

关于新型电力系统部分特点的思考

高志远¹, 张晶¹, 庄卫金¹, 张占奎¹, 孙芊², 赵磊³, 李壮⁴

(1. 中国电力科学研究院(南京), 江苏 南京 210003; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000;
3. 新疆电力交易中心有限公司, 新疆 乌鲁木齐 100031; 4. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要:新型电力系统建设是我国电力行业的重大转型,其需求来源于经济社会发展,其实现依赖于电力系统运行机理的改进。从近10年电力系统的发展历史和阶段性目标分析出发,基于“双碳”目标,对新型电力系统的电源构成、特点及运行模式进行逆向推理和分析,进而分析新运行模式下的部分关键技术需求。指出:为了实现“双碳”目标,电力系统电源构成必须进行巨大调整,特别是在2030年之后;在新型电力系统中,发电侧将以新能源为主体,用户侧将出现大量产销者并呈现大量分布自治的形态,能源互联网将成为新型电力系统的基础支撑,电网调度将主要基于市场化机制实现;新型电力系统的建设在电力电量平衡、系统安全、有源配电网管控、新能源发电和并网、电力交易和调度等方面迫切需要相关创新技术的支撑。

关键词:新型电力系统;碳中和;碳达峰;能源互联网;运行机理;信息与通信技术

中图分类号:TM619

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209007

0 引言

为了保障碳达峰和碳中和“双碳”目标的实现以及能源的可持续发展,近年来,以新能源为主体的新型电力系统的建设日益加快。高比例新能源的渗透对电力系统产生了多方面的影响,国内外研究者已开展了较多研究。文献[1]系统总结高比例可再生能源电力系统中的重要科学问题和理论框架。文献[2-3]分别对高比例新能源渗透下电力系统的惯量变化及其应对技术、交直流混联配电网的优化运行与安全保障等进行分析和总结。高比例新能源渗透给电力系统带来的技术问题是世界性的,但是由于各国资源禀赋和电力体制机制不同,各国面临的具体问题也有所差异。欧洲电力系统的发展须结合欧洲统一电力市场的建设来看,不断完善跨地区跨国互联电网及其市场体系是欧洲跨地区新能源消纳的基础^[4-5],而较高的灵活性调节能力是新能源消纳的重要支撑。美国能源结构显著不同于我国,天然气是美国电力结构的核心,美国很多州在需求响应、跨地区交易、批发、零售市场机制等方面的发展都已相对成熟^[6],但其电价波动有时也较大(如2019年8月因天气原因导致的德州超高电价)。同时,随着近期天然气供应的不足,欧美电力系统,特别是欧洲电力系统,均承受较重的压力。

关于新型电力系统的内涵、关键技术、发展阶段等已开展了较多研究。文献[7]对我国“30·60”目标

下的碳排放量进行预测。文献[8]对4种不同控制目标场景下我国的能源低碳转型发展的路径、关键技术、成本等情况进行分析。文献[9]对“双碳”目标下新型电力系统的特征和转型路径进行研究。相关研究还有很多,但尚缺乏内在的主线将其贯通,形成深入开展新型电力系统各方向研究的基础共识和工具。

作为外在约束的碳排放对电力系统有重要影响,而决定新型电力系统特征和发展路径的更重要因素是系统内在机理作用,为此,本文从电力系统的发展历史和现状梳理出发,通过对碳排放目标的分析,推演新型电力系统的构成及其特点,进而分析新型电力系统的内在运行模式,并由此分析关键技术需求。

1 电力系统的发展历史和目标

对于电力系统的发展历史,从不同的角度可以将其划分为不同的阶段。图1展示了从2010年“加强智能电网建设”提出以来,电力系统不同发展阶段的建设内容和核心目标。

图1中的建设内容和核心目标具有阶梯型和延展性的特点。例如:智能电网到2020年才完成“引领提升”,且成为后续发展阶段的基础支撑,特高压建设和智能化应用也是电网建设的长期目标^[10-11];以电网业务应用拓展为目标的全球能源互联网已成为国家电网公司的长期战略目标;清洁化的要求在智能电网建设阶段就已经提出,市场化随着电力体制改革而长期推进。当前,基于我国电力体制改革和生态文明建设的持续推进,清洁化和市场化成为经济社会对未来新型电力系统建设的2个核心要求。“双碳”目标的提出使清洁化的发展方向更加

收稿日期:2022-04-05;修回日期:2022-08-12

在线出版日期:2022-09-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目(PD71-20-013)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(PD71-20-013)

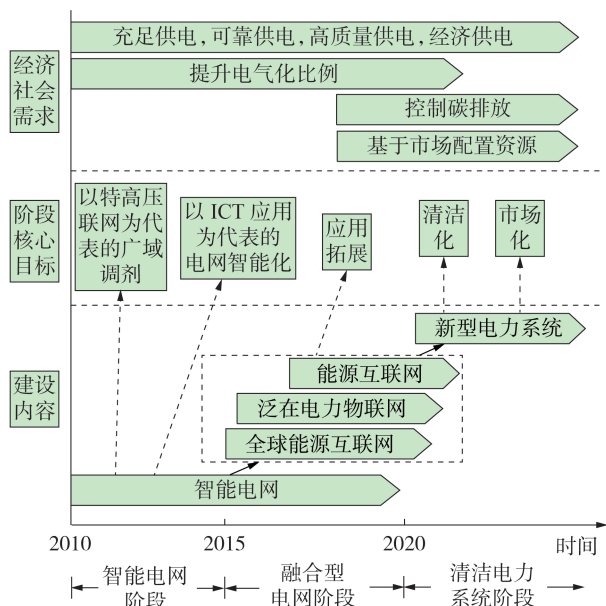


图1 自2010年来我国电力系统发展历程和阶段核心目标
Fig.1 Development process and stage core objectives of China's power system from 2010

明确。

2 碳排放约束和新型电力系统电源的构成

2.1 碳排放约束

对于我国实际的碳排放量及其未来预测,已有较多研究,但结果差异较大^[7,12-13]。为厘清“双碳”目标对电力工业的具体约束,基于我国“双碳”目标和国家统计局数据^[14],结合有关规划及相关数据^[1,8,15-17],对我国未来一次能源消费和碳排放情况进行分析计算,结果如表1^[1,8,14-17]所示。表中:一次电力消费指计入一次能源的风、光、水、核能发电量;碳排放量的计算公式如式(1)所示;能源消费量、能源消费占比的计算公式如式(2)所示。由表可见,未来我国碳排放量的下降主要是依靠一次电力消费占比的迅速、持续提高。

碳排放量的计算公式^[18]为:

$$C_j = \sum A_{i,j} E_{i,j} \quad (1)$$

式中: C_j 为第 j 年的全社会总碳排放量; $A_{i,j}$ 为第 j 年第 i 种化石能源消费量; $E_{i,j}$ 为第 j 年第 i 种化石能源折算标准煤后的参考排放系数,测算中煤炭、石油、天然气的 $E_{i,j}$ 分别取为2.7725、2.6、2.4,一次电力消

费的 $E_{i,j}$ 均取为0。需要说明的是,本文所计算的碳排放数据不包括碳汇。

对于已发布实际数据年份(记为第1年)和已有明确规划数据年份(记为第 d 年,即当前年之后的第 $d-1$ 年)之间年份的能源消费量或消费占比,采用如式(2)所示的等增长率模式进行估算。

$$V_k = V_1 \left(\frac{V_d}{V_1} \right)^{\frac{k-1}{d-1}} \quad k=2, 3, \dots, d-1 \quad (2)$$

式中: V_k 为当前年之后第 $k-1$ 年的能源消费量或消费占比; V_1 为当前年已经确定的能源消费量或消费占比; V_d 为当前年之后第 $d-1$ 年已经在规划中或权威研究中确定的能源消费量或消费占比。

在暂不考虑技术突破和其他突发事件的情况下,以相关确定性数据^[2,8,15-17]为目标,按照年度等增长率的基本原则,绘制我国一次能源消费和碳排放量的总体趋势(实际演变情况并不完全按照等增长率发展),如附录A图A1所示。由图可见,在既有规划目标下,风、光、水等绿色能源将逐步成为一次能源消费的主力,碳排放量将在缓慢增长达峰后从2030年开始迅速下降,这些外在约束将直接决定电力系统的发展方向。

2.2 新型电力系统的构成

2018—2020年我国电力行业的碳排放量分别为 4.141×10^9 、 4.227×10^9 、 4.309×10^9 t^[19],分别占各年总碳排放量的38.01%、37.92%、38.16%,即使电力行业碳排放量占比维持不变,目前的电力构成也难以满足2030年和2060年的碳排放要求。同时,随着经济社会的发展,全社会总用电量和终端能源中电能占比还会不断提升。每年的碳排放约束与电力系统构成存在如式(3)所示的关系。

$$\sum B_{j,s} A_{j,s} E_{i,j} \leq C'_j < C_j \quad (3)$$

式中: $B_{j,s}$ 为第 j 年第 s 种电能的发电量; $A_{j,s}$ 为第 j 年第 s 种电能的发电能耗(例如煤耗、气耗)折算为标煤的数值; C'_j 为第 j 年允许的电力行业最大碳排放量。

基于中电联发布的数据^[19],以有关规划及相关数据^[2,8,15-17]为远景目标,结合碳排放约束,对我国未来电力系统的需求和电力系统电源构成情况进行计算分析,结果分别如表2^[1,15,17,19-20]和表3^[8,19]所示。

由表2和表3可见,“双碳”目标和相关规划决定

表1 我国一次能源消费和碳排放情况

Table 1 Primary energy consumption and carbon emission condition in China

年份	一次能源消费总量/t	煤炭消费占比/%	石油消费占比/%	天然气消费占比/%	一次电力消费占比/%	碳排放量/t
2020	4.980×10^9	56.80	18.90	8.40	15.9	1.1294×10^{10}
2025	5.448×10^9	53.29	15.48	11.22	20.0	1.1710×10^{10}
2030	5.960×10^9	50.00	10.00	15.00	25.0	1.1957×10^{10}
2050	5.000×10^9	11.00	9.00	10.00	70.0	3.8950×10^9
2060	4.600×10^9	8.30	8.00	3.70	80.0	2.4240×10^9

表 2 对我国未来电力系统的经济社会需求

Table 2 Economic and social demands to China's future power system

年份	全社会用电量 / (kW·h)	全口径发电量 / (kW·h)	电能终端消费的比例 / %	非化石能源发电量占比 / %
2020	7.52140×10^{12}	7.62640×10^{12}	28.0	33.87
2025	9.50000×10^{12}	9.63260×10^{12}	30.4	41.15
2030	1.02345×10^{13}	1.03774×10^{13}	33.0	50.00
2050	1.37859×10^{13}	1.39784×10^{13}	55.0	73.99
2060	1.60000×10^{13}	1.62234×10^{13}	70.0	90.00

表 3 我国未来电力系统的主要电源构成及碳排放量

Table 3 Main power source composition and carbon emission of China's future power system

年份	煤电发电量 / (kW·h)	水电发电量 / (kW·h)	风电发电量 / (kW·h)	光伏发电量 / (kW·h)	核电发电量 / (kW·h)	燃气发电量 / (kW·h)	煤耗 / $[g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	电力行业碳排放量 / t
2020	4.6296×10^{12}	13 553	4.665×10^{11}	2.6110×10^{11}	3.662×10^{11}	2.525×10^{11}	304.9	4.309×10^9
2025	4.6591×10^{12}	13 753	9.035×10^{11}	1.6136×10^{12}	5.579×10^{11}	2.461×10^{11}	299.0	4.235×10^9
2030	4.6888×10^{12}	13 957	1.750×10^{12}	1.1931×10^{12}	8.500×10^{11}	2.398×10^{11}	293.2	4.163×10^9
2050	6.0000×10^{11}	14 800	5.400×10^{12}	3.1000×10^{12}	2.350×10^{12}	3.900×10^{11}	271.2	1.173×10^9
2060	4.0000×10^{11}	15 140	6.100×10^{12}	4.1000×10^{12}	2.900×10^{12}	3.500×10^{11}	260.8	1.114×10^9

了我国电力工业中非化石能源会迅猛发展,这样才能满足经济社会对电力行业碳排放量的约束。

根据中电联发布的数据,在符合已发布的未来规划要求的前提下^[1,16],参考相关研究^[8,15,17],以现状与目标之间年等比例增长(或缩减)为基本方式,绘制我国未来各类发电量构成和电力行业碳排放量趋势,如附录 B 图 B1 所示。由图可见,煤电发电量在 2030 年之前稍有增长,之后将迅速下降,电源将逐步转变为以风电、光伏发电为主,核电和水电次之。这种电源构成将使电力系统在电网、负荷、储能、运行模式、技术需求等方面均发生变化。

3 新型电力系统的运行模式

3.1 内在运行模式

新型电力系统是现有电力系统朝着清洁化方向发展的形式,也是电力市场化改革、能源互联网建设的自然延伸,具有以下特点:在发电侧,以非化石能源为主,延续能源互联网的发展,大量的用户同时也是电能的生产者(产消者),分布式发电等将成为重要的电源构成,同时,由于新能源的可控性较弱,多能互补、储能将成为发电侧的重要补充;在用户侧,除传统用户外,还将存在大量的分布式发电、微电网等产销者,储能、综合能源、多能互补将普遍存在;在电网侧,面对源、荷两侧的新特点以及大量的电力电子设备(整流器、逆变器、柔性输变电设备等),迫切需要基于信息与通信技术(information and communication technology, ICT)的智能电网的支撑,基于特高压联网的广域能源协调以及面对大量产销者分散自治的精细化感知、计量、调控需求并存,能源互联网将得到大力发展;随着电力体制改革的深入发展,市场主体范围将逐步覆盖绝大多数电能生产者和消费者,电网运行很大程度上由市场交易结果决定,市

场机制是否合理直接决定了电力系统运作效率的高低和清洁化目标能否实现。

不同于单向的从发电到输变电、配用电的传统模式,未来新型电力系统的内在运行模式如图 2 所示。由图可见:以新能源为主体的电源构成决定了大量储能、用户侧互动、多能互补应用的存在;大量产销者的存在使发电方与用电方直接关联,有源配电网和微电网广泛存在;为了适应发、用电两侧构成和特性的巨大变化,传统电网逐步转变为能源互联网;面对源、网、荷特性的变化,随着电力体制改革的深入开展,大量电力生产者和消费者不再是被动的被调度对象,而是以市场主体的身份主动参与电力系统的运行,指挥电网的是以市场机制为基础的新型调度机制。

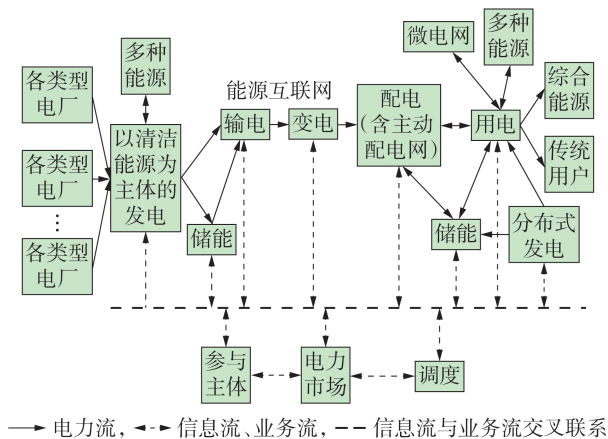


图 2 新型电力系统的内在运行模式

Fig.2 Internal operation mode of new style power system

3.2 内外部要素之间的作用机理

电力系统发展的核心矛盾是技术、经济、环境、能源等外在约束条件与电力系统运行模式之间的矛

盾。经济社会对能源的需求促使新型电力系统在源、网、荷、储等各方面不断调整和完善。但是经济社会的各项需求之间、新型电力系统内部各要素之间存在复杂的交互作用关系,如图3所示。

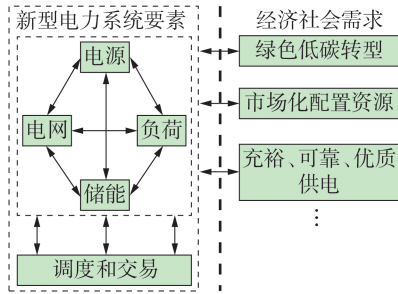


图3 新型电力系统内外部要素作用机理

Fig.3 Interaction mechanism between internal and external factors of new style power system

图3中,新型电力系统内部的各要素之间存在相互制约和支撑的作用关系,而各项经济社会需求之间通过新型电力系统也间接存在相互制约和协同作用。例如,要使新型电力系统低碳转型,就需要增加电源结构中新能源的比例,但新能源的随机性、波动性又对经济社会的充裕、可靠供电要求形成制约。因此,电力系统的绿色低碳转型需要经历一个过程,在一定的技术条件下有一个发展极限,否则会影响其他基本需求的实现。

为了深入分析图3中的作用机理,首先需要建立指标体系来表征新型电力系统各要素的状态以及对经济社会需求的满足程度。附录C表C1和表C2给出了一些可供参考的指标。此外,本文建立以下模型。

利用式(4)表示新型电力系统的状态。

$$\mathbf{X}=[x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_m] \quad (4)$$

式中: $\mathbf{X}[p]=x_p(p=1,2,\dots,m)$ 为第 p 项新型电力系统的状态,可以是某项关键指标或者若干项相关指标的加权,也可以是经过归一化处理后的无量纲映射值, m 为电力系统状态总数。

利用式(5)表示经济社会对新型电力系统的需求。

$$\mathbf{S}=[s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_n] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{S}[h]=s_h(h=1,2,\dots,n)$ 为经济社会发展对新型电力系统的第 h 项需求的满足状态, n 为所统计的经济社会对新型电力系统关键需求项数。

定义 $m \times m$ 阶矩阵 $\mathbf{I}$ 表示新型电力系统内部各要素之间的交互影响作用,其元素 $I_{pq}(p,q=1,2,\dots,m)$ 表示新型电力系统内部第 p 项状态的单位改变对第 q 项状态的影响(其值可正可负),其中对角线元素均为1,表示相应状态对自身的影响是100%。定义 $m \times n$ 阶矩阵 $\mathbf{P}$ 表示新型电力系统状态与经济社会需求满足程度间的关联关系,其元素 $P_{ph}(p=$

$1,2,\dots,m;h=1,2,\dots,n)$ 表示新型电力系统内部第 p 项状态的单位改变对经济社会第 h 项需求的贡献率。

因此,新型电力系统内外部作用机理可以从以下4个方面进行分析。

1) $\mathbf{X}[p]$ 对 $\mathbf{X}$ 的作用。

当新型电力系统的某一项要素特征发生变化时,其他要素也会受到影响。当第 p 项特征值 $X_1[p]$ 更新为 $X_2[p]$ 时,则:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{X}_p = [0 \ \cdots \ 0 \ X_2[p] - X_1[p] \ 0 \ \cdots \ 0] \\ \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_1 + \Delta \mathbf{X}_p \mathbf{I} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ 分别为要素特征变化前、后的新型电力系统状态; $\Delta \mathbf{X}_p$ 为 $\mathbf{X}_1$ 第 p 项特征值的变化量。例如,当新型电力系统中的新能源装机比例发生变化时,电网架构、负荷特征、储能构成等要素均会受到影响。

2) $\mathbf{X}[p]$ 对 $\mathbf{S}$ 的作用。

当新型电力系统的某一项要素特征发生变化时,不仅所有特征会受到影响,而且经济社会各类需求的满足程度也会受到影响,如式(7)所示。

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_1 + \Delta \mathbf{X}_p \mathbf{I} \mathbf{P} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ 分别为要素特征变化前、后的新型电力系统对经济社会各项需求的满足程度。例如,当新型电力系统中的新能源装机比例发生变化时,不仅新型电力系统的各方面特征会发生变化,而且绿色低碳、市场化交易、可靠供电、电能质量、供电充裕性等方面均会受到影响。

3) $\mathbf{S}[h]$ 对 $\mathbf{X}$ 的作用。

当某一项经济社会需求发生变化时,新型电力系统的状态会受到全面影响。当第 h 项需求的值 $s_{h,1}$ 改变为 $s_{h,2}$ 时,满足需求的新型电力系统状态未必是唯一的,其实际需满足式(8)所示的方程组。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{S} = \mathbf{S}_2 - \mathbf{S}_1 \\ \Delta \mathbf{S}[h] = s_{h,2} - s_{h,1} \\ \mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_1 + \Delta \mathbf{X} \mathbf{I} \mathbf{P} \\ \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_1 + \Delta \mathbf{X} \mathbf{I} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta \mathbf{S}$ 为经济社会需求变化前、后对经济社会需求满足程度的变化量。这里 $\mathbf{X}_1$ 和 $\mathbf{S}_1$ 是已知的目前状态,为了满足改变的第 h 项需求,通常 $\mathbf{S}_2$ 相对于 $\mathbf{S}_1$ 的各个分量均发生变化,并且 $\Delta \mathbf{X}$ 的解不是唯一的。例如,在碳减排的要求下,新型电力系统仅依靠以新能源为主体的装机结构的改变是不够的,还需要整个系统的协同改变,并且存在多样化的技术路线。

4) $\mathbf{S}[h]$ 对 $\mathbf{S}$ 的作用。

当某一项经济社会需求发生变化时,其他各项

经济社会需求也会受到影响。由式(8)可以看出,为了满足改变的第 h 项需求,新型电力系统的各要素特征均会发生变化,结果是不仅满足了第 h 项需求 $s_{h,2}$,而且使经济社会其他各项需求的满足程度(S_2 中的其他元素)均有所改变。

3.3 协同发展

新型电力系统的(技术)发展路线是一个重要且复杂的问题,需要进行持续深入的研究,以满足经济社会需求。随着时间的推移,新型电力系统将在非化石能源占比、负荷侧灵活性、储能规模、电网支撑能力等各方面都不断提升,以满足“双碳”目标、市场化程度提升和充足、可靠、优质供电的需求。在其中任何一个时刻,片面强调某一方面指标的提升均会对其他指标造成影响。从当前相关政策和趋势来看,“双碳”目标是分阶段完成的首要目标,市场化程度提升是持续推进的重要目标,充足、可靠、优质供电是长期且必须时刻满足的约束条件。

本质上,新型电力系统的发展依赖于技术的进步,从而改善矩阵 I 和 P 。

4 部分关键问题和技术要求

新型电力系统的构成和运行模式决定了其必然会遇到许多新问题和技术要求,如图4所示。

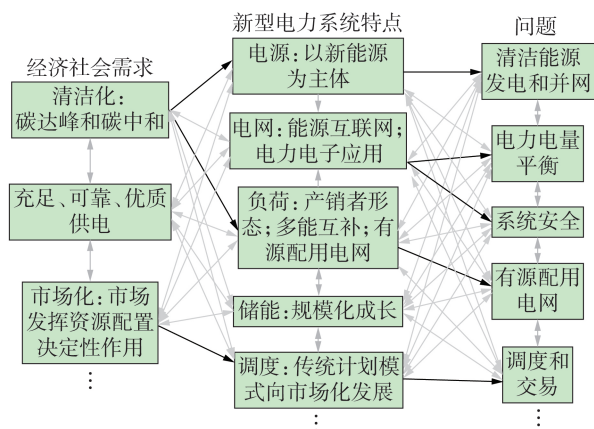


图4 新型电力系统关键需求

Fig.4 Key requirements of new style power system

图4中:各浅色箭头线显示了新型电力系统内外部各种因素之间的复杂交互作用,所涉及的问题和技术非常多,其中技术包括系统、设备、元件等不同层级;黑色箭头线显示了部分关键变化和作用关系路径。清洁化目标的直接达成手段是电源侧以新能源为主体,负荷侧通过分布式能源、多能互补等方式大量进入产消者形态。市场化目标的实现是要在清洁化的背景下继续从电力计划体制转变到市场机制。正如前述内外部要素之间的作用机理分析,上述变化将给电网运行的各方面带来新的问题和挑战,突出体现在电力电量平衡、系统安全、有源配用

电网、新能源发电和并网、电网交易和调度等方面。

4.1 电力电量平衡方面

电力电量平衡是电网供电服务的基础,对源、网、荷、储各方面,包括电力市场的发展,都有基础约束和影响。新型电力系统面临的一个突出问题是电源侧和负荷侧的巨大波动。长期来看,新能源的保证出力是较低的,新能源可能持续低出力叠加枯水期或者大发叠加丰水期,新能源的日内波动将越来越难平衡,同时负荷侧波动的挑战也将逐步增大,据测算,“十四五”期间国家电网公司经营区域内最大日峰谷差将达到 4×10^8 kW,占最高负荷的35%,并且存在和发电侧波动反向叠加的可能^[21]。

通过储能建设、需求响应、综合能源、虚拟电厂等机制可以提供一定的调节空间,但是限于技术条件和成本,这类调整空间是有限的。随着发、用电两侧构成的逐步变化,系统将需要大量的调峰、调频和备用资源,这不仅会影响经济性,而且会增加市场化推进的难度。

随着火电装机和平均出力的逐步减小,会产生如下需求:保留一定的核电、生物质电、小水电等无调节能力或不宜频繁调节的发电出力带基荷运行;加强新能源、水电和负荷预测技术的研究;通过储能、调峰能力建设等提高发电侧的调节能力;通过综合能源、虚拟电厂、需求响应、多能互补等多种方式提高负荷侧的调节能力;基于特高压联网提高大电网的广域调剂能力。

4.2 系统安全方面

系统安全也是新型电力系统发展的基本约束。新型电力系统的安全涉及电力流安全以及业务流和信息流安全。

1) 电力流安全。

相较于目前的电网,新型电力系统电力流安全所面临的主要问题包括:发电侧高比例可再生能源和负荷侧巨大的峰谷差所造成的功率差额威胁电网频率稳定^[3,22];发、用电两侧大量电力电子设备的应用以及火电等电网友好型电源的大幅减少会降低系统惯性,给电网频率、电压、功角带来影响;海量分布式能源的可观、可控性较弱,相当于电网中增加大量自调度、自控制的主体,使电网潮流复杂化,对安控设备和安防策略提出更高要求。

由此产生如下需求:不断完善电网“三道防线”;建立适应新型电力系统的新一代调度体系和自动化系统;加强弹性电力系统建设,强化其恢复能力;提升新能源发电等对电网的主动支撑能力;提升系统稳定与保护设备的技术水平;发展新型储能,除了弥补功率缺额外,新型储能还需具备有功、无功双快速支撑能力。

2) 业务流和信息流安全。

新型电力系统中ICT的应用更加广泛和深入, 监视、测量、控制、保护、调节等各项业务功能均基于ICT实现更加精细化的应用, 所面对的问题也将更加复杂: 由于对ICT过分依赖, ICT一旦出错, 造成的后果也将更加严重或难以预测; 由于应用广泛且重要, ICT容易引起关注并受到各种形式的攻击; 由图2可见, 新型电力系统具有分散性的特点, 特别是用户侧, 各类ICT的应用将增多且水准不一; 长期以来, 我国形成了电力专网通信的格局, 虽然牺牲了部分经济性, 但也带来了较高的安全可靠, 但面对技术的发展, 例如涉及频谱资源要求的5G通信应用以及与电信资源的接触、融合, 相关网络风险也将不断加大。

由此产生如下需求: 不断完善信息通信安全防护体系; 完善电网不同层级、不同业务安全区的信息通信安全规范, 特别是提高对用户侧各类信息通信接口的要求。

4.3 有源配电网方面

有源配电网的丰富是以新能源为主体的发展在负荷侧的必然结果, 这对电网总体运行形势、市场交易等方面均会产生重要影响。当前少量存在的微电网和主动配电网在新型电力系统中将广泛存在, 同时存在大量分布式能量自治单元——就地收集、存储和使用能源的微单元, 电网呈现广域互联与用户侧广泛自治, 潮流流向双向复杂的形态, 这将带来以下问题: 引起短路电流的增大、末端电压的上升和潮流的复杂化, 增加保护误动风险和配电网监控的难度, 影响供电可靠性; 增加大量谐波污染, 影响供电质量; 大量自治单元的存在可能改变传统的地区电网调度格局和模式。

由此产生如下需求: 鉴于有源配电网的广泛存在, 需要在规划、建模、多源协调控制、调度、保护等方面进行适应性发展; 加强微电网技术的研究和应用, 整合各种分布式电源、储能、负荷等; 加强主动配电网技术的研究和应用, 有效管控各类微电网、分布式电源, 提高配电网的鲁棒性、经济性和供电质量^[23]; 发展适应大范围用户侧分布自治的地区电网调度技术。

4.4 新能源发电和并网方面

如何更好地实现新能源的发电和并网, 是新型电力系统电源构成特点带来的问题, 同时这对市场交易、电网运行等各方面均会产生影响。新能源的发电和并网面临的主要问题包括: 综合成本高, 虽然风、光发电的边际成本很低, 但是从全生命周期来看, 降低综合成本仍然是长期任务, 同时由于风、光的随机性和波动性, 所需要的调峰、调频等辅助服务资源也是系统成本的一部分; 新能源并网使系统物

理特性发生改变, 给电网安全带来威胁; 由于短路容量下降以及电压支撑能力降低, 新能源机组大规模脱网和设备损坏的事故风险也将加大。

为此, 产生如下需求: 开展新能源发电技术攻关, 持续降低综合成本; 提升新能源发电的调节能力, 必要时可配套多种电源, 包括“新能源+储能”模式; 加强高比例新能源发电友好并网技术研究, 如新能源自同步发电、高电压穿越及多重故障穿越、惯量响应及一次调频、宽频带振荡分析及抑制等技术。

4.5 电力交易和调度方面

新型电力系统的建设给电力市场化改革带来了全面和深入的影响, 而市场化的发展也成为新型电力系统的一个基本内容和特点。当前, 燃煤电厂全部进入市场, 非市场化工商业用户通过电网代理购电进入市场, 我国电力市场化率迅速提高。从直接进入市场交易的工商业用户市场交易电量占全社会用电量的比例来看, 2018—2021年的年均增长率为23.97%^[19], 按此发展速度, 2025年将接近80%(甚至更高), 该发展趋势如附录D图D1所示。新型电力系统的建设是一个包括中长期和现货市场建设、调度和交易机制协调的复杂过程。随着中长期交易的曲线化和现货市场建设的推广, 电网调度将以市场交易的结果为基础, 显著不同于当前的调度模式。同时, 以新能源为主体的电源构成将给电网调度和交易带来以下问题: 成本和电价间存在矛盾, 新能源占比的提高以及随之增加的储能和调峰、备用需求, 均使系统总体成本上升, 这与经济社会需要降低电价的总体需求相矛盾; 发、用电两侧不确定性增大, 特别是高占比新能源的波动性, 均使得电力市场电价, 特别是现货市场电价, 容易发生波动, 而过大的电价波动不利于社会稳定和经济发展; 面对发、用电两侧不确定性的增大和电力市场规模的扩大, 电网调度直接进行计划调节的空间反而减少, 这对电力交易过程中的安全校核和合同执行中的电网调度提出了更高要求。

由此产生如下需要: 不断完善电力市场设计, 以适应市场主体构成和特性的变化, 特别是通过多类型市场和多交易品种、周期和方式的配合对冲市场电价的波动, 并通过市场内外部机制的配合公平分摊系统成本和风险, 抑制电价的上涨; 加强电力市场交易过程中安全校核技术的研究和应用; 发展源、网、荷、储协调互动的新型电网调度技术, 以适应新型电力系统构成的变化和电力市场的发展。

5 结论

在梳理电力系统发展历程和各阶段目标的基础上, 本文分析碳排放约束对电力系统电源构成的影

响,并分析在新的经济社会需求下新型电力系统的运行模式特点及内外部因素的交互影响作用机理,进而从电力电量平衡、系统安全、有源配电网、新能源发电和并网、电力交易和调度5个方面分析未来新型电力系统将面临的关键问题和技术要求。

在我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋下,新型电力系统的建设既是生态文明建设的需要,也是对能源安全、经济发展的挑战。后续需要基于所提出的新型电力系统内外部作用机理模型进行深入分析,进一步梳理相关核心特征指标和经济社会需求指标,分析新型电力系统核心特征指标之间的交互影响及这些特征指标与经济社会需求满足程度之间的关联关系,比较可能的不同技术路线,加强关键技术突破。此外,怎样清洁利用煤炭资源也是未来需要研究的一个重点问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [2] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术研究与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):1-11,53.
LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 1-11, 53.
- [3] 卫志农,裴蕾,陈胜,等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):85-94.
WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 85-94.
- [4] 赵腾,郭炜,李隽,等. “两个替代”趋势下的欧洲跨国电力互联互通研究[J]. 全球能源互联网,2020,3(6):632-642.
ZHAO Teng, WU Wei, LI Jun, et al. Research on cross-border power interconnection channels in Europe under trend of two replacements[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 632-642.
- [5] EPEX SPOT. Trading on EPEX SPOT[EB/OL]. (2020-04-02)[2021-09-24]. <https://www.EPEXSPOT.com/en/tradingproducts>.
- [6] PJM. PJM manual 11:energy & ancillary services market operations[EB/OL]. (2018-04-12)[2021-09-24]. <http://www.pjm.com/library/manuals.aspx>.
- [7] 方琦,钱立华,鲁政委. 我国实现碳达峰与碳中和的碳排放量测算[J]. 环境保护,2021,49(16):49-54.
FANG Qi, QIAN Lihua, LU Zhengwei. Measure carbon emission amount of China in the context of carbon peak and carbon neutrality[J]. Environmental Protection, 2021, 49(16): 49-54.
- [8] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(11):1-25.
- [9] 郭剑波. 构建新型电力系统是实现能源转型、达成“双碳”目标的有效途径[N]. 国家电网报,2021-09-07(5).
- [10] 高志远,姚建国,曹阳,等. 智能电网发展机理研究初探[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(5):116-121.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.
- [11] 鞠平,周孝信,陈维江,等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):2-11.
JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 2-11.
- [12] World Resources Institute. Climate watch[EB/OL]. (2020-12-31)[2021-09-24]. <https://www.climatewatchdata.org/>.
- [13] World Energy Agency. Data and statistics[EB/OL]. (2020-12-31)[2021-09-24]. <https://www.iea.org/>.
- [14] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. (2020-12-31)[2021-09-24]. <https://data.stats.gov.cn/>.
- [15] 国家发展改革委员会,国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030)(发改基础[2016]2795)[EB/OL]. (2017-05-17)[2021-09-24]. https://ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201705/520170517_1196878.html.
- [16] 陈向国. 周孝信:建立新一代电力系统是实现“双碳目标”的必须选择[J]. 节能与环保,2021(8):15-17.
- [17] 国家电网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望2020[EB/OL]. (2020-12-02)[2021-11-30]. <https://news.bjx.com.cn/html/20201202/1119479.shtml>.
- [18] 国家气候战略中心. 省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南[M]. 北京:中国统计出版社,2020:8-12.
- [19] 中国电力企业联合会. 中国电力企业联合会研究成果[EB/OL]. (2020-09-01)[2021-09-24]. <https://www.cec.org.cn/menu/index.html?472>.
- [20] 全国能源信息平台. 章建华:推动能源低碳转型和高质量发展[EB/OL]. (2021-06-10)[2021-09-24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1702115711741555765&wfr=spider&for=pc>.
- [21] 潘小海,梁双,张茗洋. 碳达峰碳中和背景下电力系统安全稳定运行的风险挑战与对策研究[J]. 中国工程咨询,2021(8):37-42.
- [22] 孙蓉,张诚之,陈兵,等. 规模化新能源接入下受端电网调峰方式综合评估研究[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):149-155,163.
SUN Rong, ZHANG Chengzhi, CHEN Bing, et al. Comprehensive evaluation of receiving end grid peak shaving modes under background of large-scale new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 149-155, 163.
- [23] 李芸漫,高红均,李海波,等. 考虑综合能源站柔性调控作用的配电网多阶段规划方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(1):45-54.
LI Yunman, GAO Hongjun, LI Haibo, et al. Multi-stage planning method for urban distribution network considering flexible regulation of integrated energy station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 45-54.

作者简介:



高志远

高志远(1972—),男,教授级高级工程师,硕士,通信作者,研究方向为智能电网、厂站自动化系统(E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn);

张晶(1963—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为能源互联网、智能电网、电力系统标准体系。

(编辑 王锦秀)

(下转第151页 continued on page 151)

Opportunistic maintenance decision method for power grid security and stability control device based on multi-layer stochastic optimization

OUYANG Jinxin¹, YU Li¹, JIANG Hang², YU Jianfeng¹, XIONG Jun², ZHU Kaiyang³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610094, China;

3. Power Grid Security and Stability Control Technology Branch, Guodian Nanrui Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to ensure the reliable and economical operation of security and stability control system, an opportunistic maintenance decision method based on multi-layer stochastic optimization for power grid safety and stability control device is proposed. The state transfer process of security and stability control device in operation is analyzed. Considering the correlation between internal hardware of security and stability control devices, security and stability control devices, security and stability control device and primary equipment, the functional correlation, economic correlation and random correlation of security and stability control device are coordinated from three layers. Then the nested compound objective function is constructed to establish the multi-layer opportunistic maintenance decision model of security and stability control device. An example is given to show that the model can provide the optimal maintenance strategy of the security and stability control device, improve its maintenance benefit, and realize the effective balance between its maintenance and power system operation.

Key words: electric power systems; stability; security and stability control device; opportunity maintenance; maintenance strategy; correlation

(上接第143页 continued from page 143)

Thoughts on some characteristics of new style power system

GAO Zhiyuan¹, ZHANG Jing¹, ZHUANG Weijin¹, ZHANG Zhankui¹, SUN Qian², ZHAO Lei³, LI Zhuang⁴

(1. China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;

3. Xinjiang Power Exchange Center Co., Ltd., Urumqi 100031, China;

4. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China)

Abstract: The construction of new style power system is a major transformation of China's power industry, its demands come from economic and social development, and its realization depends on the improvement of operation mechanism of power system. Starting from the analysis of development process and phased goals of power system in recent 10 years, the power source composition, characteristics, and operation mode of new style power system are inversely deduced and analyzed based on the "double carbon" goal, and some key technical requirements under the new operation mode are further analyzed. It is pointed out that the power source composition of power system must be greatly adjusted in order to achieve the "double carbon" goal, especially after 2030. In the new style power system, renewable energy will become the main body on the generation side, there will be a large number of prosumers on the user side which show a large number of distribution and autonomy forms, energy internet will become the basic support of new style power system, and the power grid dispatching will be mainly realized based on the market-oriented mechanism. The construction of new style power system urgently needs the support of relevant innovative technologies in terms of power and electricity balance, system security, management and control of active distribution and utilization grid, power generation and grid-connection of renewable energy, power trading and dispatching, etc.

Key words: new style power system; carbon neutrality; carbon peak; energy internet; operation mechanism; ICT

附录 A 我国未来一次能源消费和碳排放趋势

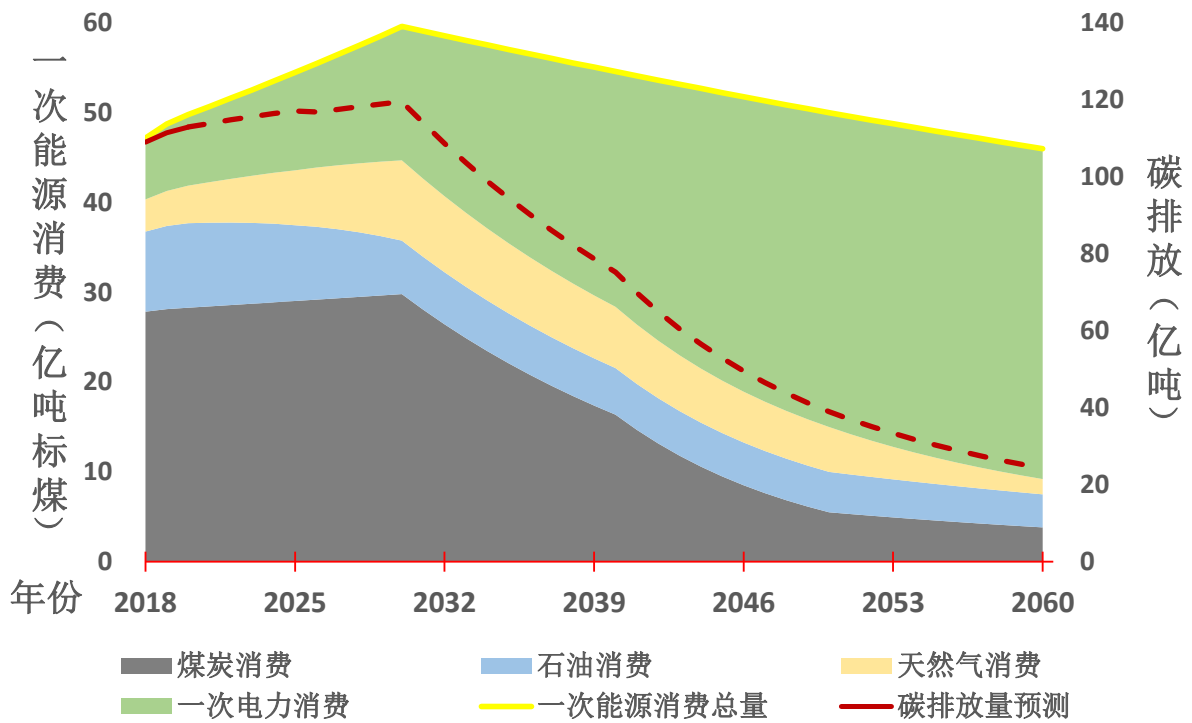


图 A1 我国未来一次能源消费和碳排放趋势

Fig.A1 China's future primary energy consumption and carbon emission trend

在暂不考虑技术突破和其他突发事件的情况下，以相关确定性数据为目标，按照年度等增长率的基本原则，绘制了我国的一次能源消费和碳排放总体发展趋势示意图。

附录 B 我国电力行业未来发电量构成及碳排放趋势

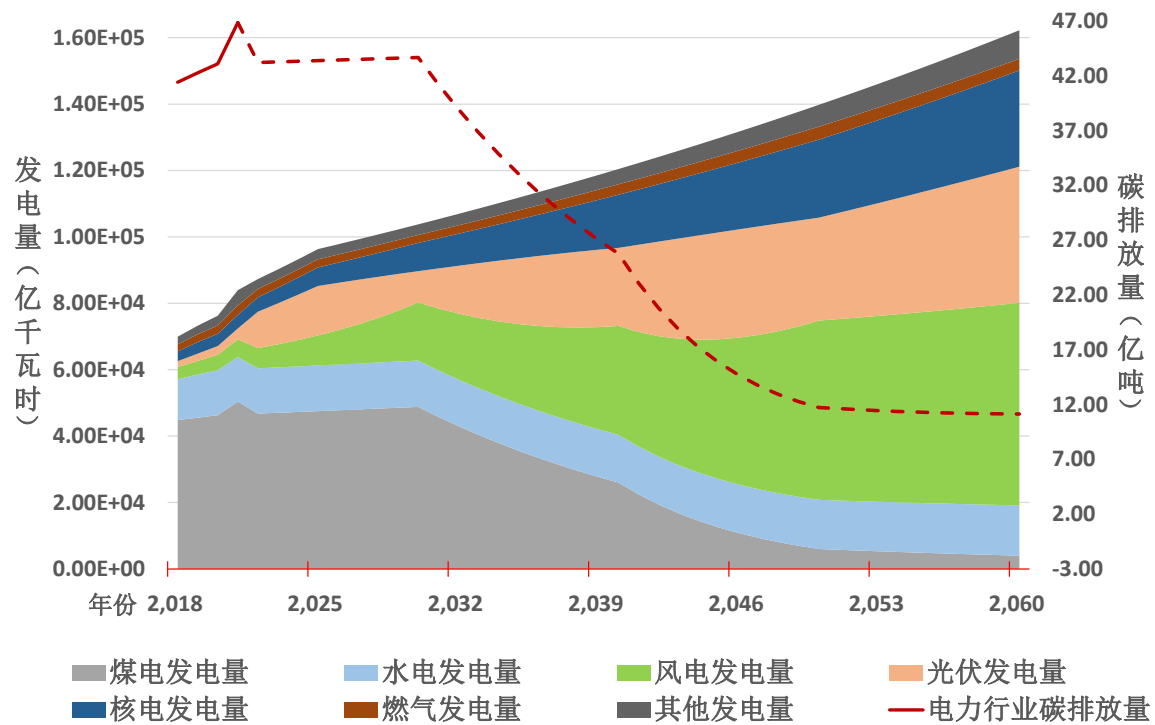


图 B1 我国电力行业未来发电量构成及碳排放趋势

Fig.B1 Power generation composition and carbon emission trend of China's power industry in future

依据中电联发布的数据，在符合未来已发布规划要求的前提下，参考相关权威研究，以现状与目标之间年度等比例增长（或缩减）为基本方式绘制了我国未来各类电量构成和电力行业碳排放量趋势示意图。

图中参考了中电联 2022 年 7 月发布的《中国电力行业年度发展报告 2022》，从图中可以看到，2021 年，由于存在局部供电偏紧、煤电发电量占比意外上升等情况，国内电力行业碳排放量上升偏快。这对于完成 2025 年和 2030 年的相关“双碳”目标造成较大压力。

附录 C 新型电力系统关键指标

表 C1 新型电力系统外部满足经济社会需求指标

Table C1 New style power system external indicators to meet economic and social needs

一类指标	二类指标	指标含义
绿色低碳转型	CO ₂ 年排放量	区域或全国年 CO ₂ 年排放量
	单位电量 CO ₂ 排放量	区域或全国平均单位电量 CO ₂ 排放量
	电力行业 CO ₂ 排放量占比	区域或全国电力工业年 CO ₂ 年排放量与排放总量之比
市场化配置资源	区域间用电成本最大差异	区域或全国范围内，两地之间同类型用户单位电量平均用电成本之差的最大值
	区域内用电成本最大差异	某区域内，不同类型用户单位电量平均用电成本之差的最大值
	弃电率	区域或全国范围内，弃电率与总发电量之比
	区域间限电次数最大差异	区域或全国范围内，两地之间限电或有序用电年平均发生次数差的最大值
充裕、可靠、优质供电	电能 在终端能源消费中的比重	区域或全国年总用电量与总能源消耗量之比
	全社会用电量	区域或全国范围全社会用电总量
	限电发生次数	区域全国范围内，限电或有序用电年平均发生次数
	年平均停电时间	区域或全国范围年平均停电时间
	用户电压合格率	区域或全国范围，各电压监测点电压超限时间与监测时间之比的平均值
	平均总谐波畸变率	区域或全国范围，各交流监测点谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比的平均值
	用户频率合格率	区域或全国范围，各频率监测点频率超限时间与监测时间之比的平均值

表 C2 新型电力系统内部关键要素指标

Table C2 Internal key factor index of new style power system

一类指标	二类指标	指标含义
电源	系统总装机容量	区域或全国范围内各类电源装机容量之和
	系统总发电量	区域或全国范围各类电源发电量之和
	系统中上网电量	区域或全国范围各类电源上网电量之和
	非化石能源发电量占比	区域或全国非化石能源发电量与总发电量之比
	火电发电量占比	区域或全国火电发电量与总发电量之比
	火电装机容量占比	区域或全国火电装机容量占总装机容量比重
	可再生能源装机容量占比	区域或全国可再生能源装机容量占总装机容量比重
	分布式能源装机容量占比	区域或全国分布式能源装机容量占总装机容量比重
电网	电网资源优化配置能力	包含特高压电网在内的各级电网输电能力之和
	灵活交流输电装置应用	电网中装设的静止无功补偿、固定串补、可控串补等灵活交流输电技术设备总容量
	智能变电站容量比	区域或全国范围内智能变电容量占总变电容量的比率
	输电容量利用率	区域或全国范围内输电线路年平均负荷率
	供电可靠率	配电网络统计期内有效供电小时数与统计期间小时数指标
	电力电子设备占比	区域或全国范围电网中，在运电力电子设备数量与所以在运一二次设备数量之比。可以进一步统计某一类型设备中电力电子设备的占比，或者该类型设备中电力电子设备容量之和的占比。
	电网等效转动惯量	区域或全国范围一段时间内电网等效转动惯量的平均值
负荷	智能电表安装率	安装智能电表的用户与总用户数之比
	综合能源系统用户数	区域或全国范围内采用或参与综合能源系统的用户总数
	微电网系统用户数	区域或全国范围内采用或参与微电网系统的用户总数
	综合能源系统总负荷	区域或全国范围内综合能源系统总负荷的年平均值
	微电网系统总负荷	区域或全国范围内微电网系统总负荷的年平均值
	综合能源系统最大负荷	区域或全国范围内综合能源系统总负荷的年最大值
	微电网系统最大负荷	区域或全国范围内微电网系统总负荷的年最大值
	移峰填谷负荷量	区域或全国范围内通过技术和机制年平均转移的峰荷量
储能	负荷自发自用电量总量	区域或全国范围内用户侧自发自用电量之和
	储能装机总容量	区域或全国储能装机总容量
	储能装机容量占比	区域或全国储能装机总容量与各类电源总装机容量之比
	抽水蓄能容量占比	区域或全国抽水蓄能容量占总装机容量比重
	储能系统中送电量	区域或全国范围内储能系统向电网送电总量
调度和交易	市场交易规模	区域或全国电力市场交易出清电量总和
	市场主体数量	区域或全国参与市场交易的各类市场主体数量和
	市场化电量占比	区域或全国电力市场交易出清电量与社会总用电量之比
	现货市场覆盖率	全国范围内，电力现货市场实施区域占比

附录 D 工商业用户直接交易电量及其全社会占比发展趋势

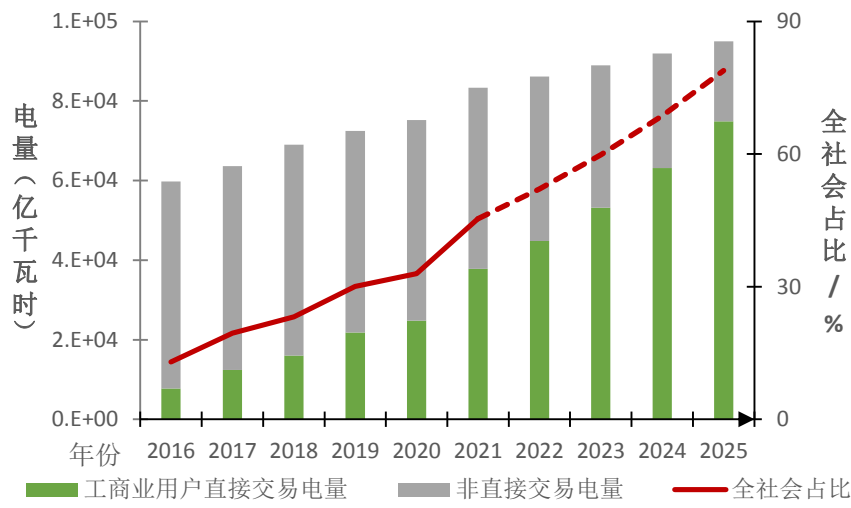


图 D1 工商业用户直接交易电量及其全社会占比发展趋势

Fig.D1 Development of direct trading electricity of industrial and commercial users and its proportion in whole society