

基于多能互补发电的日前优化运行评价方法

刘春晖¹, 张政¹, 范红真², 牟辉龙¹, 黄存款¹, 袁方¹

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 国家电网有限公司技术学院分公司, 山东 济南 250002)

摘要: 多能互补发电运行已成为提高新能源利用效益的新方向, 对多能互补式发电特性的分析也显得尤为重要。根据多能互补发电系统的运行特点, 结合互补发电评价指标与联合发电效益, 建立了评价互补特性的微电网运行指标体系。基于该指标体系, 从可靠性、稳定性、经济性三方面对风光水储互补发电系统进行分析。结果表明, 风光水储互补式运行系统能实现风、光、水三种能源在日内时间尺度上的互补性, 极大提高了供电稳定性与可再生资源利用率。

关键词: 微电网; 多能互补发电; 互补特性; 日内时间尺度; 评价指标

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22594

Evaluation Method of Day-ahead Optimal Operation Based on Multi-energy Complementary Power Generation

LIU Chunhui¹, ZHANG Zheng¹, FAN Hongzhen², MOU Huilong¹, HUANG Cunkuan¹, YUAN Fang¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. Technical College Branch of State Grid Co., Ltd., Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: Multi-energy complementary generation operation had become a new direction to improve the efficiency of new energy utilization, and it is particularly important to analyze the characteristics of multi-energy complementary generation. According to the operation characteristics of multi-energy complementary generation system, combined with the evaluation index of complementary generation and the benefit of combined generation, an operation index system for evaluating complementary characteristics of microgrid was established. Based on this index system, the wind-solar-water-storage complementary power generation system was analyzed from three aspects: reliability, stability and economy. The results show that the wind-solar-water-storage complementary operation system can realize the complementarity of wind, light and water in the intra-day time scale, and greatly improve the stability of power supply and the utilization rate of renewable resources.

Key words: microgrid; multi-energy complementary power generation; complementary characteristics; intraday time scale; evaluation index

随着传统化石能源快速消耗及全球生态环境恶化, 化石能源向低碳能源转变已成为全球能源发展的新形势。而中国电力系统要实现由低碳向脱碳的转变, 清洁的可再生能源则为新一代能源开发的重点^[1]。在所有可再生能源中, 风能和光能的可获取性与分布性具有其他能源无法比拟的优势, 但风光发电却存在较强的随机性与

不确定性, 大规模发电会影响电力系统的安全运行。而水电作为调节性能良好的电源, 可以有效平抑风光发电波动, 提高电网的消纳能力与能源利用效率。虽然水力发电优势显著, 但季节性变化明显, 故以蓄电池作为储能补发装置, 共同实现能源互补。现有研究大多以风光、风水或独立发电系统运行模式居多, 对风光水储联合发电的

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61801271); 山东科技大学电气自动化类优秀教学团队建设项目(JXTD20190505)

作者简介: 刘春晖(1979—), 女, 副教授, Email: sdustliuchunhui@163.com

通讯作者: 张政(1996—), 男, 硕士研究生, Email: 15854887296@163.com

研究相对较少。特别是对多能互补特性的评价指标参差不齐,标准不一。文献[2]对风、光、水在日内时间尺度上的互补特性只是初步探索,并未深入研究。文献[3]建立了多能互补优化模型,从发电效益、功率波动等方面分析互补特性,但未考虑风光预测的误差性。文献[4]利用弃光率、发电效益等指标,从侧面评价了互补运行特性,但对各电源互补特性仅从功率波动进行分析,具有一定局限性。

基于此,本文综合多种评价指标对多能互补发电特性从可靠性、稳定性、经济性三方面进行深入研究,构建了多能互补发电的微电网评价体系,对影响电力系统稳定运行的因素进行评判。最后以中国西部某地区为例,对评价体系中的各指标进行分析。结果表明,风光水储多能互补式发电系统在日前时间尺度上的可靠性、稳定性、经济性都较好。

1 多能互补特性评价指标

1.1 可靠性评价指标

电力系统的可靠性是多能互补系统出力对负荷满意度的重要评价量度。目前对电力系统的可靠性评判标准常用概率性与确定性两种形式来表示。本文采用的失负荷概率与累积缺电比正是从概率性出发对所选取评价时段的整体过程进行评判,通过失负荷在时间上的分布趋势,对所发生缺电概率较大的时段进行适时的调度分配以保证负荷的需求;而选取单次失负荷最长持续时间、累积缺负荷时长、累积缺负荷量指标则是从确定性出发^[5],通过对区域内所发生的缺负荷时长与造成的缺失电量进行分析,验证互补系统的多电源供电配置是否能满足供电的需求。

1)失负荷概率 L_a :是指系统中不满足负荷需求的时段数量占总评价时段数量的比例,其公式为

$$L_a = \frac{\sum_{i=1}^n \delta(i)}{n} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_z(i) = P_w(i) + P_p(i) + P_h(i) + P_b(i) \quad (2)$$

$$\delta(i) = \begin{cases} 1 & P_z(i) > P_{z'}(i) \\ 0 & P_z(i) \leq P_{z'}(i) \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 为评价总时段数量; $P_w(i)$, $P_p(i)$, $P_h(i)$, $P_b(i)$ 分别为风、光、水、储四种电源在第 i 评价时

段内的出力; $P_z(i)$, $P_{z'}(i)$ 分别为互补系统在第 i 评价时段内的负荷需求与实际出力。

2)累积缺电比 ρ :指在总评价时段内的缺负荷量占总负荷的比例。

3)单次失负荷最长持续时间 L_t :指未能满足负荷需求的单次最长持续时间。

4)累积缺负荷时长 L_s :指在总评价时段内未能满足负荷需求的时段数之和。

5)累积缺负荷量 J_s :指在总评价时段内未能满足负荷需求的缺电额之和。

1.2 稳定性评价指标

互补系统中存在风、光等不可控电源,其出力的不稳定性会给互补系统造成一定影响。对互补系统的影响主要分为对电力系统影响与水库影响两部分,对电力系统的影响本文以互补系统出力差异系数与风光出力预测误差为评判指标;对水库影响则以水库水位变化为评判指标。

1.2.1 互补出力差异系数 I_c

互补性指标是联合发电系统运行特性评判的基础,可对多种能源互补程度进行初步判断。

本文所选区域内的风、光输出功率具有较强的时间互补性,同时水电可利用自身的快速调节能力进一步平抑风光波动使互补系统更加平稳,为量化功率互补能力,故以互补系统的出力差异系数作为评判风光水出力稳定性的指标。其公式为

$$I_c = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{z'}(i) - \bar{P}]^2}}{\bar{P}} \quad (4)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{z'}(i)] \quad (5)$$

式中: $\bar{P}$ 为互补系统的平均出力。

1.2.2 风光功率误差预测

对不可控电源的出力预测可减少其因出力的不确定性对互补系统发电的影响。目前风光发电均装有发电功率预测系统^[6],但因其发电具有间歇性与不确定性,故预测误差较大,预测精度有待提高。因此本文利用功率预测误差对预测系统进行对比评价,从而了解预测系统的运行情况。为使误差效果更加具有普遍性,故利用平均绝对误差(MAE)与均方根误差(RMSE)分析风、光等不可控电源接入系统对系统出力的影响^[7],如下所示:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P'(i)| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P'(i)]^2} \quad (7)$$

式中: $P'(i)$ 为不同评价时段的风、光发电与互补发电的预测出力与实际出力的差值。

1.2.3 水库水位波动

为了平抑风光发电的波动性,要求水电出力要具有快速调节的特性,而水电出力的快速增减会给水库水位带来频繁变化,若水库水位波动过大则会对水库安全运行带来风险。故选取水库水位波动作为评判指标,并选取时段内最大水位波动日的水位波动做日内波动分析,进一步评估系统出力对水库的水位变化影响。其公式为

$$\Delta W_{\max} = \max_{i=1,2,\dots,n} \frac{|W(i) - W(i-1)|}{\Delta t} \quad (8)$$

式中: $W(i)$, $W(i-1)$ 分别为前后评价时段的水位; Δt 为评价时长。

1.3 经济性评价指标

微电网中互补系统的经济运行效益是考量发电系统运行的重要环节。微电网发电不仅要满足负荷需求,同时所产生的经济效益也是评判电网运行的重要指标。为较全面地分析微电网发电效益,故以并网状态下的日前发电效益作为评判指标,并通过夏季典型日与冬季典型日发电效益对比,分析日前微电网发电的经济性。而对于离网运行的分析,使用电源发电最优配置成本为指标,实现微电网最优的能源配置模型,避免不合理的分布式电源配置所造成的经济成本负担。

1.3.1 离网型互补发电

利用 HOMER 软件搭建互补发电的最优能源配置模型,使各电源在满足负荷的情况下配置成本最小,其公式为

$$\min F = F_w + F_p + F_h + F_b \quad (9)$$

式中: F_w , F_p , F_h , F_b 分别为风机、光伏板、水力发电机以及蓄电池的固有成本、替换成本以及运维成本之和。

1.3.2 并网型互补发电

以互补系统的综合运行效益最大为评判指标,建立日前互补发电短期优化调度模型,对日前发电计划进行优化调整。其公式为

$$\max C = C_w + C_p + C_h + C_b + C_e \quad (10)$$

$$C_e = \sum_{i=1}^n [P_{\text{grid}}(i) \times c_p(i) - P_{\text{sgrid}}(i) \times c_s(i)] \quad (11)$$

$$C_{\text{re}}(C_w, C_p, C_h) = \sum_{i=1}^n [f_w \times P_w(i) + f_p \times P_p(i) + f_h \times P_h(i)] \quad (12)$$

$$C_b = \sum_{i=1}^n [u_s(i) \times P_b(i) \times f_b] \quad (13)$$

式中: C_w , C_p , C_h , C_b 分别为风、光、水、储四种电源的运行成本; C_e 为电网交互效益; C_{re} 为三类能源的综合发电运行成本; $P_{\text{grid}}(i)$, $P_{\text{sgrid}}(i)$ 分别为不同评价时段内售电量与购电量; $c_p(i)$, $c_s(i)$ 分别为不同评价时段内的售电与购电价格; f_w , f_p , f_h , f_b 分别为风电、光电、水电、蓄电池出力运行成本系数; $u_s(i)$ 为蓄电池的运行状态, $u_s(i) = 0$ 和 $u_s(i) = 1$ 分别为蓄电池的充放电状态。

约束条件: 为确保互补系统的安全运行及符合实际情况,需对互补系统的出力与电网交互功率进行约束。

功率平衡约束:

$$P_{\text{load}}(i) = \sum_{i=1}^n P_x(i) + P_{\text{Grid}}(i) \quad (14)$$

各电源出力约束:

$$P_{x\min}(i) \leq P_x(i) \leq P_{x\max}(i) \quad (15)$$

$$P_{\text{gridmin}}(i) \leq P_{\text{grid}}(i) \leq P_{\text{gridmax}}(i) \quad (16)$$

$$P_{\text{sgridmin}}(i) \leq P_{\text{sgrid}}(i) \leq P_{\text{sgridmax}}(i) \quad (17)$$

式中: $P_{\text{load}}(i)$, $P_{\text{Grid}}(i)$ 分别为不同评价时段的负荷需求及系统与电网的交互功率; $P_x(i)$, $P_{x\min}(i)$, $P_{x\max}(i)$ 分别为分布式电源 x 在第 i 评价时段内的实际运行功率,最小运行功率与最大运行功率; $P_{\text{gridmin}}(i)$, $P_{\text{gridmax}}(i)$ 分别为互补系统在第 i 评价时段内的最小与最大售电量; $P_{\text{sgridmin}}(i)$, $P_{\text{sgridmax}}(i)$ 分别为互补系统在第 i 评价时段内的最小与最大购电量^[8]。

储能约束:

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (18)$$

$$P_{b\min}(i) \leq P_b(i) \leq P_{b\max}(i) \quad (19)$$

式中: $SOC_{\min}$, $SOC_{\max}$ 分别为蓄电池的最小与最大荷电状态; $P_{b\min}(i)$, $P_{b\max}(i)$ 分别为蓄电池不同评价时段内的最小与最大输出功率^[9]。

2 算例分析

本文选取我国西部某区域内的供电数据进行分析,该区域内风光水资源丰富,年均风能密度可达 $90 \sim 180 \text{ W/m}^2$,年均可利用小时高达 $3\ 800 \text{ h}$

以上且季节性变化明显;同时全年日照数约3 124 h,年辐射量约为1 965 kWh/m²,现建设有3座水电站,本文以1 500 kW水电站为例,对互补系统的各项指标进行分析。

2.1 可靠性指标分析

表1为全年长时间尺度下的互补系统各项可靠性指标结果,图1为累积缺负荷时长与累积缺失电量的全年分布图。

表1 全年尺度下互补系统各项可靠性指标

Tab.1 Reliability indexes of complementary system on annual scale

失负荷概率 $L_d/\%$	单次失负荷最长持续时间 L_1/h	累积缺负荷时长 L_d/h	累积缺负荷量 $J_d/(万kW \cdot h)$	累计缺电比 $\rho/\%$
2.41	6.3	52.81	4.704	1.047

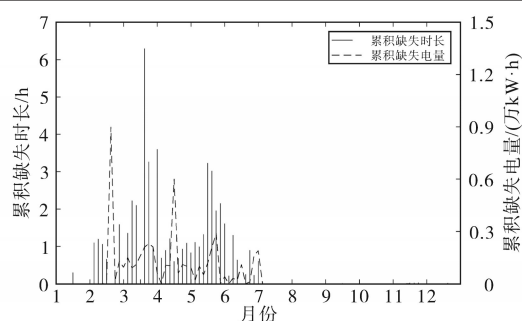


图1 累积缺负荷时长与累积缺失电量全年分布图

Fig.1 Annual distribution of accumulated load shortage duration and accumulated missing power

由表1与图1可知,互补发电系统全年的失负荷概率仅为2.41%,累积缺电量仅占全年负荷量的1.047%,且有明显的季节性变化。处于枯水季的春季会有失负荷现象,缺负荷时段约占全年缺负荷时段的81.91%,而处于汛期的夏秋季,水电充足可很好地满足负荷需求。由以上数据可知在全年长时间尺度下互补系统的可靠性较好。

2.2 稳定性指标分析

为验证互补系统中水电对风光出力波动的平抑性,将风光互补与风光水互补的出力差异系数进行对比,如图2所示。

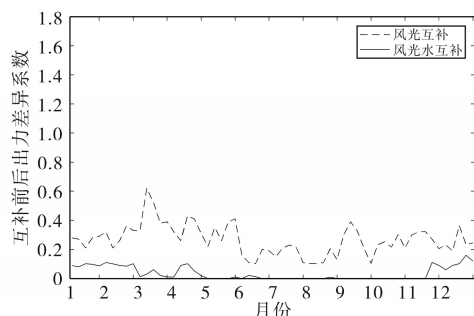


图2 互补出力差异系数

Fig.2 Complementary output difference coefficient

由图2可知,风光水互补出力差异系数明显低于风光互补出力差异系数,尤其在6月至10月中旬时段内,因处于丰水期,水力发电力度大且相对稳定,且此时正处于小风季,风光出力比例下降,故互补系统出力差异系数几乎为0,由此可得风光水互补系统较风光互补出力更加具有稳定性,能很好地平抑风光发电的出力波动性。

水力发电因与降水量、河流量、库容等因素相关,在短期内功率输出变化不大,基于此,本文假设其预测值与实际值基本一致。以1月15日为例,分别对短时间内的风电、光电及风光水互补发电功率进行预测,并利用平均绝对误差与均方根误差对三者日内误差分布情况进行分析,如图3、图4与表2所示。图4中,纵坐标误差表示实际出力与预测出力的差值所占实际出力的比重。

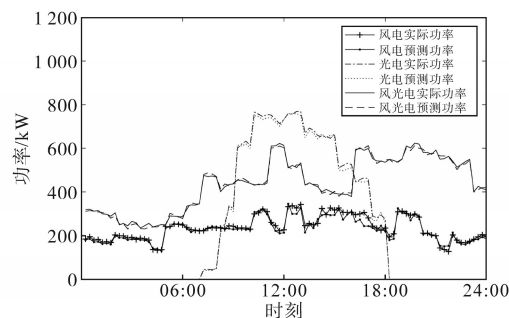


图3 互补系统发电出力预测

Fig.3 Generation output prediction of complementary system

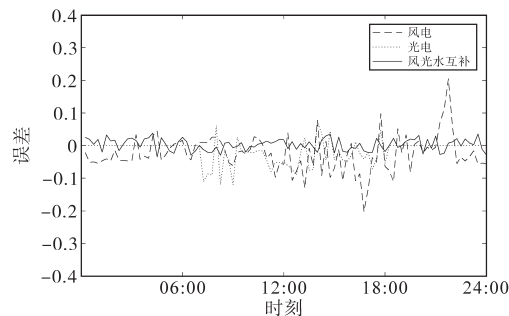


图4 互补发电误差分布

Fig.4 Error distribution of complementary generation

表2 互补系统预测误差结果

Tab.2 Prediction error results of complementary systems

发电系统	MAE/kW	RMSE/kW
风电	11.22	15.19
光电	8.97	9.71
风光水互补	8.53	9.68

由图3、图4和表2可知,风光水互补系统的预测误差比风、光单独发电的预测误差波动性小。因风速变化波动性较强,故风电误差波动也

变化频繁,而光电出力时段较为集中,故误差波动性较风电略小,但风光水互补出力误差为三者中最小,基本上处于 $-0.05\sim 0.05$ 之间(见图4)。通过对比三者的 MAE 与 $RMSE$ 数值,也能得到互补发电的预测误差最小,表明互补发电具有很好的稳定性。

水库水位的异常波动会影响互补系统的安全运行。图5、图6为互补前后水库水位全年与日内波动曲线。

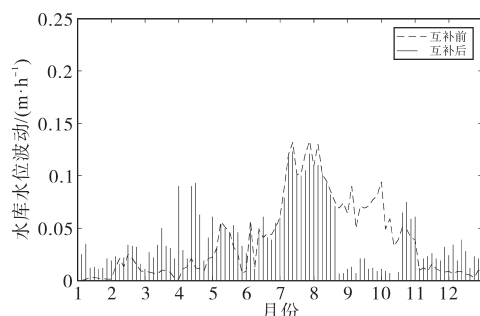


图5 全年互补前后水库水位变化

Fig.5 Changes of reservoir water level before and after annual complementation

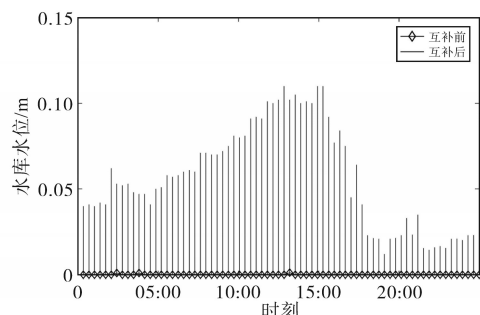


图6 最大水位波动日水库水位变化

Fig.6 Variation of reservoir water level on the day of maximum water level fluctuation

由图5、图6可得,全年互补前后的水库水位波动情况可分为3种类型:

1)互补后水位波动比互补前水位波动性大。在10月中旬至5月中旬时段内,互补后水位波动大于互补前水位波动,以该时段内某最大水位波动日(图6)为例进行分析,互补前后水位波动具有一定差异,互补前的水位变化较互补后的水位变化而言基本不变,而互补后的水位差最大也只有0.11 m。

2)互补后水位波动与互补前水位波动基本一致。从5月初至8月中旬时段内,水库虽因放蓄水造成水位波动,但互补前后水位波动相差不大。

3)互补后水位波动比互补前水位波动性小。从9月初至10月中下旬,正处于河流汛期,水力

发电可很好地平抑风光发电的波动性,故在该时段内水库水位基本保持不变。由以上数据可得,对于风、光等不可控电源的加入,对互补系统的供电稳定性影响不大。

2.3 经济性指标分析

对互补系统的经济性,本文从离网型与并网型两种运行模式下进行分析。离网模式下以最优发电配置模型实现投资成本最低的目标^[10],并网型模式下以综合运行效益最大为目标结合分时电价,验证互补系统的经济运行效益。

对互补系统的经济运行调度应满足:1)风、光等不可控电源出力满足负荷时,可减少可控电源出力。离网状态下给蓄电池充电,并网状态下在峰时售电给电网,平时或谷时给蓄电池充电并部分售电给电网。2)风、光等不可控电源出力不满足负荷时,可控电源出力增加,若仍不满足负荷需求,离网状态下蓄电池放电,并网状态下向电网购电。

2.3.1 离网型互补发电分析

离网型风光水储多能互补发电模型如图7所示,其中,eW15,Hydro,PV,S6CS25P,Converter分别为风力发电机、水力发电机、光伏板、蓄电池、变流器。

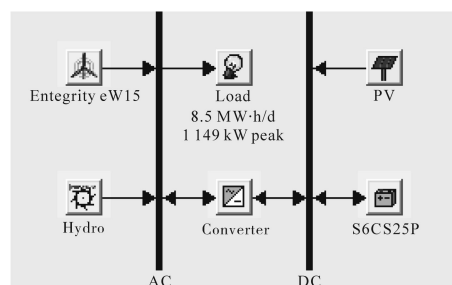


图7 离网型风光水储互补系统模型

Fig.7 Off-grid wind, solar, water and storage complementary system model

经计算得出投资成本最少的优化配置方案,其中原始资金和总净现成本为1 851.6万元和2 546.76万元,最优配置下的成本如表3所示。

表3 各组件最优组合配置

Tab.3 Optimal combination configuration of each component

组件	购置成本/万元	替换成本/万元	运维成本/万元	残值/万元	总成本/万元
风机	450.0	0.0	92.70	0.00	542.70
光伏	600.0	0.0	127.64	0.00	727.64
水轮机	0.0	0.0	87.74	-3.89	83.85
变流器	33.6	18.6	3.57	0.00	55.77
蓄电池	768.0	372.0	74.62	-77.82	1 136.80
系统	1 851.6	390.6	386.27	-81.71	2 546.76

因水轮发电机成本已收回,故不计成本。考虑到互补系统中的发电量与发电效益^[11],风机、光伏板及水轮机的装机容量分别约占三者发电总装机容量的23.07%,30.76%,46.15%。由表3可看出,蓄电池的成本比重最高,约44.63%,因此在离网型多能互补发电系统中,应降低蓄电池成本,合理调整风机、光伏、水电的出力比重^[12]。

2.3.2 并网型互补发电分析

由离网型互补发电数据可知,蓄电池成本较高,在并网下为保证综合运行效益应减少蓄电池使用,增加与电网交互功率。

本文从丰水季与枯水季典型日对日前发电效益进行分析^[13],图8、图9为丰水季与枯水季典型日互补系统出力曲线,表4、表5为分时电价与丰、枯水季日前经济效益。

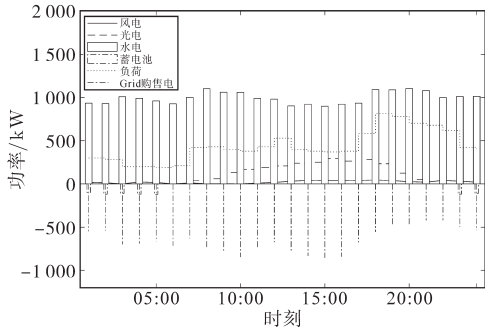


图8 丰水季电源出力状况图

Fig.8 Power output status chart in wet season

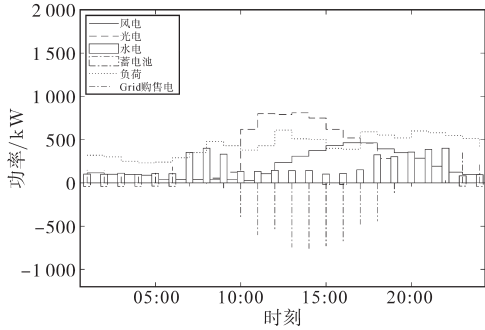


图9 枯水季电源出力状况图

Fig.9 Power output status chart in dry season

表4 分时电价

Tab.4 Time of use electricity price

时段	时间	购电/ [元·(kW·h) ⁻¹]	售电/ [元·(kW·h) ⁻¹]
峰时	10:00-14:00	0.69	0.63
	18:00-20:00		
平时	07:00-09:00	0.45	0.38
	15:00-17:00		
	21:00-22:00		
谷时	00:00-06:00	0.32	0.23
	23:00-24:00		

表5 互补发电日内经济效益

Tab.5 Intraday economic benefits of complementary power generation

时段	风电效 益/元	光伏效 益/元	水电效 益/元	总发电 效益/元	综合运行 效益/元
夏季日	245.23	1 342.4	10 018.70	11 606.3	2 303.6
冬季日	2 152.10	3 267.6	2 088.68	7 508.4	689.5

由图8、图9可知,丰水季时,水量充足,仅依靠水力发电就能满足负荷需求,应降低风、光发电占比。此外对于水电产生的大量盈余电量,可根据不同时段内电价高低售电给电网并给蓄电池充电,从而获取最大发电效益。枯水季时,因水电调节受限于径流量,以风光发电为主,通过购售电以满足负荷需求并获取经济效益。如图中所示谷时段内,电价较低,可减少水电出力,转向电网购电并对蓄电池充电,而在峰时段,虽然风光发电满足负荷需求,但售电电价较高,水电可适当出力,使互补系统向电网出售电量,获取可观经济效益补偿购电等成本。由表5可知,夏季日内水力发电效益最高,在不考虑负荷与蓄电池情况下,水力发电占总发电效益的86.32%。而冬季日内水力发电受限,互补系统以风光发电为主,水电进行补偿发电。冬季日内受水电不足、发电成本及电网购电等因素影响,冬季日内互补系统综合运行效益要低于夏季日内综合运行效益。

3 结论

本文构建了一种评价多能互补系统运行特性的指标体系,并从不同角度对风、光、水、储多能互补系统的可靠性、稳定性、经济性进行分析,经结果验证,该评价指标体系可对互补系统运行调度提供参考依据。本文仅对互补系统日前运行特性进行分析,下一步将对超短期时段内的运行特性进行研究。

参考文献

[1] Liu Q, Zheng X Q, Zhao X C, et al. Carbon emission scenarios of China's power sector: impact of controlling measures and carbon pricing mechanism[J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 9(1):27-33.

[2] 朱燕梅,邹祖建,黄炜斌,等.金沙江上游典型电站水风光互补运行研究[J].水力发电学报,2017,36(4):78-85.

Zhu Yanmei, Zou Zujian, Huang Weibin, et al. Study on the complementary operation of water, light and wind of typical power stations in the upper reaches of Jinsha River[J]. Journal of Hydraulic Power, 2017,36(4):78-85.

- [3] 夏新华,高宗和,李恒强,等.考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度[J].电力工程技术,2017,36(5):59-65.
Xia Xinhua, Gao Zonghe, Li Hengqiang, *et al.* Joint optimal operation of wind, solar, water and fire multi-energy bases considering the complementary characteristics of time and space [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 59-65.
- [4] 田旭,张祥成,白左霞,等.青海省水电与光伏互补特性分析与效果评价[J].电力建设,2015,36(10):67-72.
Tian Xu, Zhang Xiangcheng, Bai Zuoxia, *et al.* Complementary characteristics analysis and effect evaluation of hydropower and photovoltaic in Qinghai province [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10): 67-72.
- [5] 闻昕,孙圆亮,谭乔凤,等.考虑预测不确定性的风-光-水多能互补系统调度风险和效益分析[J].工程科学与技术,2020,52(3):32-41.
Wen Xin, Sun Yuanliang, Tan Qiaofeng, *et al.* Risk and benefit analysis of wind-light-water multi-energy complementary system considering prediction uncertainty [J]. Engineering Science and Technology, 2020, 52(3): 32-41.
- [6] 盛四清,张立.考虑风光荷预测误差的电力系统经济优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(9):80-85.
Sheng Siqing, Zhang Li. Economic optimal operation of power system considering wind-solar load prediction error [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(9): 80-85.
- [7] 叶林,屈晓旭,么艳香,等.风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J].电力系统自动化,2018,42(4):158-164.
Ye Lin, Qu Xiaoxu, Yao Yanxiang, *et al.* Analysis of the operation characteristics of wind-solar-water multi-energy complementary power generation system on a daily time scale [J]. Power System Automation, 2018, 42(4): 158-164.
- [8] 高佳,肖迎群.风、光、燃、储多源互补微电网的日优化运行[J].科学技术与工程,2019,19(15):136-142.
Gao Jia, Xiao Yingqun. Daily optimal operation of wind, light, gas and storage multi-source complementary microgrid [J]. Science, Technology and Engineering, 2019, 19(15): 136-142.
- [9] 任岷,李卫东,胡博,等.长期并网运行的海岛微电网电源容量优化配置[J].分布式能源,2019,4(5):75-82.
Ren Min, Li Weidong, Hu Bo, *et al.* Optimal allocation of power capacity for island microgrid with long-term grid-connected operation [J]. Distributed Energy, 2019, 4(5): 75-82.
- [10] 张志文,范威,刘军,等.偏远山区风光水储互补发电系统容量优化配置[J].电源学报,2018,16(5):138-146.
Zhang Zhiwen, Fan Wei, Liu Jun, *et al.* Capacity optimization of wind-solar-water-storage hybrid power generation system in remote mountainous areas [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(5): 138-146.
- [11] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等.考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):63-69.
Xia Yonghong, Wu Hongjian, Xin Jianbo, *et al.* Evaluation method of microgrid economic operation considering the complementary characteristics of wind, light, water and storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 63-69.
- [12] 曹蓓,杨越.综合考虑风光水储的微网容量优化配置[J].水电能源科学,2015,33(6):209-212,150.
Cao Bei, Yang Yue. Optimal allocation of microgrid capacity considering wind-solar-water-storage [J]. Hydropower Energy Science, 2015, 33(6): 209-212, 150.
- [13] 刘鋈.微电网多尺度能量管理策略研究及系统软件设计[D].西安:西安理工大学,2020.
Liu Yun. Research on multi-scale energy management strategy and system software design of microgrid [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

收稿日期:2020-10-27

修改稿日期:2021-01-12