

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0164-05

基于双层调度模型和需求分析的新能源电网规划优化模型

吴国栋^{1,2}, 李晓虎², 王 晟³, 包广清¹(1. 兰州理工大学, 电气工程与信息工程学院, 兰州 730030; 2. 甘肃省电力公司, 兰州 730030;
3. 甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730030)

摘要:随着大规模的新能源并网, 电力系统的结构、形态等发生了根本性改变, 其电网规划难度逐渐提高。针对此现状, 研究提出一种基于双层调度模型和需求分析的新能源电网规划优化模型。该模型将电网调度优化分为两层结构, 上层结构中用户将对电价的需求以及响应纳入规划中。下层结构中主要考虑新能源发电的成本消耗, 将其作为下层目标函数。通过风电、光伏发电进行预测, 以不同时段电价需求分析纳入其中, 实现新能源电网规划优化。结果表明, 在引入方法后, 风光发电的最优消纳率显著提高。在考虑需求后, 负荷峰谷差缩小了 165.48 kW。研究设计的模型能够有效降低运行成本, 并减小负荷波动, 具体表现在其运行成本仅为 7 584.88 万元, 最优消纳率达到了 83.47%, 峰、谷时段负荷差为 165.87 MW。研究设计模型能够有效提高新能源的利用效率, 降低成本。该方法为新能源电网规划提供了可量化的技术路径与实践范式。

关键词: 双层调度模型; 需求分析; 新能源电网; 规划; 优化; 消纳率

中图分类号: TN72

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0164-05

Model of new energy grid planning optimization based on two-layer scheduling model and demand analysis

Wu Guodong^{1,2}, Li Xiaohu², Wang Sheng³, Bao Guangqing¹(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730030, China;
2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China;
3. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Lanzhou 730030, China)

Abstract: With the large-scale integration of new energy sources, the structure and form of the power system undergo fundamental changes, and the difficulty of grid planning is gradually increased. In response to this situation, a new power grid planning optimization model based on a two-layer scheduling model and demand analysis is proposed. This model divides the optimization of power grid scheduling into two layers. The upper layer structure incorporates users' demand for electricity prices and their responses into the planning. The lower layer structure mainly considers the cost consumption of new energy generation and regards it as the lower-level objective function. By predicting wind power and photovoltaic power generation and incorporating the electricity price demand analysis in different time periods, the optimization of the new energy power grid is achieved. The results show that after introducing this method, the optimal consumption rate of wind and solar power generation has significantly improved. After considering the demand, the peak-valley difference of the load has decreased by 165.48 kW. The designed model in the study can effectively reduce operating costs and reduce load fluctuations. Specifically, its operating cost is only 7 584.88 million yuan, the optimal consumption rate reaches 83.47%, and the load difference between peak and valley periods is 165.87 MW. The designed model can effectively improve the utilization efficiency of new energy and reduce costs. This method provides a quantifiable technical path and practical paradigm for the planning of new energy power grids.

Keywords: two-layer scheduling model; demand analysis; new energy grid; planning; optimization; absorption rate

随着全球气候变暖和环境问题日益突出, 可再生能源的利用成为各国政府和科研机构关注的重点。新能源, 如太阳能、风能等, 作为清洁、可再生的能源形式, 具有巨大的发展潜力和应用前景^[1]。然而, 新能源并网给传统电网带来了新的挑战, 分布式新能源的并网, 改变了电力系统的结构、形态与运行控制方式^[2]。而风、光等新能源具有

较强的不确定性, 其出力受天气、季节等多种因素影响, 给电网的稳定运行和调度带来了极大的困难。此外, 新能源的大规模并网还会引起电网电压波动、谐波污染等问题, 进一步加剧了电网规划的难度^[3]。为解决新能源发电系统的能源利用率低, 规划难的问题, 国内外学者展开了深入研究。王文焯等^[4]为解决风光等能源的并网造成的电

收稿日期: 2024-11-11; 录用日期: 2025-01-14

基金项目: 国网甘肃省电力科学研究科技项目(52272223004X)

作者简介: 吴国栋(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化、可再生能源发电。

引用本文: 吴国栋, 李晓虎, 王 晟, 等. 基于双层调度模型和需求分析的新能源电网规划优化模型[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(6): 164-168.
(Wu Guodong, Li Xiaohu, Wang Sheng, et al. Model of new energy grid planning optimization based on two-layer scheduling model and demand analysis [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6): 164-168.)

力系统调度困难问题,提出了一种含规模氢能综合利用的分布式新能源电力系统调度方法。该方法提出氢能和火电结合的补偿策略,进一步提高系统消纳率。结果表明,该调度方法能够有效促进新能源发电消纳和备用能力。Singh等^[5]为提高风力发电系统的利用率以及电力系统的发电质量,提出了一种基于遗传算法和斐波那契方法的双层调度优化框架。该框架通过估计机组故障时间来对电力系统的调度进行优化。结果表明,该调度方法能够提高新能源发电的利用率。综合上述内容可知,分布式新能源电网的调度主要选择两种能源的组合方式,对于3个或3个以上新能源的电网调度问题研究较少。且目前的电网规划调度方法主要从能源自身特性出发,通过补偿机制保持系统发电稳定。但很少研究考虑从用户需求的响应角度实现用户用电量调度。针对此现状,研究提出了一种基于双层调度模型和需求分析的新能源电网规划优化模型。

该模型通过对多能源发电系统的需求响应进行建模,之后利用双层调度模型对配电网进行调度规划。研究旨在构建一个新能源电网规划模型,提高新能源的利用率,实现发电系统的调度优化。研究的创新性在于针对风光水火多能源的调度问题进行分析。同时从用户角度建立对应的需求响应模型,进一步提高配电网的能源利用率。

1 电网规划优化方法设计

1.1 发电系统建模及需求分析

风光水火多能源发电系统结合了风能、太阳能、水能以及火力发电等多种能源形式,通过互补优化调度,提高了能源利用效率和系统稳定性^[6-8]。为了更好地进行新能源电网规划优化,首先需要对风光水火多能源发电系统进行建模,并深入分析其需求特性。四种发电方式的流程如图1所示。

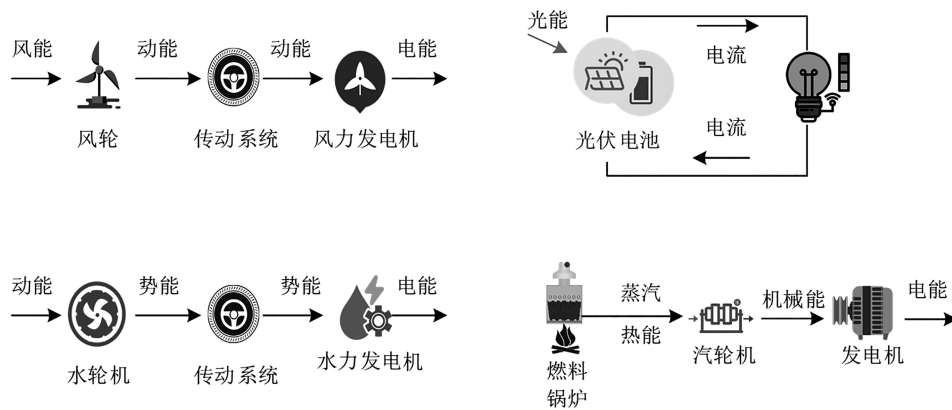


图1 风光水电多能源发电的流程

Fig. 1 Process of multi-energy generation by hydropower and wind power

风电出力预测值主要由风速来决定,其输出功率的计算方法如式(1)所示。

$$P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{in} \\ P_r \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v < v_0 \\ 0, & v \geq v_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_0 和 v_{in} 分别为切出和切入风速, v_r 为研究设定的风速阈值, P_r 为设定功率阈值, P_w 为风力发电功率。光伏发电的输出功率计算方法如式(2)所示。

$$P_{pv,t} = P_{STC} \frac{GG_1}{G_{STC}} [1 + k(T_{c,t} - T_{STC})] N_s N_p \quad (2)$$

式中, P_{STC} 为标准条件下输出功率, GG_1 为总太阳辐射量, G_{STC} 为当前时刻的太阳辐射量和标准条件下的太阳辐射量, k 为功率-温度系数, $T_{c,t}$ 和 T_{STC} 分别为光伏电池的表面温度和标准条件下光伏电池温度, t 为当前时刻, c 为当前温度,两个指标用于确定光伏电池当前状态, N_s 和 N_p 为光伏阵列串联单元和并联单元的数量。水力发电的输出功率计算方法如式(3)所示。

$$P_{h,t} = \frac{AVh_t\eta_t}{t} \quad (3)$$

式中, A 为水电转换常数,研究将其设为 9.8, V 为发电引用流量, h_t 为上下游水位差, η_t 为水力发电机效率。为保障新能源发电系统的安全稳定运行,促进可再生能源高效消纳,研究选择可控煤电机组作为调峰电源。为进一步提高系统的运行稳定性,研究在多能源发电系统中引入储能系统,在接入电网时对发电高峰和低峰进行调节^[9-10]。最优消纳率的计算方法如式(4)所示。

$$\begin{cases} \min F(P_{net}) \\ P_{net} = P_D - \lambda_w P_w - \lambda_{pv} P_{pv} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_{net} 为电力系统的净负荷, $F(\cdot)$ 为电力系统的运行成本, λ_w 为风电场的输出功率消纳率, λ_{pv} 为光伏机组的输出功率消纳率, P_w 为风电场的输出功率, P_D 为用户侧需要功率。虽然引入消纳率之后能够有效调整能源,进一步降低调节压力。但在用电高峰时段,此调节策略效果并不够理想。针对此,研究引入价格需求响应模型,通过调整电价进而引导用户的用电行为,进一步降低高峰期的用电负荷。在电价调整过程中,研究需要对用电量变化程度进行计算,进一步对电价调整幅度进行优化。衡量变化程

度的参数为价格弹性系数,其计算方法如式(5)所示。

$$\varepsilon = \frac{\Delta q \Delta p'}{q} \quad (5)$$

式中, q 为电价调整前的价格, Δq 为调整后电价变化, p' 为电价调整前的负荷, ε 为弹性系数, $\Delta p'$ 为调整后负荷变化。研究根据用户的用电习惯将一天 24 小时分为 3 个阶段,分别表示用电高峰,用电低谷和用电平峰。具体划分情况以及电价调控应用到电力系统中的流程如图 2 所示。

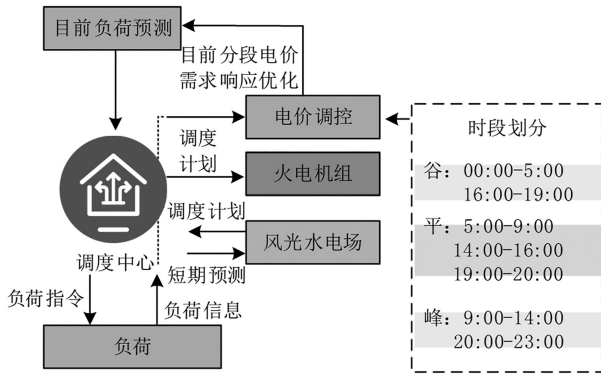


图 2 电负荷具体划分情况以及电价调控应用到电力系统中的流程

Fig. 2 The process of specific division of electricity load and electricity price regulation applied to the power system

在通过电价调节用电量的过程中有两种需求响应,分别为自响应和互响应。自响应是电价较高时,用户自觉减少用电行为的响应。而互响应是电价从高降低时用户的用电行为。两种行为下的弹性系数分别为自弹性系数和互弹性系数。价格调整后,各个时段的负荷情况如式(6)所示。

$$P_{de,t} = \begin{bmatrix} P_{ef} \\ P_{ep} \\ P_{eg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{ef} & 0 & 0 \\ 0 & P_{ep} & 0 \\ 0 & 0 & P_{eg} \end{bmatrix} E \begin{bmatrix} \frac{\Delta q_f}{q} \\ \frac{\Delta q_p}{q} \\ \frac{\Delta q_g}{q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $P_{de,t}$ 为各时段负荷情况矩阵, P_{ef} 、 P_{ep} 、 P_{eg} 为响应前峰、平、谷时段的负荷, ΔP_f 、 ΔP_p 和 ΔP_g 为三个时段的总电价转移量; E 为需求响应中弹性系数相关关系矩阵。

1.2 基于双层调度的规划优化

在建立完新能源发电机组的模型并根据需求分析提出电网规划的考虑因素后,研究将风光火电多能源发电系统的优化调度模型分为两层。上层通过电价需求响应以及消纳率实现电力系统净负荷方差最小、负荷波动率最小的目标函数。下层通过对新能源发电系统的输电功率以及机组使用情况进行控制,进一步降低系统的运行成本。研究设计的双层调度模型如图 3 所示。

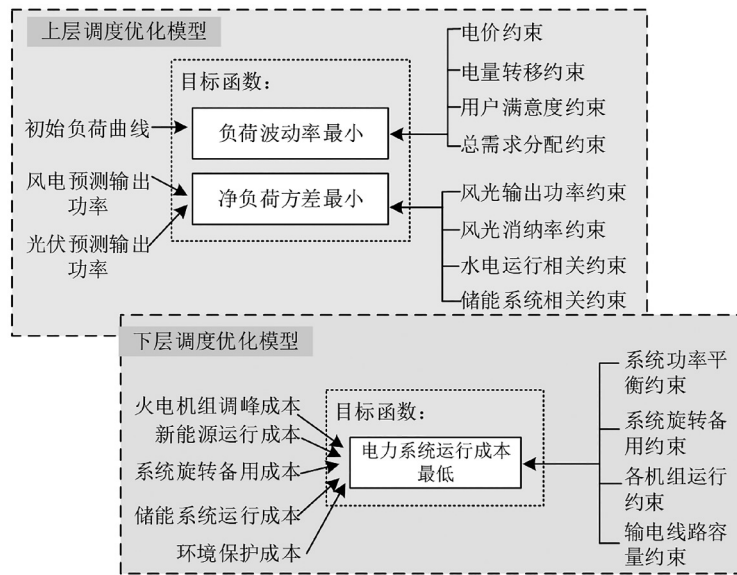


图 3 考虑价格需求以及消纳率的双层优化调度模型

Fig. 3 Two-level optimization scheduling model considering price demand and consumption rate

如图 3 所示,研究设计的双层调度优化模型中有三个不同的目标函数,通过对消纳率、电价、系统功率等进行约束实现。其中净负荷指火电机组负荷量,该目标函数的计算方法如式(7)所示。

$$\min F_1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{net,t} - P_{net,ave})^2 \quad (7)$$

式中, T 为整个调度周期, $P_{net,t}$ 为该时段电力系统的净负荷, $\min F_1$ 为净负荷方差最小目标函数, $P_{net,ave}$ 为整个调度周期内净负荷的平均值。上层的另一个目标函数是负

荷波动率最小函数。为实现此目标,研究从负荷侧进行考虑,引入价格型需求响应。该目标函数如式(8)所示。

$$\min F_2 = \min \left(\sum_{t=1}^T (P_{D,t+1} - P_{D,t})^2 \right) \quad (8)$$

式中, $P_{D,t}$ 和 $P_{D,t+1}$ 分别为实施价格型需求响应技术后 t 时段和 $t+1$ 时段的电负荷值, $\min F_2$ 为负荷波动率最小目标函数。通过对峰、平、谷 3 个时段的电价改变,引导用户在价格信号的驱动下,将用电需求从高峰时段转移至平、谷时段,从而降低负荷波动率。由此在满足电网运行成本的前提下,有效降低系统的净负荷方差和负荷波动

率,提高电网的稳定性和经济性。研究对3个时段的电价进行约束,确保3个时段的电量转移保持平衡,相加为0;此外还需要保证转移量不能超过设定的阈值范围^[11-12]。除了对转移电量进行约束之外,研究对用电支出以及用电过程的使用满意度进行约束。具体的约束如式(9)所示。

$$\begin{cases} M_s \leq 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |\Delta P_t|}{\sum_{t=1}^T P_{et}} \\ M_p \leq 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |\Delta q'_t|}{\sum_{t=1}^T q'_{et}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, M_s 和 M_p 分别为对电费支出的满意度以及用电过程的使用体验满意度, P_{et} 和 ΔP_t 分别为设施价格型需求响应前后的负荷和变化量, q'_{et} 和 $\Delta q'_t$ 为实施价格需求响应前后的电价和电价改变量。运行成本也是优化模型中不可忽视的核心变量,需在负荷平抑与用户满意度双重约束下实现最小化^[13-14]。因此,研究将下层优化调度模型以电力系统总运行成本为优化目标,具体如式(10)所示。

$$\min F_3 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 - C_6 \quad (10)$$

式中, $C_1 \sim C_6$ 依次为几个新能源的发电成本、火力发电

以及调峰成本、备用系统及维修成本、储能成本、环境保护费用、收益情况, $\min F_3$ 为电力系统总运行成本最小化目标函数。电力系统在运行过程中需要保持稳定,因此,研究对输电负荷进行约束,具体如式(11)所示。

$$0 \leq P_{L,t} \leq P_{L,max} \quad (11)$$

式中, $P_{L,t}$ 为 t 时段线路的输电功率, $P_{L,max}$ 为线路的最大输电容量。综合上述内容,研究建立了风光水火多能源发电机组的数学模型,并通过需求分析选择了消纳率以及价格需求响应作为调度优化模型的主要考虑条件。之后建立了共计三个目标函数的双层优化调度模型。进一步实现了多能源电力系统的调度规划优化。

2 电网规划优化模型性能分析

为检验研究设计的基于双层调度模型的新能源电网规划优化模型的性能,研究选取A地多能源发电系统的历史发电数据作为仿真软件的输入,在MATLAB/Simulink中通过编程对风光水火多能源发电系统进行仿真。研究将电力系统中增加了储能系统以进一步提高新能源发电的消纳率。针对此,研究对考虑储能前后风光发电的最优消纳率变化情况以及考虑消纳率调度前后运行成本的变化情况进行记录,具体如图4所示。

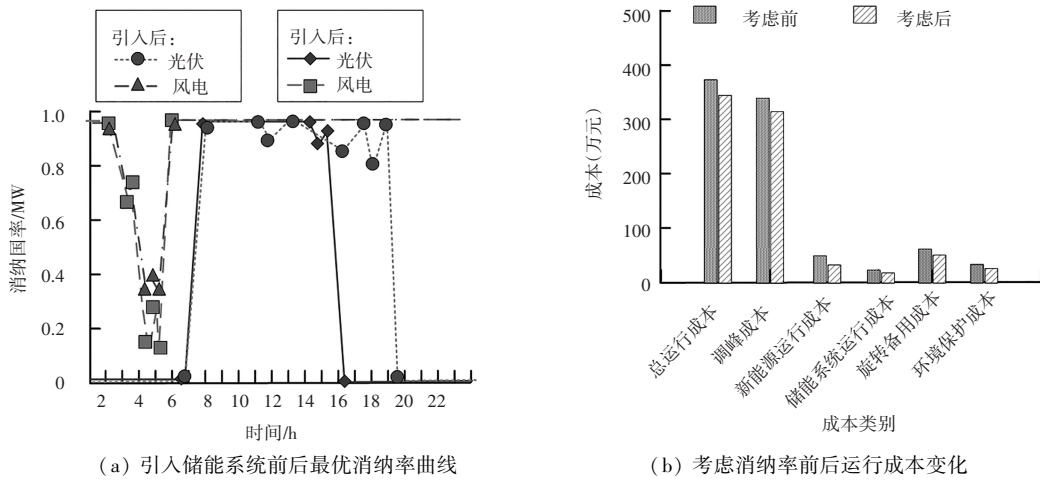


图4 考虑储能前后风光发电的最优消纳率变化情况以及考虑消纳率调度前后运行成本的变化情况

Fig. 4 The changes in the optimal consumption rate of wind and solar power before and after considering energy storage as well as the changes in operating costs before and after considering the scheduling of consumption rate

如图4(a)所示,在引入储能系统之前,风电系统的消纳率在0~4点期间的消纳率相对较低,在引入之后,其消纳率得到了明显提高。对于光伏发电来说,在16~19点期间,其消纳率接近0,而引入储能系统后出现明显提高。如图4(b)所示,考虑新能源的最优消纳率后,各成本得到了显著降低。为降低电力系统的净负荷波动率,研究引入了价格需求响应到调度模型中。为检验需求响应在调度模型中的应用价值,研究对比考虑需求响应前后系统的净负荷曲线变化情况同时记录各机组的输出功率。具体结果如图5所示。

如图5(a)所示,在考虑需求响应之后,负荷峰谷差缩小了165.48 kW。且在电负荷低谷时段,其等效负荷增加

了21.66 MW。如图5(b)所示,经过需求响应后,水电机组出力仅在9:00~12:00。火电机组仅在电负荷午高峰以及晚高峰开机运行。综合上述内容可知,引入需求响应之后,能够有效引导用户用电行为,实现削峰填谷,使机组的出力情况更加平稳。

为进一步检验研究设计的新能源电网规划优化模型(模型1)的性能,研究将其与目前较为流行的几种电网调度模型进行对比实验。对比模型包括文献[15]的调度模型(模型2)、文献[16]的调度优化模型(模型3)、文献[17]的调度优化模型(模型4)。对比指标包括负荷峰谷差、运行成本、污染物排放量、风电机组和光伏机组的单日平均最优消纳率。对比结果如表1所示。

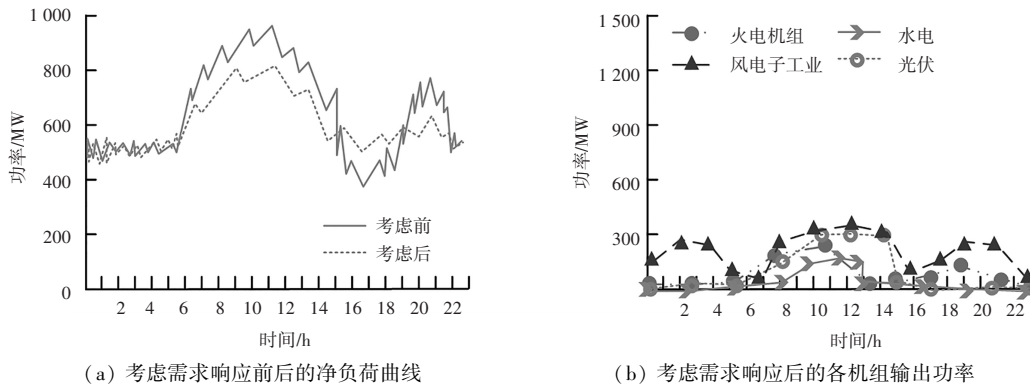


图5 考虑需求响应前后系统的净负荷曲线变化情况及各机组输出功率

Fig. 5 The changes in the net load curve of the system before and after considering demand response, as well as the output power of each unit

表1 四种模型的电网规划优化效果对比

Tab. 1 Comparison of grid planning optimization effects of four models

模型	负荷峰谷差/MW	运行成本/万元	污染排放量/t	风光机组平均最优消纳率/%
模型1	165.87	784.85	7 584.88	83.47
模型2	231.14	915.87	8 954.78	75.69
模型3	204.58	893.64	8 497.52	79.88
模型4	251.74	934.72	9 248.45	72.43

如表1所示,模型1的负荷峰谷差、污染排放量与运行成本相较于其他模型明显更低,模型1的峰谷差在200 MW以下,而其他模型的峰谷差皆超过了200 MW。而新能源发电的最优消纳率达到了80%以上,其余模型皆在80%以下。综合上述内容可知,研究设计模型能够有效维持新能源发电稳定,同时降低污染排放以及运行成本。

3 结论

针对多能源接入电力系统的配电规划优化问题,研究提出了基于双层调度模型和需求分析的新能源电网规划优化方法。该方法通过引入储能系统、考虑新能源的最优消纳率以及引入价格需求响应等策略,实现电力系统的多目标优化。实验结果表明,该方法在引入储能系统后,各新能源发电组件的最优消纳率得到了明显提升,且考虑消纳率后电力系统运行成本降低了共计降低了152.36万元。在考虑需求响应之后,负荷峰谷差缩小了165.48 kW。且在电负荷低谷时段,其等效负荷增加了21.66 MW。引入需求响应后,各机组出力更加平稳。相较于其他电网规划模型,模型1的负荷峰谷差、污染排放量与运行成本相较于其他模型明显更低,而新能源发电的最优消纳率达到了80%以上。目前研究仅考虑了运行成本、负荷波动等指标,在之后的研究中可进一步考虑供电可靠性、与其他电网的互联互通性等因素,进一步提高电力系统的智能化水平和运行效率。

参考文献

[1] 吴文传, 许书伟, 杨越, 等. 风险量化的高比例新能源电力系统概率调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 3-11.
[2] 刘一民, 郑少明, 董鹏, 等. 新能源发电设备接入的电磁暂态仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 161-165.

[3] 李军徽, 周家旭, 朱星旭, 等. 含高渗透新能源电力系统中考虑变时段控制的火/储/荷日前优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 51-62.
[4] 王文烨, 姜飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 197-206.
[5] Singh E, Afshari S S, Liang X. Wind turbine optimal preventive maintenance scheduling using fibonacci search and genetic algorithm [J]. Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics, 2023, 2(3): 157-169.
[6] 徐文哲, 张哲任, 徐政. 适用于大规模纯新能源发电基地送出的混合式直流输电系统[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 16-27.
[7] 梁振锋, 范新伟, 张婷, 等. 考虑实时备用率的中长时间尺度新能源发电备用的方法[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(3): 10-21.
[8] 崔杨, 于世鹏, 张节潭, 等. 考虑光热电站调峰补偿的高比例新能源电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 4922-4934.
[9] 井浩然, 赵红生, 姚伟, 等. 含分布式变速抽水蓄能的新能源发电系统灵活性资源规划[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 117-123.
[10] 童宇轩, 胡俊杰, 刘雪涛, 等. 新能源电力系统灵活性供需量化及分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 80-90.
[11] 韩子娇, 那广宇, 董鹤楠, 等. 考虑灵活性供需平衡的含电转氢综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 161-169.
[12] Kaur G, Dhillon J S. Electricity generation scheduling of thermal-wind-solar energy systems[J]. Electrical Engineering, 2023, 105(6): 3549-3579.
[13] 谭慧娟, 谢恩彦, 吴岳洲, 等. 基于凝聚层次聚类的电力市场需求侧协同调度优化方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7): 5-8.
[14] 范展滔, 刘敬诚. 基于改进NSGA-III-PSO的含风光柴储配电网优化调度方法研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11): 167-175, 209.
[15] 臧延雪, 边晓燕, 梁思琪, 等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 15-26.
[16] 程宇, 郭权利. 计及动态能源价格和共享储能电站的多主体综合能源系统双层优化调度策略[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 10-20.
[17] 李宇骏, 陆艺源, 牟同鹏, 等. 新能源发电经换流器并网系统的稳定性分析与控制综述[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 79-94.