[碳交易]

基于碳交易市场价格的送电调度优化模型

文/章天浩
中邮建技术有限公司

水电外送推动了中国能源结构的绿色低碳化转型，为实现“双碳”目标做出了贡献，但其减碳价值却尚未充分体现。文章建立了基于碳交易市场价格的水电外送多目标优化模型，利用NSGA-3算法对问题进行求解，验证了模型的有效性。随着碳交易市场的发展，外送水电的碳减排效益将进一步上升。

水电外送工程作为具有中国特色的特高压输电工程，其输送的清洁电力替代了受端区数量可观的燃煤电力，有效减少了CO_2等温室气体的排放量，为“双碳”目标的实现做出了显著贡献。目前，国内的相关学者针对水电外送的效益优化研究主要分为以下三类：

1）为了提高外送水电的市场竞争力。如在外送水电参与电力市场化交易的过程中，针对水电富集地区电力供需“丰余枯缺”的市场形势，文献[1]构建了省间购售电策略优化模型，为水电富集地区的发电企业制定交易策略提供了理论方法；针对跨省区水电日前市场报价过程中缺乏边际成本参考这一难题，文献[2]构建了增量报价决策模型，为水电日前市场报价提供了科学决策的依据。

2）为了解决不同利益主体间存在的冲突。如文献[3]在发电方和购电方之间基于合作博弈的理论构建了合作利润模型，根据双方风险承担意愿的不同，对初始方案进行了更改，使售电方案更加合理；文献[4]针对外送系统存在多主体利益博弈客观现实，对外送系统进行了联合优化，为解决主体间的利益冲突做出了贡献。

3）致力于促进外送水电的消纳。如针对季节性水电因缺乏市场而被迫弃水的问题，文献[5]提出了一种季节性水电外送消纳模型；为了实现就地消纳与外送水电相协调，文献[6]与文献[7]分别建立了发电机组的生产模拟计算模型和以外送水电负荷追踪能力最大化为目标的受端电网接纳空间测算模型；为了提高外送水电的消纳能力和外送通道的外送效率，文献[8]以多电网水电外送工程的运行成本最小为目标，建立了多目标规划模型。

综上所述，当前针对水电外送的效益优化研究，暂时还没有尝试从体现外送水电减碳价值的角度去讨论外送方案的合理性。在双碳背景下，水电在送往不同受端区的过程中产生的碳减排效益不容忽视。将这一因素考虑进外送方案之中，可以制定出更合理的外送分配方案。

研究方法

1. 模型构建

（1）目标函数

1）碳减排效益最大化。碳减排效益主要表征外送电量从送端区送到受端区对生态资源效益的额外促进作用，是当前针对水电外送的效益优化研究中容易被忽视的重要部分，具体计算公式为

$$f_1=\max\left(\left(\sum_{k=1}^{n}Q_k(\mu_k-\mu_o)\right)\times\rho\right) \tag{1}$$

式中，Q_k为第k个受端省份接收的外送水电电量；n为受端省份的个数；μ_k为第k个受端省份的电网平均CO_2排放因子；μ_o为送端省份的电网平均CO_2排放因子；ρ为全国碳市场碳平均交易价格。

2）送电收入最大化。由于水电外送工程的运营主体为电网公司，电网公司的收入情况将直接影响到送电计划的制定，因此将送电收入的最大化纳入优化模型。电网公司的送电收入主要包括三个部分：送端电网公司的输配电收入、过路电网公司的输配电收入以及落地水电与燃煤标杆电价的价差收入，具体如下

$$f_2=\max\left(S_{\mathrm{D}}+S_{\mathrm{P}}+S_{\mathrm{R}}\right) \tag{2}$$

$$S_{\mathrm{D}}=\sum_{i=1}^{n}P_{D,k}\times Q_k \tag{3}$$

$$S_{\mathrm{P}}=\sum_{i=1}^{n}P_{P,k}\times Q_k \tag{4}$$

$$S_{\mathrm{R}}=\sum_{k=1}^{n}\left(P_{r,k}-P_{d,k}\right)\times Q_k \tag{5}$$

式中，S_{D}、S_{P}、S_{R}分别为送端电网公司的输配电收入、过路电网公司的输配电收入和地水电与燃煤标杆电价的价差收入；$P_{D,k}$为送电线路k的送端电网公司单位输配电收入；Q_k为送电线路k的外送电量；$P_{D,k}$为送电线路k的过路电网公司单位输配电收入；$P_{r,k}$为送电线路k的上网电价；$P_{d,k}$为送电线路k的受端区的燃煤标杆电价。

（2）约束条件

1）总量约束。优化模型仅对送出电量进行优化，因此外送电量Q_k之和不应大于研究对象的总外送电量，总电量约束条件为

$$\left(\sum_{i=1}^{n}Q_k\right)\leqslant Q_{\Sigma} \tag{6}$$

式中，Q_k为送电线路k的外送电量；Q_{Σ}为总外送水电电量。

2）稳定性约束。为了保持优化后外送方案不发生剧烈变动，应当认为规定最大变化率，外送电量的变化不应超出最大变化区间，表达式为

$$Q_k\times(100\%-\psi)\leqslant Q_k\leqslant Q_k\times(100\%+\psi) \tag{7}$$

式中，Q_k为送电线路k的外送电量；ψ为规定的最大变化率。

（3）国调及转送电约束

外送线路送出电量中的国调及转送电量不应受到方案调配的影响，因此

$$\mathrm{Q_{nd}}+\mathrm{Q}_t\leqslant Q_k \tag{8}$$

式中，Q_{nd}为国调外送电量；Q_t为转送电量。

算例分析

1. 数据来源

算例选取我国某送端区4条外送通道进行联合优化。其中，各环节电价及外送电量见表1。其中，平均输配电价的计算方法为输电收入除以送电量，故已将利润分享空间、专项工程、分部电价和输电损耗等因素考虑在内。电网平均CO_2排放因子见表2。

表1　各环节电价[单位：亿元/（亿kW·h）]

	上网电价	送端电网	过路电网	燃煤标杆电价	价差
		平均输配电价	平均输配电价		
通道1	0.229	0.051	0.088	0.416	0.186
通道2	0.217	0.062	0.083	0.391	0.174
通道3	0.241	0.049	0.076	0.415	0.174
通道4	0.233	0.03	0.017	0.396	0.164

表2　电网平均二氧化碳排放因子

[单位：万t/（亿kW·h）]

送端区	受端区1	受端区2	受端区3	受端区4
0.130 8	0.586 7	0.702 5	0.563 8	0.464 4

送电通道的年外送电量统计见表3。

表3　外送电量统计　（单位：亿kW·h）

	通道1	通道2	通道3	通道4
外送电量	301.777 2	365.889 7	339.295	260.382 2
省调电量	20.725 5	47.661 79	62.501 23	116.926 2
国调电量	281.051 7	318.227 9	276.793 8	143.456
转送电量	0	0	0	0

各省电网平均CO_2排放因子数据来自于中国产品全生命周期温室气体排放系数库。

2. 结果分析

为了直观体现新方案对原方案的优化，暂不对最大变化率ψ进行规定，取碳交易市场价格为80.50元/t（2024年3月18日全国碳市场收盘价），此时，将收集到的数据代到入本文建立的效益优化模型中，得到帕累托解集如图1所示。

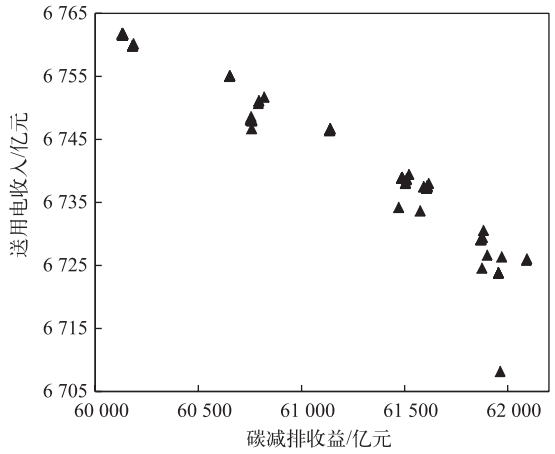

图1　帕累托解集

选取帕累托前沿的两端为方案1和方案2，分别表示碳减排效益最大化和送电收入最大化方案，见表4。

表4　送电方案　（单位：亿kW·h）

	通道1	通道2	通道3	通道4
原方案	301.777 2	365.889 7	339.295	260.382 2
方案1	309.074	528.505 3	285.093 7	144.484 9
方案2	491.665 6	319.019 4	313.126 5	143.515 2

此时，各方案下碳减排效益、送电收入及总效益的情况见表5。

表5　效益情况　（单位：亿元）

	碳减排效益	送电收入	总效益
原方案	5.937 612	662.130 4	659.974 3
方案1	6.209 207	672.607 7	688.181 5
方案2	6.012 831	676.186 2	668.901 7

此时，问题的乌托邦点为（6.209 207，676.186 2），将乌托邦点代入式（3）、式（4），得到最优折中解为（6.012 831，676.186 2），即方案1。

结果显示，方案1较原方案碳减排效益提高了2 715.9万元，电网公司的送电收入提高了10.48亿元；方案2较原方案碳减排效益提高了752.2万元，电网公司的送电收入提高了14.05亿元；方案1和方案2均使碳减排效益和送电收入得到了提升，模型有效。此外，由于送电收入与碳减排效益存在数量级的差异，因此电网公司没有动力去追求碳减排效益的最大化。反之说明，若一味地追求碳减排效益，可能会对电网企业的效益造成严重的负面影响。

结束语

（1）本文提出的模型有效，可为决策者提供支持和参考

本文提出了基于碳交易市场价格的送电调度优化模型，并通过算例分析验证了模型的有效性。在“双碳”背景下，作为清洁能源的水电在送往不同受端区的过程中往往面临着“减碳机会成本”。将这一因素考虑进外送方案之中，可以制定出更合理的外送方案，从而体现水电作为绿色能源的“附加价值”。希望本文提出的模型可以为推动实现中国西南地区富余水电的充分利用和优化配置做出贡献，为今后“双碳”背景下水电外送日益凸显的多方博弈问题和逐渐灵活的水电市场交易提供有效参考。

（2）电网没有动力追求碳减排效益的最大化，但水电价值仍需凸显

由于送电收入与碳减排效益存在数量级的差异，因此若一味地追求碳减排效益，可能会对电网企业的效益造成严重的负面影响。但这并不意味着水电作为清洁能源价值应被忽视，目前尚未被纳入碳交易市场乃至绿色电力产品的范畴，导致水电的减碳价值难以充分发挥，送端区的清洁能源的优势也难以得到充分体现。在《绿色电力交易试点工作方案》得到正式批复后，方案中已明确，当条件成熟时，绿色电力产品的范围可逐步扩大至符合条件的水电。水电作为零碳能源，在“双碳”背景下，应当遵循市场经济规律，将其纳入绿色电力产品以及碳交易市场的时机已经日趋成熟。

（3）能源主管部门应对水电外送的外送方案进行合理干预

由于电网公司存在送电收入优先的分配倾向，为了统筹兼顾社会生产实际，保障能源结构的绿色转型，能源主管部门应当发挥其主导性的作用，在保障电网效益的情况下对送电方案进行合理干预，应当尽快考虑和相关企业合作，出台关于水电减碳价值的规范化计价标准。另一方面，相关政策的制定同样不应一味追求碳减排效益，尽管受端区间的电网平均CO_2排放因子存在差异，但由于各地区发展水平的不同，电量需求存在轻重缓急，水电外送方案的制定最终还是要以社会生产效益最大化和人民福祉最大化为第一原则。**EA**

（下转第69页）

护定值优化方法研究，切实实现了提高继电保护性能的目的。借助本文对于继电保护定值优化方法的研究与设计，也希望能够为相关实际电力系统的安全管理提供有价值参考。**EA**

（收稿日期：2023-10-18）

参考文献

[1] 路峰，熊涛，李锦锦．基于多智能体系统的分布式电源配电网保护方案优化策略[J]．自动化与仪器仪表，2023(8)：174-177．
[2] 左宝峰，李俊，黄子堃，等．基于LVRT策略和故障谐波足迹的微电网继电保护方案[J]．制造业自动化，2023，45(8)：17-21．
[3] 吴双．基于粒子群方法的配电网继电保护实时整定方法研究[J]．电气技术与经济，2023(6)：64-66+70．
[4] 韦帅余，赵董．电气工程中电力综合自动化系统与变电站继电保护研究[J]．电气技术与经济，2023(6)：103-105．
[5] 张立，方洋洋．基于MATLAB/Simulink输电线路距离保护的建模与仿真分析[J]．东北电力技术，2023，44(8)：1-3+31．
[6] 夏明圣．电力系统继电保护装置直流接地安全态势识别方法[J]．微型电脑应用，2023，39(8)：221-224．
[7] 吴宇奇，黎钊，肖澍昱，等．基于电子式电压互感器边界特性分析的35 kV配网输电线路单端暂态量保护方案及其整定[J/OL]．中国电机工程学报，2023，6(6)：1-18．
[8] 王洋，张永伍，杨畅，等．基于量子遗传分析架构的分布式电网继电保护定值优化方法[J]．制造业自动化，2023，45(7)：184-188．
[9] 霍锐成，黄文焘，余墨多，等．含限流电抗器的环形直流微电网暂态对地高频电压保护方法[J/OL]．电力系统自动化，2023，7(19)：1-15．
[10] 雷翔胜，王兴华，余梦泽，等．基于PSCAD的海上特高压柔性直流线路保护的故障处理方法[J/OL]．计算机测量与控制，2023，7(13)：1-10．
[11] 张健，于洋，郑常宝，等．基于修正余弦相似度的电力系统输电线路差动保护方法[J]．安徽大学学报(自然科学版)，2023，47(4)：49-56．

（上接第 65 页）

（收稿日期：2024-03-18）

参考文献

[1] 张粒子，张枫，李俊，等．基于中长期优化调度的水电富集地区丰枯期省间购售电策略优化模型研究[J]．水利水电技术(中英文)，2021，52(07)：152-166．
[2] 邓玉敏，石峰，夏清，等．跨省区水电参与现货市场的机制和交易策略[J]．电网技术，2021，45(8)：3190-3202．
[3] 郭洪武，赵蕊，蒲雷，等．跨省电力交易多方主体合作利益分配的修正Shapley模型研究[J]．数学的实践与认识，2019，49(7)：46-53．
[4] 丁毅宏，檀勤良，郑锦，等．市场交易下电力联合外送多主体利益分配优化[J]．电网与清洁能源，2021，37(11)：31-38+46．
[5] 邴焕帅，康义，余雅峰．季节性水电外送曲线优化模型与算法研究[J]．中国电力，2016，49(02)：128-131．
[6] 崔德民，赵海兵，方燕琼，等．考虑就地消纳与外送相协调的可再生能源生产模拟[J]．电力系统保护与控制，2018，46(16)：112-118．
[7] 谭政宇，陈仕军，黄炜斌，等．基于四川水电调峰外送情景下的受端电网接纳空间分析[J]．电网与清洁能源，2020，36(12)：67-74．
[8] 纪昌明，赵亚威，张验科．促进清洁能源消纳的多网联合优化与决策模型[J]．水力发电学报，2021，40(2)：64-76．