

油田电网高比例光伏消纳能力提升举措

桂 娟

(新疆油田公司采油工艺研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 油田电网光伏规模快速发展, 占比不断提高, 光伏间歇性、随机性和波动性特点快速消耗电力系统灵活调节资源, 导致电网内新能源利用率偏低, 电网运行的安全性、经济性面临巨大挑战。结合油田电网光伏发电消纳情况, 分析影响新能源消纳能力的因素, 针对主要影响因素, 提出提升调峰能力的改进措施。

关键词: 新能源; 光伏发电; 消纳; 电网

Measures to enhance the high-proportion photovoltaic integration capacity of oilfield power grids

GUI Juan

(Research Institute of Oil Production Technology, Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

Abstract: The photovoltaic (PV) scale of oilfield power grids is rapidly expanding, with a continuously increasing proportion. The intermittent, stochastic, and fluctuating nature of PV quickly depletes the flexible regulation resources of the power system. The utilization rate of new energy within the grid is relatively low, posing significant challenges to the safety and economy of grid operation. Considering the consumption of PV power generation in oilfield grids, this study analyzes the factors affecting the absorption capacity of new energy. Based on the primary influencing factors, measures are proposed to enhance peak regulation capabilities.

Keywords: new energy; photovoltaic power generation; consumption; power grid

0 引言

近年来, 我国以风电、光伏发电为代表的新能源装机规模稳居全球首位, 发电量占比稳步提升, 成本快速下降, 已基本进入平价无补贴发展的新阶段。《“十四五”可再生能源发展规划》中指出, 我国可再生能源将进入高质量跃升发展的新阶段, 新能源装机规模跨越式发展, 可再生能源在电力消费中占比快速提升, 发展模式由政策驱动向市场驱动转变。

基于国家“双碳”目标, 中石油集团公司“清洁替代、战略接替、绿色转型”三步走总体

部署, 在保障国家能源安全的同时, 发挥油田在油气、风光、土地、技术、人才等方面的优势, 统筹推动油气生产清洁化、清洁能源规模化、多能互补综合化和终端用能电气化, 加快推进油气与新能源协同融合发展^[1]。

油田电网光伏规模快速发展, 占比不断提高, 燃气发电厂转型成为系统调节性电源, 服务高比例新能源消纳, 支撑电网安全稳定运行, 提供应急保障和备用容量, 但光伏间歇性、随机性和波动性的特点快速消耗电力系统灵活调节资源^[2]。文章介绍了油田电网现状, 评估了光伏消纳关键因素, 提出了油田电网在应对大规模新能

源消纳方面需采取的措施。

1 油田电网现状

油田电网与国网并网运行，共4个电压等级，分别为110 kV、35 kV、6（10）kV和0.4（0.38/0.22）kV。截至2024年底，总装机容量为540 MW，分别为：燃气-蒸汽循环利用发电厂1座，总装机容量320 MW（4台汽轮发电机，5台燃气轮发电机组），是唯一支撑性电源，也是周边城区唯一热源，供热负荷为230 MW；光伏额定容量220 MW（未配套储能），占比40.7%。

目前由1座国网220 kV变电站经两回110 kV线路将电厂并入国网运行，2024年总运行负荷均值为244 MW，光伏利用率为65.8%，典型日光伏出力特性曲线如图1所示。

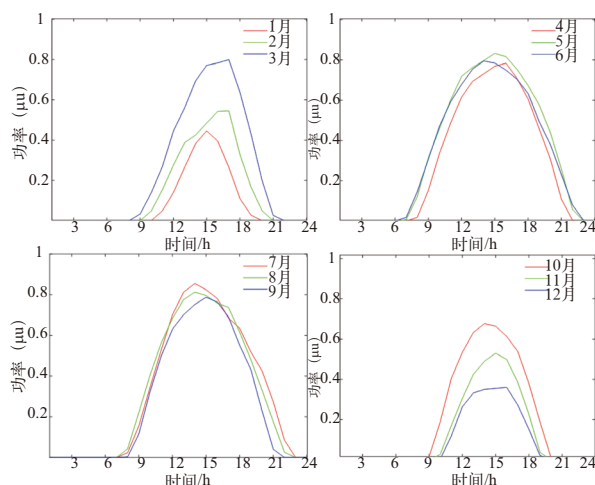


图1 典型日光伏出力特性曲线

Fig. 1 Typical daily power generation characteristic curve of photovoltaic power

(1) 油田电网负荷特性

冬季供暖期间和夏季负荷与出力如图2、图3所示。

冬季最大日：负荷高峰特性较为明显。午间高峰出现在11:00—13:00，峰值在13:00；晚间高峰出现在19:00—21:00，峰值在20:00—21:00；晚高峰大于午高峰，最低负荷出现在凌晨05:00—06:00。

夏季最大日：日间波动较冬季明显，午间高峰在12:00，晚间高峰在19:00；最低负荷出现在02:00—03:00。

月负荷特性：总体呈现冬夏季负荷高，春秋季节负荷较低的季节性波动规律，采暖季中11—1月份用电负荷较高，12月份负荷达到全年峰值，夏季6—7月份负荷较高，一般7月份为夏季峰值，年低负荷出现在9—10月，一般为最高负荷的70%。

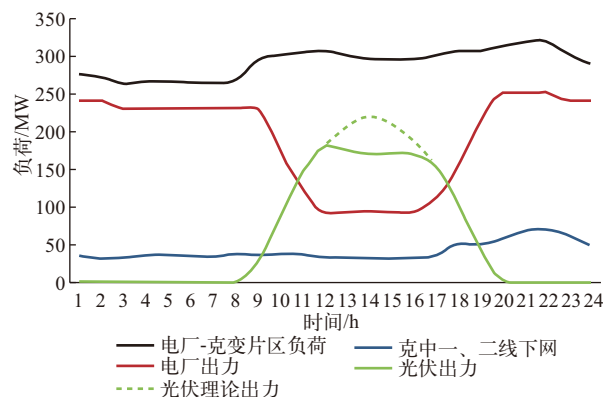


图2 冬季供暖期间负荷与出力

Fig. 2 Load and output during winter heating period

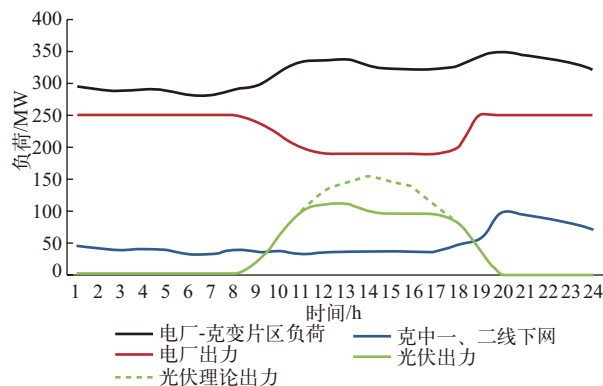


图3 夏季负荷与出力

Fig. 3 Summer load and output

(2) 当地光伏出力特性

通过分析典型年光资源数据，可得以下结论。

日间出力特性：日间光伏出力基本呈现正态分布，正午时段14:00—15:00光资源最强，出力达到峰值。

月出力特性：油田地处高纬度地区，夏季5—7月日照时间长（8:00—21:00），光伏出力较好，最大出力可达到装机功率的85%；冬季12—2月日照时间短（10:00—19:00），出力较低。光伏发电年利用小时数达1 423 h。

出力曲线（日内和日间出力曲线差异）电力系统的发、供、用要求同时完成，而光伏由于资源特性，出力存在随机性和波动性，这种属性不仅体现在日内还体现在日间，这是新能源发展受电网限制的本质原因。

（3）常规机组运行现状

冬季供暖4台燃机运行（3×6B+6FA），其他季节安排机组检修和调峰，2~3台燃机运行。6FA型燃机最快可在启动后13 min内并网，25 min达到满载运行，升降负荷速率约为额定负荷的8.33%，满足排放要求的最低负荷可降至额定负荷的50%，适合热电联产或者区域电网调峰。6B型燃机启动较为迅速，最快可在启动13 min后并网发电，17 min达到满载出力，满足排放要求的最低燃机负荷一般控制在额定负荷的80%，调峰能力有限，同时配置的联合循环系统较为复杂，汽轮机启动时间长，机组适合基荷运行和热电联产，出力较小，不适于调峰运行。

冬季供暖期，4台燃机运行发电供暖，全厂发电出力处于高位190~230 MW，整厂调峰能力受限约在60 MW，可通过启停一台6B机组或者将6FA机组调整至低负荷来实现；供暖初末期2~3台燃机运行，电厂出力在120~160 MW之间同时带采暖负荷，通过启停备用机组将整厂调峰能力增大至120 MW；春夏秋三季2~3台燃机运行，为保留较大旋转调峰能力并保障电网可靠供电，采用双机运行模式（6B+6FA），出力较小。通过启停第3台燃机，燃机调峰能力达到70~80 MW，整厂调峰达到100 MW。启动第4台机组后，整厂调峰能力达到160 MW。

2 油田电网光伏消纳关键因素

从新能源消纳原理可知，新能源发电系统需满足发电机组与负荷消耗的动态平衡、区域

电力系统发电曲线的下限约束和联络线路上的通道输送安全约束，则理论上新能源最大消纳空间位于负荷曲线与电力系统发电曲线的下限约束之间^[3]。

本地区的电力系统在 t 时刻理论可消纳新能源空间为

$$P_a(t) = P_c(t) + P_d(t) - P_e(t)P_b(t)/P_f(t) \quad (1)$$

式中， $P_a(t)$ 为 t 时刻新能源注入电网的有功功率； $P_b(t) = P_c(t) + P_d(t)$ ； $P_c(t)$ 为 t 时刻电网中负荷消耗功率； $P_d(t)$ 为 t 时刻电网中联络线外送有功功率，送出为正，接收为负； $P_e(t)$ 为统计周期（日/月/年）内常规机组最小出力与最大出力之比，表示机组调节能力； $P_f(t)$ 为统计周期（日/月/年）内负荷总量积分与负荷总量最大值之比，表示负荷波动性。

从新能源消纳原理和计算公式可知，负荷规模、外送负荷（电网互联互通能力）、负荷率以及电源调节性能是影响新能源消纳的关键因素，油田电网关键因素2024年数据见表1。

表1 新能源消纳的关键因素

Tab. 1 Key factors for new energy consumption

月份 /月	用电负荷 /MW	外送负荷 /MW	负荷率	常规机组 调峰性能	新能源 消纳空间
1	273	-35	0.92	0.67	64
2	265	-32	0.93	0.72	52
3	243	-29	0.92	0.50	98
4	221	-21	0.89	0.36	119
5	220	-22	0.88	0.36	117
6	250	-41	0.87	0.39	115
7	255	-52	0.87	0.41	107
8	223	-42	0.86	0.42	93
9	211	-52	0.90	0.45	80
10	207	-64	0.90	0.48	66
11	245	-52	0.89	0.48	89
12	312	-56	0.92	0.68	66

油田电网负荷总体呈现冬夏季负荷高、春秋季节负荷较低的季节性波动规律，负荷波动性为0.86~0.93，12—3月用电负荷最大，峰谷差越

小，负荷波动越小。

常规机组调峰性能总体呈现夏季调节能力强、冬季调节能力最弱的特点。对于独立电网系统，调峰性能和负荷率是影响新能源消纳的主要因素，以0.6调峰能力和0.9负荷率的电网系统为例，负荷率提高0.1，新能源消纳空间提升0.7，而调峰能力提高0.1，新能源消纳空间提升1.1，影响显著。具体见表2。

表2 新能源消纳空间占用电负荷量比例对调峰性能和负荷率敏感性

Tab. 2 Sensitivity of new energy consumption space to the proportion of power load and load rate

		负荷率					
调峰性能		1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
	0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.1	0.90	0.89	0.88	0.86	0.83	0.80
	0.2	0.80	0.78	0.75	0.71	0.67	0.60
	0.3	0.70	0.67	0.63	0.57	0.50	0.40
	0.4	0.60	0.56	0.50	0.43	0.33	0.20
	0.5	0.50	0.44	0.38	0.29	0.17	0.00
	0.6	0.40	0.33	0.25	0.14	0.00	-
	0.7	0.30	0.22	0.13	0.00	-	-
	0.8	0.20	0.11	0.00	-	-	-
	0.9	0.10	0.00	-	-	-	-
	1.0	0.00	-	-	-	-	-

油田地区负荷率主要受产业结构和生活习惯等因素影响。目前，油田也在开展变工况生产技术研究，但短期难以大幅变化，因此调峰能力成为短期内提高新能源消纳能力的关键。

通过对现有燃机机型和不同季节燃机运行方式进行分析，除6FA机外，其余三台6B属于基荷机组，不适合调峰：燃机具有启动快、负荷升降速率快的特点，但6B燃机旋转备用容量约为额定出力的20%，即7~8 MW；夏季光伏高发时段，云遮对光伏瞬间出力影响很大，15 min内出力会在20%~90%范围变化，燃机旋转备用容量无法匹配光伏出力波动范围；供暖季节受热定电运行方式的影响，全厂最大发电调峰能力为

60 MW；非供暖季节，兼顾机组计划检修停机以及新能源接入因素，电厂“6B+6FA”的双机运行方式在保留相对较大旋转调峰能力和保障电网可靠供电的前提下，整厂出力最小控制在93 MW，旋转调峰能力约为60 MW；通过启停另外两台机组，可增大调峰能力，但无法响应光伏瞬时出力波动。

3 提升新能源消纳能力的措施

通过火电灵活性改造提升常规机组调峰能力，利用储能系统独特的电源和负荷双重属性，通过降低负荷峰谷差，跟踪新能源发电，平抑新能源并网波动，来提升地区电网对新能源的消纳能力，在不同时间和空间尺度上满足大规模可再生能源调节和存储需求^[4]，保障电力系统稳定运行，解决新能源季节出力不均衡、系统长时间尺度平衡调节问题，支撑电力系统实现跨季节的动态平衡，使系统运行灵活性和效率大幅提升。

3.1 电厂灵活性改造

克拉玛依电厂在由传统燃气发电厂向调峰电厂的转变过程中，需进行以下四个方面的技术改造：一是进行纯凝机组改造，提升调峰能力；二是改善机组爬坡率，提高机组负荷响应速度；三是实现火电机组快速启停，以满足清洁能源发电量和负荷快速变化的需求；四是进行热电联产机组热电解耦^[5]，增强机组负荷调节能力。

根据电厂现状，优先开展燃气电站热电解耦工作，采用电蓄热式锅炉，对热电联产机组进行热电解耦，主要目的是将热电联产中的热力和电力生产分离，可以更灵活地调整电力输出，不受供热需求的限制，提高电力调峰能力，增加可再生资源消纳比例，同时可以维持供热稳定性。

电锅炉功率和储热容量计算式分别为

$$P_d = \frac{E_s}{\Delta t} \tag{2}$$

$$Q_c = \int_{t_1}^{t_2} [Q_y(t) - Q_g(t)] dt \frac{1}{\eta} \tag{3}$$

式中， P_d 为电锅炉加热功率； E_s 为需消纳的过剩

电量； Δt 为过剩电力持续时间； Q_c 为储热容量； Q_g 为燃气轮机最低出力时产热量； Q_y 为用户实时热需求； η 为储热系统效率；积分周期 $t_1 \sim t_2$ 按最大热负荷波动时段确定。

电力和热力平衡约束条件为

$$P_r + P_k = P_f + P_d \quad (4)$$

$$Q_g + Q_c = Q_y \quad (5)$$

式中， P_r 为燃气轮机发电功率； P_k 为可再生能源发电功率； P_f 为用电负荷功率。

3.2 储能配置

根据弃电时段能量确定储能容量，储能起到削峰填谷作用，提升自消纳，减少弃电^[6]。储能容量计算式为

$$E_c = \sum_{t \in T_q} P_q(t) \Delta t / \eta_c \quad (6)$$

式中， E_c 为储能规模； P_q 为弃电功率； T_q 为弃电时段集合； η_c 为储能充放电效率。

3.3 经济性优化模型

同时，经济性分析也是关键，需要计算投资成本、运行维护费用以及通过减少弃电方式获得的收益，评估项目的净现值。

目标函数为

$$\max NPV = \sum_{y=1}^Y \frac{R_y - C_y}{(1+r)^y} - C_c \quad (7)$$

式中， R_y 为年收益（弃电消纳）； C_y 为年运维成本（设备维护）； C_c 为初始投资（电锅炉+储热系统+储能）。

首先分析燃气电站历史出力数据，识别典型日/季节运行模式；然后标定过剩电力时段，使用工具MATLAB构建8 760 h时序仿真模型，测试不同功率/容量组合对弃电消纳率、调峰能力的影响；最后优化目标，找到投资成本与收益平衡的最优解^[7]。

4 运行实例

针对油田2024年新能源消纳情况，结合基础数据，开展实例仿真分析。

(1) 基础参数

光伏弃电时段：每日4 h，冬季供暖期弃电量240 MW·h，冬季供暖初、末期弃电量380 MW·h，非供暖期弃电量200 MW·h。

燃气轮机最低出力：冬季供暖期190 MW，冬季供暖初、末期140 MW，非供暖期93 MW。

热负荷需求：冬季峰值230 MW，谷值145 MW。

(2) 容量配置

电锅炉功率 $P_d=45$ MW；储热容量 $Q_c=180$ MW·h；储能规模 $E_c=50$ MW/200 MW·h。

(3) 经济性评估

实施后效果情况见表3。

表3 实施后效果汇总

Tab. 3 Effect after implementation

项目	投资成本 / 万元	年收益 / 万元	静态回收期 / 年
机组改造	5 940	787	8
储能系统	14 000	2 730	

配置储能能平稳有效地抑制地区负荷的峰谷差，提高新能源最大利用发电效率，进而实现发电、用电在时空上的解耦，有效缓解电力供需之间的矛盾^[8]；在冬季供暖期，电蓄热式锅炉可以将部分电力转化为热能储存起来，从而解耦电力和热能的生产，提高电站的运行灵活性，整体提高系统调峰能力，同时提升光伏发电消纳能力，减少弃电率至4.6%。

5 结束语

基于国家“双碳”目标、中石油集团公司三步走总体部署，统筹推进油气与新能源协同发展。电力降碳是实现这个目标的关键因素，油田电网新能源开发采用集中式与分布式并举，高比例光伏电站接入，造成电网新能源利用率低。通过分析油田电网光伏消纳关键因素，发现主要影响因素是油田负荷特性波动性小，火电机组调峰能力有限。本文针对以上现状及问题，提出燃气电站热电解耦、在发电侧配置储能系统的措

施，结合调度运行数据给出经济性优化模型，并进行实例仿真分析。结果表明，通过燃气电站热电解耦、在发电侧配置储能系统等措施，可全面提升电网新能源消纳能力，促进能源结构优化，赋能电网转型升级。接下来，以双向奔赴、荷源互动为总体思路，通过油气变工况生产，打通四大关键环节，构建“源网荷储”协同的新型电力系统，破解传统能源系统刚性约束，实现油气生产低碳化、负荷弹性化的能源供应新模式，支撑构建新型能源体系，从而实现“双碳”目标。

参考文献

[1] 张晨阳,王福焕,魏华,等. “双碳”目标下塔里木油田油气与新能源融合发展实践[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(2): 16-20.

[2] 张哲,赵建永,程晋伊. 新能源消纳现状与改进措施探究[J]. 智慧城市. 2021, 7(20): 119-120.

[3] 元江洋,刘宁宁,杨明,等. 山东电网新能源消纳关键措施分析及综合评估[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 567-576.

[4] 罗熹,龚明,张涛,等. 双碳背景下的地区电网新能源消纳能力[J]. 自动化应用, 2023, 64(23): 81-83, 86.

[5] 汪欣巍. 燃气轮机联合循环热电联供系统全工况调峰特性及热经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.

[6] 张弘. 考虑新能源消纳的储能优化配置方法研究[J]. 电气技术与经济, 2023(9): 11-13.

[7] 周凯,汪洋,陈香玉,等. 采油平台分布式光伏电站试验[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(2): 1-9.

[8] 潘忠志,孔宁,王燕涛. 改进新能源消纳的配电网资源优化配置研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(6): 71-78.

作者简介

桂娟（1989—），女，工程师，研究方向为清洁电力综合利用技术。

(收稿日期：2025-03-17)