

电力系统转型阶段评估模型研究——以安徽省为例

朱刘柱¹, 高赐威^{2*}, 尹晨旭¹, 邵海雯², 时伟¹, 叶斌¹, 张理¹

(1. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽省 合肥市 230022;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

Phase Assessment Model for Power System Transition: A Case Study of Anhui Province

ZHU Liuzhu¹, GAO Ciwei^{2*}, YIN Chenxu¹, SHAO Haiwen², SHI Wei¹, YE Bin¹, ZHANG Li¹

(1. Economic Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, Anhui Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

Abstract: As a clean, efficient, safe and sustainable modern energy system needs to be constructed, the power system must be transformed more aggressively. The main issues of the power transition of the provincial power system need to be analyzed, considering the features of the regional power supply. The adaptive development phase should be studied according to local power system. Combining the key issues of the power system transition in Anhui Province, three development phases (steady development, coal transition and community energy) are defined. The phase assessment model and the index system involving economic, efficient and environmental aspect for power system transition is proposed. And the benchmark phase is selected to evaluate the degree of power system transition. Finally, suggestions on the power system of Anhui Province are discussed.

Keywords: energy transition; power system development phases; DEA evaluation

摘 要: 随着能源转型战略深入推进以及构建清洁高效、安全可持续发展的现代能源体系的提出, 省级电力系统迫切需要结合区域能源环境特点, 甄别电力系统转型的主要问题和矛盾, 因地制宜提出适应性的发展阶段。结合安徽省电力系统转型现存的关键问题, 构建了稳健发展、煤炭过渡和社区能源3个电力发展阶段。构建了电力系统转型阶段评估模型(PAM-PST, phases assessment model for power system transition), 评估电力系统转型阶段并选取标杆阶段, 挖掘省级电力系统转型的关键着力点。最后, 提出安徽省实施电力系统转型的建议。

关键词: 能源转型; 电力系统发展阶段; 数据包络分析(DEA) 评估

0 引言

自2007年《中国的能源状况与政策》发布以来, 中国能源转型逐步推进。2014年6月, 中国提出“四个革命、一个合作”能源发展战略, 即推动能源消费革命、能源供给革命、能源技术革命和能源体制改革, 全方位加强国际合作。随后, 出台了一系列政策文件对中国未来能源发展的总体目标、战略方针和重点任务做出进一步阐述^[1-2], 对能源消费总量、非化石能源比值、CO₂排放比等指标提出具体限值, 并提出要加快构建清洁高效、安全可持续发展的现代能源体系^[3]。各省级电力系统在此目标下, 因地制宜推进能源转型, 构建现代能源体系。

国内外学者从不同角度对能源转型进行了定义, 国外学者将能源转型定义为能源结构的根本性转变^[4]; 国内学者从能源结构、新兴技术、体制变革、能源利用效率等角度对能源转型进行研究^[5-7]。“能源转型”与“能源革命”的本质是相同的。能源转型的字面理解是指能源形态的转变, 即能源结构中主要供能能源的主导地位被另一种能源替代, 替代过程包括技术更新进步、相关产业调整、相关制度的制定等^[8-9]。电力系统转型是指通过创新可再生能源(renewable energy, RE)技术, 辅以能源电力相关的机制和政策, 使可再生能源替代化石能源在电力结构中的主导地位, 向更加清洁低碳和安全高效转变。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52007030); 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院科技项目(B61209200002)。

National Natural Science Foundation of China (52007030);
Science and Technology Foundation of Economic Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (B61209200002).

省级电力系统转型的关键在于因地制宜，结合区域能源环境特点，甄别电力系统转型的主要问题和矛盾，提出适应性的发展阶段。目前国内学者对于电力系统转型的研究侧重于国家层面：文献[10-12]结合美国、德国、瑞典等国家能源转型实践经验，提出中国电力系统转型存在的问题和转型建议。文献[13-16]依托能源转型背景，论述了能源系统与信息技术融合下，电力系统技术的技术架构与未来研究方向。文献[17]提出中国能源体系2℃能源转型目标，并设计了综合能源评估模型。文献[18-19]分别从能源消费侧和供应侧，分析了能源互联网背景和高比例新能源接入对电力市场形态的影响，并指出用户侧能源转型以终端电能替代和分布式可再生能源开发利用为主要途径。评估电力系统转型的阶段，有助于发现电力系统高质量发展过程中存在的问题^[20-21]。文献[22]基于《巴黎协定》，构建了气候变化背景下全球能源互联网的节能减排路径及能源应用场景。

本文结合安徽省能源发展特点，分别从电力供应安全、优化电力结构和能源清洁高效发展角度总结了安徽省电力系统转型存在的关键问题。本文建立了电力系统转型阶段评估模型（PAM-PST, phases assessment model for power system transition），构建了稳健发展、煤炭过渡和社区能源3个发展阶段，并基于多指标综合评估模型选取标杆阶段，评估电力系统转型阶段。最后，提出安徽省实施电力系统转型的建议。

1 安徽省电力系统转型的关键问题

1.1 电力系统转型要确保电力供应安全，减少电力供应缺口

电力系统转型的核心是供应安全，即在价格可接受的前提下，保障电力的持续充足供应。按现有电源建设规模、协议分电规模和12%备用测算，2025年安徽省电力亏缺将达到22 000 MW左右，考虑电力需求侧管理3%~5%负荷削减2000~3500 MW，保守估计安徽省将存在电力供应缺口18 000~20 000 MW。若无新增规划电源，预计到2025年长三角最大电力缺口将超过40 000 MW，安徽电力缺口将占长三角区域电力缺口的50%，形势严峻^[23]。

如图1可知，第三产业和居民消费用电需求不断增加，其用电特点将使全社会用电峰谷差持续扩大。若不采取有效措施，电力缺口将持续扩大，阻碍电力安全供应。

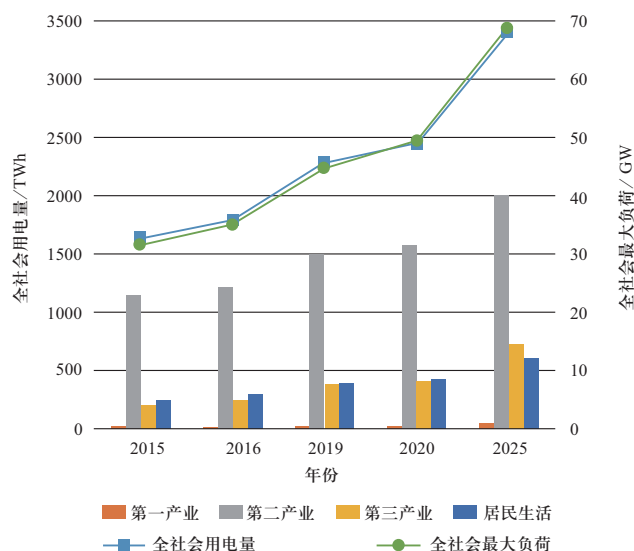


图1 安徽省用电需求结构

Fig. 1 Electricity demand mix and peak in Anhui Province

1.2 电力系统转型要优化电源结构，加强电力系统灵活性

煤电是安徽省主要供电方式，2019年安徽煤电装机已达总装机容量的65%。如图2所示，为提高非化石能源比例，截至2019年底，安徽省风电装机2740 MW，“十三五”期间年均增长率为19.3%；光伏发电装机12 540 MW，装机规模在全国领先，年均增长率为76.2%；全省非化石能源装机、发电量分别达到20 650 MW和320 TWh，分别占全社会装机的27.9%和全社会用电量的13.9%^[23]。

为适应高比例间歇性可再生能源接入，安徽省目前主要通过改造煤电机组的调峰能力提高系统的可再

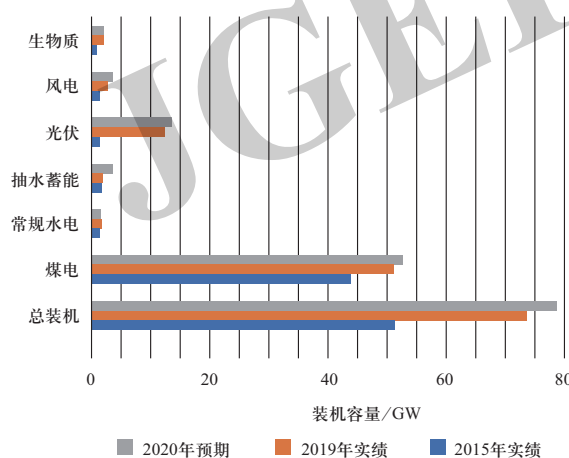


图2 安徽省电源装机结构

Fig. 2 Power source mix in Anhui Province

生能源消纳空间。但是目前煤电灵活性改造成本较大,中电联数据显示其改造费用为500~1500元/kW^[24]。目前安徽深调峰交易采用阶梯电价,第一档的机组负荷率范围为45%~50%,报价上限仅为0.3元/kWh^[25]。若无有效的调峰辅助服务补偿机制或其他激励机制,煤电厂将难以承担改造成本、运维成本和燃料成本。

若仅通过煤电改造提高系统的灵活性,不仅经济成本较大,其提高程度也有限。考虑安徽省已有深度调峰能力的煤电机组(截至2020年4月,安徽省具备40%深度调峰能力的煤电机组为33 420 MW),在目前可再生能源装机占比下,全省仍需要将近7000 MW的可再生能源消纳空间。因此,为应对间歇性可再生能源消纳问题,安徽省亟需多角度探索提高系统灵活性的措施。

1.3 电力系统转型要确保清洁高效,提高能源利用效率

目前安徽能源电力发展主要依赖煤炭,煤炭生产、消费和煤电装机比重分别达到90%、75%和75%以上,但安徽省煤层赋存条件复杂、地表塌陷严重、生态治理任务艰巨等问题日益突出。《安徽省煤炭工业发展“十三五”规划》提出煤炭产能控制目标,由2015年 1.57×10^9 t控制到 1.327×10^9 t左右;国家能源局发布《可再生能源电力配额及考核办法(征求意见稿)》,要求2020年安徽非水可再生能源电力配额指标达到14.5%。安徽能源电力向清洁高效化转型的需求迫在眉睫。

在能源系统规划方面,安徽省主要为单一能源规划,即电力系统、天然气系统、热力系统等各部门独立开展,多能源之间相互转化和互补运行的协同作用难以体现,能源综合利用效率较低。在能源消费方面,安徽省需求侧管理实施细则初步建立,但需求响应市场化建设尚未起步,用户侧资源存在很大释放和利用空间。

2 基于PAM-PST评估电力系统发展阶段

目前衡量电力系统转型进展的通用方式是计算非水可再生能源,即风力发电和光伏发电占总发电量的比重。但电力系统转型不仅是电力结构中可再生能源占比的变化,还应包括技术、效率、安全性、经济性等方面的转变,仅通过可再生能源占比来评估能源转型阶段是不够的。目前相关文献对电力系统转型阶段

和趋势的判别主要以经验法定性分析判断为主,缺乏系统性指标评估。

基于电力生产消费链的3个关键环节:电力供应侧、输配电网架、电力消费侧,选取电力系统转型相关评估指标,建立评估指标体系,并结合安徽省能源电力的发展情况,预设安徽省电力系统未来3个发展阶段,并基于评估体系对各阶段开展评估。

2.1 指标体系

电力系统转型升级不仅包括优化电力结构、增加可再生能源在能源供应侧的占比,还包括为适应可再生能源并网所增加的电力系统灵活性投资建设,包括能源供应侧调峰电源建设、输配电网架建设、能源消费侧的综合能源和需求响应能力建设。电力系统转型的特征体现在电力结构优化、能源利用效率提高和碳排放量降低3个方面,基于此构建电力系统转型评估指标体系,其中经济、效率和环境为一级指标,二级指标包括可再生能源设备投资、调峰电源投资等,如图3所示。

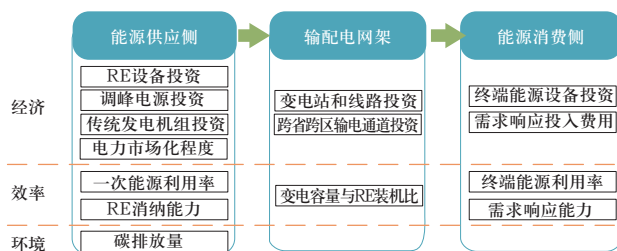


图3 电力系统转型评估指标体系

Fig. 3 Evaluation index system for power system transition

2.1.1 经济类指标

1) 能源供应侧

① RE设备投资

RE设备的投资成本包括光伏、风电、生物质发电等设备的投资费用。

$$I_{RE} = \sum_{i=1}^{N_{RE}} \omega_{RE,i} S_{RE,i} \quad (1)$$

式中: N_{RE} 为RE的类型数, $N_{RE}=4$, RE的集合表示为{PV, WT, BG, WE}, 集合中的元素分别表示光伏、风电、生物质发电、垃圾发电设备; $\omega_{RE,i}$ 、 $S_{RE,i}$ 分别为第*i*类RE设备的单位成本、投资容量。

② 调峰电源投资

调峰电源投资成本包括2个部分:对火电机组改造的费用 I_{FG} 和投资抽水蓄能电站的费用 I_{CV} 。投资调

峰电源能够增加电力系统的灵活性, 提高间歇性RE的消纳能力。

$$I_P = I_{FG} + I_{CV} \quad (2)$$

③传统发电机组投资费用

传统机组投资费用主要指火电机组的新增投资费用 I_H 。

$$I_{CG} = I_H \quad (3)$$

④电力市场化程度

本文通过比较国内电力市场化现状和美国PJM市场, 通过打分法综合评估电力市场化程度 I_{SC} , 其分值范围为1~10分, 分值大小表示电力市场化程度的大小。

2) 输电网架

①变电站和线路投资

$$I_{WJ} = \omega_T S_T + \omega_L L_1 \quad (4)$$

式中: S_T 、 L_1 分别为变电站容量和线路长度; ω_T 、 ω_L 分别为变电站单位建设容量和线路单位建设长度的投资费用。

②跨省跨区输电通道投资

通过建设跨省跨区输电通道, 促进跨省跨区电力交易, 一方面缓解本省内供电压力, 另一方面实现更大范围内RE的消纳。

$$I_{ST} = \omega_{ST} L_{ST} \quad (5)$$

式中: ω_{ST} 、 L_{ST} 分别为输电通道的单位投资费用和建设长度。

3) 能源消费侧

①终端能源设备投资

终端能源设备投资能直观反映终端综合能源发展情况。通过促进终端冷、热、电、气的相互转换, 提高各类能源利用率。终端能源设备包括热电联产机组、电转气、储气罐、燃气锅炉、制冷机等。

$$I_{ZD} = \sum_{i=1}^{N_{ZD}} \omega_{ZD,i} S_{ZD,i} \quad (6)$$

式中: N_{ZD} 为终端能源设备类型总数; $\omega_{ZD,i}$ 、 $S_{ZD,i}$ 分别为第*i*类终端能源设备的单位投资成本、投资容量。

②需求响应投入费用

需求响应效益是指能源系统通过需求响应手段, 吸引用户通过聚合商、虚拟电厂或以大用户的形式参与电力市场, 并支付相应的辅助服务费用, 如调频、调峰等。通过需求响应手段, 改善负荷曲线, 在提高用户用电灵活性的同时, 缓解能源供应侧供电压力。

$$I_{DR} = \sum_{i=1}^{N_{DR}} \omega_{DR,i} S_{DR,i} \quad (7)$$

式中: N_{DR} 为需求响应设备类型总数; $\omega_{DR,i}$ 为第*i*类需求响应设备参与市场调节的价格; $S_{DR,i}$ 为第*i*类需求响应设备的响应电量。

2.1.2 效率类指标

1) 能源供应侧

①一次能源利用率

一次能源利用率反映能源供应侧能源的利用效率。

$$I_{g\eta} = \frac{E_{yx,g}}{E_g} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $E_{yx,g}$ 、 E_g 分别为能源供应侧的有效利用能源、总供给能源。

②RE消纳能力

RE消纳能力是指省(区、市)内消纳可再生能源电量。

$$I_x = P_r - P_{rc} + P_{rr} \quad (9)$$

式中: P_r 、 P_{rc} 、 P_{rr} 分别为该地区RE的发电量、跨区送出的RE电量、跨区送入的RE电量。

2) 输电网架

变电容量与RE装机比可用来衡量电网建设规模是否与RE建设规模相符, 比值接近1表示两者建设规模匹配。

$$I_T = (S_{Tb} + S_{Tn}) / (S_{RE,b} + \sum_{i=1}^{N_{RE}} S_{RE,i}) \quad (10)$$

式中: S_{Tb} 、 S_{Tn} 分别为省级电网内110 kV及以上变电站原有容量、新增容量; $S_{RE,b}$ 、 $\sum_{i=1}^{N_{RE}} S_{RE,i}$ 分别为省级电网内原有RE的装机容量、RE新增装机容量。

3) 能源消费侧

①终端能源利用率

终端能源利用率反映消费侧的能源利用率。

$$I_{x\eta} = \frac{E_{yx,x}}{E_x} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $E_{yx,x}$ 、 E_x 分别为能源消费侧的有效利用能源、总消耗能源。

②需求响应能力

需求响应能力可根据可调控负荷占全部负荷的比例计算, 是指在规定的时段内可降低或者提高负荷以达到削峰填谷、消纳RE的目的。

$$I_d = (\sum_{i=1}^{N_{kt}} P_{kt,i} + \sum_{j=1}^{N_{kj}} P_{kj,j}) / P_L \quad (12)$$

式中: N_{kt} 为可调负荷的类型, 包括中央空调、分布式空调等; $P_{kt,i}$ 为第*i*类可调负荷可调节的功率; N_{kz} 为可转移负荷的类型, 包括电动汽车、数据中心、洗衣机等; $P_{kz,j}$ 为第*j*类可转移负荷可调节的功率; P_L 为该时段内的全部负荷。

2.1.3 环境类指标

碳排放量降低百分比

$$I_C = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} (E_{0,i} - E_i) S_{C,i} \beta_{C,i}}{\sum_{i=1}^{n_c} E_{0,i} S_{C,i} \beta_{C,i}} \times 100\% \quad (13)$$

式中: n_c 为能源类型总数; $E_{0,i}$ 、 E_i 分别为第*i*类能源的原年消费量、现年消费量; $S_{C,i}$ 为第*i*类能源的折算系数, 用以换算到标准煤; $\beta_{C,i}$ 为第*i*类能源的碳排放系数。

2.2 评估方法

2.2.1 基于熵值法确定权重

熵值法根据评估指标的信息量计算指标权重。“熵”在信息论中主要用于度量系统状态的无序性, 熵值越大, 无序性越大, 使用价值越低。类比系统状态评估, 某项评估指标的熵值越小, 该指标提供的信息量越大, 对应的权重越大。

对于*n*个样本数据, *m*个评估指标, 各指标的比重表示为

$$a_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^m Z_{ij}} \quad (14)$$

式中: Z_{ij} ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$) 为各指标归一化后的值。

指标*j*的熵值为

$$S_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} \ln \alpha_{ij} \quad (15)$$

指标*j*的权重为

$$f_j = \frac{1 - S_j}{\sum_{j=1}^m (1 - S_j)} \quad (16)$$

2.2.2 建立PAM-PST模型

数据包络分析法 (data envelopment analysis, DEA) 是一种将指标划分为多个输入和多个输出, 通过计算决策单元的输入与输出变量的相对效率进行综合评估的方法。常用的评估模型有2种: C^2R 模型, 评估的是决策单元间的相对综合有效性, 即同时评估规模有效性和技术有效性; C^2GS^2 模型, 评估的是决策单元间的相对纯技术有效性^[26]。本文采用 C^2R 模型进行评估。

1) 评估指标归一化

考虑到各类评估指标的数值均具有特定的物理含义, 为了对比各类指标, 需要对其做归一化计算。本文采用相对劣化度分析法: 根据指标特点分为越大越优型和越小越优型, 采用对应的归一化计算公式将指标折算到 [0, 1] 区间, 其中 0 表示最差, 1 表示最优。

①若指标越大越优, 则采用的归一化方法为

$$I_i = \frac{I_x - \min I_x}{\max I_x - \min I_x} \quad I_x \in M \quad (17)$$

式中: I_x 为越大越优类型的指标; *M*为评估体系中所有指标的集合。

②若指标越小越优, 则采用的归一化方法为

$$I_i = \frac{\max I_y - I_y}{\max I_y - \min I_y} \quad I_y \in M \quad (18)$$

式中: I_y 为越小越优类型的指标。

2) DEA评估模型

选取经济类指标作为输入变量, 效率和环境类指标作为输出变量, 如图3所示。对于*n*个省级电网系统, 即*n*个决策单元, $X_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ri})^T$ 、 $Y_i = (y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{si})^T$ 分别表示第*i*个省级电网系统的输入和输出变量, 其中*r*、*s*分别表示输入变量和输出变量的个数, 构造 C^2R 模型:

$$\begin{aligned} & \min \theta_{C^2R} \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^m X_j \lambda_j + S^- = \theta_{C^2R} X_0 \\ & \quad \sum_{j=1}^m Y_j \lambda_j + S^+ = Y_0, \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (19)$$

式中: θ_{C^2R} 为决策单元*i*的相对综合效率值, $\theta_{C^2R} = 1$ 表示被评价的决策单元为DEA有效, 即该省电力系统电力转型发展规划效率高, $\theta_{C^2R} < 1$ 表示被评估的决策单元为非DEA有效; λ_j 为第*j*个决策单元的权值; S^- 、 S^+ 分别表示输入的冗余量和输出的不足量。

3 电力系统转型的发展阶段分析

3.1 未来发展阶段构建

通过分析安徽省能源发展现状, 安徽电力系统供应侧主要特征为煤电比重大, 新能源发展以光伏为主, 并存在电力系统灵活性不足的问题; 需求侧的主要特征为夏季最大峰谷差持续扩大, 尖峰负荷高且短暂, 存在需求响应资源潜力大但运营不足的问题。综合考察经济、资源、技术、市场等多种不确定因素作

用下未来能源系统的长期演变方式与影响，从供应侧、输配电网架、用户侧协调发展的角度，构建以下3个能源未来发展的阶段，如图4所示。

稳健发展阶段：电力系统发展规划按照目前安徽能源电力“十四五”规划发展，电力系统转型速度较慢，能源供应侧主要依托煤电。

煤炭过渡阶段：在目前转型速度的前提下，能源供应更多依靠终端综合能源及需求侧的参与，逐步建立电力市场机制。

社区能源阶段：终端综合能源得到更快发展，微电网、虚拟电厂广泛普及。用户侧资源通过成熟的市

场机制参与市场交易。能源利用效率显著提高。

3.2 基于PAM-PST评估电力系统转型阶段

根据《中国能源统计年鉴》和安徽省“十四五”规划，3个发展阶段各指标评估值如表1所示，其中，稳健发展阶段对应目前安徽“十四五”规划，煤炭过渡和社区能源阶段为未来规划阶段。根据式（17）~（18），对表1中的指标评估值做归一化处理。以安徽省“十一五”、“十二五”、“十三五”规划数据为样本，根据式（14）~（16）评估各指标离散程度和不确定性，计算各指标权重，如表2所示。

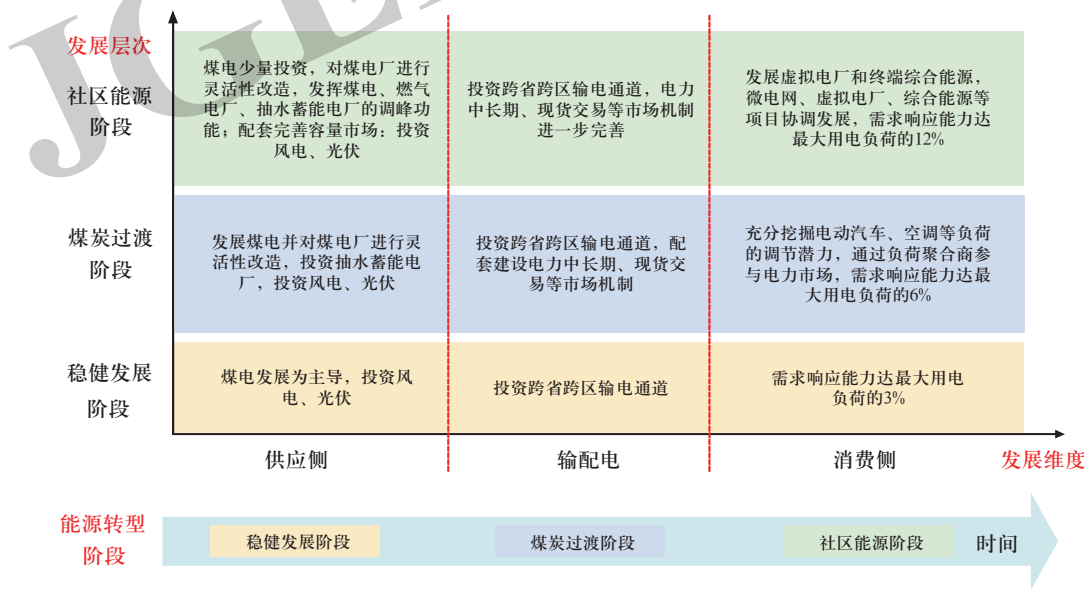


图 4 3个电力系统发展阶段的基本特点
Fig. 4 Features of the power system in three phases

表 1 不同电力系统转型阶段的评估指标值
Table 1 Evaluation indexes of power system in three phases

能源阶段	RE设备投资 /10 ¹¹ 元	调峰电源投资 /10 ¹⁰ 元	传统发电投资 /10 ¹¹ 元	变电和线路投资 /10 ¹⁰ 元	跨省跨区输电 通道投资/10 ¹³ 元	终端能源 设备投资/10 ¹⁰ 元	需求响应效益 /10 ¹⁰ 元
稳健发展	1.41	1.05	1.36	5.8	0	0	3.35
煤炭过渡	1.69	2.33	1.03	5.82	1.12	0.68	6.71
社区能源	2.12	1.27	0.85	5.89	1.65	1.37	13.3

能源阶段	电力市场化 程度	一次能源 利用率/%	RE消纳能力 /10 ⁷ kW	变电容量与RE 装机比	终端能源利用率/%	需求响应能力	碳排放量 降低/%
稳健发展	1.2	55	2.3	10.5	70	0.03	5
煤炭过渡	4.8	54	2.76	10.6	85	0.06	15
社区能源	6.5	57	3.32	10.8	92	0.12	30

表2 电力系统转型阶段评估指标权重
Table 2 Weights of evaluation index for power system transition assessment

一级指标	权值	二级指标	二级指标权值
经济类	0.437	$\{I_{RE}, I_P, I_H, I_{WJ}, I_{ST}, I_{ZD}, I_{DR}, I_{SC}\}$	$\{0.251, 0.194, 0.055, 0.091, 0.107, 0.034, 0.136, 0.132\}$
效率类	0.458	$\{I_{gn}, I_x, I_T, I_{xp}, I_d\}$	$\{0.19, 0.286, 0.135, 0.187, 0.202\}$
环境类	0.105	$\{I_C\}$	$\{1\}$

根据电力系统转型指标的评估值和各二级指标的权重计算各个发展阶段的一级评估指标综合值，如表3所示。

表3 各个发展阶段的一级评估指标综合值
Table 3 Comprehensive values of the first-level evaluation index in three phases

发展阶段	经济类	效率类	环境类
稳健发展	0.055	0.937	0.029
煤炭过渡	0.558	0.474	0.15
社区能源	0.784	0.274	0.3

基于PAM-PST，根据表3中不同能源阶段的一级指标综合值，将经济指标作为投入指标，效率和环境指标作为产出指标，计算3个发展阶段的DEA效率，如表4所示。

表4 3个发展阶段的DEA效率
Table 4 DEA efficiency in three phases

发展阶段	稳健发展	煤炭过渡	社区能源
DEA效率	0.554	0.73	1

由表4可知，随着电力系统转型发展的深入，DEA效率逐渐趋优，社区能源阶段的DEA评估结果为1，DEA有效，表示电力系统转型发展规划效率最高。稳健发展和煤炭过渡的效率值均小于1，即非DEA有效，其中稳健发展阶段下，DEA只达到最佳效率的一半，其能源发展未来的提升空间很大，需要综合考虑能源供应侧、输配电网架、能源消费侧协调规划发展，改进投资和改革重点。

将DEA效率为1的发展阶段，即社区能源发展阶段设置为标杆发展阶段，对比省级电力系统能源发展现状，可从能源供应侧、输配电网架、能源消费侧的维度以及经济、效率、环境的层次，挖掘能源发展存在的问题和未来改进的着力点。

1) 能源供应安全方面

由表1可知，对比3个能源阶段，社区能源发展阶段下，虽然传统发电机组和调峰电源投资减少，但是为确保能源供应充足，一是在能源供应侧增加可再生能源投资，并通过市场化手段消纳可再生能源；二是投资建设跨省跨区输电通道，增加区外来电；三是通过终端综合能源建设和挖掘需求响应潜力，缓解能源供应压力。

2) 优化能源结构方面

由表2可知，RE设备投资、RE消纳能力指标权重较大，分别为0.251和0.286，对DEA效率评估影响较大。结合表1，稳健发展阶段的RE设备投资约占社区能源阶段的66%，RE消纳能力约占社区能源阶段的69%。因此，在增加可再生能源投资的同时，应探索不同的手段提高电力系统消纳RE能力，如投资调峰电源、投资终端能源设备、激励用户参与需求响应等。

3) 能源清洁高效方面

由表2可知，一次能源利用率和终端能源利用率在产出指标中，均占有较大权重。由表1可知，3个阶段下，一次能源利用率相差不大，但是社区能源阶段下通过投资终端能源设备和采取有效的需求响应措施，充分提高了终端能源利用率。

4 安徽省电力系统转型建议和讨论

结合安徽省电力系统发展规划，基于PAM-PST模型评估电力系统转型阶段，通过案例分析甄别电力系统转型的主要问题和矛盾，针对性地提出以下4点转型建议。

1) 多维度多层次评估转型阶段，深度挖掘省级电力系统转型存在的问题。

综合评估电力系统转型阶段和多维度多层次挖掘存在的问题，有利于科学地制定未来的发展政策和改革措施，以防规划决策与能源实际发展之间存在偏差，影响电力系统转型的发展。

电力系统转型背景下,电网规划不再是单纯的电源规划,而是立足能源供应侧、输配电网架、能源消费侧的协调链接,冷、热、电、气多种能源之间综合规划,改变单纯依靠增加能源供应来满足需求增长的传统观念,将节能和提高需求终端资源利用效率作为替代资源,以更为经济的方式满足电力服务。

①能源供应侧。煤电要从电量型电源向电力电量型电源转变,提高现有机组的灵活性和容量价值,保持主体能源地位,并充当最主要的灵活性资源;水电要持续稳步开发,作为重要的基荷电源;新能源从补充替代电源发展成为主体能源之一。通过多能源协调规划,合理投资煤电等传统能源。

②输配电网架。安徽省地处长三角,采用跨区输电的方式能够实现东西部能源互补,实现调峰资源共享,降低系统总成本的同时提高调峰能力。

③能源消费侧。加强能源消费侧需求响应资源的挖掘和储能建设,有助于削峰填谷,改变电力系统形态。从多种能源协调规划运行的角度,投资终端能源设备,发挥能源互补作用,提高能源利用率。

2) 多种方式提高电力系统灵活性,满足电力系统转型需求。

为应对高比例波动性可再生能源接入,可采取以下4种方式提高电力系统的灵活性:①改造煤电机组的灵活性,提高煤电机组的调频能力;②适量投资热电联产机组,耦合电网、气网和热网,提高电力系统的调节能力;③挖掘具有调频能力的需求响应资源,如变频空调、电动汽车等;④在能源供应侧和消费侧根据调节需求,投资储热和储气装置,提高对应环节的灵活性。

3) 构建能源区域间的合作共享平台,发挥市场化作用。

通过构建能源区域间的合作共享平台,统筹资源配置,实现跨越发展。关键在于通过竞争机制、价格机制等,发挥市场在能源资源配置中的作用。能源区域间的合作共享平台是指整合“区域间能源+现代信息通信技术+海量用户”等生态资源,以市场化手段打破省间壁垒,实现各省之间资源共享。合作共享平台的建设有利于区域间能源技术、数据、资源共享,提高能源利用率,促进区域间协同创新和发展。

4) 省级电力公司体制改革,适应能源体系转型升级。

在能源转型背景下,电网作为电力传输和供应的关键环节,是能源转型的中心环节。省级电网公司要

向着能源多元化、服务智能化、用能方式多样化方向发展,源-网-荷多维度优化配置能源资源,建设成为具有中国特色国际领先的能源互联网企业。电力公司转型需要体制机制的保障:一是建立适应高效率现代企业管理需求的电力公司管理体制。对现有垄断环节和市场环节业务相关人、财、物等内部管理模式开展适应性分析,基于现代化企业管理要求,优化组织机构权责、重组业务流程、培养高素质人才队伍,加强对制度执行的监督,构建精简高效的管理机制和企业治理机制;二是立足于混合体制改革的增量配电、综合能源服务、电动汽车公司领域,以能源战略转型为出发点,从电力行业链条纵向延伸、其它能源服务等公共服务行业横向拓展角度进行深度挖掘,重塑省级能源电力混合体制。

参考文献

- [1] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014—2020年)[R]. 北京: 国务院办公厅, 2014.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030)[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2016.
- [3] “十四五”时期风电将是能源转型重要支撑[J]. 大众用电, 2020, 35(9): 52.
- [4] GULAGI A, RAM M, SOLOMON A A, et al. Current energy policies and possible transition scenarios adopting renewable energy: a case study for Bangladesh[J]. Renewable Energy, 2020, 155: 899-920.
- [5] 王永真, 张宁, 关永刚, 等. 当前能源互联网与智能电网研究选题的继承与拓展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 1-8. WANG Yongzhen, ZHANG Ning, GUAN Yonggang, et al. Inheritance and expansion analysis of research topics between energy Internet and smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 1-8(in Chinese).
- [6] 李晨, 耿亮, 熊焱, 等. 基于计量经济学的能源转型背景下全球碳排放预测分析方法[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 51-58. LI Chen, GENG Liang, XIONG Yi, et al. Forecasting and analyzing global carbon emissions based on econometrics against the background of energy transformation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 51-58(in Chinese).
- [7] 苗中泉, 毛吉康. 电能时代的能源地缘政治初探[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 518-525. MIAO Zhongquan, MAO Jikang. A Study on the geopolitics of energy in the era of electric power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 518-525(in Chinese).
- [8] 向敏. 融入改革发展大局 助推能源转型发展:《电力业务资质管理年度报告(2020)》解读[J]. 中国电业, 2020(10): 26-27.
- [9] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电

- 力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
- ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [10] 朱彤. 德国与美国当前能源转型进程比较分析[J]. 国际石油经济, 2016, 24(5): 1-8.
- ZHU Tong. Comparison analysis on current energy transition in Germany and the United States[J]. International Petroleum Economics, 2016, 24(5): 1-8(in Chinese).
- [11] 盛春红. 能源转型的制度创新: 德国经验与启示[J]. 科技管理研究, 2019, 39(18): 25-31.
- SHENG Chunhong. Institutional innovation of energy transformation: German experience and enlightenment for China[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(18): 25-31(in Chinese).
- [12] 戚永颖, 何继江. 瑞典交通能源转型路径[J]. 能源, 2018(Z1): 75-79.
- [13] 姜玲玲, 刘晓龙, 葛琴, 等. 我国能源结构转型趋势与对策研究[J]. 中国能源, 2020, 42(9): 15-19.
- JIANG Lingling, LIU Xiaolong, GE Qin, et al. Research on energy structure transition countermeasures in China and its trends[J]. Energy of China, 2020, 42(9): 15-19(in Chinese).
- [14] 王晓磊, 王涛, 尹蕊. 基于能源转型的我国新一代电力系统技术[J]. 集成电路应用, 2020(9): 110-111.
- WANG Xiaolei, WANG Tao, YIN Rui. China's new generation power system technology based on energy transformation[J]. Application of IC, 2020(9): 110-111(in Chinese).
- [15] 刘钊. 能源和数字革命背景下能源系统与信息技术融合的技术架构研究[J]. 电工材料, 2019(6): 23-26.
- LIU Zhao. Research on technical architecture of integration of energy system and information technology under the background of digital revolution[J]. Electrical Engineering Materials, 2019(6): 23-26(in Chinese).
- [16] 代红才. 泛在电力物联网推动我国能源转型发展及业态创新[J]. 电气时代, 2020(1): 20-21.
- [17] PAN X Z, CHEN W Y, CLARKE L E, et al. China's energy system transformation towards the 2 °C goal: Implications of different effort-sharing principles[J]. Energy Policy, 2017, 103: 116-126.
- [18] 王一铮, 庞凯元, 文福拴, 等. 促进用户侧能源转型的区域能源定价与管理策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 21-29.
- WANG Yizheng, PANG Kaiyuan, WEN Fushuan, et al. Regional energy pricing and management strategies for promoting user-side energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 21-29(in Chinese).
- [19] 刘瑞丰, 陈天恩, 李焰, 等. 基于能源转型的电力市场建设分析与思考[J]. 中国电力企业管理, 2020(7): 39-43.
- [20] 朱彤. 能源转型中我国电力能源的结构、问题与趋势[J]. 经济导刊, 2020(6): 48-53.
- [21] 张显, 史连军. 中国电力市场未来研究方向及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 1-11.
- ZHANG Xian, SHI Lianjun. Future research areas and key technologies of electricity market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 1-11(in Chinese).
- [22] 侯方心, 张士宁, 赵子健, 等. 实现《巴黎协定》目标下的全球能源互联网情景展望分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 34-43.
- HOU Fangxin, ZHANG Shining, ZHAO Zijian, et al. Global energy interconnection scenario outlook and analysis in the context of achieving the Paris Agreement goals[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 34-43(in Chinese).
- [23] 安徽省能源局. 安徽省电力发展“十三五”规划[R]. 合肥: 安徽省能源局, 2017.
- [24] 陈敏曦. 从“联动”走向“浮动”的煤电市场化新篇: 专访中电联行业发展与环境资源部副主任(正职级)薛静[J]. 中国电力企业管理, 2019(28): 22-27.
- [25] 华东能源监管局. 安徽电力调峰辅助服务市场运营规则(试行)征求意见稿[R]. 合肥: 华东能源监管局, 2017.
- [26] HUPPMANN D, GIDDEN M, FRICKO O, et al. The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): an open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 112: 143-156.
- 收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2020-12-09。
- 作者简介:
- 朱刘柱(1972), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划设计。
- 高赐威(1977), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为需求侧管理、电力规划、电力市场、电力安全。通信作者, E-mail: ciwei.gao@seu.edu.cn。
- 尹晨旭(1987), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为综合能源规划设计。
- (责任编辑 张宇)