{\partial p_s^2} = \frac{-2 \sum_{i=1}^{n_{\text{pv}}} \left[(p_{\text{gs}} + p_{\text{pol}} - p_i) \sum_{i=1}^n k_i^T \right]}{p_s^3} < 0 \quad (\text{B7})$$

由式(B7)可知, F_1 是关于 p_s 的严格凸函数, 证明存在最优交易电价 $p_{s,\text{best}}$ 使得 F_1 最大。

附录 C

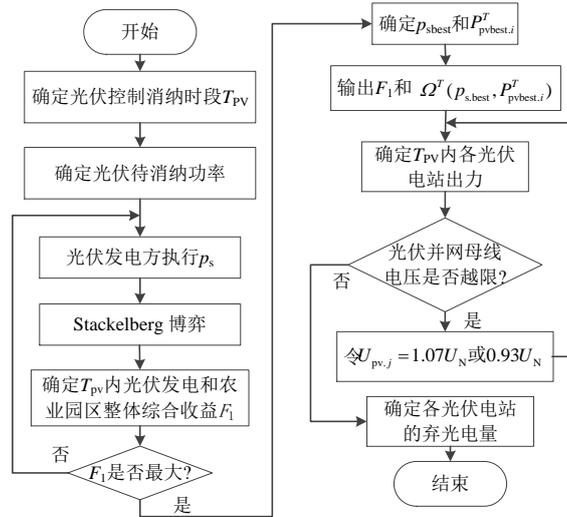


图 C1 上层控制仿真流程

Fig.C1 Upper-level control simulation process

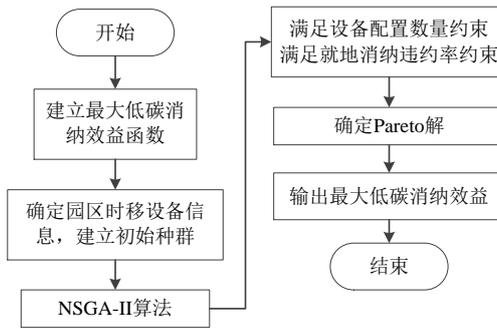


图 C2 下层控制仿真流程

Fig.C2 Lower-level control simulation process

表 C1 IEEE 33 节点配电网负荷信息

Table C1 Load information of IEEE 33-bus distribution network

节点	最大负荷/ (kV · A)	节点	最大负荷/ (kV · A)
2	120+j40	18	80 +j40
3	90+j30	19	90 +j40
4	120+j40	20	90 +j40
5	60 +j20	21	90 +j40
6	60 +j20	22	90 +j40
7	120+j40	23	90 +j50
8	120+j40	24	120+j25
9	60 +j20	25	120+j30
10	60 +j20	26	60 +j25
11	350+j60	27	60 +j25
12	400+j80	28	60 +j20
13	60 +j35	29	260+j55
14	120+j30	30	310+j75
15	60 +j20	31	150+j30
16	70 +j25	32	120+j40
17	60 +j20	33	60 +j20

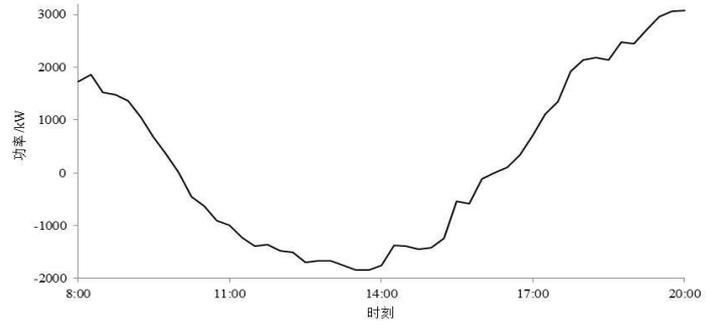


图 C3 IEEE 33 节点配电网通过 1-2 支路的功率变化

Fig.C3 Power distribution of IEEE 33-bus distribution network