

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.02.003

面向多时间尺度的新型电力系统电力电量平衡方法研究

徐子韬, 王志昊, 张宁, 黄涛, 马嘉昊, 张智, 陈艳波

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 100192)

摘要: 以风电和光伏为代表的新能源发电具有季节波动性和短期随机性波动的特点。随着新能源的大规模并网,其出力特性对新型电力系统的电力电量平衡带来新的挑战。为保障电力系统的可靠运行,本文对面向多时间尺度的电力电量平衡方法展开研究。首先,基于福建电网 2019~2022 年的历史数据,并结合福建省气候天气特征,对新能源发电的多时间尺度出力特性进行分析,总结电力保供所面临的挑战;其次,构建了考虑中长期电量平衡和短期电离平衡的电力系统运行模型,提出考虑季节特性、极端天气的典型场景辨识方法。最后,以福建电网为例,通过对不同时间尺度下的电力电量平衡模型进行计算,分析多种发电形式参与的时序生产过程,量化分析福建电网在大规模新能源并网下的电力供应不足情况,及大规模新能源并网背景下传统发电机组的容量设置可能性,并提出了均衡电力电量充裕性的相关建议。

关键词: 电力电量平衡; 新型电力系统; 新能源发电; 电力供应; 极端天气

Research on Power Quantity Balance Method of New Power Systems Considering Different Time Scales

XU Zitao, WANG Zhihao, ZHANG Ning, HUANG Tao, MA Jiahao,

ZHANG Zhi, CHEN Yanbo

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 100192, China)

Abstract: New energy generation represented by wind power and photovoltaic is characterized by seasonal and short-term stochastic fluctuation. With the large-scale grid connection of new energy sources, their output characteristics bring new challenges to the power balance of new power systems. For assuring reliable operation of the power system, the multi-timescale-oriented power power balance method is performed in this paper. Firstly, based on the historical data of Fujian power grid from 2019~2022 in combination with the climate and weather characteristics in Fujian, the multi-timescale output characteristics of new energy power generation are analyzed and the challenges faced by power supply preservation are summarized. Then, a power system operation simulation model considering medium- and long-term power balance and short-term ionization balance is constructed, and a typical scenario identification method considering seasonal characteristics and extreme weather is proposed. Finally, by taking Fujian power grid as an example and calculating the electricity power balance model under different time scales and analyzing the time-sequential production process with the participation of multiple forms of power generation, the insufficient power supply of Fujian power grid in case of large-scale new energy grid integration and the possibility of different capacity settings for conventional generating units in the context of large-scale new energy grid integration are quantitatively analyzed and, moreover, the relevant suggestions for balancing the adequacy of electricity power is proposed.

Keywords: power balance; new power system; new energy generation; power supply; extreme weather

收稿日期:2025-03-06

基金项目:国网福建经研院 2024 年“核蓄”一体化运行仿真技术及容量优化配置研究(No.52130N23000K)。

0 引言

随着全球经济的高速发展,气候问题愈加严重,我国相继颁布政策及法案,积极推动能源领域向绿色低碳转型^[1]。2020年9月,我国提出了“2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的“3060双碳目标”^[2]。目前,我国电力产业的碳排放量占据总排放量的40%以上^[3-4]。因此,电力行业是我国实现双碳目标的主力军。需要在加强传统燃煤发电清洁高效利用的基础上,积极推动构建以风电、光伏等清洁能源为主的新型电力系统^[5]。在我国东南沿海,特别是福建省,新能源发电的发展十分迅速,尤其是海上风电。2023年12月1日,我国首个国家级海上风电研究与试验检测基地在福建开工建设^[6];2024年3月,福州连江宣布将建设全国单机容量最大海上风电项目,建成后年发电量预计可达33亿千瓦时^[7]。然而,高比例新能源并网也给电力系统的运行带来新的挑战,主要包括以下几个方面:

短期电力平衡方面,新能源出力具有波动性、间歇性,这种不确定性使传统电力系统以确定性发电资源供给负荷的模式不再适用。以风电、光伏为主的新能源受天气等诸多因素影响较大,在特定条件下新能源出力可能表现出反调峰特征,极端情况下系统可能面临保障供电能力弱、供电可靠性不足的风险^[8],此时需要系统常规可调电源、储能电站、外网购电等资源保证电力平衡。

长期电量平衡方面,新能源出力的季节特性较为明显,例如夏季极热无风导致风电出力受限,而同时负荷需求激增,用户面临限电甚至断电风险。其他种类电源中,水电受到丰水期和枯水期的影响,常规电源受到检修周期的影响,加之新能源出力的中长期预测技术尚不成熟,众多因素叠加之下,长期电量供应同样面临巨大挑战。长期储能技术和负荷侧需求响应^[9]是具有较大潜力的解决方案,但是长期储能在现阶段仍然有成本高、效率低等缺陷,还需进一步研究发展^[10]。

在电力安全保供方面,与传统的火力发电不同,其主要形式为风电和光伏发电,极易受到外界气象因素的影响。常规天气条件下,新能源出力能够根据大量天气数据进行较为准确的预测,帮助电力系统实现新能源发电消纳与调度。但近年来,随着人为因素导致的全球气候变暖、洋流变化、气压变化的加剧,极端天气的出现更加频繁,给新能源甚至是电力系统的安全运行产生了严重影响^[11]。2020年8月,美国加州遭遇严重高温,风电、水电出

力下降,负荷急剧上升,最终导致大规模轮停事故^[12]。

目前,国内外学者针对新能源高占比新型电力系统的优化调度开展了相关研究。文献[13]在短期电力电量平衡中考虑了弃水电量成本,以总成本最低为目标确定各电源的发电出力;文献[14]把电力系统内各电源按发电特性划分,使用多目标优化求解;文献[15]通过拟合水电转换曲线进行混合整数规划的方法,计算高水电比重的电力电量平衡问题;文献[16]通过分析负荷与电源出力之间不均匀性的关系来分析电力电量平衡问题;文献[17]综合阐述了数据驱动的机器学习技术在机组组合中的应用,以更好地解决电力电量平衡问题;文献[18]以小时为单位进行新型氢能电站在微网系统中的研究;文献[19]通过对火电、水电、储能进行精细化建模,研究水火储荷协同一体化短期电力平衡;文献[20]通过比较有无网络约束的电力电量平衡计算,对青海电网调度运行进行优化调整;文献[21]从负荷角度,通过对不同行业的负荷特性进行建模研究电力电量平衡问题;文献[22]围绕灵活性资源,提出了评价方法、计算方法与场景构建方法等3大难题及其解决思路;文献[23]通过对园区这一典型应用场景,提出了电力电量初平衡与再平衡建模计算方法。

以上研究或适用能源类型较为单一,未考虑到新能源在不同时间尺度的出力特性,考虑到未来电力系统中电源种类的多样性,本文在高比例新能源电力系统的多种类电源背景下,首先对新能源的出力特性、负荷特性进行分析,提出极端天气场景的辨识与提取方法,并基于以上分析与方法,进行大规模新能源并网下的风险分析;接着在考虑极端天气场景的情况下,提出了多时间尺度下的电力电量平衡模型;最后结合福建电网的真实数据,针对电力电量平衡问题进行分析计算,着重分析了新型电力系统在新能源装机高占比下的电力供应不足问题。

1 高比例新能源电力系统电力电量平衡特性分析

1.1 高比例新能源电力系统电力电量平衡短期特性分析

风电和光伏的不稳定性使得电力供应的可靠性受到影响。在这一背景下,深入了解福建电网的新能源发电情况以及负荷特性变得至关重要。本节所进行分析的数据均来源于福建电网2019~2022年的实际运行数据。

1)随着新能源装机的不断提升,新能源的出力波动性对电网的影响不断提高。图1为近4年福

建省新能源出力日波动量最大值,由表可看出,福建省新能源出力日波动量最大值在2019~2022年均超过5 400 MW,超过新能源总装机量的45%。图2、图3为福建省光伏与风电出力波动率在单日尺度上的最大值,由两图可看出,福建省的光伏与风电出力均有较大的波动量,在各自装机中的占比较高。

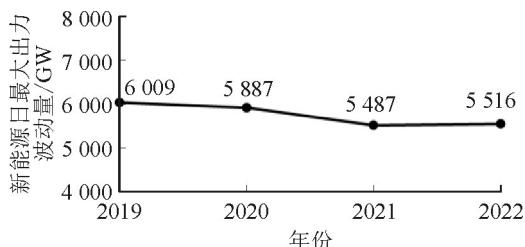


图1 2019~2022年福建省新能源出力日波动量最大值
Fig. 1 The maximum daily fluctuation of new energy output in Fujian from 2019 to 2022

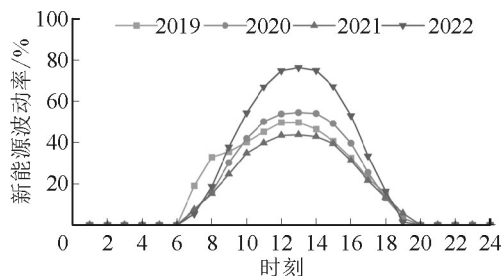


图2 福建省2019~2022年光伏出力波动率最大值
Fig. 2 The maximum fluctuation rate of photovoltaic output in Fujian from 2019 to 2022

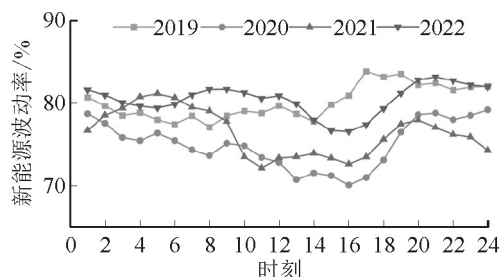


图3 福建省2019~2022年风电出力波动率最大值
Fig. 3 The maximum fluctuation rate of wind power output in Fujian from 2019 to 2022

2)福建省负荷需求是较明显的“鸭型”曲线。图4为福建省某年夏季典型日的新能源出力、负荷量与净负荷量情况,负荷需求有较明显的两个高峰,即午高峰与晚高峰,新能源总体出力在中午尚可达到最大,但在午后出力便逐渐降低,具有较为明显的反调峰特性,无法满足负荷的高峰需求,这也使净负荷量曲线的午高峰时段有所下降,这对电力系统电力电量的灵活性调整与调度提出了一定的要求。

3)福建省新能源出力整体不足,负荷支撑能力有待加强,从2022年看,负荷需求峰值达到48 749 MW,而新能源出力峰值仅有9 963 MW(光伏、风电出力

分别为3 798 MW、6 165 MW),占比20%左右,相较之前年份虽有所增加,但新能源电源应用规模仍然需要进一步提升。

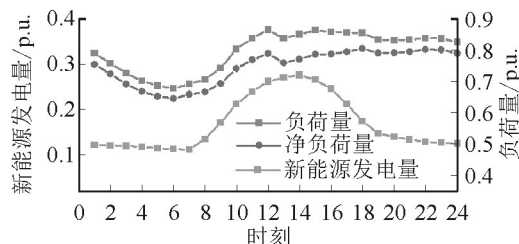


图4 福建省某年夏季典型日负荷与新能源出力
Fig. 4 Typical daily load and new energy output in a summer in a certain year in Fujian

4)新能源出力之间具有互补性。图5为福建省近4年新能源整体日波动率,通过与图2、图3对比可知,由于风电、光伏的出力特性相悖,风电的夜间出力特性较高,而光伏集中于日间,因此,新能源的大规模应用可一定程度上降低波动率,给电源出力带来“平滑效应”。

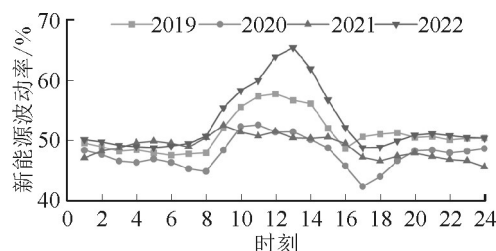


图5 福建省近4年新能源日波动率
Fig. 5 Daily fluctuation of new energy in past four years in Fujian

综上,福建省新能源出力具有较大的波动性,且其负荷支撑能力需要进一步加强。

1.2 高比例新能源电力系统电力电量平衡长期特性分析

1)新能源发电在负荷中占比相对较小,导致其负荷供应能力整体较弱,且存在明显的季节性差异。图6为福建省2022年月度负荷电量与新能源发电量情况,由图可知,新能源电量具有明显的反调峰特性,在负荷需求量最大的7月和8月,新能源供电量反而最小,占比仅5.3%、3.5%。究其原因,季节性变化对新能源发电量产生了较大影响。这使得电力系统在依赖新能源的同时,需要更为灵活和可调节的备用能源来应对季节性波动,确保持续可靠的电力供应。在考虑这一特性的基础上,制定适当的调度策略和能源储备计划,以维持电力系统的平稳运行,成为当前新能源整合的关键考量。

2)福建省东临太平洋,属于典型的亚热带季风气候,各季节风电光伏资源分布不均,季节差异显著。图7为福建省风光季节电量变化图,由图可

知,风力资源由于秋季受北方冷空气南下的影响,易出现持续的东北大风;而冬季南方气温逐渐降低,但气压梯度随之变小,导致冬季风速小于秋季;春、夏两季受副热带高压控制,风速较小,但福建春、夏季常出现强对流天气,且易受台风影响,也会带来短时较强的风力资源;光伏资源时间分布上夏多春少,秋季与冬季大致持平,随季节变化较为明显。这是由于夏季为非雨季,云量少,大气透明度高,而春季雨水充足,故光照资源较少。

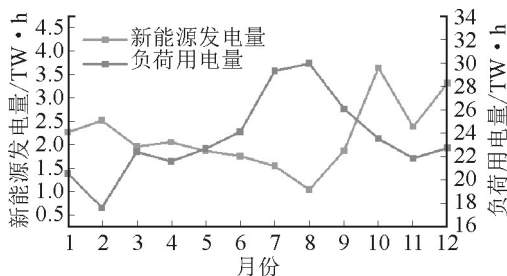


图6 福建省2022年月度电量
Fig. 6 Monthly electricity consumption in Fujian in 2022

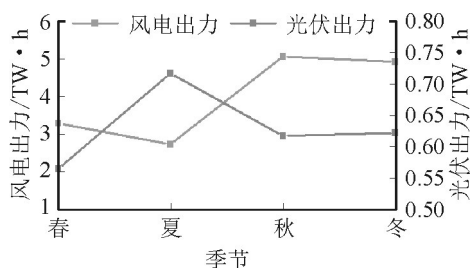


图7 福建省风光季节电量变化图
Fig. 7 Seasonal variation chart of wind and photovoltaic power in Fujian

3)从长远看,福建省电源结构将呈现新能源占比逐渐增大、电源种类日益丰富的趋势。图8为福建省未来40年电源装机容量规划情况,随着清洁能源技术的不断发展,风电、光伏等新兴能源将成为电力系统的主导力量。这种多元化的电源结构将为福建省提供更加灵活、可持续的能源选择,推动电力系统朝向更为环保、高效的方向发展。在这一演变中,需适时优化调度策略,以确保电力系统的安全、稳定供应,迎接未来更加绿色可持续的能源时代。

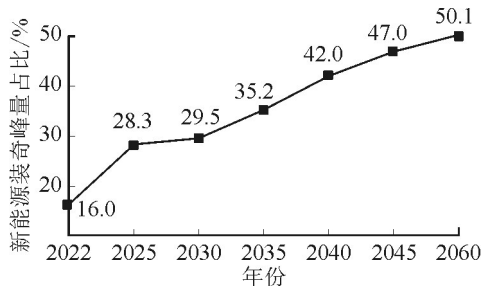


图8 福建省电源规划
Fig. 8 Power supply plan in Fujian

1.3 极端天气场景辨识与提取

近年来由福建省能源系统气象特性导致的电力供应风险显著增多。在台风、高温、寒潮、强降水等极端气象条件以及风电、光伏存在的“极热无风”、“晚峰无光”等特性影响下,新能源电力供给能力大幅降低,成为新型电力系统电力不平衡的重要原因,亟需准确辨别极端场景并针对性做好电力电量平衡调度。

对于新能源低出力的极端天气事件,判据如式(1)所示,本文定义新能源日出力 E_d 低于额定出力水平 $E^{\max}$ 的 $\alpha(0 \leq \alpha < 1)$ 倍时,定义为进入新能源低出力极端天气场景。本文研究中初步以新能源日平均出力低于额定出力 14% 辨识低出力场景^[24]。

$$E_d < \alpha E^{\max} \quad (1)$$

对于新能源出力反调峰特性凸显的极端天气,判据如式(2)所示,本文定义新能源日峰荷时段出力 E_d^p 低于日出力水平 E_d 的 $\beta(0 \leq \beta < 1)$ 倍时,定义为进入反调峰极端天气场景。本文研究中初步以新能源日峰荷时段出力低于日出力水平 22% 辨识反调峰场景。

$$\begin{cases} E_d^p = \sum_{t_i} E_{t,d} \\ E_d^p < \beta E_d \end{cases} \quad (2)$$

基于式(1)、(2),本文根据福建省的新能源出力数据统计分析,提取新能源低出力与反调峰两种极端天气场景。图9分别展示了不同季节新能源极端天气场景发生的次数。由图中可以看出,低出力场景在秋季发生次数最多,达到7天;而反调峰场景则在冬天发生次数最多,达到7天。通过对比可以发现,极端天气场景发生在不同季节的次数不同,存在明显的季节分布特征。

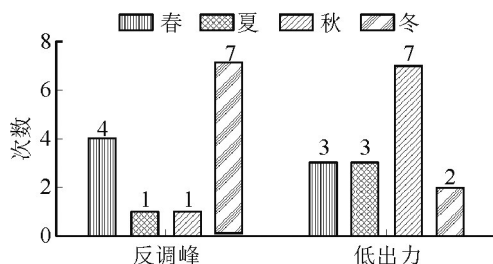


图9 两种极端天气场景季节次数分布
Fig. 9 Seasonal frequency distribution of two extreme weather scenarios

1.4 高比例新能源系统电力电量平衡风险分析

1)新能源大规模应用虽有一定的“平滑效应”,但其出力的波动性仍然较大,这对于电力系统运行

计划制定、实时调度管理等均带来不小的挑战,常规电源、储能等需要更加细致地配合新能源进行电力供应,当新能源出现反调峰出力时,其他形式电源需要有更大的旋转备用容量,否则可能出现弃风弃光或弃负荷现象。

2)随着新能源机组占比不断增加,电力系统整体惯性减弱,爬坡速率特性变化,电力电量平衡机制出现调整,出力预测误差特性逐渐凸显。这一趋势带来了电力系统运行安全性面临的新挑战。系统整体稳定性降低,需要采取有效措施来适应和调整电力系统的运行策略,以确保在高比例新能源接入的背景下,系统能够更加可靠地应对各种复杂运行情况。

3)随着新能源装机量比例不断攀升,其波动性和反调峰特性日益凸显。天气、季节等多方面因素对发电端的影响逐渐放大,导致电力系统运行面临更大不确定性。安排运行方式、制定检修计划以及准确预测出力大小等方面都将面临挑战。因此,需要针对性地发展更智能的调度技术、精准的天气预测模型和高效的储能系统,以提高电力系统的适应性和韧性,确保持续稳定的电力供应。

2 含高比例新能源电力系统的电力电量平衡运行模拟模型

本模型从调度运行角度,考虑了火电、风电、光伏、抽水蓄能、储能等多种电源类型,综合计算短期与长期电力运行成本,可通过系数调整各自成本占比,以适应不同情况下的需求,进而求出不同时间尺度下的运行调度安排。模型整体框架见图10。

$$C_{o,t} = \sum_{n=1}^{N_s} p_n (C_{G,t} + C_{N,t} + C_{erss,t})$$

$$\begin{cases} C_{G,t} = \sum_{i=1}^{N_G} [(a_i P_{G,i,t,n}^2 + b_i P_{G,i,t,n} + c_i) + S_{G,i} (1 - u_{G,i,t-1}) u_{G,i,t}] \\ C_{N,t} = \sum_{j=1}^{N_N} [C(P_{N,j,t,n}) + W(P_{N,j,t,n}) + S_i (1 - u_{N,j,t-1}) u_{N,j,t}] \\ C_{erss,t} = \sum_{e=1}^{N_{erss}} [C(P_{erss,e,t,n}) + W(P_{erss,e,t,n})] + \sum_{i=1}^{N_{bl}} \pi_{bl} u_{erss,e,t,n} \\ C_{DG,t} = \sum_{d=1}^{N_{DG}} [C(P_{DG,d,t,n}) + S_{DG} (1 - u_{DG,d,t-1}) u_{DG,d,t}] + k_{c,DG} (P_{DG,d,t,n}^{pre} - P_{DG,d,t,n}) \\ C_{load,t} = k_{c,load} P_{loss,t,n} \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_1 为调度优化模型的目标函数,代表系统总成本; $C_{o,t}$ 、 $C_{RE,t}$ 、 $C_{load,t}$ 分别代表运行成本、新能源机组成本及负荷成本; N_s 代表场景种类; p_n 代表第 n

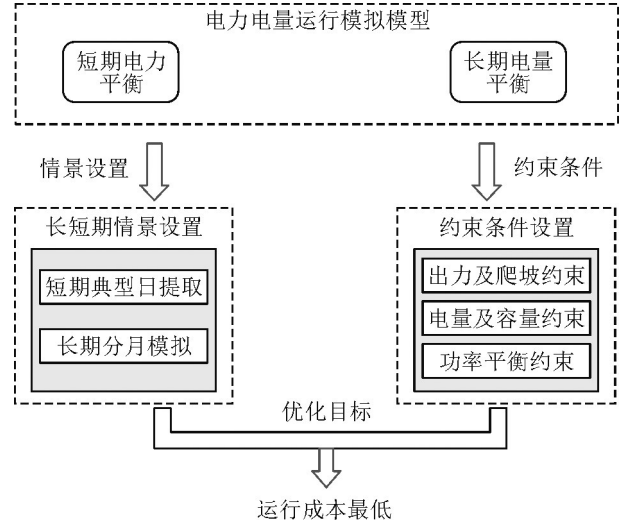


图10 电力电量平衡运行模拟模型框架
Fig. 10 Simulation modeling framework for electricity power balance operation

2.1 目标函数

目标函数主要由两部分组成,包括考虑短期电力平衡的运行成本 C_1 和考虑长期电力平衡的运行成本 C_2 ,如式(3)所示。考虑到 C_1 和 C_2 计算的都是电力系统在不同时间尺度上的年运行成本,因此引入 λ 作为长期运行成本相对于整体运行成本的权重系数,公式为

$$\min C = (1 - \lambda)C_1 + \lambda C_2 \quad (3)$$

2.1.1 短期电力平衡运行成本

为保证电力系统的可靠性供应和新能源的消纳,同时兼顾经济性的问题,目标函数应为计及弃负荷量及弃电量的惩罚成本在内的系统总运行成本。

$$C_1 = \sum_{t=1}^T (C_{o,t} + C_{RE,t} + C_{load,t}) \quad (4)$$

个场景发生的概率; $C_{G,t}$ 、 $C_{N,t}$ 及 $C_{erss,t}$ 分别代表火电机组、核电站及储能电站(抽水蓄能及电化学储能)的运行成本; a_i 、 b_i 及 c_i 分别为第 i 台火电机组的发

电成本系数; $S_{G,i}$ 为第 i 台火发电机组的成本系数^[25]; $P_{G,i,t,n}$ 为第 i 台火发电机组在场景 n 下 t 时的发电功率; $u_{G,i,t}$ 为第 i 台火发电机组的启停状态(包括以下所有状态变量, 1 为启动, 0 为停机); $P_{erss,e,t,n}$ 为电化学储能 e 的启停状态; $u_{DG,d,t,n}$ 为新能源机组 d 的启停状态; $u_{Nj,t,n}$ 为核电机组 j 的启停状态; $P_{Nj,t,n}$ 为第 j 台核电机组在场景 n 下 t 时的发电功率; $C(P_{Nj,t,n})$ 为其运行成本; $W(P_{Nj,t,n})$ 为其维护成本; $P_{erss,e,t,n}$ 为第 e 台储能电站在场景 n 下 t 时的功率; $C(P_{erss,e,t,n})$ 为其储能充放电成本, $W(P_{erss,e,t,n})$ 为其维护成本; π_{bl} 为电化学储能的折旧率; $P_{DG,d,t,n}$ 为第 d 台新能源机组在场景 n 下 t 时的发电功率; $C(P_{DG,d,t,n})$ 为其成本函数; $k_{c,DG}$ 为弃风弃光的惩罚成本系数, $P_{DG,d,t,n}^{pre}$ 第 d 台新能源机组在场景 n 下 t 时的预测功率; $k_{c,load}$ 为弃负荷成本系数; $P_{loss,t,n}$ 为 t 时场景 n 下的切负荷量。

2.1.2 长期电量平衡运行成本

$$C_2 = \sum_{m=1}^M \left(\sum_{Gi=1}^{N_G} C_{Gi,m} E_{Gi,m} + \sum_{DG=1}^{N_{DG}} C_{DG,m} E_{DG,m} + \sum_{Ni=1}^{N_N} C_{Ni,m} E_{Ni,m} + \sum_{erss=1}^{N_{erss}} C_{erss,m} E_{erss,m} + C_{loss,m} E_{loss,m} \right) \quad (6)$$

式中: $C_{Gi,m}$ 、 $C_{DG,m}$ 、 $C_{Ni,m}$ 、 $C_{erss,m}$ 、 $C_{loss,m}$ 分别为长期(月度)时间尺度下第 i 台传统火电机组、新能源机组、核电机组、储能机组与弃负荷惩罚单位电量的成本; $E_{Gi,m}$ 、 $E_{DG,m}$ 、 $E_{Ni,m}$ 、 $E_{erss,m}$ 、 $E_{loss,m}$ 分别为上述各类型第 i 台机组(或弃负荷)在第 m 月的月度电量; $M=12$ 代表每年共有 12 个月。

2.2 约束条件

2.2.1 短期电力电量平衡约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_i P_{Gi,t,n} + \sum_j P_{Nj,t,n} + \sum_d P_{DG,d,t,n} + \sum_e P_{erss,e,t,n} = P_{load,t,n} - \Delta P_{loss,t,n} \quad (7)$$

式中: $P_{load,t,n}$ 为不受电价影响的基本负荷。

2) 电量平衡约束

$$\sum_i \sum_t P_{i,t} \Delta t = \sum_i E_i \quad (8)$$

式中: $P_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段出力; E_i 为机组 i 调度周期目标电量值; Δt 为时段长度; N 为系统运行的机组数量。

3) 机组出力及爬坡约束

$$\begin{cases} u_{ji,t} P_{ji,t,n}^{\min} \leq P_{ji,t,n} \leq u_{ji,t} P_{ji,t,n}^{\max} \\ P_{ji,t,n} - P_{ji,t-1,n} \leq u_{ji,t} R_{ji} \\ P_{ji,t-1,n} - P_{ji,t,n} \leq u_{ji,t-1} R_{ji} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{ji,t,n}$ 为第 j 种类的第 i 个机组在场景 n 下 t 时的出力; R_{ji} 为第 i 个机组的爬坡率。

4) 新能源出力约束

$$0 \leq P_{DG,i,t,n} \leq P_{DG,i,t,n}^{pre} \quad (10)$$

5) 抽水蓄能约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{water,t,n}^{dis} \leq P_{water,t,n}^{dis,max} \\ 0 \leq P_{water,t,n}^{cha} \leq P_{water,t,n}^{cha,max} \\ V_{water,t,n}^{\min} \leq V_{water,t,n} \leq V_{water,t,n}^{\max} \\ |P_{water,t,n}^{dis} - P_{water,t-1,n}^{dis}| \leq \Delta P_R \\ |P_{water,t,n}^{cha} - P_{water,t-1,n}^{cha}| \leq \Delta P_R \\ V_{water,t,n} = V_{water,t-1,n} + C_{water}^{cha} \eta_{water}^{cha} P_{water,t,n}^{cha} - C_{water}^{dis} P_{water,t,n}^{dis} / \eta_{water}^{dis} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{water,t,n}^{cha}$ 、 $P_{water,t,n}^{dis}$ 为抽水蓄能电站的充放电功率; $P_{water,t,n}^{cha,max}$ 、 $P_{water,t,n}^{dis,max}$ 为电站充放电功率的最大值; $V_{water,t,n}$ 为抽水蓄能电站的蓄水量; $V_{water,t,n}^{\max}$ 、 $V_{water,t,n}^{\min}$ 为其储水量的最大值及最小值; ΔP_R 为抽水蓄能的爬坡率; η_{water}^{cha} 、 η_{water}^{dis} 为抽水蓄能电站充放电的效率; C_{water}^{cha} 、 C_{water}^{dis} 为其充放电时电量与用水量的转换系数。

6) 电化学储能

$$\begin{cases} 0 \leq P_{elec,t,n}^{dis} \leq P_{elec,t,n}^{dis,max} \\ 0 \leq P_{elec,t,n}^{cha} \leq P_{elec,t,n}^{cha,max} \\ S_{SOC,t,n}^{\min} \leq S_{SOC,t,n} \leq S_{SOC,t,n}^{\max} \\ S_{SOC,t,n} = S_{SOC,t-1,n} + \eta_{elec}^{cha} P_{elec,t,n}^{cha} - P_{elec,t,n}^{dis} / \eta_{elec}^{dis} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{elec,t,n}^{cha}$ 、 $P_{elec,t,n}^{dis}$ 为电化学储能电站的充放电功率; $P_{elec,t,n}^{cha,max}$ 、 $P_{elec,t,n}^{dis,max}$ 为逆变器的额定充放电功率; $S_{SOC,t,n}$ 为储能电站的荷电状态; $S_{SOC,t,n}^{\max}$ 、 $S_{SOC,t,n}^{\min}$ 为荷电状态的最大值及最小值。

7) 系统备用容量约束

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^J (-P_{ji,t,n}^{\max} - P_{DG,i,t,n}) \leq -P_{load,t,n} - P_{re} \\ \sum_{j=1}^J (P_{ji,t,n}^{\min} + P_{DG,i,t,n}) \leq P_{load,t,n} - N_{re} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_{re} 及 N_{re} 为系统正、负旋转备用; $P_{ji,t,n}^{\max}$ 为第 j 类机组的总出力最大值; $P_{ji,t,n}^{\min}$ 为第 j 类机组的总出力最小值。

8)调节限制约束

$$\begin{cases} |P_{ji,t,n} - P_{ji,t,bs}| \leq \psi_i \\ |P_{erss,t,n} - P_{erss,t,bs}| \leq \psi_{erss} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{ji,t,bs}$ 为第 j 类第 i 个机组的基准出力; $P_{erss,t,bs}$ 为储能电站的基准出力; ψ_i 为机组的灵活调节能力限制; ψ_{erss} 为储能电站的灵活调节能力限制。

2.2.2 长期电力电量平衡约束条件

1)电量平衡约束

$$\sum_{i=1}^N E_{Gi,m} + E_{DGi,m} + E_{Ni,m} + E_{erssi,m} = L_m - E_{loss,m} \quad (15)$$

式中, L_m 为系统在第 m 月的月度负荷电量。

2)火电机组利用小时数约束

$$H_{Gi\min} P_{Gi}^{\max} \leq \sum_{m=1}^{N_G} E_{Gi,m} \leq H_{Gi\max} P_{Gi}^{\max} \quad (16)$$

式中: $H_{Gi\min}$ 、 $H_{Gi\max}$ 分别为第 i 台火电机组年利用小时数的下限值与上限值; $P_{Gi}^{\max}$ 为第 i 台火电的装机容量。

3)新能源机组能量约束

$$E_{DGi,m} + E_{DGi,m}^{Cur} = E_{DGi,m}^{Pre} \quad (17)$$

式中, $E_{DGi,m}$ 、 $E_{DGi,m}^{Cur}$ 和 $E_{DGi,m}^{Pre}$ 分别为第 i 台新能源机组的电量、弃电量和预测电量。

本文所建立模型以电力系统有功功率的电力电量平衡为核心,考虑了不同种类电源的出力和容量约束。以此为基础,建立了运行经济性最优的目标函数。该模型可抽象为复杂条件下的规划问题,通过现有求解器即可求解,具有较好的可行性并对实际工作有一定的指导意义。

3 算例分析

为验证所提模型的有效性,本算例基于福建省电力供求的真实数据,旨在不同时间尺度下,即以小时为单位的短期电力电量平衡与以月为单位的长期电力电量平衡,对福建省高比例新能源电力系统整体的电力供应情况进行仿真与分析。模型以 Matlab 平台中的 YALMIP 工具包调用 CPLEX 软件为基础进行,其计算流程见图 11,长短期电力电量

平衡调度结果通过商业求解器直接计算得出,算例后半部分中火电机组容量相关设置结果则通过多次迭代试验得出。算例中电源种类及装机容量边界值见表 1。

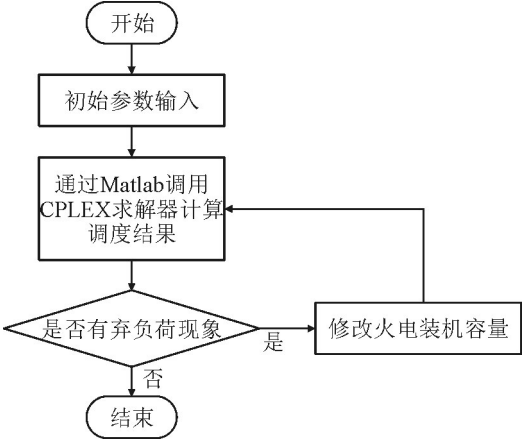


图 11 算例部分计算流程图
Fig. 11 Calculation flowchart of example part

表 1 电源种类及装机容量边界
Table 1 Type of power supply and installed capacity boundaries

电源种类	装机容量边界/GW
传统火电	29.9
水力发电	12.08
抽水蓄能	3.3
核电	11.01
风力发电	7.42
光伏发电	4.65
储能	0.03

3.1 长期电力电量平衡仿真计算分析

本节算例主要研究福建省高比例新能源接入电网的情景下,不同火电装机规模对应的电力电量平衡相关问题,为了体现不同季节之间的关联性,首先进行全年逐月的电量平衡仿真计算,然后根据季节进行划分,分析长期电量平衡的季节特性,最后汇总得到年度电量平衡结果。本算例设置了 3 个子场景分别开展测算,不同季节在 27.9 GW、28.9 GW、29.9 GW 3 种场景的火电机组装机下电力缺口时长和最大缺口的期望值见表 2。月内各时段供应与消纳能力的最大化以及各时段的调节能力均衡。

表 2 不同季节电力平衡分析结果
Table 2 Analysis results of power balance in different seasons

参数	场景	全年	春	夏	秋	冬
缺口电量/GW·h	1	527.89	120	161.37	137.87	108.66
	2	351.39	79.857	107.48	91.746	72.310
	3	175.99	40.029	53.874	45.841	36.245
最大缺口电量/GW·h	1	56.756	43.561	56.756	49.368	47.017
	2	37.861	28.989	37.861	32.849	31.289
	3	18.978	14.531	18.978	16.318	15.684

4个季度典型日的仿真结果相比,长期电力电量平衡中,4个季度均出现了电量缺口,从电量缺口季节分布来看,福建省电网的电力缺口主要发生在夏季,而冬季电力缺口最少,4个季节电力缺口分别占电力缺口总量的22.75%、30.61%、26.05%和20.6%,这是由于在夏季用电高峰,风电出力不足且新能源出力存在波动性,看似电源装机容量远超供电需求,但实际可调电力不足,导致出现电力缺口。而福建冬季温度适宜,负荷最低,且风光资源丰富,电力缺口反而最小。最大电力缺口均发生在夏季,期望值为107.572 44 GW。

考虑到火电机组的逐步退役使高比例新能源电力系统面临着更大的电量平衡压力,为使长期电力电量平衡中不出现弃负荷现象,在现有新能源装机量与负荷需求量的基础上,取火电机组年利用小时数为4 500 h,逐渐增大火电机组装机容量进行仿真计算,得火电机组的装机容量至少达到34.8 GW时,能够满足电力系统月度电量平衡需求,不出现电量缺口,月电量平衡结果见图12。

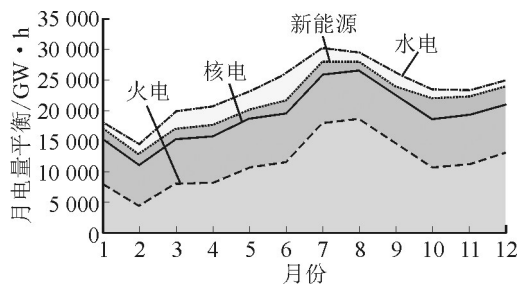


图12 月电量平衡结果

Fig. 12 Monthly power balance results

3.2 短期电力电量平衡仿真分析

本节进行短期电力电量平衡分析,首先基于实际运行数据,通过聚类计算得到6个典型日的负荷曲线与新能源出力曲线,接着进行以运行成本最优为目标的仿真计算得到所选典型日的调度运行优化计划,最后进行对比分析。

该6个典型日又可分为2个子类别,分别为4个季度典型日与2个极端天气典型日。通过对福建省2017~2022年新能源出力及负荷数据进行聚类计算分析,得到全省新能源出力与负荷需求在4个季度的典型曲线,如图13所示。通过图13(b)可以看出,新能源出力在大部分情况下具有中午时段出力高,其他时段出力低的“调峰”特性,而在某些天气条件下,新能源出力表现出与该特征相反的“反调峰”特性;其他一些极端天气情况下,新能源出力会受到影响进而大幅减少,故本算例另外选取了1个

低出力典型日与1个“反调峰”典型日,其负荷及新能源出力曲线分别见图14、图15。

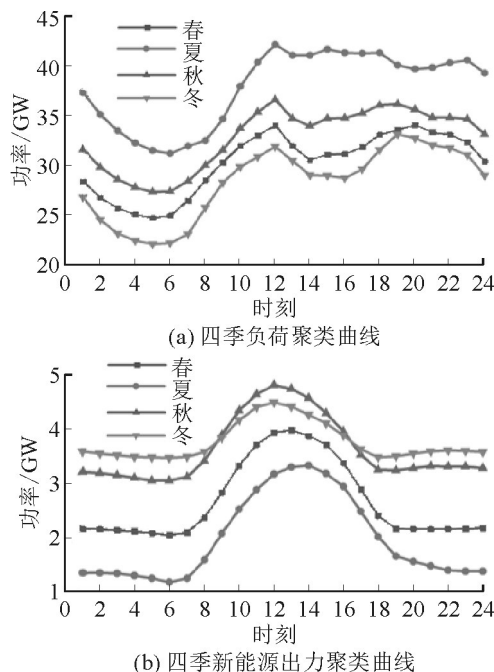


图13 四季新能源出力聚类曲线

Fig. 13 New energy output cluster curve for four seasons

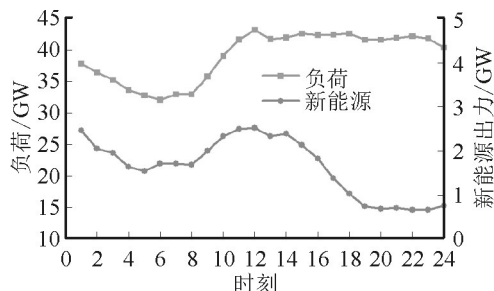


图14 低出力典型日负荷及新能源出力曲线

Fig. 14 Typical daily load and new energy output curve for low outputs

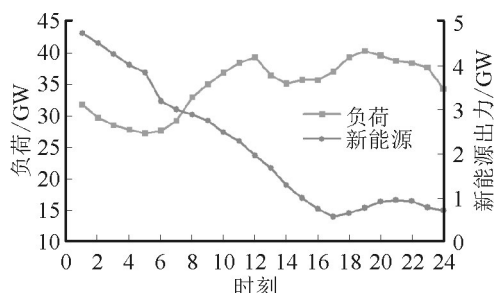


图15 反调峰典型日负荷及新能源出力曲线

Fig. 15 Typical daily load and new energy output curve for anti-peaking operation

3.2.1 季度典型日仿真结果分析

通过图13可以看出,福建省该地区夏季负荷显著高于其他季节,冬季负荷最低,这是由于夏季高温天气且维持时间极长,冬季温度处于较为适

宜的温度范围内,供暖供冷压力显著减小。而福建该地区新能源出力夏季最低,冬季秋季最高,在夏季存在极热无风,风电供应不足的问题,而处于17~22 h时负荷高峰期间,光伏发电不足,新能源反而供应不足。仿真计算结果见图16,可以看到,由于负荷需求高、新能源出力低的特点,夏季

典型日出现了电量缺口,且是4个季度中唯一出现此现象的季度。从发生的时刻来看,电力缺口主要发生在晚高峰时段,此时段光伏发电出力几乎为零,对电力负荷的支撑作用大大减弱,而此时若风力发电出力也较小,电力缺口的情况会更加严重。

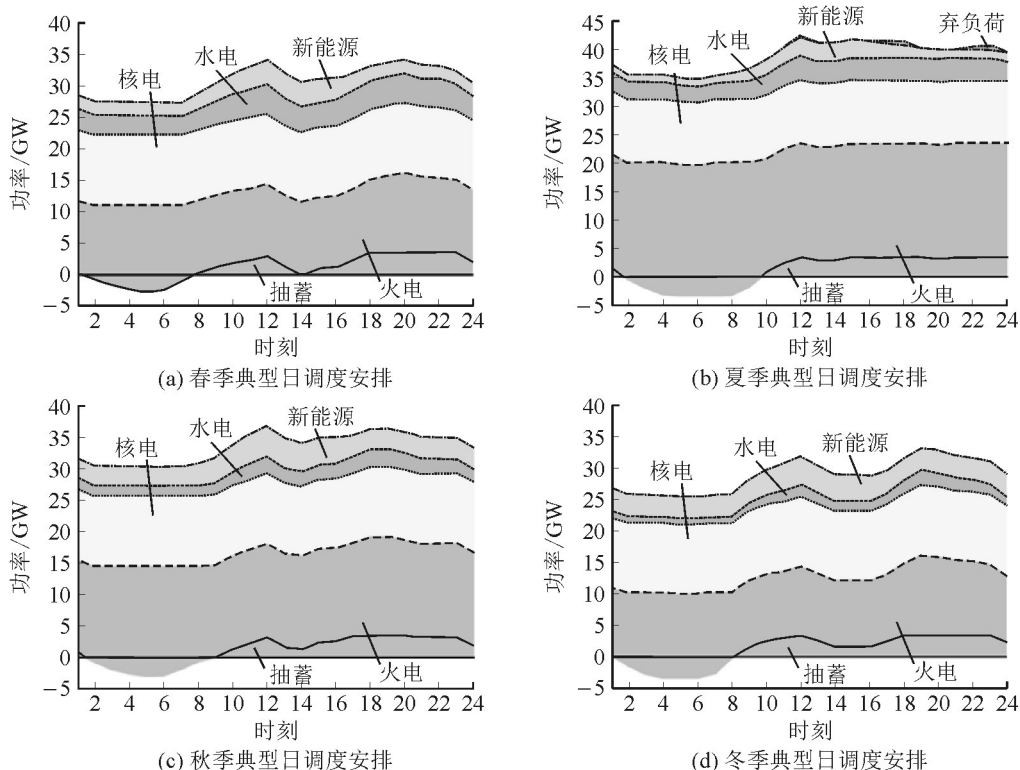


图16 四季典型日调度安排
Fig. 16 Typical daily scheduling arrangement for four seasons

综合来看,福建省新能源发电和负荷特性表现出较强的季节特性,应在不同季节制定相应的调度安排计划,尤其在夏季制定完备的电力保供措施是十分必要的。

3.2.2 极端天气典型日仿真结果分析

“反调峰”典型日与极端天气典型日的调度计划仿真计算结果见图17。由图可以看出,“反调峰”典型

日中新能源出力变化特征与一般情况有较大区别,出现了一定程度的弃负荷情况,在新能源装机量逐渐增大的趋势下,这一情况的弃负荷风险将逐渐增大,这就要求做好新能源出力的预测工作,其他形式电源也应及时调整,积极配合以应对“反调峰”情况。而当遭遇极端天气时,新能源出力下降明显,发电总量占比仅为4.36%,此时也出现了一定的弃负荷现象。

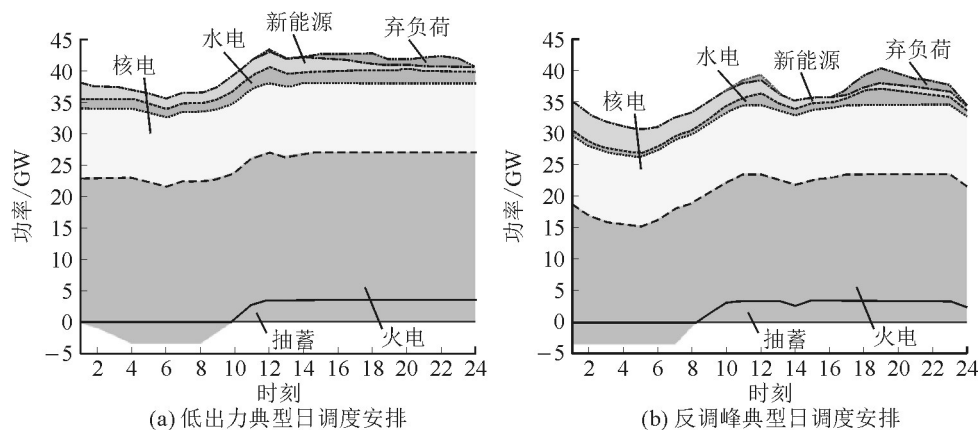


图17 极端天气条件下典型日调度安排
Fig. 17 Typical daily scheduling arrangement under extreme weather condition

在本算例中的两类特殊情况下,弃负荷风险有明显上升的现象,能为电力系统实际调度运行提供一定参考。但是值得注意的是,算例所考虑的仍为相对极端的场景。进一步地,从上述仿真计算中可以看出,核电与传统火电机组有很大的电网支撑作用,面对出现弃负荷的3个典型日,调整火电机组的容量是减小乃至消除弃负荷现象的途径之一,在此,简单计算消除弃负荷现象的最小容量以供参考,结果见表3。

表3 场景分类及最小容量
Table 3 Scene classification and minimum capacity

典型日场景	火电机组最小容量/GW
夏季典型日	21.0
“反调峰”典型日	22.5
低出力典型日	25.4

3.3 电力电量平衡仿真分析讨论

从短期电力电量平衡模拟结果看出,季节典型日所代表的的平均情况中,夏季负荷明显高于其他季节,因而出现了弃负荷现象,反映出夏季高温带来的电力保供压力较大,而反调峰与低出力典型日所代表的极端情况均出现了弃负荷现象,值得注意的是,弃负荷集中出现在午后至午夜这一时段。从长期电力电量平衡模拟结果看出,这一时间尺度下弃负荷现象十分明显,且占负荷比例均高于20%。另外综合两种时间尺度的模拟结果来看,在发生弃负荷的情况下,抽水蓄能与电化学储能的出力几乎全时段达到极限值,可见储能性质电源对于电力系统的调整作用之强。因此基于以上福建省新能源发电情况、负荷数据以及仿真计算结果,提出以下3点建议:

1)合理安排电源建设时,需要充分考虑新能源出力波动性对电力有序供应的影响,优化电源结构,统筹新老电源建设,配置足够的常规电源或灵活调节电源来满足迎峰度夏供应需求;

2)在高比例新能源接入电网的背景下,需深度挖掘电网需求侧潜力。建议采用智能调度系统,实现对可控负荷的灵活配置,提高电能利用效率。同时,推动分布式能源发展,鼓励用户参与电能市场,促进电力系统可持续升级,实现清洁能源与电网协同发展;

3)建议优化储能系统容量与输出特性,以平衡新能源波动性,提升电网稳定性。一方面应均衡配置长期储能和短期储能以分别应对新能源出力的季节性不平衡与波动性;另一方面采用智能控制技

术,实现储能与新能源机组的协同运行,灵活应对电力需求波动,以确保可靠供电并最大化清洁能源利用,协调配置储能系统与新能源机组。

4 结语

随着高比例新能源接入电网,受气候驱动的风电和光伏等新能源在电力系统中的影响逐渐显著。本文针对高比例新能源电力系统的电力电量保供问题,结合福建电网的运行数据提出了面向不同时间尺度的电力电量平衡模拟分析模型,得出以下结论:

1)以风电、光伏为代表的新能源出力在短期尺度有较大的时段波动特性,在长期尺度有较大的季节波动特性,电源检修运行安排、电力保供面临较大挑战;

2)出现电力缺口以及新能源出力大幅时,储能性质电源灵活调整出力,调整作用明显。未来可大力发展飞轮储能、重力储能、电化学储能等多种形式的新型储能技术;

3)从运行经济性角度看,传统火电机组的负荷支撑作用明显,这与清洁能源占比逐渐提高、火电机组逐渐退役的趋势矛盾,可考虑使用有类似特性的核电机组进行替代,但运行调度细节上仍有一定区别。

本文通过分析2019~2022年福建电网新能源发电数据,归纳福建省新能源和负荷在短期和长期平衡方面的特性。定量分析揭示了福建典型电网在大规模新能源整合下可能面临的电力供应不足问题,并提出了相应的电力电量平衡建议,为未来解决高比例新能源接入的电网电力供应问题提供了借鉴。

参考文献

[1] 张保淑. 能源绿色转型 澎湃发展动能[N]. 人民日报海外版, 2023-12-18.

[2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.

XI Jinping. Statement at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020 (28): 5-7.

[3] 陈怡, 田川, 曹颖, 等. 中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(5): 632-640.

CHEN Yi, TIAN Chuan, CAO Ying, et al. Research on peaking Carbon emissions of power sector in China and the emissions mitigation analysis[J]. Climate Change Research, 2020, 16(5): 632-640.

- [4] 史立山. 构建适应可再生能源资源特点的新型电力体系[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(4): 1-4.
SHI Lishan. Construct a new power system compatible with the characteristics of renewable energy resources[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(4): 1-4.
- [5] 肖先勇, 郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & Carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.
- [6] 福建省人民政府. 我国首个国家级海上风电研究与试验检测基地在闽开工建设[EB/OL]. 2024-03-24. https://www.fujian.gov.cn/xwdt/fjyw/202312/t20231202_6321080.html.
- [7] 福州市工信局. 福州连江, 将建设全国单机容量最大海上风电项目[EB/OL]. 2024-03-24. <http://www.chinapower.com.cn/flfd/xmjz/20240313/238729.html>.
- [8] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [9] 姜昊, 王玉峰. 基于在线学习的面向居民用户激励型需求响应[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(6): 23-33.
JIANG Hao, WANG Yufeng. Incentive demand response for residential users based on online learning[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(6): 23-33.
- [10] ERSUN D U, JIANG Haiyang, XIAO Jinyu, et al. Preliminary analysis of long-term storage requirement in enabling high renewable energy penetration: A case of East Asia[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(6): 1255-1269.
- [11] 鞠冠章, 王靖然, 崔琛, 等. 极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 77-83.
JU Guanzhang, WANG Jingran, CUI Chen, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 77-83.
- [12] 李可昕, 郭鸿业, 陈启鑫. 从加州限电事故与美国 WEIM 机制看电力市场的融合协同[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 1-8.
LI Kexin, GUO Hongye, CHEN Qixin. Integration and collaboration of electricity market from perspectives of electricity restriction accident in California and mechanism of western energy imbalance market in USA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 1-8.
- [13] 纪昌明, 赵亚威, 张彦科, 等. 考虑弃水电量成本的短期电力电量平衡模型[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 50-63.
JI Changming, ZHAO Yawei, ZHANG Yanke, et al. Short-term power balance model considering cost of abandoned hydropower[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(3): 50-63.
- [14] 刘德旭, 刘艳, 潘永旗, 等. 基于可再生能源发电优先消纳的电力电量平衡模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 64-71.
LIU Dexu, LIU Yan, PAN Yongqi, et al. Research on power balance model based on priority consumption of renewable energy power Generation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 64-71.
- [15] 曾雪婷, 刘天琪, 李茜, 等. 高水电比重系统电力电量平衡混合整数二次规划模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1114-1124.
ZENG Xueting, LIU Tianqi, LI Qian, et al. An mixed integer quadratic programming model and algorithm study for power balance problem of high hydropower proportion's system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1114-1124.
- [16] 刘明浩, 王丽萍, 王渤权, 等. 基于出力不均匀性的火电站电力电量平衡方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 162-168.
LIU Minghao, WANG Liping, WANG Boquan, et al. Power and energy balance method of thermal power station based on uneven output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 162-168.
- [17] 杨楠, 郝俊聪, 产雪振, 等. 数据驱动的考虑安全约束机组组合问题研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3654-3668.
YANG Nan, HAO Juncong, CHAN Xuezhen, et al. Review of data-driven security-constrained unit commitment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3654-3668.
- [18] KHAN M A, BAYATI N, EBEL T. Techno-economic analysis and predictive operation of a power-to-hydrogen for renewable microgrids[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 298(12): 117762.
- [19] 陈典, 陆润钊, 张健, 等. 实用化水火风光系统时序电力电量平衡方法[J]. 水力发电学报, 2023, 42(5): 25-34.
CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Jian, et al. Sequential power and energy balance practical method for hydro-thermal-wind-solar power systems[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(5): 25-34.
- [20] 朱罡, 李延和, 张真, 等. 省级电网全清洁能源供电运行控制技术与应用[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 195-205.
ZHU Gang, LI Yanhe, ZHANG Zhen, et al. Operation control technology and application of all-clean energy power supply in provincial power grid[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 195-205.

- 2017,37(2): 336-348.
- [23]曾正,赵荣祥,汤胜清,等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):1-12.
- ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, TANG Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-12.
- [24]李亚军,何山,胡兵,等. 考虑最大效率的风光制氢系统容量配置及功率调控[J]. 电气传动,2024,54(10):50-57.
- LI Yajun, HE Shan, HU Bing, et al. Capacity configuration and power regulation of scenic Hydrogen production system considering maximum efficiency[J]. Electric Drive, 2024, 54(10): 50-57.
- [25]MA Zhiwen, WITTEMAN L, WRUBEL J A, et al. A comprehensive modeling method for proton exchange membrane electrolyzer development[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(34): 17627-17643.
- 作者简介:**
- 施涛(1982—),男,副教授,研究方向为新能源与储能运行控制。
- 许泽炎(2000—),男,硕士,研究方向为新能源与储能运行控制。E-mail:1222056624@njupt.edu.cn。
- 雷震亚(2006—),男,学士,研究方向为新能源与储能运行控制研究。
- 朱维骏(2002—),男,硕士,研究方向为新能源与储能运行控制。
-
- (上接第25页)
- [21]韩凝晖,周颖,石坤,等. 面向新型电力系统电量平衡的可调节负荷互动潜力分析[J]. 电力需求侧管理,2022,24(6):70-76.
- HAN Ninghui, ZHOU Ying, SHI Kun, et al. Adjustable load interaction potential oriented to power balance of new power system[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 70-76.
- [22]鲁宗相,林弋莎,乔颖,等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化,2022,46(16):3-16.
- LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.
- [23]孔慧超,黄学劲,王文钟,等. 园区受端新型电力系统电力电量再平衡方法[J]. 综合智慧能源,2024,46(2):68-74.
- KONG Huichao, HUANG Xuejin, WANG Wenzhong, et al. Electric power and energy rebalancing method for new power systems at receiving ends of industrial parks[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(2): 68-74.
- [24]OHLENDORF N, SCHILL W P. Frequency and duration of low-wind-power events in Germany[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(8): 084045.
- [25]杨楠,贾俊杰,邢超,等. 基于E-Seq2Seq技术的数据驱动型机组组合智能决策方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(23):7587-7599.
- YANG Nan, JIA Junjie, XING Chao, et al. Data-driven intelligent decision-making method for unit commitment based on E-Seq2Seq technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7587-7599.
- 作者简介:**
- 徐子韬(1998—),男,硕士研究生,从事电力系统规划和运行研究工作。E-mail:346083405@qq.com。
- 王志昊(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析。
- 张智(1994—),男,讲师,通信作者,从事电力系统规划和运行研究工作。