doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.01.013

海洋光柴储发电系统性能研究

张庆岭, 牟 超 (中国电子科技集团公司电子科学研究院,北京100041)

摘 要:本文针对海洋光柴储发电系统开展研究,对发电系统理想状态下的出力进行预测。为 提高发电系统的工作效率,基于参数分析法和能量守恒定律分别建立光伏发电系统出力模型、 柴油发电系统能量转换效率模型,并开展发电系统工作性能测试试验。将实验数据和上述模型 耦合,对影响发电系统工作性能的因素进行了量化分析。结果表明,局部阴影是影响光伏系统 出力的主要因素,其影响系数达到46%,而柴油发电系统辅助设施消耗柴油发发电系统45.5% 的能量。

关键词:光柴储;微网系统;局部阴影;功率预测;效率分析

中图分类号: P715.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2021) 01-0096-06

我国海岸线长达 18 000 多 km,拥有管辖权的 海域面积约为 300 万 km²,相当于无人值守国土面 积的 1/3^[1]。海洋锚泊信息浮台(以下简称"浮台") 作为大型海上平台,具有搭载能力强、中继组网的 特点,可协助完成海洋管理工作。

目前,光柴储系统的研究集中于陆地光伏电 站,海洋发电系统研究较少。浮台以光伏发电为主、 油机发电为辅,配置储能设备构成独立的海洋微型 电网。本文介绍了浮台能源系统架构,构建了光伏 发电系统出力模型、柴油发电机系统能源转换效率 模型,并对发电效率影响因素进行分析。

1 系统架构介绍

浮台能源系统采用光伏发电为主、柴油发为 辅、锂电储能的架构设计,可通过高轨卫星与管控 中心通信,如图1所示。





系统规模:系统配置光伏组件 68 块,8 串 6 并布局,每块光伏组件面积 1.685 m×0.997 m,标准 状态下的转换效率 16.2%;柴油发电机组 1 套,率 额定功率 12 kW,油箱理论容积 800 L,燃料最大 加注量 720 L;储能系统蓄电池组容量 120 kWh, 柴油机启停 SOC 值(State Of Charge,荷电状态, 定义为电池剩余容量占电池容量的比值)分别为 20% 和 80%^[2]。

收稿日期: 2020-06-21

作者简介: 张庆岭(1986-), 男, 工程师, 主要从事设备研发及系统集成工作。E-mail: 06zhangqingling@163.com

2 系统性能分析

2.1 光伏发电系统模型及评估

太阳能光伏系统分析一般采用模拟法和解析 法,其中解析法包括 LoLP 法和参数分析法。本文 采用参数分析法,将复杂的非线性的光伏发电系统的工作过程简化为简单的线性系统,然后对光 伏发电系统性能进行分析。

为提高光伏效率,浮台每串光伏组件集中布置,布局如图2所示。



图 2 光伏组件串并结构示意图

光伏发电系统出力预测公式如式(1)~式(2) 所示^[4]:

$$E_p = H_A \bullet (P_{AS}/G_S) \bullet K \tag{1}$$

$$P_{AS} = \eta_{PS} \bullet A \bullet G_S \tag{2}$$

式中: *E_p*为某期间光伏发电系统的发电量, kWh; *P_{AS}*为标准状下太阳能光伏电池板出力, kW; H_A 为某期间光伏组件表面得到的太阳辐射量, kWh/m²; A 为光伏组件有效工作面积, m²; η_{PS} 为标准状态下光伏组件的转换效率; G_S 为标准状态 下的日照强度, 1 kW/m²; K 为综合设计系数, 理 想状态下取值为 1。

据美国国家航空航天局(NASA)公布的气象 资料,南海气象数据资料如表1所示。

表1 南海地区光照数据

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10 月	11 月	12 月	均值
$kWh/(m^2 \cdot d)$	4.86	5.54	6.29	6.92	6.62	6.28	6.17	5.82	5.42	4.87	4.30	3.91	5.56

结合南海地区历史气象数据可知,5月份光照 强度较好、风雨较少、温度变化较小,因此选取5 月份统计平均数据,对浮台光伏发电系统出力进 行预测。由式(1)和式(2)可知,光伏组件理 论日均发电量为: 2.2 油机发电系统模型及评估

柴油发电机最佳运行功率为额定功率的75% 左右,而最低运行功率约30%^[5]。柴油发电机组可 定功率运行,也可动态匹配负载运行,其燃料消 耗量和发电机输出功率的关系近似为^[6-7]:

$$F = F_0 P_{de-R} + F_1 P_{de} \tag{3}$$

式中: F 为柴油机燃料消耗量, L/h; P_{de-R} 为

 $E_P = H_A \bullet \eta_{PS} \bullet A \bullet K$

=6.62×0.162×(68×1.685×0.997)×1=122.5 kWh

柴油机的额定功率,kW; *P_{de}*为柴油机的输出功率, kW; *F*₀为柴油发电机燃料曲线的截距系数,即发 电机单位功率的空载耗油量,L/kWh; *F*₁为柴油 发电机燃料曲线的斜率,L/kWh。

柴油机的经济性指标一般指柴油机燃油消耗率,即柴油机工作时每千瓦时所消耗的燃油量的克数。一般高速柴油机取值范围204~250,中速柴油机取值103~225,低速柴油机取值160~185^[10]。

$$g_e = G_T / P_e \tag{4}$$

式中: g_e 为燃油消耗率, g/kWh; G_T 为燃油 消耗量, g/h; P_e 为有效功率, kW。

能源转换时,变压器效率一般在95%以上^[8]; 配电盘转换主要有电磁继电器、开关、指示灯组成, 功率消耗可以忽略;额定工况下油机整流模块能 源转换效率为95%,由上述数据可知柴油机发电 系统发电的燃油消耗率为277 g/kWh。

3 系统运行试验

3.1 系统运行试验

系统平稳运行后,天气状况良好时进行测试,数据采集点设计如图3所示。



图 3 试验数据采集点示意图

测试过程中载荷工作在额定工况,读取数据 库中光伏组件累计发电量、载荷瞬时电流、母线 平均电压、油位及柴油发电机组启停信息,测试 时段为5月2日-7日,每天的14:00和21:00 进行统计,统计数据见表2。

表 2 系统运行数据统计表

日期	时间	光伏累计发电量 /kWh	载荷瞬时电流 /A	母线平均电压 /V	油位 /%
5.2	14: 00	7 341.84	96	52.4	45
	21: 00	7 381.05	-42.5	52.5	45
5.3	14: 00	7 407.01	80.4	52.5	45
	21: 00	7 419.53	-41.7	52.92	43
5.4	14: 00	7 456.72	81.6	52.4	43
	21: 00	7 481.13	-43.5	52.5	43
5.5	14: 00	7 524.31	123.3	52.5	44
	21: 00	7 569.31	-42.5	52.5	45
5.6	14: 00	7 541.16	95.7	52.5	44
	21: 00	7 598.97	-40.6	52.1	44
5.7	14: 00	7 623.38	21.3	52.3	36
	21: 00	7 631.96	-41.2	53.06	35

由表2计算浮台载荷瞬时功率、载荷日均耗

电量、光伏组件 24 h 发电量等,如表 3 所示。

5.7

日期 时间 光伏日发电量 /kWh•d 载荷瞬时功率/kW 日均耗电量 /kWh 油位 /% 5.2 21: 00 / -2.23 -53.55 44 5.3 21: 00 48.48 -2.11 -50.55 43 5.4 21: 00 61.6 -2.44 -58.59 43 5.5 21: 00 58.18 -2.23 -53.55 44 5.6 21: 00 49.66 -2.12 -50.77 43

表 3 光伏日均发电量、载荷统计表

42.99

由表3可知,试验过程中载荷平均功率 2.22 kW,浮台光伏发电系统实际日均发电量 E'_p 为52.18 kWh。查询数据库可知,测试期间油机夜 间启动1次并持续运行8.13 h,耗油54 L(柴油密 度0.85 g/mL)。由公式4可知油机发电系统发电 量为:

21: 00

$$W = \frac{\rho V}{g'_e} = 165.7 \text{ kWh}$$

-52.47

3.2 试验结果分析

-2.19

3.2.1 光伏发电系统分析 光伏组件发电模型中 影响效率和输出功率的因素如图 4 所示^[9]。





浮台光伏发电系统为全新光伏组件,布设地 点为热带,电池板污渍、老化、积雪、温度变化等 可不予考虑,影响光伏发电系统工作效率主要因素 为阴影遮挡、电池组件组合与汇流损失、逆变器效 率等。一般光伏逆变器能量转换效率为 95%、电 池组件组合与汇流损失造成功率损失小于 2%^[10]。

局部阴影对光伏组件性能影响较大,阴影造成的热斑效应可能损坏光伏电池^[11];阴影下的光伏板功率输出曲线波动较大,容易出现多个波峰,影响 MPPT 策略的效果^[12]。在试验室模拟阴影遮挡

时,全局最大功率 120.88 W 的光伏阵列基于扰动 法的 MPPT 控制跟踪到的最大功率仅为 68 W^[13]。 甲板上的球形设备舱、护栏、设备天线、避雷针等 均会对光伏组件阵列产生局部阴影,且局部阴影 的覆盖范围较大,始终覆盖 10% ~ 40% 的光伏组 件,成为影响浮台光伏组件发电效率的主要因素。 浮台光伏发电系统综合设计系数 K包括局部阴影 系数 K_{H} 、逆变器损失系数 K_{C} 、光伏组件组合系数 KPA 三部分,有上述定义可知:

$$K = E'_{P}/E_{P} \tag{5}$$

35

(6)

$$K = K_H \bullet K_C \bullet K_{P4}$$
由式 (5) ~式 (6) 可得:

$$K_{H} = \frac{E'_{P}}{E_{P}} \times \frac{1}{K_{C} \cdot K_{PA}}$$
$$= \frac{E'_{P}}{E_{P}} \times \frac{1}{K_{C} \cdot K_{PA}}$$
$$= \frac{52.18}{122.5} \times \frac{1}{0.95 \times 0.98}$$
$$= 0.46$$

浮台光伏发电系统的局部阴影系数K_H为0.46。

通过上述分析可知,局部阴影是影响浮台光 伏发电效率的主要因素。后续应通过优化浮台甲 板结构,降低上层结构对光伏组件造成的局部阴 影;优化光伏组件布局,规避多串组件同步形成 阴影遮挡;控制策略演化时降低局部阴影对 MPPT 策略的影响。

3.2.2 油机发电系统分析 油机发电系统运行时, 除完成载荷、蓄电池组的供电外,还需维持通风 系统、冷却系统、安防系统的运行,系统能量分 配如图 5 所示。



图 5 柴油发电机组能量分配

测试过程中油机发电系统夜间运行,此时光 伏系统停止工作、储能系统 SOC 值由 20% 上升 至 80%。柴油机发电系统配置的通风系统(额定 功率 P_T 为 2 kW)、冷却系统(额定功率 P_L 为 1.6 kW)、安防系统(含油机舱照明、摄像头、红 外报警等,功率 P_L 为 1.5 kW)耗电量分别为 16 kWh, 13 kWh, 12 kWh。另外,油机控制箱及启动 电池、舱室密封电磁阀、浮台线缆等会消耗一定 能量。柴油机发电系统工作期间所产生电量分配 如图 6 所示。



图 6 柴油机发电系统电量分配

由图可知,油机发电量的 54.5% 流向载荷和 蓄电池组,24.9% 的流向通风、冷却及安防系统, 20.6% 消耗在油机控制箱、油机启动电池、电磁阀、 电缆线路等上面。

后期油机发电系统优化时应优先考虑冷却、 通风系统设计,降低冷却系统功损耗;安防优先 采用被动式安全防护设备,减少安防联动功耗; 最后对供电线路进行合理规划、采用更高效的电 气设备和器件,以降低辅助系统功耗。

4 结 论

浮台光柴储微网系统主要由光伏发电系统、 柴油机发电系统及储能系统构成,本文采用参数 分析法建立光伏发电系统出力预测模型、浮台柴 油机发电系统燃油消耗率模型,并结合系统运行 数据对影响发电效率的因素进行了分析,研究结 果表明:

(1)局部阴影是影响光伏发电系统出力的主要因素,其衰减系数约为46%,可通过浮台结构、 组件布局、控制软件等开展优化设计,减少阴影 遮蔽影响;

(2)油机发电系统发电量的 54.5% 流向载荷 和蓄电池组,45.5% 由冷却、通风、安防及其他电 气设备消耗掉,可在结构布局、器件选型等方面 开展优化设计,减少辅助系统功耗。上述研究具 有实际应用价值,可为浮台能源系统的后续优化 及运行维护提供借鉴及参考。

参考文献:

- [1] 孙悦民.中国海洋资源开发现状及对策[J].海洋信息,2009(2):20-23.
- [2] 中电科海洋信息技术研究院有限公司 [DB/OL].http://www.cetcocean.com/.
- [3] 车孝轩.太阳能光伏发电及智能系统 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2013.
- [4] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微网中电池储能与柴油发电机的协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012(32):70-77.
- [5] HOMER Software[DB/OL].http://www.homerenergy.com.
- [6] Dufo-Lopez R, Bernal-Agustin J L. Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems[J], Renewable energy, 2008, 33 (12) : 2559-2572.
- [7] 张志华.船舶动力装置概论 [M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.
- [8] 郑华耀,赵殿礼,吴庚申.船舶电气设备及系统[M].大连:大连海事大学出版社,2011.
- [9] 赵明智,张晓明,宋世金.太阳能光伏发电技术及应用[M].北京:北京大学出版社,2014.
- [10] 董双丽, 刘书强, 林荣超, 等. 光伏方阵串并联失配损失的测试与分析 [J]. 测试工具与解决方案, 2016(13):129-130.
- [11] 王琦, 郑丹丹, 温正庚. 局部阴影下光伏阵列建模对比分析与改进 [J]. 陕西电力, 2017(5):13-16.
- [12] 杨元培, 杨奕, 王建山, 等. 光伏发电传输最大功率储能优化建模仿真 [J]. 计算机仿真, 2017, 34(9):103-108.
- [13] 马骏. 局部阴影下光伏阵列的建模与仿真分析 [J]. 探索与观察, 2019,9(15):39-40.

Research on the Performance of Solar-Diesel-Battery Microgrid System

ZHANG Qing-ling, MOU Chao

China Academy of Electronic and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: The research on solar-diesel-battery microgrid system of mooring platform is carried out to predict the performance of power generation system under ideal condition. To improve the efficiency of power generation system, the output model of photovoltaic power generation system are established based on parameter analysis method, and the energy conversion efficiency model of diesel power system, based on energy conservation principle. Performance test of power generation system is also carried out. The experimental data and the model above are coupled to quantify the factors affecting the performance of the power generation system. The results show that partial shading is the main factor affecting the output force of the photo-voltaic system, and its influence coefficient reaches 46%, while the auxiliary facilities of the diesel power generation system consume 45.5% of the energy of the diesel power generation system.

Key words: solar-diesel-battery; microgrid system; partial shading; power forecasting