

基于 DEMATEL-ISM 模型的电网绿色发展 影响因素研究

厉松芮¹, 汪美顺², 柴剑雪¹, 赵振利¹, 张立辉¹

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

(2. 国家电网有限公司, 北京 102209)

摘要: 在生态文明、能源革命等背景下, 电网作为能源供应的枢纽环节, 有必要探究电网绿色发展的影响因素, 从而明确发展路径. 首先构建了包含电网协同上下游和电网建设全生命周期共 3 个层次的电网绿色发展指标体系; 应用 DEMATEL-ISM 集成方法对一级指标进行了结构解析, 并从深层根源影响因素、中层间接影响因素和表层直接影响因素 3 个方面进行了结果分析. 研究表明, 22 个影响因素之间相互关联, 构成一个含有 6 个层级的影响因素递阶结构, 其中有 7 个指标为关键影响因素. 该研究明确了新时代下电网作为配置与交易平台对生态环境的影响, 并通过影响因素的分析为电网绿色发展提供了一个实施路径, 以促进电网与环境协调发展.

关键词: 电网绿色发展; 影响因素; DEMATEL-ISM 模型; 路径分析

在全球能源转型的新时代, 电力可持续发展已成为世界各国能源战略调整的共同取向. 我国的电力行业面临严峻形势, 一是承担着存量优化与持续增长双重任务; 二是面临环境污染治理和气候变化双重压力^[1]. 在此背景下, 生态文明建设、能源革命等战略对我国电力的发展提出了新的要求^[2-5], 而电网作为电力输送的重要枢纽, 如何实现与生态环境的协调统一成为电网绿色发展的关键性问题. 因此, 需要综合考虑国家环境政策、电力系统变革以及能源新技术应用等多方因素, 明确电网作为能源资源配置和交易平台在整个生态系统价值链中的重要作用, 研究电网本身及协同上、下游实现环境效益最大化的关键影响因素及路径.

目前关于电力绿色发展的研究主要从发电侧、电网侧和用户侧三个方面开展的. 从发电侧, Hancheng Dai, 等^[6] 使用一般均衡模型评估中国 2050 年大规模可再生能源发电的经济影响和环境协同效益, 主要研究可再生能源对电力绿色发展的影响; 曲茜茜^[7] 从电源结构和火电行业发展两方面研究资源与环境双重压力下的电力绿色发展的路径; 牛晓娜^[8] 运用线性回归分析建立了发电厂的节能减排模型以及可持续发展模型, 从发电侧提出了电力绿色发展模型. 从电网侧, Lopes, JPA^[9] 识别了葡萄牙电力系统的影响环境效益的影响因素, 指出技术升级是提高电网环境效益的重要因素; Seyed Ali^[10] 提出了一些评价电网环境效益的指标,

收稿日期: 2019-11-12

资助项目: 国家电网有限公司总部科技项目《基于生态文明思想的电网绿色发展战略规划技术与评估方法研究》(SGNY0000NGJS1900127)

然后基于环境污染物的排放计算可再生能源的发电成本及所呈现的环境指数;魏联滨^[11]等采用压力状态响应模型构建了天津市电网规划环境影响评价指标体系,实现了对电网规划环境影响的定量评价。从用户侧,在大气污染防治背景下,宋宗耘^[12]从电力需求预测、分时电价、调峰调度、政策激励机制等方面对电力需求侧管理方法进行优化,从用户管理方面对电力绿色发展路径进行了探究;杨东伟,等^[13]提出了一种基于关键指标控制的多目标绿色电力分时定价策略,以降低用电量波动性、提升新能源利用率等为目标,建立绿色电力分时定价模型,主要是从电价方面对电力绿色发展进行了研究。已有的文献多数只从发电侧和用户侧对电力绿色发展进行了探究,或者研究只集中于电网建设对生态环境影响的微观方面,很少有学者从电力产业链的角度研究电网绿色发展,目前还没有比较系统的电网全环节对生态环境影响的研究体系。

本文首先以生态文明建设等宏观环境、能源革命等行业趋势和国家电网公司战略为背景,分析电网协同上、下游促进能源转型的途径和作用,以及电网规划建设对环境的影响,得到了电网绿色发展的作用框架。然后根据电网发展对生态环境带来的正负效益,构建表征电网绿色发展的多维度指标体系。最后应用 DEMATEL-ISM 模型得到电网绿色发展影响因素的作用框架,为电网绿色发展提供了一个实施路径。该研究不仅评估了全生命周期内电网建设阶段对生态环境的影响,并且协同上下游探究电网促进能源可持续发展而发挥的作用,为电力行业明确了电网绿色发展的侧重点。

1 电网绿色发展影响因素体系构建

电网绿色发展意味着逐步实现与生态环境的协调统一,因此需探究电网对生态环境的影响,即电网对生态环境的作用途径。这种影响体现在三个方面,电网引导上游促进电源结构绿色发展;电网本身的规划、建设和运营对生态环境的影响;电网协同下游促进能源消费端绿色发展。

电网协同上游促进能源转型、改善电源结构主要体现在引导发电端风光水火的互补远距离外送;发展智能电网,推进新能源友好并网;引导园区多能互补,缓解弃风、弃光和弃水等方面^[14-19]。电网建设项目的环境影响主要是全寿命周期内由于输电线路以及变电站的结构、布局的变化对各种环境因素造成的影响^[20-23],在投资规划阶段,合理的电网规划能够促进新能源消纳;在建设阶段,输电线路建设会对沿途生态环境产生影响以及建设施工过程中产生的施工噪声、污染排放;在运营阶段,输电线路对电磁环境、声学环境、无线电等会带来干扰。电网协同下游促进绿色发展主要有两方面,一方面是电网推进电能替代,提高清洁能源消费比例;另一方面,电网需求侧管理使电力资源得到更加合理的配置和更加高效的利用,实现减少新建电厂投资和一次能源对大气环境的污染^[24-27]。

研究电网绿色发展是基于电力行业可持续发展需求,解决电网发展与环境、资源之间的矛盾,因此探究电网绿色发展的影响因素及路径必须研究电网系统对生态系统的扰动作用,即生态系统脆弱性^[28]。本文以 Gallopin^[29]提出的敏感性-应对能力 (Sensitivity-Response capacity) 作为电网绿色发展的评估框架,从敏感性和应对能力两个维度对影响系统脆弱性的因素进行筛选、识别,归纳整理出 22 个一级指标,并构建了二级指标对一级指进行了解释与量化,如表 1 所示。

表 1 电网绿色发展影响因素体系

准则层	一级指标	编号	二级指标及单位
电网引导发电侧对生态系统的影响	能源消耗强度	α_1	发电能源日均消费量 (吨标准煤) 单位发电量煤耗 (吨)
	大气环境污染	α_2	单位发电量 CO ₂ 排放量 (万吨) 单位发电量 SO ₂ 排放量 (吨) 单位发电量 NO _x 排放量 (吨) 单位发电量烟 (粉) 尘排放量 (吨)
	水环境污染	α_3	单位发电量废水排放量 (吨) 单位发电量化学需氧量排放量 (吨) 单位发电量氨氮排放量 (吨)
	环境治理水平	α_4	环保费用占总投资的比重 (%) 污水处理率 (%) 固废回收率 (%) 危险废物综合利用率 (%)
	发供电清洁度	α_5	本地发电结构清洁度 外来供电结构清洁度
电网环节对生态系统的扰动程度	土地资源 利用程度	α_6	单位输送电量占地面积 (m ²) 单位输电线路水土流失量 (m ³)
	生态多样性 扰动程度	α_7	建设前后植物覆盖率差异 (%) 建设区域动物迁徙率 (%) 规划网线与生态敏感区临近度 (m) 网络两侧 2km 范围内生态敏感区面积 (m ²)
	景观破坏程度	α_8	电网穿越景区的面积 (m ²) 区域人均绿地变化率 (%) 输变电设备与城市景观的协调性
	水环境 扰动程度	α_9	变电站污水日排放量 (吨) 高抗发生漏油量 (吨)
	大气环境 扰动程度	α_{10}	六氟化硫泄漏量 (吨) 六氟化硫回收率 (%)
	电磁环境 干扰程度	α_{11}	规划区域主要环境电磁场超标面积 (m ²) 线路及变电站附近电磁场强度和达标距离 (m)
	无线电 干扰程度	α_{12}	规划区域主要环境无线电干扰超标面积 (m ²) 线路及变电站附近无线电干扰幅度和达标距离 (m)
	固体废物 排放水平	α_{13}	变电站固体废弃物排放量 (吨) 变电站固体废弃物处理率 (%)
	危险废弃物 排放水平	α_{14}	变电站危险废弃物排放量 (吨) 变压器油泄漏量 (吨)

续表 1 电网绿色发展影响因素体系

准则层	一级指标	编号	二级指标及单位
电网协同 用户侧对 生态系统的 适应能力	能源互联度	α_{15}	微电网接入系数
			储能系统接入系数
			新能源接入系数
	电能替代度	α_{16}	以电代煤度 (%)
			以电代油度 (%)
			以电代气度 (%)
	电网输电能力	α_{17}	跨省线路输电能力比重 (%)
			供电线损率 (%)
	电网智能化 水平	α_{18}	智能化变电容量比率 (%) 智能化调度中心比率 (%)
	电网安全度	α_{19}	电网电压合格目标差异率 (%)
电网平均故障停电时间目标差异率 (%)			
用户侧 服务水平	α_{20}	智能电表用户占比 (%)	
		电动汽车充换电电量占比 (%)	
辅助服务水平	α_{21}	电网侧储能调峰调频容量占比 (%)	
电网需求侧 管理水平	α_{22}	需求侧让负荷占比 (%)	
		用户参与调峰容量占总调峰容量比例 (%)	

敏感性指在电网协同上下游及建设的全寿命周期内对环境的扰动作用,反映了生态系统面对电网系统扰动的敏感性因素,包含了电网引导下发电环节对生态系统的影响,主要有能源消耗强度、大气环境污染、水环境污染等;电网项目全寿命周期对生态系统的扰动程度,主要有对生态多样性、景观、水环境、大气环境和电磁环境等的破坏程度.应对能力则是电网系统-生态系统响应和适应这些敏感性因素的能力,主要通过电网自身技术和电网需求侧管理进行响应,包括能源互联度、电能替代度、电网输电能力等,主要与社会子系统层面相关.

2 基于 DEMATEL-ISM 的电网绿色发展影响因素结构建模

DEMATEL 法是为了分析复杂系统内部因素的重要性程度,简化系统结构分析的过程而提出的一种运用图论与矩阵工具进行系统要素分析的方法.该方法通过分析系统中各因素之间的逻辑关系与直接影响关系,构建直接影响矩阵,以此来判断该因素在整个系统中的作用.ISM 法可以把模糊不清的思想、看法转化为直观的具有良好结构关系的模型,特别适用于变量众多、关系复杂而结构不清晰的系统分析.电力绿色发展体系影响因素多,因素间关系复杂,本文借助 DEMATEL 法在区分因素属性、重要度以及相互影响关系方面的优势,在此基础上利用 ISM 对各因素影响关系进行分层,构建电网与生态环境影响结构框架^[30-34].具体分析流程如图 1.

2.1 建立指标直接影响矩阵

电网绿色发展影响因素体系分为六小类共 22 个一级指标,指标的集合为 $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

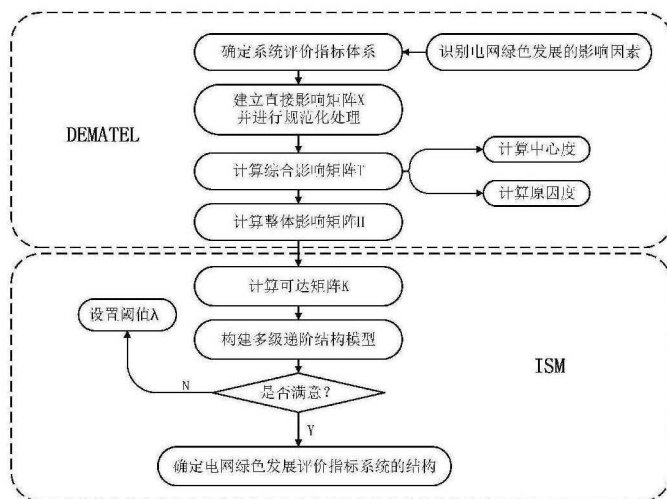


图 1 DEMATEL-ISM 模型流程

... α_{22} }, 将指标之间的相互影响记为 β_{ij} , 采用 Delphi 法, 邀请相关专家根据指标间的相互影响关系对 β_{ij} 赋值, 赋值规则如表 2。我们邀请国家电网公司和华北电力大学 10 位从事能源环境研究的相关专家对各因素间影响程度进行评估, 采用平均法对专家数据进行处理, 得到电网绿色发展影响因素指标的直接影响矩阵 $X = (\beta_{ij})_{22 \times 22}$, 如表 3。将指标的直接影响矩阵进行规范化处理, 得到规范化后的指标直接影响矩阵 C 为

$$C = (C_{ij})_{22 \times 22} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq 22} \sum_{j=1}^{20} \beta_{ij}} X \tag{1}$$

表 2 语义量化转换

语义	分值 β_{ij}
因素 α_i 对因 α_j 的影响程度	没有影响 -0
	弱的影响 -1
	一般影响 -2
	强的影响 -3
	较强影响 -4

2.2 计算指标综合影响矩阵、中心度和原因度

计算指标的综合影响矩阵 T 用以确定各项指标相对于电网绿色发展影响因素指标体系中最高水平指标的综合影响, 其计算公式为

$$T = C(I - C)^{-1} \tag{2}$$

其中 I 为单位矩阵, 采用 MATLAB 进行计算求得综合影响矩阵 T 。

利用下面公式计算各项指标的中心度 M_i 和原因度 N_i

$$f_i = \sum_{j=1}^{22} t_{ij}, \quad i = 1, 2 \dots 22 \tag{3}$$

$$e_i = \sum_{j=1}^{22} t_{ji}, \quad i = 1, 2 \dots 22 \tag{4}$$

$$M_i = f_i + e_i, \quad i = 1, 2 \dots 22 \tag{5}$$

$$N_i = f_i - e_i, \quad i = 1, 2 \dots 22 \tag{6}$$

其中 t_{ij} 为综合影响矩阵; f_i 为指标 α_i 的影响度; e_i 为指标 α_i 的被影响度; M_i 为指标 α_i 的中心度, 用来表示该项指标在指标体系中的重要程度, 中心度越大, 表明该项指标重要性越大; N_i 为指标 α_i 的原因度, 用来表示该项指标在指标体系中的作用大小, 原因度越大, 则表明该项指标在体系中所起的作用越大.

表 3 直接影响矩阵

β_{ij}	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{16}	α_{17}	α_{18}	α_{19}	α_{20}	α_{21}	α_{22}
α_1	0	4	4	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
α_2	1	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	1	1	1
α_3	1	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	1	1	1
α_4	1	4	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
α_5	3	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	1	2	2	1	1	1
α_6	0	0	0	0	0	0	4	4	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
α_7	0	0	0	0	0	2	0	3	2	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
α_8	0	0	0	0	0	0	3	0	2	2	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
α_9	0	0	0	0	0	0	3	2	0	2	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
α_{10}	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
α_{11}	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
α_{12}	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	3	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
α_{13}	0	0	0	0	0	1	3	2	3	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
α_{14}	0	0	0	0	0	1	3	2	3	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
α_{15}	3	0	0	0	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	4	3	2	4	2	4	3
α_{16}	2	1	1	0	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	3	2	2	2	2	2
α_{17}	1	1	1	1	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	0	2	2	1	2	1
α_{18}	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	2	4	0	4	3	3	2
α_{19}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2	0	3	3	3
α_{20}	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1	1	0	1	4
α_{21}	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	1	1	0	2
α_{22}	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	1	0

2.3 计算指标整体影响矩阵和可达矩阵

指标整体影响矩阵 H 的计算公式为

$$H = I + T \tag{7}$$

根据指标的整体影响矩阵 H , 给定衰减度 λ , 通过下式计算指标的可达矩阵 K

$$K_{ij} = \begin{cases} 1, & h_{ij} \geq \lambda(i, j = 1, 2 \dots 22) \\ 0, & h_{ij} < \lambda(i, j = 1, 2 \dots 22) \end{cases} \tag{8}$$

设置衰减度 λ 的目的是舍去影响程度较小的指标间的影响关系, 简化系统结构, 其大小直接影响可达矩阵的构成和系统结构的划分. 因此, 需要对阈值经过多次取值分析验证, 以获

得最佳的系统结构模型. 本文分别取 $\lambda = 0.04, \lambda = 0.08, \lambda = 0.12$ 和 $\lambda = 0.16$ 得到四个各因素之间的可达矩阵, 将可达矩阵中因素 α_{ij} 所在行和所在列元素之和视为 α_{ij} 的节点度, 得到各因素在不同衰减度下的节点度分布, 如图 2. 当 λ 分别为 0.04, 0.08, 0.12 和 0.16 时, 节点度分别下降 26, 18, 7 和 2. 在 $\lambda = 0.08$ 时, 遵循节点度数适中, 不会过大或过小的原则, 所以给定 $\lambda = 0.08$, 可达矩阵如表 4 所示.

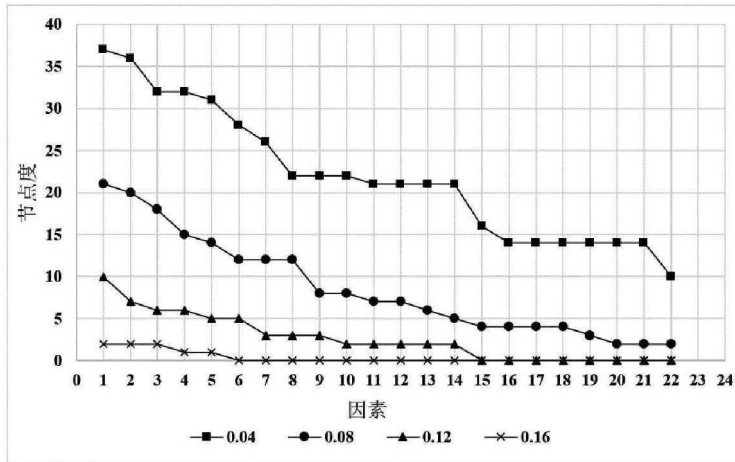


图 2 不同衰减度下的节点度

表 4 可达矩阵

β_{ij}	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{16}	α_{17}	α_{18}	α_{19}	α_{20}	α_{21}	α_{22}
α_1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
α_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
α_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
α_4	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
α_6	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_8	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_9	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{10}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{13}	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{14}	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{15}	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
α_{16}	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
α_{17}	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
α_{18}	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
α_{19}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
α_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1
α_{21}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
α_{22}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

2.4 构建多级递阶结构模型

根据指标的可达矩阵 K , 通过下面公式可确定指标的可达集合 R_i 和前项集合 S_i :

$$\begin{cases} R_i = \{\alpha_i \mid \alpha_i \in A, k_{ij} = 1\} \\ S_i = \{\alpha_i \mid \alpha_i \in A, k_{ji} = 1\} \end{cases} \quad (i, j = 1, 2 \cdots 22) \quad (9)$$

基于 $R_i = R_i \cap S_i$ 的条件对可达矩阵中各影响因素进行循环分层, 可得 6 个层级: $L_1 = \{\alpha_7, \alpha_8, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{22}\}$; $L_2 = \{\alpha_6, \alpha_9, \alpha_{10}\}$; $L_3 = \{\alpha_{13}, \alpha_{14}, \alpha_{16}, \alpha_{17}\}$; $L_4 = \{\alpha_2, \alpha_3, \alpha_{20}\}$; $L_5 = \{\alpha_1, \alpha_4, \alpha_{18}, \alpha_{19}\}$; $L_6 = \{\alpha_5, \alpha_{15}\}$.

3 结果

3.1 电网绿色发展影响因素的重要性分析

通过 DEMATEL-ISM 模型得到了各个因素的中心度和原因度, 中心度和原因度较大的因素视为关键因素, 它们不仅本身对于电网绿色发展起着重要作用, 而且在很大程度上影响体系中的其他因素, 在制定电网绿色发展相关政策时应作为重点掌控因素. 通过对中心度和原因度的计算, 如表 5, 在电网绿色发展影响因素中, 能源消耗强度 (α_1)、发供电清洁度 (α_5)、能源互联度 (α_{15})、电能替代度 (α_{16})、电网输电能力 (α_{17})、电网智能化水平 (α_{18})、电网安全度 (α_{19}) 在整个体系中的中心度和原因度均较高, 属于关键因素, 决定着电网发展的安全化、智能化和清洁化. 因此, 要实现电网绿色发展, 应当把控制这些关键因素作为工作的重点.

表 5 中心度与原因度

编号	中心度	原因度	编号	中心度	原因度
α_1	2.5112	0.8340	α_{12}	1.4284	-0.4581
α_2	1.7159	-0.0105	α_{13}	1.3198	-0.0465
α_3	1.7159	-0.0105	α_{14}	1.3198	-0.0465
α_4	1.0178	0.1297	α_{15}	3.2672	1.1648
α_5	2.6668	0.6651	α_{16}	3.6131	-0.0305
α_6	1.6017	-0.4216	α_{17}	3.4401	0.2379
α_7	2.1243	-1.0851	α_{18}	2.9761	1.2397
α_8	1.6392	-0.6805	α_{19}	2.6287	0.5190
α_9	1.6861	-0.5716	α_{20}	1.9792	0.0826
α_{10}	1.4028	-0.5033	α_{21}	1.9284	-0.1930
α_{11}	1.4284	-0.4581	α_{22}	1.8320	-0.3570

3.2 系统多级递阶结构分析

由 DEMATEL-ISM 法得到电网绿色发展的递阶层次结构, 结构分为六层, 如图 3 所示. 一方面, 递层次结构图体现出各个因素在电网绿色发展过程中所起的作用, 可分为深层根源影响因素、中间间接影响因素和表层直接影响因素; 另一方面通过层次结构图中的关联关系可以看出各个因素的因果关系, 得到实现电网绿色发展的作用机理和实施路径.

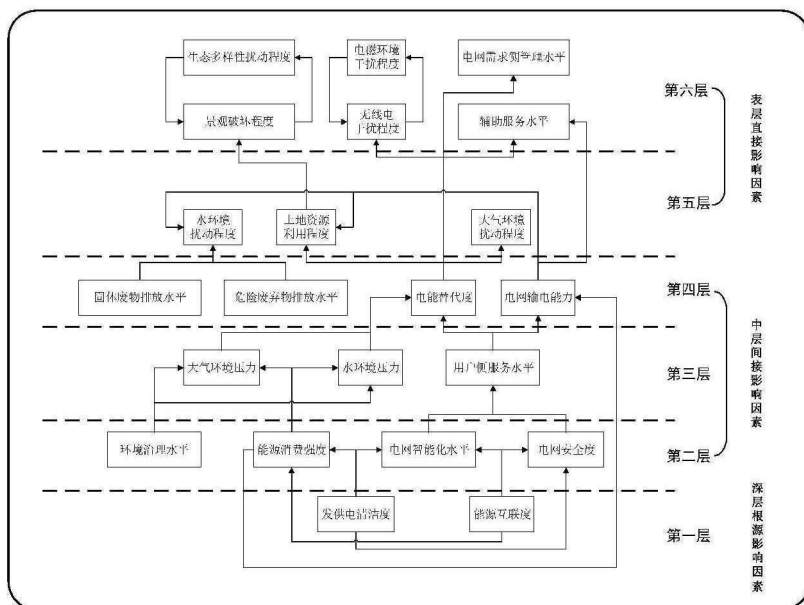


图3 电网绿色发展影响因素路径图

(1) 表层直接影响因素

依据 DEMATEL-ISM 法的分析, 表层直接影响因素可以分为两个方面, 电网服务互动水平和电网环节对环境的影响。

电网服务互动水平受到第四层中电能替代度和电网输电能力两个因素的影响。因此, 一方面要基于高比例电能替代和高水平电网输电能力提高电网辅助服务水平。首先通过电网侧储能调峰调频替代部分的抽水蓄能电站、化学储能和火电调峰调频, 减少抽水蓄能电站对资源的破坏, 降低化学储能和火电对生态环境的污染; 其次通过电网引导新能源机组、电储能设施、售电公司、电力用户等新型市场主体参与辅助服务市场。另一方面要促进电网与用户的友好互动, 以泛在电力物联网为主导, 全面支持用户侧智能终端参与电网调节。

电网环节对环境的影响主要受到第四层四个因素的影响, 并且同一层级中存在回路关系。为了促进电能替代和提高电网输电能力, 必须特高压、微电网等电网项目规划建设为基础。因此, 电网项目规划阶段要考虑地区资源禀赋、负荷需求、区空间规划等因素, 合理避让生态保护红线, 满足输电要求的同时减小对生态环境的破坏, 实现电网企业精准投资; 电网建设阶段通过同塔多回路设计、油水分离装置等新型技术对输电线路沿途生态环境的破坏降低, 以及施工时的废弃物污染控制在较低范围内。

(2) 中层间接影响因素

中间间接影响因素包括三个层级, 可以分为三条路线进行分析。

1) 第一条路线是基于电网安全可靠运行对于用户侧服务水平的影响, 进而影响到电网输电能力和电能替代度。促进电网智能化水平, 加快智能变电站, 配电自动化, 调度智能化等技术的发展; 提高电网安全度, 形成具有抵御自然灾害及各类重大威胁的弹性和自恢复能力的、一体化的绿色电网。在电网安全可靠运行的基础上, 在用户侧促进用户侧分布式电源、电动汽车充换电设施等服务发展。

2) 第二条路线是在能源消费强度和环境治理水平两个方面作用下发电侧对生态环境的影响,进而影响到需求侧的电能替代度.在保障电力可靠供应的前提下,优先调度可再生发电资源,按机组能耗和污染物排放水平由低到高排序,最大限度地减少能源消耗和污染物排放,同时在发电调度过程中把握弃风、弃光、弃水的协调控制.

3) 第三条路线是电网建设环节中的固体废物排放水平和危险废物排放水平对于表层直接影响因素的作用.一般固体废弃物处理可以建立鉴定-回收-估值-拍卖处理体系,实行全过程质量管控;针对危险废物处理可以设置专用的危险废物贮存场所,制定危险废物管理计划和事故的防范措施及应急预案,建立集中回收处理机制.

(3) 深层根源影响因素

依据 DEMATEL-ISM 法的分析,深层根源因素包含发供电清洁度和能源互联度两个因素,两个指标均对第二层级的能源消费强度、电网智能化水平和电网安全度产生影响.发电清洁度和能源互联度分别从清洁能源发电和清洁能源消纳两个方面对电网绿色发展体系中的其他因素产生影响作用.因此,可以从发电侧和用户侧对电网绿色发展提出一些措施:

1) 要从根源上促进电网绿色发展必须加强电网在发电环节的引导作用,提高清洁能源占比.以广泛互联、坚强的特高压电网为骨干网架,促进源-网-荷-储互动、发挥节能调度作用、提高间歇性电源的利用程度,以适应风电、光伏发电等清洁能源大规模接入.

2) 提高能源互联度,促进清洁能源消纳是促进电网绿色发展的另一重要措施.要充分发挥电网在资源配置和交易平台的作用,通过提高微电网、储能系统和新能源的接入比例,促进各类能源集中与分散并存的优化配置和有效利用,以实现电能深度替代.

4 结论

基于生态文明建设、能源革命和公司战略等背景,建立了我国电网绿色发展的作用框架和指标体系;运用 DEMATEL-ISM 法识别出电网绿色发展的关键因素并通过划分深层根源影响因素、中间间接影响因素和表层直接影响因素对电网绿色发展的路径进行了分析,提出政策建议.从深层根源影响因素,一方面要充分发挥电网在发电环节的引导作用,改善电源结构;另一方面充分发挥电网在新能源市场中资源配置和交易平台作用,加快推进电力现货市场及调峰辅助服务市场建设,提高清洁能源消纳比例.从中层间接影响因素,在保障电力安全可靠的前提下,在发电侧最大限度地减少能源消耗和污染物排放;其次运用特高压、能源互联网技术,构建电力输送能力强、电力供应稳定的电网架构.从表层直接影响因素,一方面做到电网的规划建设运营全寿命过程符合区域规划,降低施工污染,减缓电网运营对生产生活环境的影响;另一方面运用泛在电力物联网理念,用户提供多元化增值服务,实现电网与用户双向互动.通过对电网绿色发展作用框架和影响因素的分析,电网企业可以明确电网发展的侧重点,实现电网发展和生态环境的协调统一.

参考文献

- [1] 李际,樊慧娴. 2018 年我国电力发展形势及 2019 年展望 [J]. 中国能源, 2019, 41(2): 19-24.
- [2] 谭雪,刘俊,郑宽,等. 新一轮能源革命下中国电网发展趋势和定位分析 [J]. 中国电力, 2018, 51(8): 49-55.
- [3] 林伯强. 能源革命促进中国清洁低碳发展的“攻关期”和“窗口期”[J]. 中国工业经济, 2018(6): 15-23.

- [4] 秦容军. 能源革命驱动要素及新一轮能源革命方向研究 [J]. 煤炭经济研究, 2018, 38(6): 6-10.
- [5] 马丽梅, 史丹, 裴庆冰. 中国能源低碳转型 (2015-2050): 可再生能源发展与可行路径 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 8-18.
- [6] Hancheng Dai, Xuxuan Xie b, Yang Xie, Jian Liu, Toshihiko Masui. Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China[J]. Applied Energy 162 (2016) 435-449.
- [7] 曲茜茜. 电力工业绿色和谐发展路径研究 [J]. 价值工程, 2012, 31(4): 46-47.
- [8] 牛晓娜. 基于多元统计分析的绿色电力系统及其协调优化研究 [D]. 山东大学, 2011.
- [9] Lopes J P A, Almeida P M R, Soares F J. Using Vehicle- to-grid to Maximize the Integration of Inter mitten Renewable Energy Resources in Islanded Electric Grids[C]//Clean Electrical Power, 2009 International Conference on, IEEE, 2009: 290-295.
- [10] Seyed Ali Moham-mad Javadian. Environmental benefits of DGs and comparing their generation costs with thermal power plants considering production pollution on human health [J] .Indian Journal of Science and Technology, 2011, 4(10): 1290 -1294.
- [11] 魏联滨, 等. 天津市电网规划环境影响评价指标体系研究 [J]. 环境影响评价, 2018, 40(3).
- [12] 宋宗耘. 大气污染防治背景下的电力需求侧管理优化研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2018.
- [13] 杨东伟, 赵三珊, 张轶伦, 等. 基于关键指标控制的多目标绿色电力分时定价策略 [J]. 工业工程与管理, 2019, 24(2): 38-45+54.
- [14] 刘子胜. 基于生态承载力的电力可持续发展研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2010.
- [15] 辛禾. 城市绿色电力指标体系与评价模型 [D]. 华北电力大学 (北京), 2016.
- [16] 杨淑霞, 纪宇, 张笛. 基于环境效应视角的电力系统节能减排研究及展望 [J]. 华北电力大学学报 (社会科学版), 2018(4): 1-7.
- [17] 赵新刚, 梁吉, 任领志, 等. 能源低碳转型的顶层制度设计: 可再生能源配额制 [J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1164-1169.
- [18] 黄跃红, 徐斌. 生态电力: 中国电力工业发展的科学路径 [J]. 东北师大学报 (哲学社会科学版), 2013(6): 92-95.
- [19] 程超, 周渝慧, 岳开伟, 等. 城市绿色电力战略环境评价指标体系 [J]. 中国电力, 2012, 45(3): 76-80.
- [20] 王伟. 绿色电网发展理论与实证研究 [D]. 华北电力大学, 2015.
- [21] 张立锋. 西藏藏中地区电网建设生态环境影响及对策研究 [J]. 四川环境, 2018, 37(2): 108-113.
- [22] 易明, 张启, 苏志冰, 等. 生态文明建设中电网前期工作的重要性 [J]. 建材与装饰, 2018 (44): 217-218.
- [23] 胡高阳. 基于模糊多目标理论的电网建设工程决策研究 [D]. 福州大学, 2016.
- [24] 陆晨, 张雷. 电网前期工作在生态文明建设中的作用 [J]. 国家电网, 2013 (2): 60-61.
- [25] 郑新业, 吴悠. 促进能源体系绿色发展的价格机制创新 [J]. 价格理论与实践, 2018(4): 12-16.
- [26] 朱佳杰, 丁乾慧, 沈健. 绿色低碳理念下的电力调度与决策模型分析 [J]. 科技创新导报, 2017, 14(36): 22-23.
- [27] 于广亮, 郑楠, 刘娟楠, 等. 基于委托 - 代理模型的绿色电力市场激励机制 [J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 157-160.
- [28] 李博, 金校名, 杨俊, 韩增林, 苏飞. 中国海洋渔业产业生态系统脆弱性时空演化及影响因素 [J]. 生态学报, 2019, 39(12)
- [29] Gallopin G. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 293-303.
- [30] 张兆宇, 李文雅. 终端区管制系统风险因素分析的 DEMATEL-ISM 模型 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(10): 86-91.
- [31] 李小鹏, 李存斌, 刘定, 孙肖坤. 基于 DEMATEL-ISM 的电力 CPS 事故构模分析 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2018, 45(4): 67-77.

- [32] 杨姝, 李俊龙. 基于 DEMATEL-ISM 法的民航飞行员综合安全能力结构模型研究 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25(4): 169-174.
- [33] 李小龙. 风电项目经济运行影响因素分析与策略研究 [D]. 华北电力大学, 2016.
- [34] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究 [J]. 管理科学学报, 2008, 11(2): 20-26.

The Study on Influencing Factors of the Power Grid Green Development Based on Dematel-Ism Model

LI Song-rui¹, WANG Mei-shun², CHAI Jian-xue¹,
ZHAO Zhen-li¹, ZHANG Li-hui¹

- (1. College of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)
(2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In the context of ecological civilization and energy revolution, as the hub of energy supply, it is necessary to explore the influencing factors of green development of power grids, so as to clarify the development path. A grid green development indicator system including the grid upstream and downstream and the whole life cycle of the grid construction is established. The DEATEL-ISM model was used to analyze the structure of the first-level indicators, and the results were analyzed from three aspects: deep root influencing factors, middle indirect influencing factors and surface direct influencing factors. The results show that the 22 influencing factors are related to each other and constitute a hierarchical structure with six levels of influencing factors, of which 7 indicators are key influencing factors. The study clarifies the impact of the grid as a configuration and trading platform on the environment in the new era, and provides an implementation path for green development of the grid through the analysis of influencing factors.

Keywords: the power grid green development; influencing factor; DEMATEL-ISM model; path analysis