

面向决策的区域微电网定量评估框架

滕敏亮, 滕晓亮, 田芬芳, 王耀华, 林建豪, 张 巍, 周意诚*

浙江腾腾电气有限公司, 浙江 温州

收稿日期: 2026年3月22日; 录用日期: 2026年4月12日; 发布日期: 2026年4月18日

摘 要

针对区域微电网研究中“运行优化结果难以直接转化为规划和政策判断依据”的问题, 本文提出一种面向决策的定量评估框架。该框架将系统输入、运行决策机制与绩效评估层进行解耦, 并通过统一的信息流将短期运行行为映射到年度成本、燃料消耗和二氧化碳排放等长期指标。为说明框架的工程可操作性, 文中选取由三台柴油发电机构成的区域微电网作为案例, 在相同负荷条件下比较“基准调度场景”和“按成本优先的决策导向场景”。同时补充了一个可复现实算例: 基于公开可计算的机组参数、年度负荷持续曲线、柴油价格和排放系数, 逐项给出计算方法与结果。结果表明, 在本文设定条件下, 决策导向场景相较基准场景可使年度燃料消耗、运行成本和二氧化碳排放分别下降约3.55%、3.55%和3.55%。研究表明, 即便采用简单透明的运行规则, 只要置于统一的长期评估框架中, 也能够为区域微电网规划、运行和政策比较提供有解释性的定量依据。

关键词

决策导向评估, 区域微电网, 运行策略, 经济与环境评估, 长期性能

A Quantitative Evaluation Framework for Regional Microgrids Aimed at Decision-Making

Minliang Teng, Xiaoliang Teng, Fenfang Tian, Yaohua Wang, Jianhao Lin, Wei Zhang, Yicheng Zhou*

Zhejiang TTN Electric Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang

Received: March 22, 2026; accepted: April 12, 2026; published: April 27, 2026

Abstract

This paper proposes a decision-oriented quantitative evaluation framework for regional microgrids,

*通讯作者。

文章引用: 滕敏亮, 滕晓亮, 田芬芳, 王耀华, 林建豪, 张巍, 周意诚. 面向决策的区域微电网定量评估框架[J]. 智能电网, 2026, 16(2): 17-23. DOI: 10.12677/sg.2026.162003

aiming to bridge the gap between short-term operational decisions and long-term planning-oriented performance assessment. The framework decouples system inputs, operational decision mechanisms, and performance evaluation layers, and maps operational behaviors into annualized indicators including cost, fuel consumption, and CO₂ emissions. A three-generator diesel microgrid is used to demonstrate the framework under two scenarios: a baseline dispatch rule and a cost-priority decision-oriented rule. To enhance reproducibility, a verifiable numerical example is added based on explicit generator parameters, an annual load-duration curve, diesel price, and an emission factor. Under the adopted assumptions, the decision-oriented scenario reduces annual fuel use, operating cost, and CO₂ emissions by about 3.55%, 3.55%, and 3.55%, respectively, compared with the baseline scenario. The study shows that even simple and interpretable operational rules can provide meaningful evidence for planning and policy decisions when embedded in a unified long-term evaluation framework.

Keywords

Decision-Oriented Evaluation, Regional Microgrid, Operational Strategies, Economic and Environmental Assessment, Long-Term Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着分布式电源、储能和局部能源自治需求不断增强,微电网已成为社区、园区、岛屿及偏远地区供电的重要技术路径[1]-[4]。与传统集中式电力系统相比,区域微电网通常具有边界明确、资源类型多样、运行模式灵活等特点,其规划与运行不仅要满足供电可靠性,还需要综合兼顾经济性、环境性和可实施性。

现有研究在微电网控制、能量管理和调度优化方面已取得大量成果。然而,许多研究更侧重短时尺度的最优控制或特定算法性能,难以直接回答规划者和政策制定者更关心的问题:某一种运行决策机制在全年尺度上究竟会带来多大成本差异、燃料消耗差异和排放差异。另一方面,综合能源系统和多维评估研究已说明,系统评价应服务于更高层级的决策过程[5]-[7]。

此外,微电网规划与运行研究中,已有一批较成熟的软件工具可用于配置设计、经济性测算和情景分析,例如 HOMER 等代表性平台。这类工具在多能源组合优化、设备容量配置和生命周期成本比较方面具有较强实用性,已被广泛用于离网型或混合型微电网研究。然而,其建模与求解过程往往更强调结果导向的优化输出,用户通常更容易获得“最优方案”本身,而较难直接审查某一运行规则对年度成本、燃料消耗和排放结果的独立影响。

与此不同,本文的目标并不是构造一个替代现有大型软件的黑盒优化器,而是提出一种面向决策的“白盒”评估框架:将系统输入、运行规则和绩效结果显式解耦,使研究者和决策者能够直接观察“某一可解释的运行规则”如何影响长期指标。换言之,本文更关注规则透明性、评价可追溯性和决策可解释性,而非追求在复杂约束下的全局最优搜索。

因此,本文框架与现有工具之间更适宜被理解为互补关系而非替代关系。一方面,在项目早期,当系统方案尚未完全确定时,本文框架可作为前期快速评估工具,用于低成本比较不同运行规则或政策假设的方向性差异;另一方面,在采用 HOMER 等软件完成详细优化之后,本文框架又可作为结果解释工

具,帮助回答“为何该方案在长期尺度上更优”“哪一项运行规则对成本或排放改善贡献最大”等问题。

基于此,本文不将重点放在构造新的求解器或特定软件平台,而是提出一种工具无关、可迁移的区域微电网定量评估框架:在统一场景输入下,将运行决策机制视为可替换的策略模块,再通过长期绩效聚合完成对经济与环境结果的透明比较。文中以基于燃料成本特征的机组优先级规则为代表性决策机制,并通过多发电机微电网案例验证框架的适用性。

本文的主要贡献如下:其一,构建了连接“运行决策-长期绩效-决策支持”的结构化评估框架,并强调在统一输入条件下对运行规则进行显式、透明的量化评估;其二,在框架内引入一种简洁、可解释的基于成本指标的发电机优先级机制,用以展示“白盒规则”如何影响长期经济与环境结果;其三,补充一个可复现实算例,说明如何由机组参数与负荷曲线直接计算年度成本和排放;其四,从方法定位上明确本文框架与 HOMER 等现有工具的互补关系,即前者强调规则解释与快速比较,后者擅长复杂配置优化与工程仿真。

全文结构如下:第2节阐述定量评估概念;第3节给出框架结构;第4节介绍基于燃料成本特征的运行决策机制;第5节给出案例研究与可复现实算例;第6节讨论其适用性与局限性;第7节给出结论。

2. 定量评估概念

2.1. 评估范围与时间尺度

本文所称区域微电网,是指在特定地域边界内集成多类分布式电源、负荷以及可选储能设备的局部供能系统。与仅关注某一时刻调度结果不同,本文同时考虑短期运行行为与长期绩效结果:前者表现为给定时刻的机组投入和功率分配,后者表现为全年尺度的累计成本、燃料消耗和排放。这样的时间尺度划分,有利于把运行策略变化稳定地映射到年度评价指标。

2.2. 评估维度

为服务决策,框架聚焦三个维度:经济绩效、运行可行性和环境影响。经济绩效通过全年累计运行成本表征;运行可行性要求在容量约束和供需平衡约束下可靠满足负荷需求;环境影响则采用燃料消耗乘以标准排放系数进行核算。三个维度共同构成面向决策的最小评估闭环。

2.3. 运行决策在评估中的作用

在同一微电网配置下,不同机组优先级、启停逻辑和功率分配规则会改变各机组的利用小时与运行点,进而改变长期成本和排放结果。因此,运行决策应被视为评估输入的一部分,而不是脱离情景边界的孤立算法。该处理方式与综合评估研究强调的“情景一致、指标统一、结果可比较”的原则相一致。

3. 决策导向评估框架

3.1. 框架结构

所提框架见图1。由系统输入层、运行决策层、绩效评估层和决策支持层四部分构成。系统输入层给出负荷曲线、机组参数和运行约束;运行决策层负责形成机组优先级与调度规则;绩效评估层将时序运行结果汇总为长期指标;决策支持层则面向规划、运行和政策比较输出评价结论。该框架强调方法论而非软件工具,因此具有工具无关性和供应商中立性。

3.2. 输入层:系统条件与约束

输入层在给定场景中保持不变,主要包括:负荷持续曲线或时序负荷、各发电机容量上限、燃料成

本参数及必要的运行边界。通过固定输入层，可确保不同场景之间的绩效差异主要来自运行决策，而非系统配置变化。



Figure 1. Decision-oriented quantitative evaluation framework

图 1. 决策导向型定量评估框架

3.3. 运行决策层与绩效评估层的交互

运行决策层的输出是机组启停次序和功率分配结果；绩效评估层则将各时段发电量和燃料消耗进行累加，形成年度成本与排放。运行层决定“如何运行”，评估层回答“长期结果如何”，二者共同构成面向决策的因果链条。

4. 基于燃料成本特征的运行决策机制

4.1. 发电机燃料成本模型

参考经典经济调度模型[8][9]，本文采用二次函数表示发电机燃料消耗(或等价燃料成本)特性：

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

式中， $F_i(P_i)$ 为发电机*i*在输出功率 P_i 下的单位时间燃料消耗量； a_i 、 b_i 、 c_i 为机组成本系数。该形式能在工程上较好刻画常规柴油机组在正常出力区间内的经济性差异。

4.2. 最大单位发电成本指标

为了构造易于解释的优先级规则，定义机组在额定最大出力处的平均单位发电成本指标为：

其中， $P_{i,max}$ 为机组*i*的额定最大功率。 $C_{i,max}$ 越小，表示该机组在高负荷附近提供单位电量所需燃料越少。

$$\mu_i = \frac{F_i(P_{i,max})}{P_{i,max}} \quad (2)$$

4.3. 运行约束与优先级规则

在每个负荷水平下，系统需满足功率平衡约束：

$$\sum P_i(t) = P_L$$

其中， P_L 为该时段总负荷。本文设置两种场景：基准场景采用“按容量由小到大逐台投入”的经验规则；决策导向场景则按 $C_{i,max}$ 由低到高进行排序，优先启用单位发电成本较低的机组。需要指出的是，该规则并不宣称全局最优，而是作为可嵌入框架、便于比较的代表性决策机制。

$$\sum P_i = P_L, 0 \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (3)$$

5. 案例研究与可复现实算例

5.1. 算例设置

为增强稿件的可核验性，本文在原案例基础上补充一个完全可复现的年度算例。目标微电网由三台

柴油发电机构成，总装机容量为 1200 kW；全年负荷采用五段式负荷持续曲线表示，总时长为 8760 h。柴油单价取 1.15 美元/L，二氧化碳排放系数取 2.68 kg/L [10][11]。由于所有参数均在文中给出，因此读者可依据式(1)~式(3)逐项复算。其中具体参数见表 1，表 2。

Table 1. Generator specifications

表 1. 发电机参数

发电机	最大功率/kW	a	b	c
G1	500	0.0008	0.18	5
G2	400	0.001	0.2	6
G3	300	0.0012	0.22	7

Table 2. Annual load duration curve

表 2. 年度负荷持续曲线

负荷水平/kW	持续时间/h	电量/MWh
250	1800	450.0
450	2600	1170.0
700	2200	1540.0
950	1200	1140.0
1100	960	1056.0

5.2. 场景说明与排序结果

由式(2)可得，三台机组在额定出力处的平均单位发电成本分别为： $G1 = 0.5900$ ， $G3 = 0.6033$ ， $G2 = 0.6150$ 。因此，决策导向场景的优先级为 $G1 \rightarrow G3 \rightarrow G2$ ；基准场景为 $G3 \rightarrow G2 \rightarrow G1$ 。二者的差异在于：前者优先使用高负荷下更经济的机组，后者更接近不区分成本特征的经验型投入顺序。

Table 3. Unit priority and annual evaluation results

表 3. 机组优先级与年度评估结果

场景	优先级顺序	年成本/千美元	燃料消耗/千升	CO ₂ 排放/t
基准场景	$G3 \rightarrow G2 \rightarrow G1$	3504.99	3047.82	8168.16
决策导向场景	$G1 \rightarrow G3 \rightarrow G2$	3380.68	2939.72	7878.45

5.3. 典型负荷点的可复算示例

以 950 kW 负荷为例：在基准场景下，机组按 $G3 \rightarrow G2 \rightarrow G1$ 投入，得到输出分配为 $G3 = 300$ kW、 $G2 = 400$ kW、 $G1 = 250$ kW；代入式(1)可得该时段总燃料消耗为 479.0 L/h。相同负荷下，在决策导向场景中按 $G1 \rightarrow G3 \rightarrow G2$ 分配，得到 $G1 = 500$ kW、 $G3 = 300$ kW、 $G2 = 150$ kW，总燃料消耗为 472.5 L/h。该负荷点每运行 1200 h，单独即可节约约 7.8 千升燃料。

同理，对表 2 中全部负荷水平逐项计算并累加，可得到表 3 所列年度结果。由于本文采用的机组参数、负荷持续时间、价格和排放系数均为显式给定，算例具有可追溯、可复核和可替换的特点。

5.4. 结果分析

从年度累计结果看，决策导向场景相比基准场景，年运行成本由 3504.99 千美元降至 3380.68 千美

元, 降幅为 3.55%; 燃料消耗由 3047.82 千升降至 2939.72 千升, 降幅为 3.55%; 二氧化碳排放由 8168.16 t 降至 7878.45 t, 降幅为 3.55%。这表明, 即便在不引入复杂优化算法的情况下, 只要对运行决策进行合理排序, 也能在长期尺度获得稳定收益。

需要指出的是, 上述结果是针对本文算例参数得到的定量结论, 并不意味着任意微电网均会出现相同比例的改进。框架的价值在于提供一种统一计算方法, 使不同系统、不同规则 and 不同政策假设都可以被置于同一评价坐标下。图 2 归纳了两种场景的年度评估结果对比。

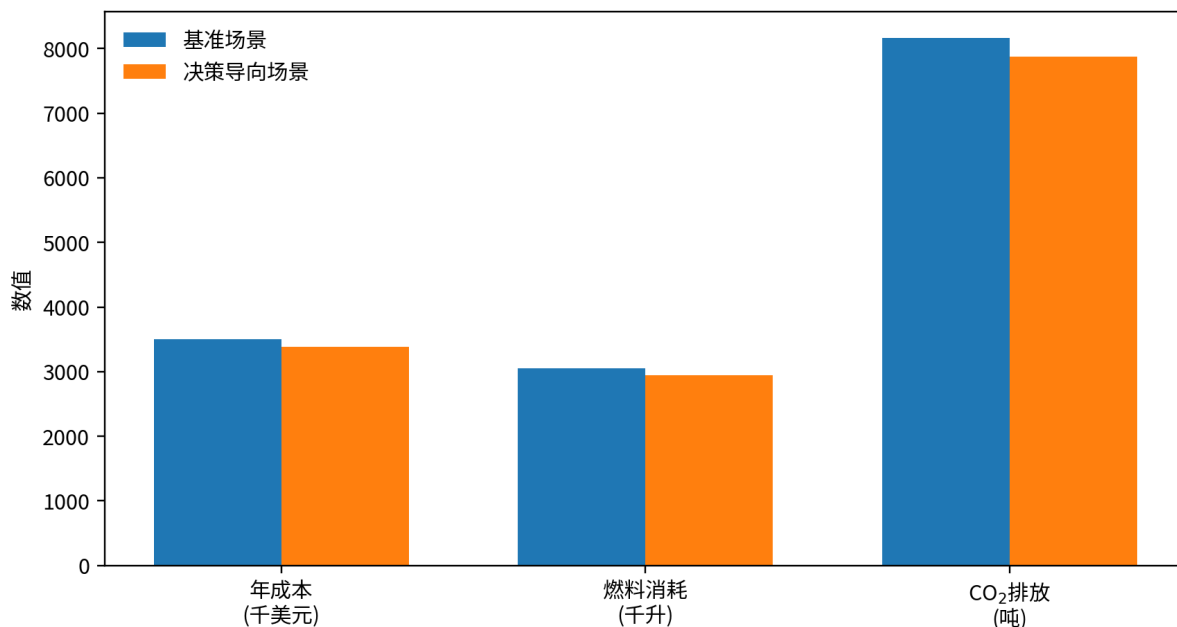


Figure 2. Comparison of annual evaluation results for the two scenarios
图 2. 两种场景的年度评估结果对比

6. 讨论

6.1. 与现有工具和算法导向研究的区别与互补性

与强调特定软件平台功能实现的工具导向研究不同, 本文并不依赖某一专有仿真平台, 也不试图替代 HOMER 等已广泛应用的微电网分析软件。HOMER 类工具在设备选型、容量配置、生命周期成本优化以及多情景经济性比较方面具有明显优势, 特别适合处理包含多能源耦合、多约束条件和较大方案空间的工程问题。

然而, 这类工具通常更偏向“结果导向”的优化范式, 其输出重点往往是最优配置或最优运行结果本身。相比之下, 本文更关注“某一运行规则为何会产生这样的长期结果”, 即强调规则 - 结果之间因果链条的透明呈现。从这个意义上说, 本文框架属于一种面向决策解释的白盒评估方法: 规则可定义、过程可追溯、指标可复算、结论可审查。

因此, 本文的独特价值不在于求解一个比现有软件更复杂或更优的调度问题, 而在于为规划者和政策制定者提供一种能够直接评估“可解释运行规则”的定量工具。对于需要快速比较政策情景、运行原则或优先级机制的场景, 这种白盒框架具有较强实用性。

同时, 本文框架也可与 HOMER 等工具形成互补: 在项目前期, 可先利用本文框架对不同运行规则进行快速筛选, 识别值得进一步深入的方案; 在项目后期, 也可在大型软件给出优化结果后, 利用本文

框架对关键规则、成本驱动因素和排放变化来源进行解释，从而增强优化结果的可理解性与决策可沟通性。

6.2. 对规划与政策分析的意义

在区域微电网规划中，决策者往往需要比较不同机组组合、不同运行政策或不同燃料价格假设下的长期结果。本文框架可直接用于此类情景比较：只需固定系统边界与输入，再替换运行决策规则，即可得到可比的年度成本与排放结果。特别是在项目可研初期、边界条件尚不完备或决策者更关注规则透明性而非复杂寻优性能时，本文框架可作为一种低门槛、可快速迭代的预评估方法；而在详细设计阶段，则可与专业优化软件结合使用，形成“快速解释-深入优化-结果回释”的协同分析流程。

6.3. 局限性

本文案例聚焦柴油发电型区域微电网，尚未显式建模可再生能源随机性、储能寿命损耗、爬坡约束和检修计划等因素。未来可在保持框架不变的前提下，向更复杂的“源-网-荷-储”协同场景扩展。

7. 结论

本文提出了一种面向决策的区域微电网定量评估框架，并完成了最终稿层面的结构精简、重复内容压缩和引文顺序重构。该框架通过解耦系统输入、运行决策和绩效评估，使短期运行行为能够被一致地转换为年度成本、燃料消耗和二氧化碳排放等长期指标。

在三机柴油微电网案例中，本文进一步补充了一个可复现实算例。结果表明，在相同负荷与参数条件下，基于成本优先级的决策导向场景可获得更低的年度成本和排放。由此可见，运行决策并非只是调度层面的局部选择，而是会显著改变长期规划评估结果。

因此，所提框架可作为区域微电网规划、运行和政策评估之间的连接工具。后续研究可在此基础上进一步引入可再生能源、储能和多目标权衡分析，以提升其对新型微电网系统的适用性。

与现有优化型软件不同，本文框架更强调对白盒运行规则的直接评估，因此适合作为区域微电网方案研究中的前期快速评估工具和后期结果解释工具。

参考文献

- [1] Lasseter, R.H. (2011) Smart Distribution: Coupled Microgrids. *Proceedings of the IEEE*, **99**, 1074-1082. <https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2114630>
- [2] Hatziargyriou, N. (2014) *Microgrids: Architectures and Control*. Wiley.
- [3] Olivares, D.E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A.H., Canizares, C.A., Iravani, R., Kazerani, M., *et al.* (2014) Trends in Microgrid Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **5**, 1905-1919. <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2295514>
- [4] Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A. and Bahramirad, S. (2015) State of the Art in Research on Microgrids: A Review. *IEEE Access*, **3**, 890-925. <https://doi.org/10.1109/access.2015.2443119>
- [5] Mancarella, P. (2014) MES (Multi-Energy Systems): An Overview of Concepts and Evaluation Models. *Energy*, **65**, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- [6] Keirstead, J., Jennings, M. and Sivakumar, A. (2012) A Review of Urban Energy System Models: Approaches, Challenges and Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 3847-3866.
- [7] Lund, H., Østergaard, P.A., Connolly, D. and Mathiesen, B.V. (2017) Smart Energy and Smart Energy Systems. *Energy*, **137**, 556-565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>
- [8] Wood, A.J. and Wollenberg, B.F. (1996) *Power Generation, Operation, and Control*. 2nd Edition, Wiley.
- [9] Conejo, A.J., Carrión, M. and Morales, J.M. (2010) *Decision Making under Uncertainty in Electricity Markets*. Springer.
- [10] IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.
- [11] International Energy Agency (2022) *CO₂ Emissions from Fuel Combustion*. IEA.