

直流配电技术成熟度分析及发展趋势预测

宁可儿, 焦在滨, 施任威, 张超逸, 刘俊杉

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对当前直流配电技术发展路径不明晰的问题,提出了直流配电技术发展阶段评估和成熟度预测方法以探究其发展趋势。首先,构建基于技术成熟度曲线的技术成熟度评估模型,通过调研文献将其按内容分为规划设计、运行控制与保护、关键设备3类,并进行文献检索以获取成熟度预测数据基础;接着,对未来直流配电技术的成熟度阶段和整体发展趋势进行分析预测,给出技术、热度双重作用下的直流配电成熟度预测结果;最后,通过设计拟合优度指标和交叉验证方法,验证了所提模型的准确性。研究表明:文献、专利等成果的数量可以反映技术发展趋势,直流配电技术科学研究热潮将在2030—2040年达到顶峰,并在2060年前后实现稳定发展,这与我国“双碳”目标实现的时间节点有效对应。

关键词: 直流配电;技术成熟度曲线;拟合优度指标;成熟度预测

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202404004 **文章编号:** 0253-987X(2024)04-0041-13

Maturity Analysis and Development Trend Forecast of Direct Current Power Distribution Technology

NING Ke'er, JIAO Zaibin, SHI Renwei, ZHANG Chaoyi, LIU Junshan

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Regarding the unclear development path of direct current (DC) power distribution technology, the development stage assessment and maturity prediction methods of DC power distribution technology are proposed. Initially, a technology maturity assessment model based on the Hype Cycle is established. The literature related to DC power distribution can be classified into three categories, including planning and design, operation control and protection, and key equipment according to the content. Literature retrieval is conducted to obtain the basis of maturity prediction data. Subsequently, the future maturity and overall development trends of DC power distribution technology are analyzed and predicted to offer the forecast results of DC power distribution maturity under the dual role of technology and heat. Ultimately, the accuracy of the proposed model is verified by the designed goodness of fit index and cross-validation methods. The results show that the number of achievements such as literature and patents can reflect the development trend of the technology. The boom of scientific research on DC power distribution technology is expected to peak in 2030 to 2040 and realize stable development around 2060, which corresponds to the time for achieving China's carbon peaking and carbon neutrality goals.

Keywords: direct current power distribution; Hype Cycle; goodness of fit index; maturity forecast

收稿日期: 2023-07-19。 作者简介: 宁可儿(2000—),女,硕士生;焦在滨(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助项目(5400-202220146A-1-1-ZN)。

网络出版时间: 2023-10-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20231030.0925.002>

19世纪80年代,爱迪生电力照明公司利用直流发电机发出直流电,给上千只白炽灯供电,形成了直流配电网的雏形^[1]。然而,受技术条件等因素限制,早期的直流配电系统未能体现出明显优势。相反地,交流配电系统由于灵活性、经济性等方面十分突出,自此之后处于配电系统的主导地位。20世纪中后期,一方面,随着电力电子功率器件的发展,直流技术在输电领域取得了成功应用;另一方面,电力负载的多样性,特别是大量直流负荷的出现,为直流技术在配电领域的应用创造了条件^[2]。20世纪末,中低压直流配电技术在数据中心、城市轨道交通、航空器、舰船、电厂、变电站等领域均得到了尝试和应用。

目前,随着新能源、信息技术的发展和国民经济的快速增长,用户的用电需求、电能质量、经济性、供电可靠性、用电环保性等要求不断提高,用户侧分布式电源、直流负荷“即插即用”的需求与日俱增。随着城市规模不断扩大,用电负荷快速增长,城市交流配电网出现供电能力不足、走廊紧张等一系列问题^[3]。相较于传统交流配电系统,直流配电系统供电能力更强,传输效率更高,电能质量更好,有利于可再生能源和直流负荷的接入,为电力系统带来了新的解决方案^[4]。特别地,在确定合理的电压等级序列后,直流配电系统与分布式光伏、数据中心、储能以及家用电器的良好兼容性^[5],为直流配电技术的发展奠定了坚实基础。此外,对于我国“2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和”的目标而言^[6],直流配电技术供电能力强的特点在充电桩、高能耗企业供电以及海上风电汇集送出等方面也具有明显的优势。

然而,无论在中压还是低压配用电领域,直流配电技术的应用仍处于爆发前期,发展路径“自下而上”的趋势明显,即相关技术首先从示范工程和小规模应用开始,逐步扩展形成规模化,最终形成具有广泛共识的标准体系。2050年我国能源体系中非水可再生能源占比将达到43%,负荷侧广义直流负荷占比达70%,直流配电系统理论及示范将是未来的研究热点^[7]。但是,目前直流技术在配电领域的应用并未如预期般得到广泛共识,直流配电技术成熟度较低,未来发展路径还不明朗,各层级工程技术和决策人员仍处于预研、示范、应用观望阶段。

文献[8]对于直流配电网典型拓扑及接线、关键技术等进行总结,并从技术特点、实施路径、开展工作等方面对直流配电系统的发展提出相应建议。文

献[9]对于国内外直流配电网的故障检测及保护方法进行综述,提出直流配电网故障分析与继电保护需要进一步解决的问题,如控保一体化、故障限流技术等。文献[10]提出,研究直流配电网的网络架构、电压等级是推动直流配电网发展的基础,而电能变换与控制技术、直流设备则是发展的关键。文献[11]认为未来配电网将是多电压等级、多层网络结构下,融合多能源、混合运行方式下的配电系统。文献[12]从系统规划与评价、控制和保护、关键设备3个方面,对直流配用电系统的技术瓶颈、未来研究方向进行了分析和展望。

上述文献对于直流配电技术的展望和分析大多是定性提出,少有采用定量的评估模型对直流配电技术发展的成熟度阶段进行评估和预测。技术成熟度评估及预测方法在多个学科领域已经有所尝试,如文献[13]基于文献计量方法,建立了系统的综合评估指标体系,对能源互联网技术成熟度进行等级评估。文献[14]提出在生物医学方面可以利用高德纳曲线分析技术发展趋势。文献[15]借鉴高德纳曲线思想,利用 Gompertz 曲线模型,对语音识别技术、智能驾驶技术、自然语言处理3种新兴技术的成长阶段进行预测。文献[16-19]均借鉴高德纳公司给出的预测结果,对各自领域的新技术发展阶段与趋势进行分析。然而,上述有关技术成熟度预测的文献大多围绕公共管理、经济、哲学等领域,而对直流配电技术的发展阶段评估和成熟度预测的研究尚未开展。

为此,本文首先构建直流配电技术成熟度预测模型,描述新兴技术发展过程,设计基于技术成熟度曲线的直流配电技术发展量化分析模型,为直流配电技术发展阶段评估和成熟度预测提供方法。进一步,通过调研文献将直流配电技术分为规划设计、运行控制与保护、关键设备3类,确定预测指标,进行文献检索以及数据处理。最后,将所设计方法应用于直流配电技术领域,对直流配电技术的整体发展趋势和关键技术的发展趋势进行评估分析,得出技术和热度双重作用下的直流配电成熟度预测结果,并通过拟合优度指标和交叉验证方法验证了模型的准确性。

1 直流配电技术成熟度预测模型

1.1 新兴技术发展过程

一般认为,新兴技术发展成熟的过程包括5个阶段^[20],分别为:①启动期。新技术概念被提出,媒体报道迅速增长,吸引广泛关注。②泡沫期。技术

逐渐改变,个别成功案例出现,激进者跟进,媒体报道。③低谷期。技术受限且缺点暴露,没有达到预期,受到质疑,曝光度急剧下降。④爬升期。新技术优缺点逐渐清晰,科技产品出现,更多公司开始尝试,出现成功且可复制的使用模式。⑤成熟期。新科技变为成熟科技,经过数次迭代,效益与潜力被市场接受,成为主流。图 1 给出了新兴技术发展成熟的过程示意图。

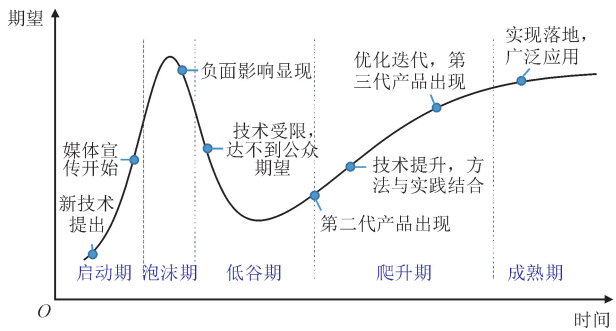


图 1 新兴技术发展成熟过程

Fig. 1 The process of emerging technologies from development to maturity

高德纳公司通过技术成熟度曲线^[21-22],又称高德纳曲线,对上述新兴技术的发展成熟过程进行了定性描述,用于分析新技术的发展趋势,目的是结合新技术自身发展、社会热度两重因素,预测技术成熟所需的时间。

影响新兴技术发展成熟的主要因素,除了技术发展的驱动力、科学研究导致的技术进步之外,社会热度也是其中之一^[23]。当新兴技术被提出时,推动其进步的主要因素是热度(关注度),而技术自身仍处于研究阶段,此时技术成熟度曲线中热度因素占主导地位。随着科学研究与技术研发持续推进,新兴技术将在某些领域取得关键性突破,此时虽然热度衰减,但技术因素成为推动技术进行的主要驱动力,从而使得技术成熟度曲线中的技术因素占主导地位。

1.2 直流配电技术发展量化分析模型

直流配电相关的技术及设备一直是国内外研究的热点,与之相关的学术文章发表量与日俱增。通过统计分析近几十年有关直流配电技术的文章以及专利发表情况,可以对直流配电技术的发展概况有深刻了解。

直流配电技术正经历从提出到提升的阶段,受制于电力电子等技术发展,仍停留在提出和示范工程时期;而随着受限技术的突破,直流配电技术将有所发展提升,实现广泛落地应用。此外,新型电力系

统的建设不断推陈出新,政策导向和电力系统变革引起的社会关注度对于直流配电技术发展也有不可忽视的影响。因此,用高德纳曲线分析直流配电技术发展趋势是具备合理性的。

为分析直流配电技术发展过程并进行成熟度预测,可将高德纳曲线分解为技术曲线和热度曲线,对技术成熟度进行量化拟合^[24],如图 2 所示。

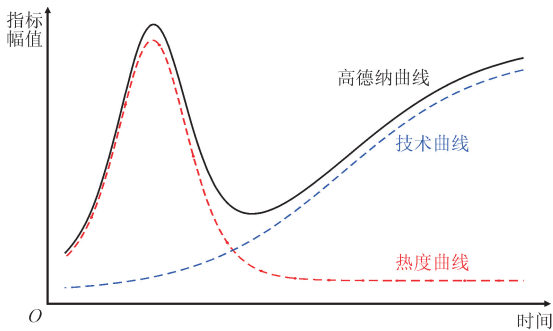


图 2 高德纳曲线分解示意图

Fig. 2 Diagram of the decomposition of the Gartner curve

$\sigma(t)$ 函数被广泛应用于分析事物的增长趋势^[15-25],其数学表达式为

$$\sigma(t) = \frac{k}{1 + e^{-p(t-t_0)}} \tag{1}$$

式中: k 为增长上限, k 越大, 曲线增长的上限越高; p 为衡量曲线变化快慢的参数, p 越大, 曲线上升速度越快, 坡度越陡; t_0 为增长的起始时间。

技术发展曲线能够反映技术发展趋势, 其发展阶段的特征与 $\sigma(t)$ 函数增长趋势相类似。考虑到不同技术的起步有不同的增长初始阶段, 引入技术增长参数对原 $\sigma(t)$ 函数进行修正, 使得模型更加普适化。由此, 定义技术发展曲线 $N_{\text{tech}}(t)$ 的表达式为

$$N_{\text{tech}}(t) = \frac{k}{1 + ae^{-p(t-t_0)}} \tag{2}$$

式中: a 为技术增长参数, a 越小, 表示在同一时间技术的成熟度越高, 反之亦然。

参数 k 、 p 、 a 对技术发展曲线的影响如图 3 所示。

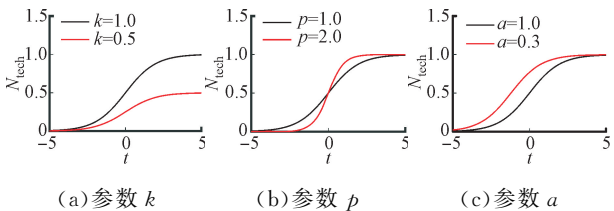


图 3 不同参数对技术发展曲线的影响

Fig. 3 Influence of different parameters on the technological development curve

由图 3(a)可见,当增长上限 k 减小时,技术发展曲线达到成熟时的最终值减小。由图 3(b)可见,当 p 增大时,曲线变化更快,上升阶段更加陡峭,所需时间缩短。由图 3(c)可见,当技术增长参数 a 减小时,曲线向左平移,同一时刻下曲线的技术成熟度水平越高。

热度曲线反映社会媒体关注度,体现发展速度的变化,而 $\sigma(t)$ 曲线的斜率能够反映增长变化程度,因此引入 $\sigma(t)$ 的导数作为热度曲线的原型。考虑到不同热度曲线的变化快慢不同,引入热度增长参数 b ,并加入基础热度值 N_0 ,对原 $\sigma(t)$ 函数进行修正,得到热度曲线 $N_{\text{hot}}(t)$ 的表达式为

$$N_{\text{hot}}(t) = \sigma'(\frac{t}{b}) + N_0 \tag{3}$$

式中: $\sigma'(t)$ 是 $\sigma(t)$ 的导数; N_0 为基础热度值; b 为热度增长参数, b 越小,表示热度增长速度越快,反之亦然。

图 4 所示为参数 k 、 p 、 a 、 b 对热度曲线的影响规律。由图 4(a)可见,当增长上限 k 减小时,热度曲线峰值减小。由图 4(b)可见,当 p 减小时,曲线变得平缓,同时峰值也有所减小。由图 4(c)可见,改变参数 a ,对曲线有平移效果。由图 4(d)可见,增大热度增长参数 b ,曲线的变化速度变缓而峰值保持不变。

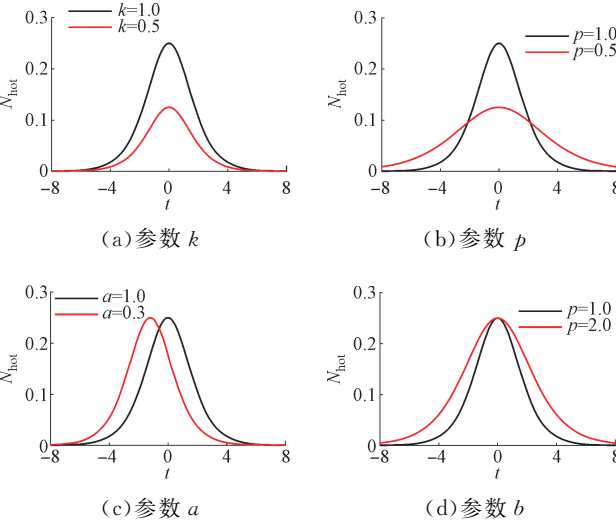


图 4 不同参数对热度曲线的影响规律

Fig. 4 Influence of different parameters on the heat curve

技术成熟度曲线为技术发展曲线和热度曲线的叠加,可写为

$$N(t) = \omega_{\text{tech}} N_{\text{tech}}(t) + \omega_{\text{hot}} N_{\text{hot}}(t) \tag{4}$$

式中: ω_{tech} 、 ω_{hot} 分别为技术发展曲线和热度曲线叠加时各自对应的权重。

综上,通过式(2)~式(4),可对技术发展成熟度曲线进行量化描述。

1.3 直流配电技术成熟度预测过程

本文设计的直流配电技术成熟度预测过程如图 5 所示。首先,选取能够描述直流配电发展趋势的相关指标,进行文献分类与检索;然后,对所得数据进行归一化处理 and 权重分配,通过最小二乘法拟合数据,预测出技术成熟度曲线;最后,对误差进行分析,验证所设计方法的准确性和合理性。

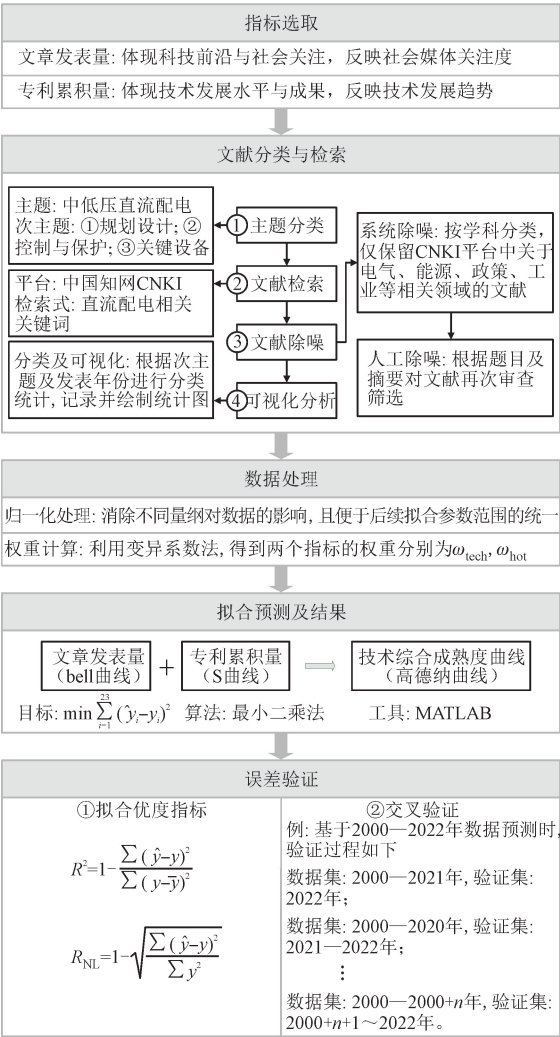


图 5 直流配电技术成熟度分析及预测过程

Fig. 5 Maturity analysis and forecast process of DC power distribution

1.3.1 指标选取

直流配电技术成熟度的预测十分抽象复杂,对于评估指标和数据的选取需要客观真实。由于直流配电是一种在技术层面基于工程的实践和创新,因此,选取能够体现技术发展前沿的学术文章发表量,

以及工程实践创新的专利累积量两大数据作为预测直流配电技术成熟度的指标。其中,文章的发表量体现出科技前沿与社会关注,能够代表科学关注情况趋势;而由知识转化成的专利累积量,则在一定程度上代表了技术发展水平。

1.3.2 文献分类与检索

在确定文章发表量、专利累积量两大指标后,就可对相关文献进行检索。在检索过程中,考虑到直流配电领域多类型关键技术以及专利申请人身份差异,对上述指标再进一步分类。直流配电领域的相关专利可按申请单位是否有高校,分为高校发表、企业发表 2 类。直流配电的相关文章则可按内容分为规划设计技术、运行控制与保护技术、关键设备 3 类,如表 1 所示。

表 1 直流配电技术相关文章分类

Table 1 Literature classification of DC power distribution

类别	关键技术	代表性文献
规划设计技术	电压等级标准与确定	[27]
	网架结构选择	[10]
	可靠性评估	[28]
	分布式电源与储能的选址定容	[29]
	接地方式	[30]
运行控制与保护技术	优化调度	[31]
	协调控制	[32]
	保护与故障隔离技术	保护策略 [33-34] 故障隔离 [35]
直流断路器	中压直流断路器	[36]
	低压直流断路器	[37]
DC/DC 换流器	非隔离型换流器	[38]
	隔离型换流器	[39]
关键设备	AC/DC 变换器	电流源型 [40] 电压源型 [40]
	直流开关接插件	[41]
	其它设备	直流适配器 [38] 直流限流器 [38]

分类后通过中国知网 CNKI 进行检索,经过多次尝试及检查验证,综合考虑文献数量、文献是否重叠、是否具有代表性等,最终得到 2000—2022 年间相关的中文文章及专利发表量,如图 6 所示。

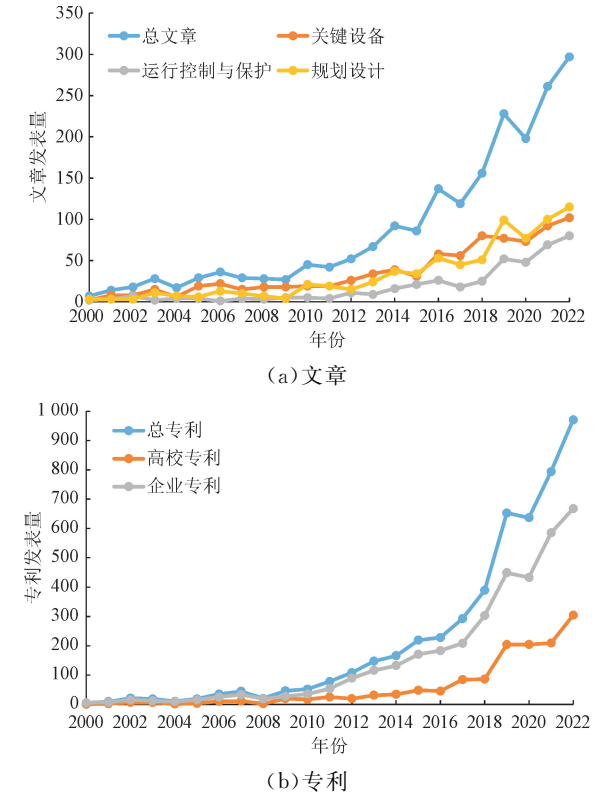


图 6 直流配电领域中文文章及专利发表量统计
Fig. 6 Statistics of Chinese articles and patents published in DC power distribution field

由此,得到检索文献数量 $y_{i,t}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, 5$ 分别对应高校专利发表量、企业专利发表量、规划设计技术文章数量、运行控制与保护文章数量、关键设备文章数量 5 个指标, $t = 1, 2, \dots, T$ 表示统计的年份数。将该 5 类指标分成专利、文章两大类,可得到反应技术的专利积累总量 $y_{\text{tech},t}$ 和反应热度的文章发表总量 $y_{\text{hot},t}$, 分别表示为

$$y_{\text{tech},t} = y_{1,t} + y_{2,t}, t = 1, 2, \dots, T \tag{5}$$

$$y_{\text{hot},t} = y_{3,t} + y_{4,t} + y_{5,t}, t = 1, 2, \dots, T \tag{6}$$

式中:下标 tech 表示以专利积累总量为代表的技术指标;下标 hot 表示以文章发表量为代表的热度指标。

1.3.3 数据处理

在预测前,为消除不同指标的量纲带来的影响,对各项数据指标进行归一化处理,表示如下

$$Z_{i,t} = \frac{y_{i,t}}{\max y_{i,t}}, i = 1, 2, \dots, 5, t = 1, 2, \dots, T \tag{7}$$

$$Z_{\text{tech},t} = \frac{y_{\text{tech},t}}{\max y_{\text{tech},t}}, t = 1, 2, \dots, T \tag{8}$$

$$Z_{\text{hot},t} = \frac{y_{\text{hot},t}}{\max y_{\text{hot},t}}, t = 1, 2, \dots, T \tag{9}$$

式中: $Z_{i,t}$ 、 $Z_{\text{tech},t}$ 、 $Z_{\text{hot},t}$ 分别为经过归一化处理后的第 i 个指标值、技术指标值和热度指标值; $y_{i,t}$ 为第 i

个指标第 t 年的值; $\max y_{i,t}$ 为第 i 个指标的最大值。

在进行考虑综合指标的直流配电技术成熟度分析时,需要将技术发展曲线和热度曲线通过权重系数进行有效叠加,形成直流配电技术成熟度曲线。利用变异系数法^[13],根据两大指标所占权重进行计算,得到反应技术的专利累积总量、反应热度的文章发表总量的平均值 $\bar{Z}$ 和标准差 S 分别为

$$\begin{cases} \bar{Z}_{\text{tech}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Z_{\text{tech},t}; S_{\text{tech}} = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (Z_{\text{tech},t} - \bar{Z}_{\text{tech}})^2} \\ \bar{Z}_{\text{hot}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Z_{\text{hot},t}; S_{\text{hot}} = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (Z_{\text{hot},t} - \bar{Z}_{\text{hot}})^2} \end{cases} \quad (10)$$

由此,可得计算指标的变异系数 V 和权重 ω 分别为

$$V_{\text{tech}} = \frac{S_{\text{tech}}}{\bar{Z}_{\text{tech}}}; V_{\text{hot}} = \frac{S_{\text{hot}}}{\bar{Z}_{\text{hot}}} \quad (11)$$

$$\omega_{\text{tech}} = \frac{V_{\text{tech}}}{V_{\text{tech}} + V_{\text{hot}}}; \omega_{\text{hot}} = \frac{V_{\text{hot}}}{V_{\text{tech}} + V_{\text{hot}}} \quad (12)$$

式(11)表示变异系数等于标准差除以平均值,式(12)则表示各指标所占权重是各指标变异系数占总变异系数之和的比例。通过式(10)~式(12)进行权重计算,为后续技术发展曲线和热度曲线的叠加提供基础。

1.3.4 拟合预测

按照 1.2 节将技术成熟度曲线分为技术发展曲线和热度曲线的介绍,在拟合预测阶段对两类曲线分别进行。在技术发展曲线预测中,将高校专利、企业专利分别预测与分析,然后叠加形成针对技术发展的预测;在热度曲线预测中,将规划设计技术、运行控制与保护技术、关键设备 3 类论文分别进行预测与分析,然后叠加形成针对热度过程的预测。最后,将式(12)计算得到的权重系数代入式(4),最终形成对直流配电技术整体的预测结果,具体过程如图 7 所示。

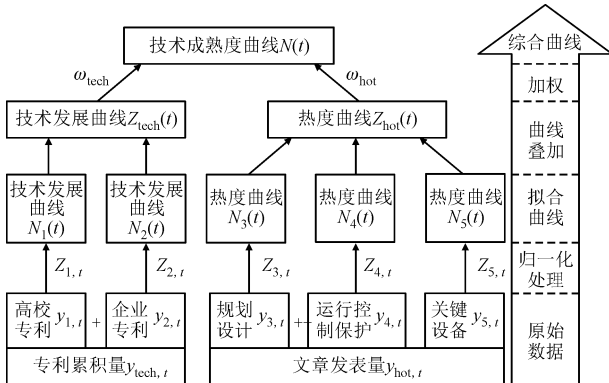


图 7 直流配电技术成熟度预测过程

Fig. 7 Process of forecasting the maturity of DC power distribution

由图 7 可以看出,本文的预测思路是由分支到主干逐层进行,并分析对应的预测结果。具体描述如下。

在拟合技术发展曲线时,得到两组专利累积量(高校/企业)数据,一组是通过文献检索和数据处理,得到的高校专利发表量和企业专利发表量的实际数据 $Z_{i,t} (i = 1, 2)$,另一组数据是将 t 代入式(2)得到的理论数据 $N_i(t) (i = 1, 2)$ 。此时式(2)中其他参数未知,利用最小二乘法进行拟合,得出满足

$$\min \sum_{t=1}^T (N_i(t) - Z_{i,t})^2, i = 1, 2 \quad (13)$$

的最佳模型参数,然后代入式(2),即可得到以时间为输入、专利累积量为输出的预测函数。因此,技术发展曲线预测函数表达式可写为

$$N_{\text{tech}}(t) = \sum_{i=1,2} N_i(t), \forall t \quad (14)$$

在预测未来某年直流配电技术专利累积量时,只需令 $t = 1, 2, \dots$ 并代入式(14),然后进行归一化还原,即可得到对应年份的预测值。

同理,将拟合热度曲线时得到的规划设计技术文章数量、运行控制与保护文章数量和关键设备文章数量的实际数据 $Z_{i,t} (i = 3, 4, 5)$,以及将 t 代入式(3)得到的理论数据 $N_i(t) (i = 3, 4, 5)$,利用最小二乘法进行拟合,可得到满足

$$\min \sum_{t=1}^T (N_i(t) - Z_{i,t})^2, i = 3, 4, 5 \quad (15)$$

的最佳模型参数,然后代入式(3),可得到以时间为输入、文章发表量为输出的预测函数。因此,热度曲线预测函数表达式可写为

$$N_{\text{hot}}(t) = \sum_{i=3,4,5} N_i(t), \forall t \quad (16)$$

在预测未来某年直流配电技术文章发表量时,只需令 $t = 1, 2, \dots$ 并代入式(16),然后进行归一化还原,即可得到对应年份的预测值。最后再通过式(4),即可得到直流配电技术整体的预测函数。

1.3.5 误差验证

引入曲线回归中常用的拟合优度指标 R^2 ,对拟合结果的合理性进行验证。同时参考文献[26],将残差平方和与相对误差有机结合在一起,定义新指标 R_{NL} 以描述更加普遍的非线性回归拟合优度。 R^2 、 R_{NL} 的表达式分别如下

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\hat{y} - y)^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \quad (17)$$

$$R_{\text{NL}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (\hat{y} - y)^2}{\sum y^2}} \quad (18)$$

式中： $\hat{y}$ 、 y 分别为指标的预测值和实际值； $\bar{y}$ 为原始数据的平均值。 R^2 、 R_{NL} 越接近于 1，表示曲线的拟合优度越好。

此外，借鉴机器学习领域验证模型参数常用的交叉验证方法^[42]，对所得的预测曲线进行拟合效果评估。验证过程为：已知数据跨度为 2000—2022 年，选定 2000—2021 年数据进行拟合预测，用 2022 年数据进行验证；选定 2000—2020 年数据进行拟合预测，用 2021—2022 年数据进行验证；依此类推，最后一次选定 2000—2000+ n 年数据进行拟合预测，用 2000+ n +1—2022 年数据进行验证。其中， n 表示所选取的用于验证的最小数据集长度，根据具体算例进行合理选取。

2 直流配电技术成熟度预测结果

本文对直流配电技术发展趋势的预测包括两方面内容，一是对直流配电技术的整体发展趋势进行评估分析，二是从专业的角度对直流配电领域关键技术的发展趋势进行评估分析。

2.1 以专利累积量为基础的技术发展曲线分析

近 20 年来，直流配电技术的发展有着明显上升趋势。在预测直流配电技术成熟度时，选取 2000—2022 年相关专利累积量作为技术发展趋势预测指标，对统计数据按式(5)进行归一化处理，在给定合理区间内确定局部最优解来拟合技术曲线，并以申请人身份的不同，将专利分为高校发表专利、企业发表专利，利用技术发展曲线预测模型分别对高校、企业发表的专利发表情况进行分析及预测。为提取并对比专利累积量的实际特征，对于归一化拟合后的数据进行还原，得到的结果如图 8 所示。

考虑到技术发展成熟后仍可能存在少量专利发表的情况，因此，将专利累积量达到成熟期最终累积量的 99% 作为判断技术发展成熟的标志^[15]。从图 8 中技术发展预测曲线的趋势可见，高校专利发展在 2051 年中旬达到成熟，而企业专利发展则早于高校，即在 2046 年中旬达到成熟。企业专利的成熟时间早于高校专利，说明在技术发展过程中，企业在技术水平和应用能力方面对整个直流配电技术落地应用的带动作用更加突出。相反地，高校对于直流配电领域核心关键技术的前瞻性和颠覆性创新则需要实践中反复迭代验证。综合来看，只有当核心技术创新(高校专利)和示范验证通过(企业专利)均发展到一定的成熟度，直流配电技术才进入整体成熟期。根据模型测算，其成熟时间为 2050 年。

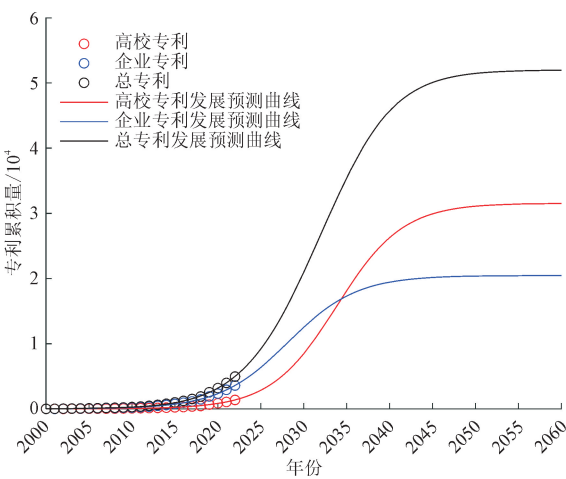


图 8 基于高校及企业专利累积量的技术发展预测曲线
Fig. 8 Technology development forecast curve based on patent accumulation of universities and enterprises

2.2 以文章发表量为基础的热度曲线分析

选取 2000—2022 年相关文章发表量作为科学关注的趋势预测指标，对统计数据进行归一化处理，采用最小二乘法在给定区间内确定局部最优解来拟合热度曲线，并将中文文章的内容分为规划设计技术、运行控制与保护技术、关键设备 3 类。分别对直流配电技术不同方向技术文章的发表量进行拟合预测，并对于归一化拟合的数据进行还原，得到的结果如图 9 所示。

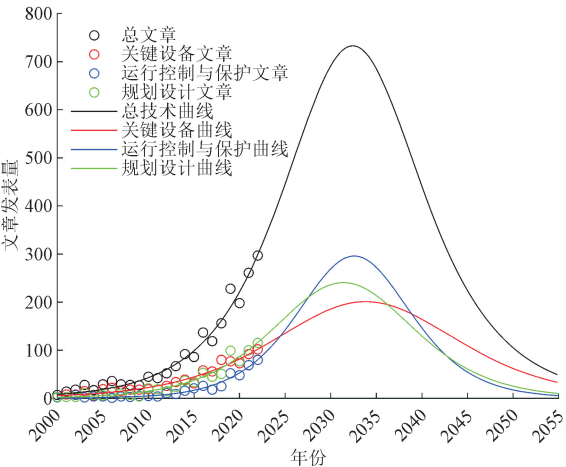


图 9 基于文章发表量的热度预测曲线
Fig. 9 Hotness forecast curve based on paper publication

将文章发表量达到极大值点作为判断热度到达顶峰的标志，具体通过对热度预测曲线求导为 0 得到。从图 9 中基于文章发表量热度预测曲线的发展趋势可见，国内对于直流配电技术的科学关注热潮将于 2032 年中旬达到顶峰；而对于直流关键设备、直流配电运行与控制保护技术、直流配电规划设计

技术 3 类关键技术领域,其达到热度顶峰的时间分别为 2033、2032、2031 年。

综上可知,直流规划设计技术最先达到关注度顶峰,运行控制与保护技术其次,直流关键设备的科学关注热潮则最晚。这说明在直流配电技术的发展过程中,规划设计技术是研究人员首先关注的问题。客观而言,在直流设备领域仍然存在设备造价昂贵、直流开断理论亟需突破等现实瓶颈问题,仍需政策的持续支持和相关科研人员的持续努力攻关。

2.3 考虑综合指标的直流配电技术成熟度分析

根据式(10)~式(12),计算出中文专利累积量、文章发表量两大指标的权重分配,如表 2 所示。

表 2 中文专利累积量和文章发表量指标的权重分配

Table 2 Weight allocation for Chinese patent accumulation and paper publication

指标	平均值	标准差	变异系数	权重
专利累积量	0.214 2	0.288 8	1.348 0	0.580 3
文章发表量	0.298 9	0.291 4	0.975 1	0.419 7

将基于专利累积量的技术发展预测曲线、基于文章发表量的热度预测曲线通过标准化处理和加权叠加,可得到直流配电技术发展的成熟度预测曲线,如图 10 所示。

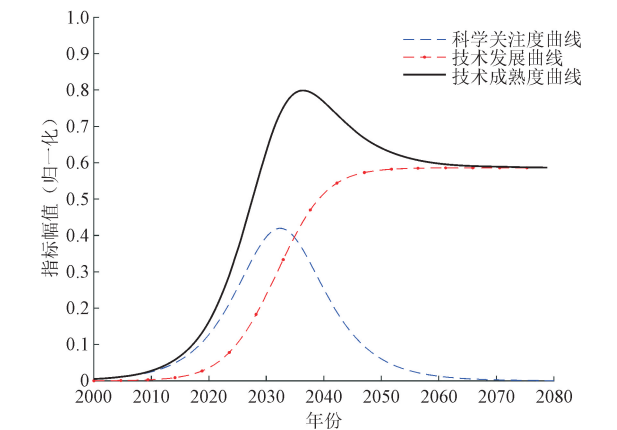


图 10 直流配电技术发展成熟度预测曲线
Fig. 10 Maturity forecast curve of DC power distribution

由图 10 可见,直流配电技术的发展至成熟将经历启动、快速爬升、达到顶峰、下降并趋于平稳 5 个阶段。目前,直流配电技术的发展正处于快速上升阶段,约在 2032 年达到科学关注研究热潮的顶峰,并在 2060 年左右达到技术成熟,之后进入稳定发展阶段,相关专利和文章的发表增速将放缓。

然而,与人工智能、区块链技术等新兴技术的发展趋势相比,直流配电技术成熟度曲线的下降部分并不明显,这是由直流配电技术的特殊性所决定的。直流配电在国内外已有几十项示范工程^[43],具有专业化、发展稳定、依托工程等特点,因此直流配电技术发展及热度水平发展趋势较为统一,并不会因剧烈的社会热潮而产生空前泡沫期。

2.4 国内外专利及文章预测结果比较

此外,本文基于 Web of Science 平台检索获得英文文章及专利数据,采用技术发展成熟度预测模型,得到了以英文文章、专利作为指标的技术发展预测和热度预测结果。

2.4.1 以专利累积量为基础的技术发展曲线对比

选取 2000—2022 年英文专利累积量作为技术发展趋势预测指标,在给定合理区间内确定局部最优解拟合技术曲线,将中文专利预测结果作为参考,得到的国内外技术发展预测曲线如图 11 所示。

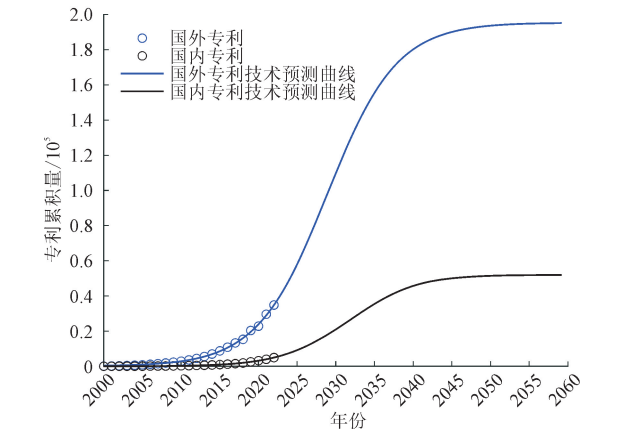


图 11 中英文专利累积量技术发展预测曲线
Fig. 11 Technology development forecast curve of Chinese and English patent accumulation

由图 11 可见,以专利累积量作为指标,国内技术发展在 2050 年初达到成熟,而英文专利发展略早于国内,即在 2049 年中旬达到成熟,两者具有相类似的预测结果。

2.4.2 以文章发表量为基础的热度曲线对比

选取 2000—2022 年英文文章发表量作为科学关注的趋势预测指标,在给定合理区间内确定局部最优解拟合技术曲线,将中文文章预测结果作为参考,得到的国内外热度预测曲线如图 12 所示。

由图 12 可见,以文章发表量作为指标,国内对于直流配电技术的科学关注热潮将在 2032 年中旬达到顶峰,而国外关注热潮将在 2034 年达到顶峰。

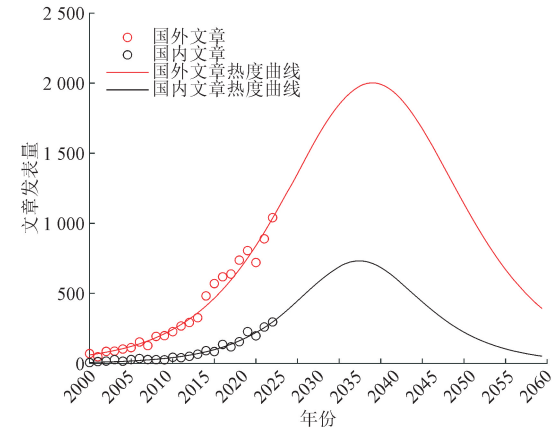


图 12 中英文文章发表量热度预测曲线

Fig. 12 Hotness forecast curve of Chinese and English article publication

2.4.3 考虑综合指标的直流配电技术成熟度对比

计算英文专利累积量、文章发表量两大指标的权重分配,如表 3 所示。将基于英文专利累积量的技术发展预测曲线、基于文章发表量的热度预测曲线通过标准化处理和加权叠加,以国内综合成熟度预测结果作为参考,得到国内外直流配电技术发展的综合成熟度预测曲线,如图 13 所示。

表 3 英文专利累积量和文章发表量指标权重分配

Table 3 Weight allocation of English patent accumulation and paper publication

指标	平均值	标准差	变异系数	权重
专利累积量	0.236 3	0.290 3	1.228 4	0.606 0
论文发表量	0.396 9	0.317 0	0.798 6	0.394 0

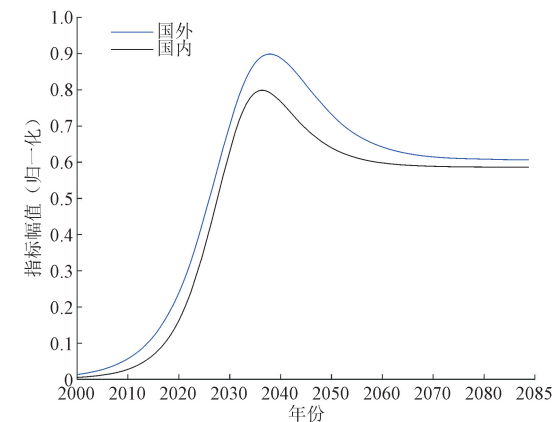


图 13 国内外直流配电技术发展成熟度预测曲线

Fig. 13 Maturity forecast curve of DC power distribution technology at home and abroad

从图 13 中的成熟度预测结果可以看出,国外与国内技术成熟度预测曲线有着相似的发展趋势,即在 2032—2034 年达到科学关注研究热潮顶峰,并在 2060—2065 年达到技术成熟,之后进入稳定发展,

相关专利、文章的发表增速放缓。

3 结果分析及验证

3.1 拟合优度验证

为进一步评价直流配电技术成熟度的拟合及预测结果,根据式(17)、式(18)分别计算专利累积量和文章发表量预测曲线的拟合优度,评估图 8、图 9 中 7 条曲线的拟合效果,得到的结果如表 4 所示。

表 4 专利及文章预测曲线的拟合优度评估

Table 4 Goodness-of-fit evaluation of patent and paper maturity forecast curves		
指标	R^2	R_{NL}
专利累积总量	0.999 4	0.980 8
高校专利累积量	0.996 9	0.955 8
企业专利累积量	0.999 6	0.984 0
文章发表总量	0.966 2	0.874 8
直流设备文章发表量	0.943 4	0.852 8
控制与保护文章发表量	0.943 1	0.818 2
直流配电规划文章发表量	0.932 1	0.814 8

由表 4 可知,拟合优度指标 R^2 在 0.932 1 ~ 0.999 6 区间,新定义的拟合优度指标 R_{NL} 在 0.814 8 ~ 0.984 0 区间,整体来说两项的数值均接近于 1,表明拟合效果良好。

3.2 交叉验证

根据 1.3.5 节描述的验证过程,进一步进行交叉验证,选取用于验证的最小数据集长度 n 为 14。图 14 展示了针对专利累积总量、文章发表总量预测曲线的 8 次交叉验证结果,用误差棒表示 2015—2022 年预测数据中的最大误差范围。考虑到数据集过小会影响拟合精度,选定的最小预测集为 2000—2014 年间的 15 个原始数据。

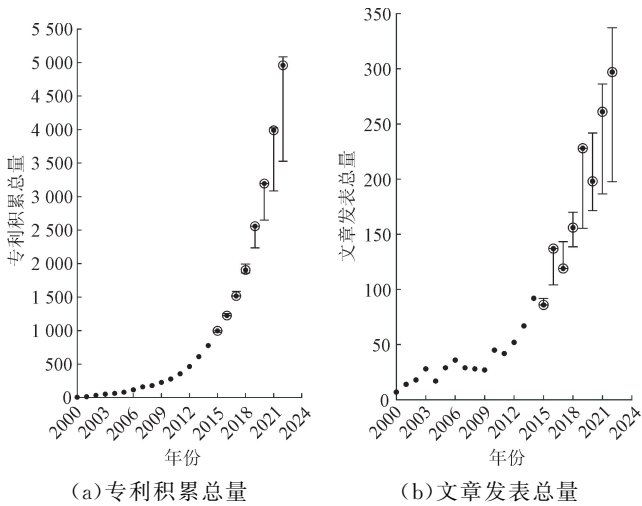


图 14 交叉验证预测效果

Fig. 14 Forecast effect of cross-validation

由图 14 可见,离预测数据集越近的年份(2015 年)误差越小,离预测数据集越远的年份(2021、2022 年),所得预测数据与实际值误差较大。综合来看,交叉验证所得结果在相应趋势的增长区间内,即误差的上下边界仍符合增长趋势。同时,由于数据本身存在统计误差、有浮动范围、受实际情况影响(如 2020 年文章发表量受疫情影响较 2019 年有所降低)等因素,可以认为本文拟合的预测曲线能够满足要求,有较好的精度和合理性。

3.3 文献数量对技术成熟度的影响分析

由技术成熟度模型可知,专利及文章是衡量技术发展及关注热度趋势的指标。以专利累积量为例,假定 2023 年中文专利发表量分别是 2022 年专利发表量的 0.3、2、4、6 倍,得到不同情况下直流配电技术发展成熟度预测结果,如图 15 所示。

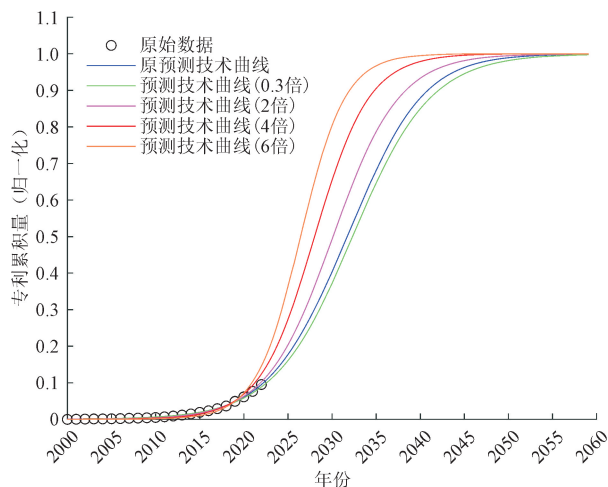


图 15 专利数量增长对技术成熟度的影响

Fig. 15 The influence of patent increasing on technology maturity

若 2023 年中文专利发表量是 2022 年专利发表量的 2 倍,则相较于原预测结果,成熟时间提前 2.8 a;若 2023 年中文专利发表量是 2022 年专利发表量的 4 倍,则成熟时间提前 7.9 a。这说明无论是驱动政策的出台,还是流向示范工程的投资,均可以推动该领域的研究升级和技术进步,具体表现为论文、专利等研究成果数量的增加,进而推动技术成熟时间提前,从而更好地支撑“双碳”目标的实现。

4 结 论

本文通过构建基于技术成熟度曲线的技术发展预测模型,形成数据检索处理、变量分析、趋势预测的完整评价体系,为直流配电技术发展阶段评估和

成熟度预测提供方法。得到的主要结论如下。

(1)直流配电技术中,规划设计,运行控制与保护、关键设备 3 类不同的关键技术具有不同的发展趋势和技术成熟度时间表,直流设备关键技术瓶颈的突破及经济性的提升,是影响整个直流配电技术发展和成熟的核心要素,需要持续关注。

(2)通过利用技术成熟度曲线对直流配电技术的分析,表明我国直流配电技术科学研究热潮将在 2030—2040 年达到顶峰,在 2060 年前后实现稳定发展,其与我国关于 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的时间表完全一致。

(3)国外与国内的直流配电技术成熟度预测曲线有着相似的发展趋势,即在 2032—2034 年达到科学关注研究热潮顶峰,并在 2060—2065 年达到技术成熟并稳定发展。

(4)国家科技政策和产业政策将通过文献与专利等成果数量的增加影响技术发展趋势,通过设立专项科技攻关项目,支持先进技术的示范应用等途径,能够将直流配电技术成熟时间提前,从而更好地支撑新型电力系统的建设和“双碳”目标的实现。

参考文献:

- [1] 段双明,郭阳,任俊,等.含分布式电源的低压直流配电网研究综述[J].东北电力大学学报,2015,35(6):1-7.
DUAN Shuangming, GUO Yang, REN Jun, et al. Review of DG integrated low voltage DC distribution network[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(6): 1-7.
- [2] 段建东,魏朝阳,周一,等.未来直流配电网电压等级序列研究[J].中国电机工程学报,2018,38(12):3538-3545.
DUAN Jiandong, WEI Zhaoyang, ZHOU Yi, et al. Research on voltage level sequence of future DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3538-3545.
- [3] 张建华,曾博,张玉莹,等.主动配电网规划关键问题与研究展望[J].电工技术学报,2014,29(2):13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [4] 张永明,丁宝,傅卫东,等.基于直流配电与直流微网的电气节能研究[J].电工技术学报,2015,30(S1):389-397.

- ZHANG Yongming, DING Bao, FU Weidong, et al. Electrical energy conservation based on DC distribution and DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 389-397.
- [5] 李露露, 雍静, 梁仕斌, 等. 民用低压直流供电系统保护综述 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 133-143.
- LI Lulu, YONG Jing, LIANG Shibin, et al. A review of civil low voltage DC distribution system protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 133-143.
- [6] 李栋. 绿色金融如何助力实现碳中和 [J]. 债券, 2021(3): 46-49.
- LI Dong. How green bond initiatives help secure the carbon neutrality [J]. China Bond, 2021(3): 46-49.
- [7] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.
- XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802-6813.
- [8] 马钊, 焦在滨, 李蕊. 直流配电网络架构与关键技术 [J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3348-3357.
- MA Zhao, JIAO Zaibin, LI Rui. Network structures and key technologies of DC distribution systems [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3348-3357.
- [9] 罗飞, 焦在滨, 马钊, 等. 直流配电网故障分析和继电保护综述 [J]. 供用电, 2018, 35(6): 1-11.
- LUO Fei, JIAO Zaibin, MA Zhao, et al. Review of fault analysis and relay protection of DC distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 1-11.
- [10] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.
- SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [11] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
- MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [12] 曾嵘, 赵宇明, 赵彪, 等. 直流配用电关键技术研究与应用展望 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6790-6801.
- ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6790-6801.
- [13] 石雪靖. 能源互联网技术成熟度等级评估 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 129-134.
- SHI Xuejing. Evaluation on technology readiness levels of energy internet [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3): 129-134.
- [14] 李亚男, 雷二庆. 技术创新态势评估工具: Hype Cycle [J]. 科研管理, 2015, 36(S1): 47-53.
- LI Yanan, LEI Erqing. Hype Cycle: a tool to evaluate technology maturity [J]. Science Research Management, 2015, 36(S1): 47-53.
- [15] 马志云, 许雅洁, 杨芳娟, 等. 新兴技术成长阶段动态监测方法研究 [J]. 科学学研究, 2020, 38(6): 976-989.
- MA Zhiyun, XU Yajie, YANG Fangjuan, et al. Research on dynamic monitoring method of emerging technology growth stage [J]. Studies in Science of Science, 2020, 38(6): 976-989.
- [16] STEINERT M, LEIFER L. Scrutinizing Gartner's hype cycle approach [C]//PICMET 2010 Technology Management for Global Economic Growth. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-13.
- [17] 杨超, 孟显印. 基于炒作周期曲线的新兴技术态势及政策系统供给研究 [J]. 中国科技论坛, 2021(3): 17-27.
- YANG Chao, MENG Xianyin. Research on the development trend and policy system construction of emerging technologies based on hype cycle [J]. Forum on Science and Technology in China, 2021(3): 17-27.
- [18] 张学义, 范阿翔. 基于技术成熟度曲线的人工智能审视 [J]. 科学技术哲学研究, 2019, 36(2): 14-19.
- ZHANG Xueyi, FAN Axiang. On artificial intelligence from the perspective of hype cycle [J]. Studies in Philosophy of Science and Technology, 2019, 36(2): 14-19.
- [19] JARVENPAA H M, MAKINEN S J. An empirical study of the existence of the Hype Cycle: a case of DVD technology [C]//2008 IEEE International Engineering Management Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [20] FENN J, RASKINO M. Mastering the hype cycle: how to choose the right innovation at the right time [M]. Boston: Harvard Business Press, 2008.
- [21] FENN J, LEHONG H. Hype cycle for emerging

- technologies, 2011 [EB/OL]. (2011-07-28) [2023-01-25]. <https://www.gartner.com/en/documents/1754719>.
- [22] BLOSCHE M, FENN J. Understanding Gartner's hype cycles [EB/OL]. (2018-08-20) [2023-03-16]. <https://www.gartner.com/en/documents/3887767>.
- [23] O'LEARY D E. Gartner's hype cycle and information system research issues [J]. *International Journal of Accounting Information Systems*, 2008, 9(4): 240-252.
- [24] DEDEHAYIR O, STEINERT M. The hype cycle model: a review and future directions [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2016, 108: 28-41.
- [25] HOSMER D W Jr, LEMESHOW S, STURDIVANT R X. *Applied logistic regression* [M]. 3rd ed. Hoboken; Wiley, 2013.
- [26] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨 [J]. *中国卫生统计*, 2002, 19(1): 9-11.
- ZHANG Shiqiang. Approach on the fitting optimization index of curve regression [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2002, 19(1): 9-11.
- [27] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(13): 3391-3403.
- SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(13): 3391-3403.
- [28] LIANG Dong, QIN Chaoyun, WANG Shuyuan, et al. Reliability evaluation of DC distribution power network [C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 654-658.
- [29] 饶宇飞. 分布式电池储能系统优化配置与调度技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [30] 李蕊, 罗飞, 焦在滨. 中压直流配电系统接地方式研究 [J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2594-2603.
- LI Rui, LUO Fei, JIAO Zaibin. Grounding mode research of MV DC distribution system [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2594-2603.
- [31] 权然, 金国彬, 陈庆, 等. 源网荷储互动的直流配电网优化调度 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(2): 41-50.
- QUAN Ran, JIN Guobin, CHEN Qing, et al. Optimal dispatching of DC distribution network based on source-grid-load-storage interactions [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(2): 41-50.
- [32] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述 [J]. *电力工程技术*, 2021, 40(2): 59-67.
- WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(2): 59-67.
- [33] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(19): 3114-3122.
- XUE Shimin, CHEN Chaochao, JIN Yi, et al. A research review of protection technology for DC distribution system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [34] 高淑萍, 吕宇星, 宋国兵, 等. 利用改进变分模态分解突变能量的直流配电网保护方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(5): 159-170.
- GAO Shuping, LÜ Yuxing, SONG Guobing, et al. A DC distribution network protection method based on improved VMD and abrupt energy [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(5): 159-170.
- [35] 张章, 胡源, 罗涛, 等. 中压直流配电系统保护技术研究综述 [J]. *电测与仪表*, 2020, 57(23): 109-118.
- ZHANG Zhang, HU Yuan, LUO Tao, et al. Review on research of protection technology for medium voltage DC distribution system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(23): 109-118.
- [36] PEI X, CWIKOWSKI O, VILCHIS-RODRIGUEZ D S, et al. A review of technologies for MVDC circuit breakers [C]//IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 3799-3805.
- [37] 朱金保. 从应用场所需求谈低压直流断路器 [J]. *电器与能效管理技术*, 2019(22): 23-29.
- ZHU Jinbao. Discussion on low voltage DC circuit breakers from application field requirements [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2019(22): 23-29.
- [38] 徐旒旒, 刘海涛, 熊雄, 等. 低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3986-4000.
- XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3986-4000.
- [39] 赵彪, 安峰, 宋强, 等. 双有源桥式直流变压器发展与应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 288-298.
- ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Develop-

ment and application of DC transformer based on dual-active-bridge [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (1): 288-298.

[40] 吴盛军,王益鑫,李强,等. 低压直流供电技术研究综述 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 1-8.

WU Shengjun, WANG Yixin, LI Qiang, et al. Review of low voltage dc power supply technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 1-8.

[41] 章晋龙,史述青,杨海森,等. 国内外直流配电网技术发展研究综述 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(S1): 93-98.

ZHANG Jinlong, SHI Shuqing, YANG Haisen, et al. Overview of development of DC power distribution network [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3 (S1): 93-98.

[42] 范永东. 模型选择中的交叉验证方法综述 [D]. 太原: 山西大学, 2013.

[43] 姜淞瀚,彭克,徐丙垠,等. 直流配电系统示范工程现状与展望 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 219-231.

JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231.

(编辑 李慧敏 刘杨)