

新能源高渗透电网的核电调峰特征与能力构建

戴加林

中广核惠州核电有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21073

[摘要] 在“双碳”目标与新型能源体系建设背景下,电力系统对灵活调节资源的需求激增。核电在高渗透率电网中的角色正由基荷电源向“基荷支撑与有限调峰”电源转变。本文分析了新能源高渗透场景下电网对核电调峰的刚性需求,揭示了核电调峰的经济性与安全性约束边界。系统阐述“核-储-风-光”协同调度架构及沿海能源集群方案,结合负荷跟踪能力提升、堆芯控制技术革新及核能综合利用场景拓展等方面展开论述,旨在构建多维核电调峰能力,助力核能为新型电力系统提供关键安全支撑及可靠低碳能源供应。

[关键词] 核电调峰; 高渗透率电网; 新型能源体系; 多能协同调度; 核安全

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A

Characteristics of Nuclear Power Peak Shaving and Capacity Building in High-Permeability New Energy Grids

Jialin Dai

CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of the "dual carbon" goals and the development of a new energy system, the demand for flexible regulation resources in power systems has surged. The role of nuclear power in high penetration grids is evolving from a base-load power source to one that provides both base-load support and limited peak shaving capabilities. This paper analyzes the inherent demand for nuclear power peak shaving under high renewable energy penetration scenarios, revealing the economic and safety constraints associated with this function. It systematically outlines a coordinated dispatch architecture integrating nuclear, storage, wind, and solar power, along with a coastal energy cluster solution, and discusses improvements in load tracking capabilities, innovations in reactor core control technology, and expanded applications for comprehensive nuclear energy utilization, aiming to enhance multi-dimensional nuclear power peak-shaving capacity and enable nuclear energy to provide critical safety support and reliable low-carbon energy supply for the new power system.

[Key words] nuclear power peak shaving; high penetration grid; new energy system; multi-energy coordinated dispatching; nuclear safety

引言

规划建设新型能源体系是推动经济社会全面绿色转型、实现碳达峰碳中和目标的核心路径。人工智能时代算力需求爆发式增长,能源电力化进程加速,以传统煤电为主的能源结构难以支撑绿色转型需求。清洁稳定的核电是当前唯一能够在低碳约束下提供频率支撑的电源品类。截至2025年底,我国在运及在建核电机组总装机规模已突破1.1亿千瓦。东部沿海五省核电发电量占比近20%,切实履行基荷职能。据国家电网测算,2060年我国新能源装机占比将达70%。高比例新能源接入导致系统惯量下降,频率调节能力衰减,易诱发系统振荡——英国“8·9”大停电、

伊比利亚半岛停电等事件都已印证这一技术风险。

目前核电角色面临着深刻地改变。第26届联合国气候变化大会,由包括中国在内的22国联合发布《核能三倍宣言》,提出将全球核电装机在2050年比2020年翻两番。中国自2023年开始加大核电机组核准力度,将在2030年超过1.2亿千瓦的核电装机容量。伴随着核电装机的提升以及新能源渗透率的持续攀升,消纳矛盾和系统调节压力逐步增大。核电参与电网调峰将不再是重大节假日任务,而将是常态化的需求。

本文从保证安全的前提下,考虑电网调峰的硬需求,对高比例新能源下核电调峰运行特性、制约因素及能力构建方式

进行系统的研究以期核电与电网发展提供理论和工程上的参考。

1 核电调峰驱动机制与运行特征

1.1 调峰需求刚性化的系统成因

随着弱转动惯量风电及零转动惯量光伏的大规模并网，电网频率支撑和抗扰动能力减弱。当新能源渗透率超过30%后，系统频率调节备用呈指数型上升。在煤电占比逐步减少及新能源占比日益攀升的双背景下，电网对于核电的基荷支撑、参与调峰调频、应急保底的需求已成刚性需求。

电力市场化改革持续推进加剧了这一现象。《关于促进电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》提出“探索核电安全参与电网调峰”。核电功能定位由单一基荷电源向“基荷为主、调峰为辅”转变成为定势。

从数值上来看，在核电占比较高的电网（新能源占比大于30%），当核电比例高于15%时，单堆年调峰次数约在0.65次，主要参与节假日调峰。当核电比率达到30%以后，调峰频率增加十倍以上，参与月调峰。当比值超过50%时，以日跟踪为主。在我国广东、福建等核电大省，核电特殊时段调峰已成为维持电网安全的必需。

1.2 经济和安全约束的界限

从全寿命周期的角度分析，核电投资占总成本的50%以上；固定资产折旧与财务费用在运维成本中的占比很大。核电站单位造价为煤电的2.5~4.0倍，但燃料费所占比例低于20%，远远低于煤电的60%。因此核电成本构成决定了核电不是首选调峰电源。降功率运行将降低核电能力因子，增加发电成本，直接影响经济性。

出于核安全方面的考虑，压水堆机组有着明确的运行约束条件^[1]：

- 功率改变速度的限制：一般不超过5%额定功率 / 分钟。远小于燃气机组。
- 调节能力受到限制，通常的商用压水堆无法实现小于50%额定功率的长期稳态运行。
- 安全风险累加：频繁变功率运行加剧堆芯功率畸变、燃料元件破损（PCI）、控制棒驱动机构磨损以及放射性废料增加等。

总之核电调峰应贯彻安全第一、以基荷为主，调峰为辅，深度适当，日前提携的原则。有节制、有策略地参与调峰，在保证核安全的前提下进行。

2 核-储-风-光互补：构建调峰能力的体系结构

一方面，东南沿海地区作为电力负荷中心，也是大容量直流的受端电网，对于灵活调节和系统稳定支撑的要求不断提高。受限于电源结构的影响，抽水蓄能和天然气发电等灵活调节资源的占比只有约6%，远远低于发达国家30%平均水平。灵活性调节资源匮乏已经成为新能源消纳的主要问题。

另一方面，东南沿海核电站的选址与海上风电、光伏选址高度吻合，具备多能互补的地理条件。法国核能+风电互济运行将电网频率波动减少了约75%。为我国提供了可借鉴经验，《核能

和可再生能源协同发展》规划提出“核能与可再生能源取长补短、协调发展”。

2.1 源-网-荷-储一体化智慧能源系统

构建区域能源互联网，融合以核电厂为主导、风电和光伏为代表的多种能源及储能资源是实现多能互补的基础设施。^[2]

- 核电：基荷和系统惯性，能源集群基石。
- 储能（抽水蓄能/化学储能）：负责短时波动平抑及频率快速响应，抽蓄与电化学储能分时参与实现经济调度。
- 风光：多发、承担增量清洁能源。

构成“核稳、储快、风光补”的互补关系。智慧能量管理系统采集实时数据和超短期功率预测，使用优化算法，达到多种来源互联并网、精细控制管理，有效提高了区域清洁能源就地消纳能力。

2.2 分级管理、分层调度

根据分层递阶调度原则分别从时间尺度、经济性与安全性三个角度设计核-储-风-光协同调度方案^[3]。时间尺度方面依据多尺度匹配的原则，由抽水蓄能电站承担日和周级别调节，由电化学储能电站应对分钟及小时级别波动，经济性角度依照边际收益最大化的原则，在低价时段储能充电，高价时段放电，并由核电承担必须的深度调峰工作；安全性角度遵循鲁棒约束原则对风光不确定性进行处理并设置核电调峰的安全约束（包括机组的功率变化率等限制、最小稳态运行功率）。

调度结构本质是以智能能量管理为基础，源网荷储深度融合与实时优化，在安全约束条件下使系统整体收益最大化和运营成本最小化。

3 能源集群规划：调峰能力的硬件基础

多能协同需要电源侧的统一规划与建设。风-光-核-储一体化清洁能源基地是增强核电调峰适应性的硬件支撑。

3.1 核电配套储能协同运营

在核电站安全范围之外集中建设配套储能电站，是削弱核电功率波动和减轻机组反复调峰的有效手段。技术研究认为这种配置能够实现三个作用：

- 调峰缓冲，储能系统可在毫秒级响应短时功率调峰，承担核电机组不宜承担的短期功率调节工作。
- 备用电源再利用，储能电站可作为核电厂站用外电源，减少核电厂应急柴油机的配置，降低建安及运维费用。
- 黑启动支持：储能可以增强核电厂全厂失电的黑启动能力和厂用电电压、频率。

国家能源局在着手研究《核电配套储能协调发展》重大软课题，以寻求与核电结合的道路。当前，抽水蓄能电站是主要的核电配套储能方式。电化学储能等新型储能示范利用逐渐发展。

3.2 沿海千万千瓦规模能源基地方案

我国东南沿海浅水海域能源丰富，风能、太阳能资源具备组建多品种互补能源集群的条件。以广东为例，可考虑四个千万千瓦的能源集群：

表1 广东沿海能源集群规划

集群名称	组成电源	区域定位
粤东集群	揭阳核电+潮汕沿海风电+火电+抽水蓄能	东翼清洁能源枢纽
珠三角集群	惠州/大亚湾核电+汕尾风电+火电+抽水蓄能	负荷中心多源互补
粤西北集群	阳江/台山核电+粤西沿海风电+火电+抽水蓄能	西部清洁能源基地
粤西南集群	廉江核电+雷州半岛风电+火电+新型储能	新型储能示范区

通过机组群内和机组群间的协调调度及精细运行,可显著减少核电调峰对单机的影响,取得最佳的环保与经济效益。

4 技术进步：调峰能力的关键支柱

4.1 机组负荷跟踪能力改善途径

目前国内的三代核电已经能够满足基本的负荷跟踪要求。为了进一步拓展核电的负荷跟踪能力需要从以下几个方面进行突破：

- 采用先进堆芯控制方案以实现负荷的较大增长率,即轴向偏移控制系统及先进的棒束组控制系统。
- 控制系统智能化：应用智能控制算法代替常规PID控制,用于复杂工况下的功率调节。使得功率调节的堆芯扰动、调节时间等均得以降低。

- 低功率的扩展：在安全评估的框架内证明将稳态最小值进一步降至50%Pn的30%的可能性。

4.2 燃料及堆芯控制技术的进步

大的功率瞬变必然引起PCI,导致包壳破损。基于GAIA改进的先进事故容错燃料束采用Cr涂层改善,提高了瞬态条件下燃料特性,为我国燃料技术提升提供了参考。

快升降负荷后的堆芯平衡和热点的控制是另一难点。常规堆控方案容易出现局部功率高峰,需要人为调节。这使日本三菱公司研制开发出先进的压水堆SRZ-1200堆通过沿轴向富集度梯度分布以及先进堆芯控制系统很好地限制了热点线功率密度,并平衡负荷调节能力与安全裕度,代表了先进堆芯控制发展的趋势。

4.3 运维和经济性

采用下列运维措施可以部分抵消调峰带来的经济损失：

- 延长换料周期从18个月到20个月,使机组能力因子提高约1%。
- 优化延伸策略：大修安排及延伸运行,充分利用设备。
- 延寿运行：对二代机组进行改造和延寿评估,延长服役期,摊低成本。

5 场景深度延伸：挖掘调峰能力的效益增长点

在电力单一品销售的盈利方式受市场电价降低威胁下,核

电站核能综合利用为核电带来了多元增长途径。减轻调峰对机组利润率的影响。

5.1 热电联供及工业供汽

核能供暖、工业供汽技术已较为成熟。海阳、秦山等核电基地已经开展热电联供,收益比纯发电提高1.5倍。在连云港徐圩核电采用“双堆耦合”为石化基地提供量身定制的蒸汽,“以热定电,热电联供”。工业热负荷比较连续且与核电的基荷特性非常匹配,从需求侧削减了调峰要求。

5.2 核电+算力中心模式

人工智能时代的到来推动了数据中心用电需求的快速增长。据国际能源署预测,2030年全球数据中心耗电量预计将达到945 TWh。核电具备稳定、低碳的优势,符合数据中心高可靠性及绿电占比大于80%的需求。沿海厂址为数据中心冷却创造了良好的条件,可实现数据中心PUE值小于1.2。

从国际实践来看,微软和谷歌等公司则通过长期购电锁定核电资源,把核电视为人工智能算力基础设施的重要能源组成,并实现“核电+算力”的共生共荣。这为核电向电力和算力综合服务发展提供了重要参考,也是今后缓减调峰的重要方向。

6 结论与建议

在高比例新能源背景下,建设安全、经济、适应的核电调峰能力是构建新型电力系统和推进能源转型的关键举措。本文分别从需求刚性、约束边界、协同架构、硬件基础、技术路线及场景延伸等方面展开分析研究,有助于行业内进一步理清核电快速发展过程中如何实现核电调峰的问题。

建议行业重点开展以下工作:完善市场机制,尽快建立容量补偿机制和完备绿电溢价政策;加快示范验证,在高比例核电地区推进核电机组参与调峰的技术储备与论证;加强技术攻关,推动事故容错燃料、智能堆芯控制、核-储一体化等关键技术的研发。实现我国由核电大国向核电强国的跨越。

[参考文献]

[1]张健.新型电力系统下核电机组调峰策略研究[J].中国电力,2023,56(8):12-18.

[2]梁毅,李华,刘航旭,等.计及核电风险量化的多源互补调峰调度方法[J].电力工程技术,2024,43(2):124-133.

[3]安泽依,刘奇洪,邱斌斌,等.光-核-储综合能源系统不同运行策略下的焓分析[J].核动力工程,2025,46(3):271-281.

作者简介：

戴加林(1982--),男,汉族,江苏省盐城市人,工程师,硕士研究生,核能消吸与新型电网构建。