

中文引用格式:谢科范,左凌宇,彭华涛. 我国电网智能安全技术的关键专利分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(9):59-68.

英文引用格式:XIE Kefan,ZUO Lingyu,PENG Huatao. Key patent analysis of China's power grid intelligent safety technology [J]. China Safety Science Journal,2024,34(9):59-68.

我国电网智能安全技术的关键专利分析*

谢科范¹教授,左凌宇^{**1},彭华涛²教授

(1 武汉理工大学 管理学院,湖北 武汉 430070;2 武汉理工大学 创业学院,湖北 武汉 430070)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.0232

基金项目:国家社会科学基金资助(23BGL085)。

【摘要】 新安全格局下,为促进电网安全管理由传统模式向安全生产全过程数字化、信息化、智能化模式的转变,基于2008—2023年我国电网智能安全专利数据,采用网络中心度分析和主路径分析等方法,描绘专利地图;提取关键专利技术子群,并系统分析电网智能安全的技术发展情况、技术发展重点;基于专利地图和专家意见,运用熵权-优劣解距离法(TOPSIS),就我国既有智能安全技术社群对电网安全智能化的支撑度进行评价。结果表明:我国电网智能安全技术已形成11类关键技术社群,其中,电网智能安全过程技术是最丰富的知识群组。11类电网智能安全技术社群中,对电网智能安全支撑度较高的技术是智能控制技术、智能调度技术和网络通信安全技术。智能安全技术对电网传统安全目标中的安全管控能力和安全稳定能力有较好的支撑度,并对电网的现代安全目标中的安全治理能力和主动安全能力有较好的支撑度,但对安全韧性能力的支撑度不高。

【关键词】 电网安全智能化; 智能安全技术; 关键专利; 专利地图; 熵权-优劣解距离法(TOPSIS); 技术社群

Key patent analysis of China's power grid intelligent safety technology

XIE Kefan¹, ZUO Lingyu¹, PENG Huatao²

(1 School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;

2 School of Entrepreneurship, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In the new security pattern, the power grid safety management was promoted to transform from the traditional mode to the digital, information, and intelligent mode during the life-cycle of safety production. Based on patent data of China's power grid intelligent security from 2008 to 2023, the patent map was performed using network centrality analysis and main path analysis. Then, key patent technology subgroups were obtained to systematically analyze technological development and key points of power grid intelligent safety. Based on patent maps and expert opinions, the entropy weight-TOPSIS method was used to evaluate the support of China's existing intelligent safety technology community for power grid security and intelligence. The results showed there were 11 key technology communities for the power grid intelligent safety technology, and power grid intelligent safety process technology was the most excellent knowledge group. Among the 11 types of power grid intelligent safety technology communities, technologies including intelligent control, intelligent dispatching, and network communication safety were

* 文章编号:1003-3033(2024)09-0059-10; 收稿日期:2024-02-23; 修稿日期:2024-05-28

** 通信作者:左凌宇(1997—),男,湖北恩施人,博士研究生,研究方向为电网安全、风险管理等。E-mail: 246544@whut.edu.cn。

with higher support for power grid intelligent safety. Intelligent security technology can well support the safety control and stability capabilities in the traditional safety goals of the power grid. Furthermore, it supports the safety governance and active security capabilities in the modern safety goal of the power grid. However, the support for security resilience capabilities was insufficient.

Keywords: power grid safety intelligence; intelligent safety technology; key patent; patent mapping; entropy weight-technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method; technology community

0 引言

当前,我国各地的电网系统开展了程度各异的基于人工智能的电网安全实践,如国网江苏省电力有限公司开发运行了企业级人工智能平台,包括三库二平台(样本库、算法库、模型库、训练平台、服务平台)。可以认为,在全国推行电网安全智能化已有一定的实践经验基础,在电网行业先行先试可望为其他行业的安全智能化提供参照,而这也是文中研究的实践意义所在。

现有电网安全智能化方面的研究,较多的是把各种人工智能技术应用到电网智能安全体系中^[1],如机器学习^[2-3]、深度学习^[4]、多智能体系统^[5]等各种智能算法正逐步应用于电网的安全运维过程。李海英等^[6]提出一种改进深度置信网络方法,提升了智能电网暂态安全状态感知能力和智能电网的安全分类精度。PENG等^[7]采用基于深度学习的物体检测技术,实现了电网施工现场的智能安全监控。随着分布式电网和可再生能源的发展,电网面临的安全风险环境有了新的变化,电网安全技术需要保证做到与时俱进,如物联网、边缘计算、5G以及数字孪生等新一代信息技术能够改善和提升传统电网在作业施工、运维、管理等方面的安全可靠。基于物联网和边缘智能技术,可利用无人机智能巡检、人工智能模型对输电线路图像进行故障诊断^[8]。王国春等^[9]利用新一代调度技术,开发了电网的在线安全分析服务架构。LI等^[10]设计了基于区块链的智能电网数据管理系统,并采用层次分析法和专家咨询法,构建了系统安全评估模型。周二专等^[11]开发了以数字孪生为核心的稳定调度数字化应用系统,为调度员提供实时决策支持。智能技术的发展,使得电网安全体系从传统的人因安全管理转变为全面安全预防。在各种智能设备和分布式电网的接入下,复杂的物联网网络末梢边界更为模糊,需要全域、全过程、多维度的安全体系来替代碎片化的安全体系^[12]。综合来看,国内外在电网智能安全技术发展与应用以及电

网安全智能化方面,虽然已经开展了一些研究,但在理论架构和针对具体行业方面的研究显得不足。

因此,笔者拟构建电网智能安全技术的分类架构(安全技术的3大类)及电网安全目标评价架构(安全目标的3剖面);运用中国专利数据构建电网智能安全技术的专利地图,并进行领域分群与统计分析;运用熵权-优劣解距离法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)模型,对电网智能安全的各类技术对安全智能化的支撑度进行评价分析,并提出对策建议,以期为我国电网安全智能技术的发展提供靶向指引,推动我国电网安全智能化目标实现。

1 电网安全智能化的技术理论框架

电网安全智能化是指基于人工智能、大数据、物联网、区块链等技术,实现电网建设、运行、维护的安全风险侦测、安全过程监控、安全生产保障、安全预警预控、安全事故处置、事故损害修复等的全面智能化运行与管理。

1.1 电网智能安全技术的3大类分群

电网智能安全技术包括直接以电网安全为目标的技术,也包括保持电网运行的协同与稳定而间接提升电网安全性的技术。为便于对电网智能安全技术进行归属划分,将电网智能安全技术分为3大类,即智能安全装备技术、智能安全过程技术、智能安全软件技术3个分群,每一大类下可再分为若干子群(子群由专利地图数据确定),从而形成电网智能安全技术的3类分群思路。

1.2 电网智能安全目标的3剖面分维

电网安全智能化除了应满足传统的安全保障功能和安全管理工作以外,还应具有安全生产管理4.0模式所新增的功能。具体来说,需考虑以下3个剖面的6个维度,即所谓3剖面分维。

1) 第一个剖面。在传统的被动安全能力维度基础上外加主动安全能力维度。被动安全是一种防御性的、情景应对性的、应急性的安全,包括电网系

统的安全监测、安全处置和安全救援等。相较于传统的安全预防,安全生产管理 4.0 对安全预测和预控提出了更高要求。尤其在数据驱动、信息赋能背景下,电网设备运行的海量数据可以作为大数据样本,通过学习、模拟、演化形成多智能、全面性虚拟场景,进行多维运算和多向性风险分析以实现主动安全。因此,电网主动安全是一种主动的、预测应对性的、全面预控性的安全,包括电网的设计安全、安全预警、未知安全隐患侦测以及安全风险预控。

2) 第 2 个剖面。在传统的安全管控能力维度基础上外加安全治理能力维度。安全管控针对人机料法环 5 个方面进行安全风险识别、监测与应对管理,包括电网的安全防护、安全标准规制、安全提示和安全监督等。在现代化电网安全体系下,电网安全责权利外延扩大,电网安全的利益相关者不仅包括传统电力管理、运营、使用方,还包括治理角色。综合来看,相比电网安全管控,电网安全治理更注重安全基础条件和安全机制的建立,包括电网的安全决策协同机制、安全信息沟通、安全建言平台运行和安全责权利配置等。

3) 第 3 个剖面。在传统的安全稳定能力维度基础上外加安全韧性能力维度。安全稳定性注重安全状态的平稳与安全隐患的消除,包括电网的负荷

稳定、运行平稳和事故零发少发。可再生能源设备、新能源装置、物联智能微型系统等外部装备的接入,可以加速电网功能恢复和扩大电网安全有界波动域。电网安全韧性目标是提升电网对偶然事件、突发冲击的抗击能力、减损能力和恢复能力;智能技术可支撑电网的冗余设计、容错纠错、柔性适应、风险隔离和快速修复等功能。

2 电网智能安全技术关键专利概况

专利数据采集自智慧芽专利数据库 Patsnap。以“电网、智能、安全”为关键词进行搜索,并利用专利受理主体和法律状态类别筛出无效专利、无关专利,最后得到 4 418 项关于我国电网智能安全的专利数据(不含港澳台地区)。

现有电网智能安全专利布局主要集中在安全装备装置、网络安全系统、智能预警和监测、安全评价等领域。从数量上看,单相接地和高电压测试装置领域,配电柜、分布式光伏补偿装置领域,以及无线通信、网络攻击领域的专利数量较为集中。

基于上述 4 418 份电网智能安全专利数据,统计电网智能安全专利技术的申请情况,得到我国电网智能安全专利申请数量前 15 位申请者的年申请数量,如图 1 所示。

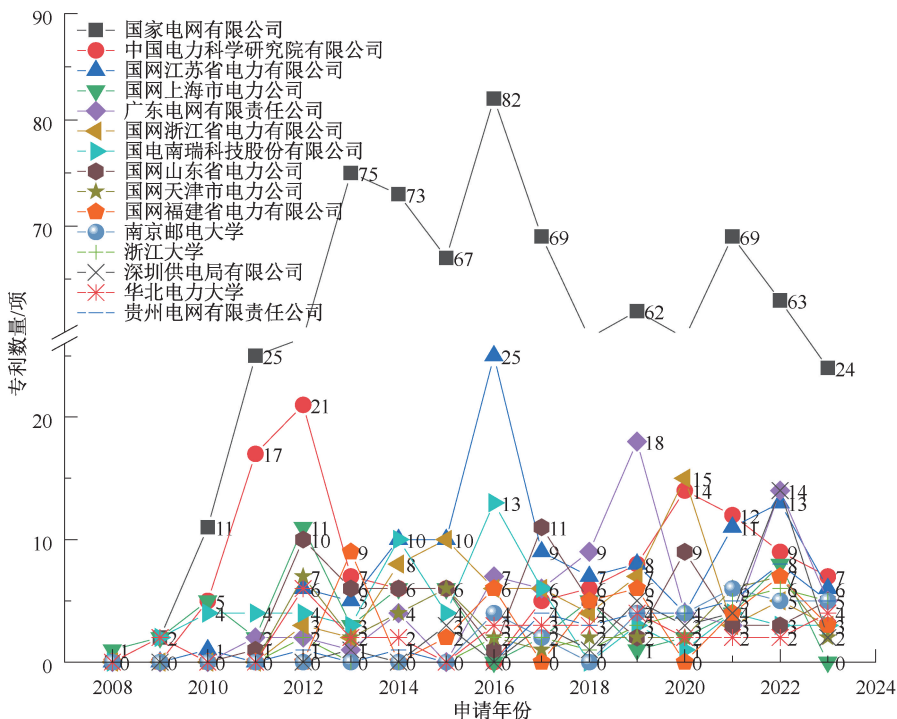


图 1 我国电网智能安全专利申请情况 (Top15 申请人)

Fig. 1 Patent application for China's power grid intelligent safety (Top 15 applicants)

可以看出,国家电网有限公司在电网智能安全方面的专利申请具有明显数量优势,中国电力科学研究院有限公司和国网江苏省电力有限公司则紧随其后。国家电网有限公司在电网智能安全领域的专利布局较为均匀且分散,并不局限于单一研发领域。

电网智能安全的技术丰富性和维度广泛性致使电网安全智能化领域的专利布局较为分散,高价值

专利和关键专利在网络中并不明显。因此,运用中心度来进行大范围的专利初筛^[13]。考虑到专利引证网络的知识流动情况,选择入度中心度进行潜在关键专利搜寻^[14]。利用 Pajek 软件,对清洗后的专利数据进行入度分析,筛选出 1 831 个节点,共 7 个类别,入度最高为 6,最低为 0。随后抽取入度为 3~6 的节点,共计 83 个节点,得到我国电网智能安全技术潜在关键专利分布图(图 2)。

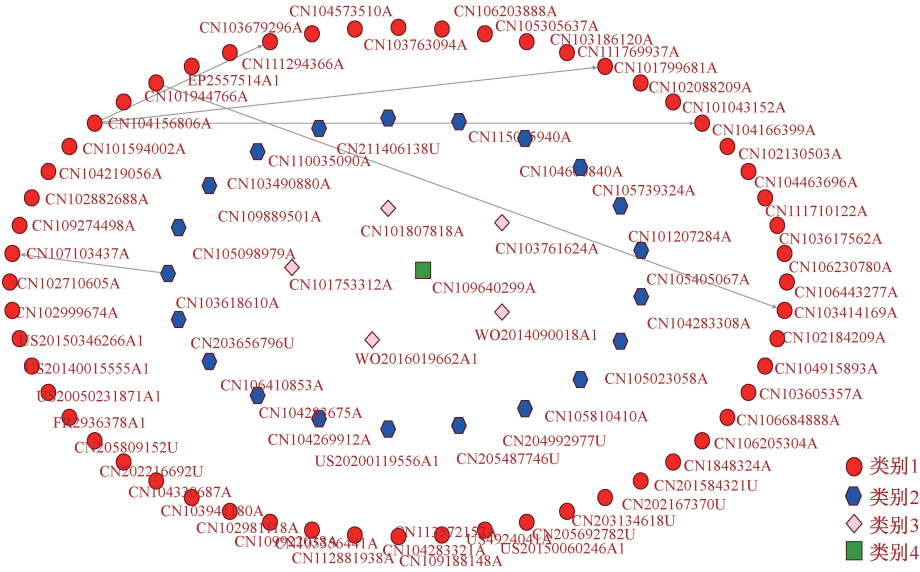


图 2 我国电网智能安全潜在关键专利分布

Fig. 2 Potential key patent distribution for China's power grid intelligent safety

图 2 中,83 个节点大部分以孤点形式存在,而小部分节点存在 1 个引用或被引用的关系。整个专利分布根据入度中心度被划分为 4 个类别(圆形、三角形、菱形和正方形),且节点数量随着中心度的减小而增加。其中,专利 CN109640299A 的度中心度为 6。入度中心性可大致筛选出电网智能安全技术领域中的技术基础和核心知识,识别潜在关键专利技术。

3 关键专利技术子群分析

3.1 潜在关键专利技术子群提取

考虑到图 2 中的 83 个潜在关键专利节点大多属于孤立节点,利用 Pajek 的 K-Neighbours 算法搜索节点所在网络的所有邻近节点。分别对 83 个节点作详细地网络结构刻画,分析结果包含 16 个小型专利引证网络子群。

依据 16 个网络的节点数量和复杂性程度进行网络类型分类。包括:

1) 复杂网络。如节点 CN110035090A 的网络结构较为复杂(图 3),存在大量且复杂的引用关系,

对这类节点主要采用主路径分析进行专利提纯。

2) 简单网络。如节点 CN109188148A 专利网络的节点数多且度中心性偏高,但结构关系不复杂(图 4),主要对关键节点进行分析。针对节点数不多、结构关系单一的简单网络结构,直接提取关键专利。

经过专利查证,补充 16 个专利引证网络子群的主题信息,结果见表 1。

表 1 我国电网智能安全潜在关键专利引证网络子群信息
Table 1 Subgroup information of potential key patent citation network for China's power grid intelligent safety

排序	代表性节点	网络类型	待分析状态	专利主题
1	CN109640299A	复杂网络	主路径分析	区块链、数据密钥、网络安全
2	CN105098979A	简单网络	提取	智能电力调度
3	CN101594002A	复杂网络	主路径分析	电力调度、防误操、自愈控制、风险预警

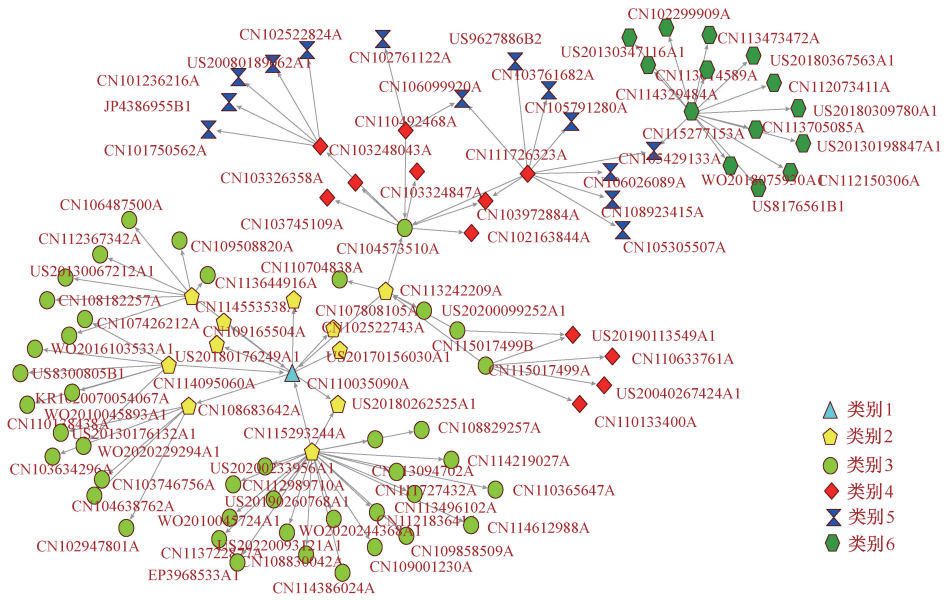


图 3 复杂网络节点(示例)

Fig. 3 Complex network node case

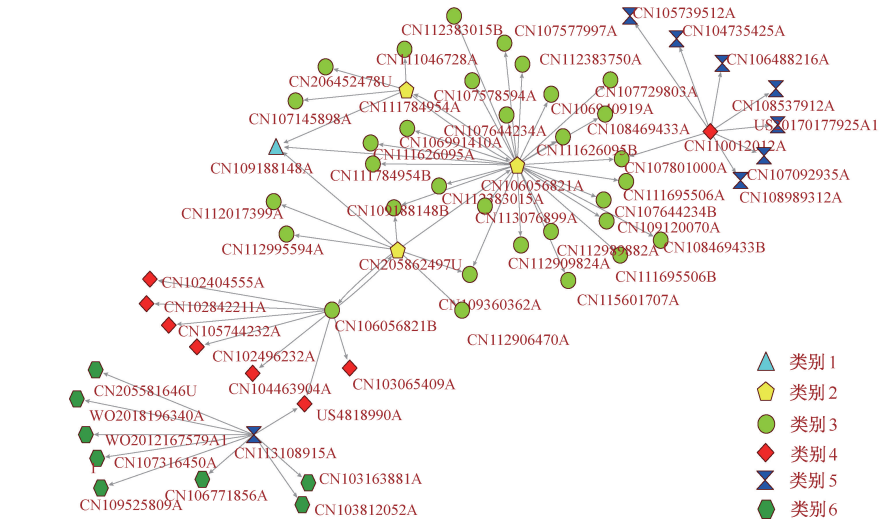


图 4 简单网络节点(示例)

Fig. 4 Simple network node case

续表 1

排序	代表性节点	网络类型	待分析状态	专利主题	排序	代表性节点	网络类型	待分析状态	专利主题
4	CN101807818A	复杂网络	关键节点分析	网络安全	10	CN104283308A	复杂网络	关键节点分析	智能控制
5	CN110035090A	复杂网络	主路径分析	智能控制	11	CN101799681A	简单网络	提取	智能控制
					12	CN113572157A	复杂网络	提取	智能电力调度
6	CN104156806A	复杂网络	关键节点分析	智能决策	13	CN111710122A	简单网络	关键节点分析	智能控制
7	CN101944766A	复杂网络	主路径分析	智能监控、安全在线分析	14	CN106205304A	复杂网络	关键节点分析	智能检测
8	CN211406138U	简单网络	提取	智能监控	15	CN106684888A	简单网络	提取	智能控制
9	CN105305637A	简单网络	提取	风险预警	16	CN109188148A	简单网络	关键节点分析	智能监控

16个专利引证网络子群中,有4个需要进行主路径分析的专利技术子群在专利主题上不重叠,且与电网安全智能化主题高度相关。6个需要进行关键节点分析的专利技术子群集中在智能控制和监测方面。已提取的6个关键专利技术子群则主要和智能控制、智能电力调度相关。

3.2 关键专利技术子群构建

1) 主路径分析。主路径分析主要用于识别技

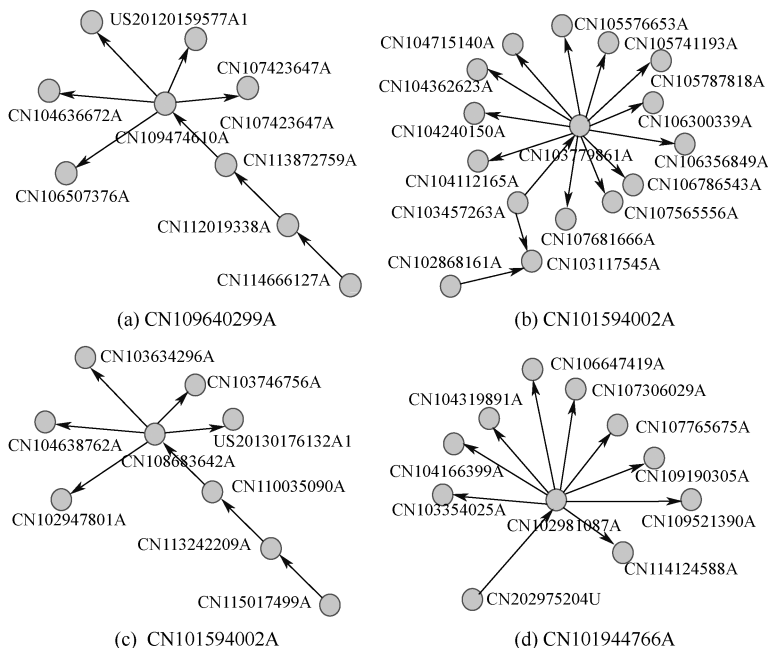


图5 我国电网智能安全专利引证网络主路径分析

Fig. 5 Main path analysis of China's power grid intelligent safety patent citation network

表2 主路径分析的节点补充

Table 2 Complementary nodes of main path analysis

节点	补充性节点	专利主题
CN109640299A	CN112019338A... CN104636672A	网络通信、 电网信息隐私
CN101594002A	CN102868161A... CN105741193A	智能电力调度、 智能控制
CN110035090A	CN113242209A... CN115017499A	智能监控、 智能检测
CN101944766A	CN114170878A... CN102184209A	智能检测、 在线安全

2) 关键节点分析。根据 CN101807818A、CN104156806A、CN101207284A、CN111710122A、CN106205304A 和 CN109188148A 所在网络的节点分布情况,对网络中重点专利进一步提纯。6个技术子群中提取出的补充性节点见表3。

术轨道发展变化,其基本原理是根据特定搜索算法计算的遍历权重来确定主路径^[15-16]。采用搜寻路径计数(Search Path Link Count, SPLC)算法对4个潜在关键专利引证复杂网络进行主路径分析^[17],结果如图5所示。

提取出共计27个补充性关键节点,因篇幅原因仅展示部分节点,整理后见表2。

表3 关键节点分析的节点补充

Table 3 Complementary nodes of critical node analysis

节点	补充性节点	专利主题
CN101807818A	CN102438240A CN106789015A	网络通信安全
CN104156806A	CN116310979A ... CN113537783A	智能监控、作 业安全识别
CN101207284A	CN103138390A ... CN110071579A	智能控制
CN111710122A	CN108830998A ... WO2019101187A1	智能控制
CN106205304A	CN103840438A	智能控制
CN109188148A	CN107801000A ... CN111695506A	智能监控、 风险识别

4 电网智能安全技术社群分析

按照电网智能安全技术划分的3个技术类别,

即智能安全装备技术、智能安全过程技术和智能安全软件技术,结合关键专利子群的技术重点和技术类别的主题方向,将94项关键专利进行技术社群类型划分,分别为智能监控装备、智能控制装备、防误

操作技术、智能监控与检测技术、智能调度技术、智能控制技术、网络通信安全技术、风险识别和预警系统、电网信息隐私技术、在线安全分析系统、智能决策系统等11类。结果见表4。

表4 我国电网智能安全技术的社群分类

Table 4 Community classification of China's power grid intelligent safety technology

领域	技术类别	技术社群	数量	重点主题词
电网智能安全技术	智能安全装备技术	智能监控装备	3	远程监控、视频监控
		智能控制装备	4	防误操、低压控制、智能锁
	智能安全过程技术	防误操作技术	2	防误校验、防误操作管理
		智能监控与检测技术	20	安全监控仿真系统、作业违章识别、物联网电力监控、设备智能检测
		智能调度技术	12	电网重构、供需平衡、防停电、供电恢复
		智能控制技术	18	自愈控制、实时控制、智能管控
		网络通信安全技术	9	物联网、区块链、通信加密、云端
	智能安全软件技术	风险识别和预警系统	5	安全预防、风险评估、运行故障告警
		电网信息隐私技术	13	身份认证、信息安全、密钥协议
		在线安全分析系统	4	全数字实时仿真、安全分析平台
		智能决策系统	4	决策支持、风险评估、数字管理

技术类别中的智能安全过程技术拥有数量最多的关键专利,共有61项;其次为智能安全软件技术(26项)和智能安全装备技术(7项)。技术社群中,智能监控与检测技术、智能控制技术、电网信息隐私技术和智能调度技术的专利数量最多,分别为20、18、13和12项。这主要是因为,自动化检测和控制技术在电网实际建设和运营过程中,首先,考虑的是以技术手段代替粗放式的人工管理,再逐步实现深层次的智能化。从电网安全的实践来看,利用物联网、数字孪生等技术的实时智能监控、虚拟仿真功能来排查电网基础设施建设的风险点,这方面已开始得到推广应用。其次,电网安全的智能化是以数字化为基础的,而当前与数据、数字技术、数字平台等相配套的规章制度并不完善,网络攻击、信息泄露以及数字身份认证等问题亟待解决。因此,电网信息隐私技术和网络通信安全技术亦成为电网智能安全领域的关键技术。智能调度技术除了传统的电力运行、电力恢复保障等方面,还包含对新能源、可再生能源和微电网等方面的安全消纳。

我国电网安全智能化的整体专利布局与安全生产管理4.0模式的趋势要求大致吻合。94个专利整体上可支持应对电力供需平衡风险、安全运行风险、网络与信息安全风险、电力建设施工风险以及重大突发事件风险等,尤其是可为主动安全和安全治理的支撑提供技术条件。从技术的重点类型来看,人工智能、物联网、区块链、数字孪生等新一代信息

技术正逐渐构成网络安全智能化的基础。无论是在电网基础设施建设施工、作业现场的实时监控、行为识别上,还是在电网的供电保障、风险识别和电网通信方面,电网安全逐渐向数字化、信息化、智能化方向发展,有向动态感知、全过程实时分析、一体化智慧安全发展的趋势。

5 电网智能安全技术的支撑度评价

通过识别关键专利技术,将智能安全装备技术、智能安全过程技术和智能安全软件技术的11类技术社群作为分析对象,结合电网智能安全目标三剖面6维度,从传统安全目标(安全管控能力、安全稳定能力、被动安全能力)和现代安全目标(安全治理能力、安全韧性能力、主动安全能力)的观测视角,测量我国现有电网智能安全技术发展对未来安全生产管理4.0模式的支撑能力,并进行系统评价。

5.1 方法支撑度评价

为更充分地利用原始数据的信息,同时尽可能地避免专家评价的主观赋权问题,本文运用熵权法确定权重,再运用TOPSIS方法进行具体评价,构成熵权-TOPSIS方法。

5.2 数据来源与计算

邀请20位专家,以11类电网智能安全技术为评价对象,针对“电网智能安全技术对电网智能安全目标的支撑作用”这一问题进行评价。其中,

10位专家来自高校,具有正高级职称,主要研究方向为风险评估、智能电网和安全生产科学技术;10位专家来自国家电网,其中5位专家为正高级工程师,5位专家为一线作业的电力工程师。考虑到评价精度对评价效果的影响,采用7级Likert量表,1—7分别表示非常强、强、较强、不确定、较差、差、非常差。

熵权-TOPSIS法的基本步骤如下^[18]:

步骤1:构建原始矩阵 X ,假设评价体系中存在 m 个评价单元, n 个评价指标,则原始矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$,其中, x_{ij} 表示第 i 个评价单元在第 j 项评价指标的值。由于采用Likert量表,所以原始矩阵中的任一元素均有 $x_{ij} > 0$ 。

步骤2:规范化原始矩阵,利用下式对所有指标作规范化处理,得到矩阵 X' 。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

式中 $\max(x_j)$ 和 $\min(x_j)$ 分别为原始矩阵 X 中第 j 行的最大值和最小值。

步骤3:计算第 i 个评价单元在第 j 个评价指标上的比重 y_{ij} 。

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}, \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n; \\ j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

步骤4:计算第 j 个指标的信息熵 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

步骤5:确定第 j 个指标的权重 w_j 。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

其中, $d_j = 1 - e_j$ 也称为指标的差异性系数。

步骤6:构建基于矩阵 X' 的加权后规范化矩阵 Z 。

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (x'_{ij} \times w_j)_{m \times n} \quad (5)$$

步骤7:确定正理想解 Z_j^+ 与负理想解 Z_j^- ,其中, $Z_j^+ = \max(z_{ij}), Z_j^- = \min(z_{ij})$ 。

步骤8:计算元素 z_{ij} 与正理想解和负理想解之间的欧式距离 D_i^+ 和 D_i^- 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (Z_j^+ - z_{ij})^2}; D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (Z_j^- - z_{ij})^2} \quad (6)$$

步骤9:计算各评价单元与理想解的相近贴进度 C_i 。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (7)$$

5.3 指标权重确定与综合排序结果

利用熵权法将20位专家的评价结果转化为11类技术社群对6个安全维度的支撑度权重,结果见表5。

表5 熵权法计算出的电网安全目标重要度权重结果

Table 5 Importance weight result of power grid safety target calculated by entropy-weight method

安全维度	e_j	d_j	$w/\%$
主动安全能力	0.990 7	0.009 3	9.68
被动安全能力	0.983 9	0.016 1	16.71
安全治理能力	0.985 4	0.014 6	15.18
安全管控能力	0.992 7	0.007 3	7.54
安全韧性能力	0.969 8	0.030 2	31.28
安全稳定能力	0.981 1	0.018 9	19.61

注: e_j 为信息熵值; d_j 为信息效用值; w 为权重系数。

由表5可知:在6个安全目标中,安全韧性能力的权重系数最大,而安全管控能力的权重系数最小。被动安全能力、安全治理能力以及安全稳定能力的权重系数相差不大,在15%~20%之间。将表5中的指标权重加权到TOPSIS法中计算11类电网智能安全技术对电网安全目标的支撑度,并进行综合排序,结果见表6。

表6 智能安全技术对电网安全智能化支撑度的

评价结果

Table 6 Evaluation results of intelligent safety technology on power grid safety intelligent support

技术子群	D_i^+	D_i^-	C_i	排序
智能监控装备	1.793	0.306	0.146	10
智能控制装备	1.808	0.307	0.145	11
防误操作技术	1.569	0.498	0.241	9
智能监控与检测技术	0.645	1.457	0.693	4
智能调度技术	0.558	1.533	0.733	2
智能控制技术	0.284	1.844	0.867	1
网络通信安全技术	0.612	1.51	0.712	3
风险识别和预警系统	1.334	0.83	0.384	6
电网信息隐私技术	0.965	1.23	0.56	5
在线安全分析系统	1.406	0.698	0.332	7
智能决策系统	1.45	0.674	0.317	8

注: D_i^+ 为正理想解距离; D_i^- 为负理想解距离; C_i 为相对接近度。

基于6大智能安全目标,分析11类电网安全智能技术社群对各目标的支撑情况,结果如图6所示。

从图6可以看出,智能控制技术对电网安全智能化目标的支撑情况最好,智能控制技术的关键专

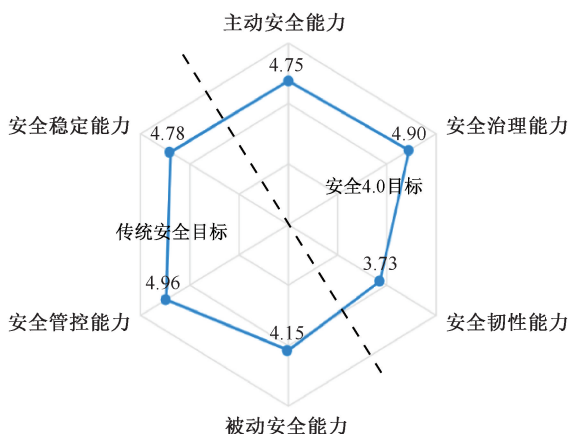


图6 我国电网智能安全技术对电网安全智能化目标的支撑度

Fig. 6 Support of China's power grid intelligent safety technology to power grid safety intelligence goal

利有 18 项,在自愈控制、实时控制、智能管控方面形成了一定的知识聚集。智能调度技术和网络通信安全技术在此方面较为相近,分别占据排序 2 和排序 3。其中,智能调度技术的重点更偏向于在安全稳定、安全治理,且在新能源安全消纳方面具有较大潜力;网络通信安全技术则偏向安全治理能力和安全稳定能力,基于物联网、区块链等数字化架构是保障安全的兜底维度。智能装备技术中,智能监控装备和智能控制装备的排序分别为 10 和 11。相较而言,这 2 项技术主要聚焦在作业施工、违章识别和安全保障方面,但是数量较少,且内容稍显分散,因此,需要进一步加强对关键智能装备的开发。整体上,智能安全过程技术的关键技术类别排名靠前,这是由于专利数量多,且电网智能安全过程技术在具有技术普适功能的情形下还具有技术靶向性。例如:智能监控与检测技术和智能控制技术分别在主动安

全能力和安全管理能力上排名靠前,且为支撑电网安全生产的必要性技术。

电网安全智能化目标中,安全管控能力和安全治理能力可得到智能安全技术更好的支撑;安全稳定能力和主动安全能力的技术支撑情况次之。被动安全能力因为已经比较成熟,因此,智能安全技术对这一目标支撑的提升力度不大。在安全韧性能力的支撑上出现一个悖论:尽管安全韧性能力的重要性权重最大(31.28%),但现有的电网智能安全技术对其的支持度却是最低(3.73)。

6 结 论

1) 我国电网智能安全技术分为 3 个技术社群,即智能安全装备技术、智能安全过程技术和智能安全软件技术。又分为 11 个关键技术子群,其中,电网智能安全过程技术是最丰富的知识群组,对电网智能安全支撑度最高的技术是智能控制技术、智能调度技术和网络通信安全技术。

2) 电网智能安全技术既可较好地支撑传统安全目标中的安全管控能力,也可支撑现代安全目标中的安全治理能力。

3) 面向电网安全智能化目标,安全韧性能力的重要性权重最大,但当前的电网智能安全技术对安全韧性能力的支持度又最小,说明面向安全韧性提升的智能安全技术的研发与应用亟待加强。

4) 主动安全能力在电网安全智能化目标中的重要性权重排倒数第二,但当前的电网智能安全技术对主动安全能力的支撑度并不低,说明电网系统推行主动安全的可行性较强。

5) 未来,可就基于专利地图的电网智能安全技术演化预测以及电网公司推进安全智能化的具体路径等开展进一步研究。

参 考 文 献

- [1] SETHU M, KOTLA B, RUSSELL D, et al. Application of artificial intelligence in detection and mitigation of human factor errors in nuclear power plants: a review[J]. Nuclear Technology, 2023, 209 (3):276-294.
- [2] 李常刚, 李华瑞, 刘玉田, 等. 大电网动态安全风险智能评估系统[J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (22):67-75. LI Changgang, LI Huarui, LIU Yutian, et al. Intelligent assessment system for dynamic security risk of large-scale power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (22):67-75.
- [3] DOBBE R, HIDALGO-GONZALEZ P, KARAGIANNPOULOS S, et al. Learning to control in power systems: design and analysis guidelines for concrete safety problems[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: DOI:10.1016/j.epsr.2020.106615.
- [4] YOU Huimin. Safe operation management of urban smart grid based on deep learning[J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022: DOI:10.1155/2022/4184941.

- [5] 潘玺安, 艾欣, 胡俊杰, 等. 考虑网络安全约束的分布式智能电网边云协同优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2023, 37 (23):1-15.
PAN Xi'an, AI Xin, HU Junjie, et al. Network security constrained distributed smart grid edge-cloud collaborative optimization scheduling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 37 (23):1-15.
- [6] 李海英, 沈益涛, 罗雨航. 基于改进深度置信网络的智能电网暂态安全状态感知[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (5):171-177.
LI Haiying, SHEN Yitao, LUO Yuhang. Transient security situational awareness of smart grids based on an improved deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (5):171-177.
- [7] PENG Guanyao, LEI Yin, WU Di, et al. CORY-Net: contrastive res-YOLOv5 network for intelligent safety monitoring on power grid construction sites[J]. IEEE Access, 2021, 9:160 461-160 470.
- [8] MISHRA M, BISWAL M, BANSAL C R, et al. Intelligent computing in electrical utility industry 4.0: concept, key technologies, applications and future directions[J]. IEEE Access, 2022,10: 100 312-100 336.
- [9] 王国春, 许洪强, 冯长有, 等. 新一代在线安全分析技术架构及未来展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (24): 110-120.
WANG Guochun, XU Hongqiang, FENG Changyou, et al. Technical architecture and future prospect for new generation of online security analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (24):110-120.
- [10] LI Dacan, GONG Yuanyuan. The design of power grid data management system based on blockchain technology and construction of system security evaluation model[J]. Energy Reports, 2022, 8:466-479.
- [11] 周二专, 张思远, 严剑峰, 等. 电网调控决策知识模型建模及实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (14): 5 057-5 067.
ZHOU Erzhan, ZHANG Siyuan, YAN Jianfeng, et al. Decision knowledge modeling and implementation for power grid dispatching and control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (14):5 057-5 067.
- [12] 曾梦婷, 甘露, 张迪, 等. 以数字电网促进新型电力系统 IT 与 OT 融合的思考[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11):1-11.
ZENG Mengyu, GAN Lu, ZHANG Di, et al. Thinking of promoting integration of IT and OT in new power system with digital grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 44 (11):1-11.
- [13] 郭剑明, 王婧怡, 周云峰, 等. 基于专利网络节点重要性的核心专利识别方法研究[J]. 情报杂志, 2023, 42(5):162-168.
GUO Jianming, WANG Jingyi, ZHOU Yunfeng, et al. Research on the core patents identification method based on node importance of patents network[J]. Journal of Intelligence, 2023, 42 (5):162-168.
- [14] 安同良, 姜舸, 王大中. 中国高技术制造业技术测度与赶超路径:以锂电池行业为例[J]. 经济研究, 2023,58(1): 192-208.
AN Tongliang, JIANG Ge, WANG Dazhong. Measurement of critical technologies in China's high-tech manufacturing and the catch-up path: lithium battery industry as an example[J]. Economic Research Journal, 2023,58(1):192-208.
- [15] 张娴, 方曙. 专利引用网络主路径方法研究述评与展望[J]. 图书情报工作, 2016, 60 (20):140-148.
ZHANG Xian, FANG Shu. Research review on the main path analysis of patent citation networks[J]. Library and Information Service, 2016, 60 (20):140-148.
- [16] VERSPAGEN B. Mapping technological trajectories as patent citation networks: a study on the history of fuel cell research[J]. Advances in Complex Systems, 2007,10(1):93-115.
- [17] HUMMON N P, DEREIAN P. Connectivity in a citation network: the development of DNA theory[J]. Social Networks, 1989, 11 (1):39-63.
- [18] 马海群, 李敏. 基于熵权 TOPSIS 法的知识产权保护政策评价研究[J]. 数字图书馆论坛, 2023, 19 (8):60-67.
MA Haiqun, LI Min. Evaluation of intellectual property protection policy based on entropy weight topsis method[J]. Digital Library Forum, 2023, 19 (8):60-67.

作者简介: 谢科范 (1963—),男,湖南益阳人,博士,教授,主要从事安全科学理论、安全生产管理、安全系统和风险管理等方面的研究。E-mail: xkf@whut.edu.cn。

