

doi: 10.7690/bgzdh.2021.06.001

军用独立型光储柴微电网模态转换控制策略

高明宇, 刘金宁, 冯长江

(陆军工程大学石家庄校区车辆与电气工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为满足军事任务中各类用电的需求, 提出一种军用独立型光储柴微电网模态转换控制策略。基于军用独立型光储柴微电网的结构特点, 通过分析系统运行中功率平衡关系与实际任务需要, 根据微源运行特性与战斗进程结合, 对负荷等级进行划分, 拟定 13 种工作模态与模态转换判定依据, 并建立光储柴微电网系统综合仿真模型进行分析。验证结果表明: 该策略在各类工况中能够完成各个模态的转换与稳定运行, 提升了微电网系统的适用性与可靠性。

关键词: 微电网; 控制策略; 平战转换; 模态转换; 仿真

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A

Mode Transition Control Strategy for Military Independent Optical Diesel Storage Micro Grid

Gao Mingyu, Liu Jinning, Feng Changjiang

(Department of Vehicle & Electrical Engineering, Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to meet the needs of all kinds of power consumption in military tasks, a mode transition control strategy for military independent optical diesel storage micro grid is proposed. Based on the structural characteristics of military independent optical diesel storage micro grid, through analyzing the power balance relationship and actual task needs in the system operation, according to the combination of micro source operation characteristics and combat process, the load level is divided, 13 working modes and mode transition judgment basis are designed, and the comprehensive simulation model of optical diesel storage micro grid system is established for analysis. The verification results show that the strategy can complete the transformation and stable operation of each mode in various conditions, and can improve the applicability and reliability of micro grid system.

Keywords: micro grid; control strategy; transition from peacetime to wartime; mode transition; simulation

0 引言

随着我军信息化进程的不断深入, 军事基地和武器装备对电能供应的依赖程度逐渐提升^[1]。在远离大电网的海岛、边防哨所基地、哨所等区域, 独立型微电网综合了传统能源与新能源发电的应用优势, 技术日趋成熟, 运行灵活、智能, 可靠性更高, 具有广阔的应用前景^[2]。

独立型光储柴微电网是一个多源、多负荷的系统。为了保证系统的经济性与稳定性, 需要对微网中不同特性的微电源与负载采取适用的控制策略, 完成不同的模态转换, 从而实现新能源的高效利用与系统能量的供需平衡^[3], 满足军事任务的各类用电需求^[4]。

1 微网系统结构与基本运行逻辑

如图 1 所示, 光储柴微电网中独立微电网是典型结构之一, 由光伏电池组、储能系统和柴油发电

机组组成^[5]。

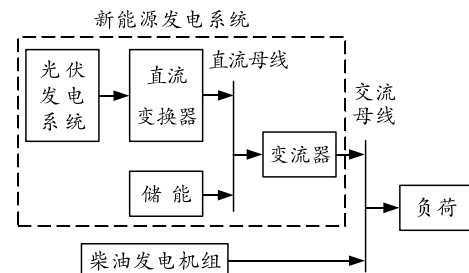


图 1 光储柴独立型微电网结构

光伏电池组由多个光伏电池单元经过串、并联组成, 通过控制器控制输出稳定电能给负载供电^[6]; 储能系统主要作用是保证负荷的长期平衡、快速跟踪供需平衡, 提高微网系统的经济性与稳定性^[7]; 柴油发电机组由内燃机、发电机和控制系统构成。与目前新型的燃气轮机相比, 柴油发电机发展历史长、技术成熟; 对于燃料而言, 柴油能量密度要比液化燃气大得多, 可减少燃料输送的费用, 便于偏

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(51307184)

作者简介: 高明宇(1991—), 男, 河北人, 硕士研究生, 从事装备电气测试技术与智能系统研究。E-mail: 413789384@qq.com。

远地区的燃料储存^[8]。各微源特性如表 1 所示。微网系统遵循光伏为主、储能支撑、机组应急的原则,通过制定稳定高效的控制模式,克服各微源自身不足,协调微源与负载之间的供需平衡,保障系统稳定运行^[9-10]。

表 1 光储柴微源特性

电源种类	优势	缺陷	作用
光伏发电系统	目标特性低,结构简单、清洁可靠,不依赖油料保障	占地面积大;输出受温度、光照等条件的制约	主要能源
储能系统	目标特性低,技术成熟,安全性好	只能存储能量而不产生能量;容量有限	储能能量
柴油发电机组	输出稳定,发电效率高	发电受燃料制约;运行时产生噪音和热量,易暴露目标	应急能源

2 微网运行模式控制

为使光储柴微网系统各单元协调稳定地工作,通过分析系统运行中的功率平衡关系与实际任务需要,确定系统运行的 13 种模式与模式切换判据,以满足各类军事任务需求^[11]。

2.1 微网系统负荷分级

依据《供配电系统设计规范》规定,电力负荷应根据对供电可靠性的要求及中断供电在政治、经济上造成的损失或影响的程度进行分级。笔者结合军事任务实际需求,以军事哨所应用为例,设置系统负荷分级如下:

一级负荷:观测、侦察、通信和指控器材,战斗装具,武器装备等作战指挥用电负荷;

二级负荷:照明、监控系统等营区用电负荷;

三级负荷:灶具、广播电视、空调、热水器等生活用电负荷。

在系统运行模式设计中,要针对不同的负荷保障需求,建立相应的负荷投入和切除的控制逻辑,从而满足军用微电网各类任务的需求。

2.2 系统模式转换控制策略

微电网由分布式电源、能量转换装置、负荷等汇集而成的小型发电系统,微源及负载的不同工作状态组成微网系统的各种模式。由于各微源会随着光照、温度、自身状态等不断改变自身的输出功率,其军事目标特征也不相同;因此,需要提出有效的协调控制策略来保障系统在各类模式转换中实现供需平衡,提高可再生能源的利用水平和供电的稳定性^[12]。通过控制系统采集光照、温度、燃料储量及光伏电池、柴油发电机、储能系统运行状态参数,

对系统工作状态及作战命令状态进行判断,控制系统的工作模式,确保系统满足各类任务要求。

在未收到平战转换指令时,系统处于平时工作状态,整体运行以微源的工作状态及核心负载的供电保障为核心,兼顾二、三级负荷,通过调整微网系统各源之间的功率分配来达到协调控制的目标。蓄电池工作区间为 $30\% \leq \text{SOC} \leq 100\%$,柴油发电机组以 70% 的额定功率运行最优运行状态。以 P_{pv} 、 P_{Battery} 、 P_{Diesel} 分别代表光伏、储能系统、柴油发电机组输出功率, P_{Load} 、 P_{Load1} 、 P_{Load2} 和 P_{Load3} 分别代表负荷总功率及各级负荷功率。结合运行中实际工况,将系统运行划分为 7 种工作模式:

模式 1: 当 $P_{\text{pv}} \geq P_{\text{Load}}$ 时,系统以光伏发电系统为负载进行供电,同时将剩余电量存储至储能系统;若 $\text{SOC} = 100\%$,则光伏发电系统采用限功率控制,部分弃光,蓄电池进入浮充状态,满足稳定运行要求。

模式 2: 当 $P_{\text{pv}} \leq P_{\text{Load}}$, $\text{SOC} \geq 30\%$ 且 $P_{\text{pv}} + P_{\text{Battery}} \geq P_{\text{Load}}$ 时,光伏发电系统采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,与储能系统共同为负载供电。

模式 3: 当 $\text{SOC} \geq 30\%$, $P_{\text{pv}} + P_{\text{Battery}} < P_{\text{Load}}$ 时,启动柴油发电机组判断光储柴系统是否满足负荷需求;若 $P_{\text{pv}} + P_{\text{Battery}} + P_{\text{Diesel}} \geq P_{\text{Load}}$,光伏发电系统、储能系统与柴油发电机组同时运行,全系统综合对负载进行供电。

模式 4: 当 $\text{SOC} \geq 30\%$, $P_{\text{pv}} + P_{\text{Battery}} < P_{\text{Load}}$ 且 $P_{\text{pv}} + P_{\text{Battery}} + P_{\text{Diesel}} < P_{\text{Load}}$ 时,全系统供应仍不能满足系统需求,此时依次切除三级、二级负荷直至微网系统供需平衡,保障核心负荷供电平稳可靠。

模式 5: 当 $P_{\text{pv}} < P_{\text{Load}}$, $\text{SOC} < 30\%$ 且 $P_{\text{pv}} + P_{\text{Diesel}} < P_{\text{Load}}$ 时,依次切除三级、二级负荷直至微网系统供需平衡,实现稳定运行。

模式 6: 当 $P_{\text{pv}} < P_{\text{Load}}$, $\text{SOC} < 30\%$, $P_{\text{pv}} + P_{\text{Diesel}} \geq P_{\text{Load}}$ 且 $P_{\text{Diesel}} \geq 70\%P_n$ 时,柴油发电机组输出功率大于最优运行功率,此时以光、柴系统综合对负载进行供电。

模式 7: 当 $P_{\text{pv}} < P_{\text{Load}}$ 、 $\text{SOC} < 30\%$, $P_{\text{pv}} + P_{\text{Diesel}} \geq P_{\text{Load}}$ 且 $P_{\text{Diesel}} < 70\%P_n$ 时,控制柴油发电机组在 $70\%P_n$ 的最优工作点运行,同时将剩余的容量供给蓄电池充电,最大程度地发挥蓄电池削峰填谷的效果。

当储能系统充电完成时,关闭柴油发电机组,系统重新判定并进入相应模式。

在收到平战转换指令时，系统处于战时工作状态，微网整体运行以战场动向及军用负荷的供电保障为核心，通过调整微网系统各源的启停状态来达到协调控制的目标。平战转换指令可选择接收指挥信息系统的命令，也可根据战场环境判断进行手动切换。结合运行中各实际工况，将系统运行划分为 6 种工作模态：

当收到平战转换指令，且无特殊敌情需要时，系统切除二、三级负荷，同时启动柴油发电机组与光伏系统共同为储能系统进行充电至 $SOC=100\%$ 并保持。充电完毕后，蓄电池保持浮充状态，同时依次接入二、三级负荷，负载满负荷运行，系统进入模态 7 运行，保持良好的战备状态。

模态 8：当系统充电完毕后，依次接入二、三级负荷，当达到供需平衡时系统不能满负荷运行，此时停止增加负荷，负载减载运行，蓄电池浮充，保持良好的战备状态。

模态 9：当系统收到平战转换指令且面临敌情时，对战场态势进行判定，当光伏电池板战损或敌高空侦察需隐蔽撤收时，关停光伏发电系统并启动柴油发电机组，当 $P_{Diesel} \geq P_{Load}$ 时，蓄电池浮充，柴油发电机组为满载负荷供电。

模态 10：当光伏电池板战损或敌高空侦察需隐蔽撤收时，关停光伏发电系统并启动柴油发电机组，当 $P_{Load1} \leq P_{Diesel} \leq P_{Load}$ 时，依次切除三级、二级负荷至系统供需平衡，蓄电池浮充，柴油发电机组为减载负荷供电。

当系统收到平战转换指令且面临敌情时，对战场态势进行判定，当柴油发电机组战损或敌侦察需隐蔽撤收时，关停、撤收柴油发电机组，当 $P_{pv} \geq P_{Load}$ 时，蓄电池浮充，光伏发电系统为满载负荷供电，系统进入模态 1 运行。

模态 11：当柴油发电机组面临敌侦察需隐蔽撤收时，关停、撤收柴油发电机组，当 $P_{Load1} \leq P_{pv} \leq P_{Load}$ 时，依次切除三级、二级负荷至系统供需平衡，蓄电池浮充，光伏发电系统为减载负荷供电。

模态 12：当柴油发电机组面临敌侦察需隐蔽撤收时，关停、撤收柴油发电机组，当 $P_{pv} < P_{Load1}$ 且 $SOC \geq 30\%$ 时，切除二级、三级负荷，储能系统及光伏发电系统共同为一级负荷供电。

模态 13：当光伏发电系统与柴油发电机组战损或收到战斗命令时，系统进入最高戒备状态，关停、撤收光伏及柴油发电机组，切除二、三级负荷，以

储能系统对一级负荷进行供电，维持战斗状态直至命令解除。

当柴油发电机关停， $P_{pv} < P_{Load1}$ 且 $SOC < 30\%$ 时，系统发电量不足，储能耗尽，微网系统停止供电。

系统能量管理策略控制流程和判定条件如图 2 所示。

注意在各模态转换及运行中应遵循以下原则：

1) 模态转换过程中发电机组与逆变器并联运行时需要预留同步时间，以避免电压波动和功率环流^[13]。

2) 在判定柴油发电机组输出功率小于最优运行功率时 ($P_{Diesel} < 70\%P_n$)，蓄电池组进入充电状态，如果出现负载功率升高则转换至模态 5，直至 $SOC \geq 80\%$ 时方可转换为模态 2、3 等，防止蓄电池因反复充放电而缩短使用寿命。

3) 为保证供电的稳定性，柴油发电机组在进行容量配置时应满足 $P_{Diesel} \geq P_{Load1}$ ，确保柴油发电机组能够满足一级负荷的用电需求，保障系统的稳定运行。

4) 在平时，储能系统通过存储电能达到削峰平谷的作用，降低柴油等非清洁能源的使用，具有经济效益；在战时，电能可存储进蓄电池中作为用电保障的最终手段，具有战略意义。根据这一原则，为维持微网系统平战 2 种状态下的供需平衡与稳定供电，以分布式电源供电和负荷切除视为系统正向电能余裕，则系统供电优先级的基本原则为：

平时供电优先级：光伏发电系统 > 储能 > 柴油发电机组 > 二、三级负荷切除 > 一级负荷切除；

战时供电优先级：光伏发电系统 > 柴油发电机组 > 二、三级负荷切除 > 储能 > 一级负荷切除。

将图 2 中微网各部分运行状态汇总，全部结果如表 2 所示。其中：光伏发电系统 0、1 分别代表切除和运行状态；储能系统 0、1、2 分别代表切除、充电和放电状态（当蓄电池 $SOC < 30\%$ 切除；当 $SOC \geq 100\%$ 时，采用浮充方式进行充电，保持以充电状态连入系统中^[14]）；柴油发电机组 0、1 分别代表切除和运行状态；负荷 0、1 分别代表切负荷与满负荷运行状态；模态 1—13 对应模态 1 至模态 13。如表 2 所示，在微源与负载不同组合工作状态下，除去系统无发电源支撑微网的停机状态，系统共有 20 种工作方法。其中的备注项为重复或违反运行逻辑的模态，具体情况为：

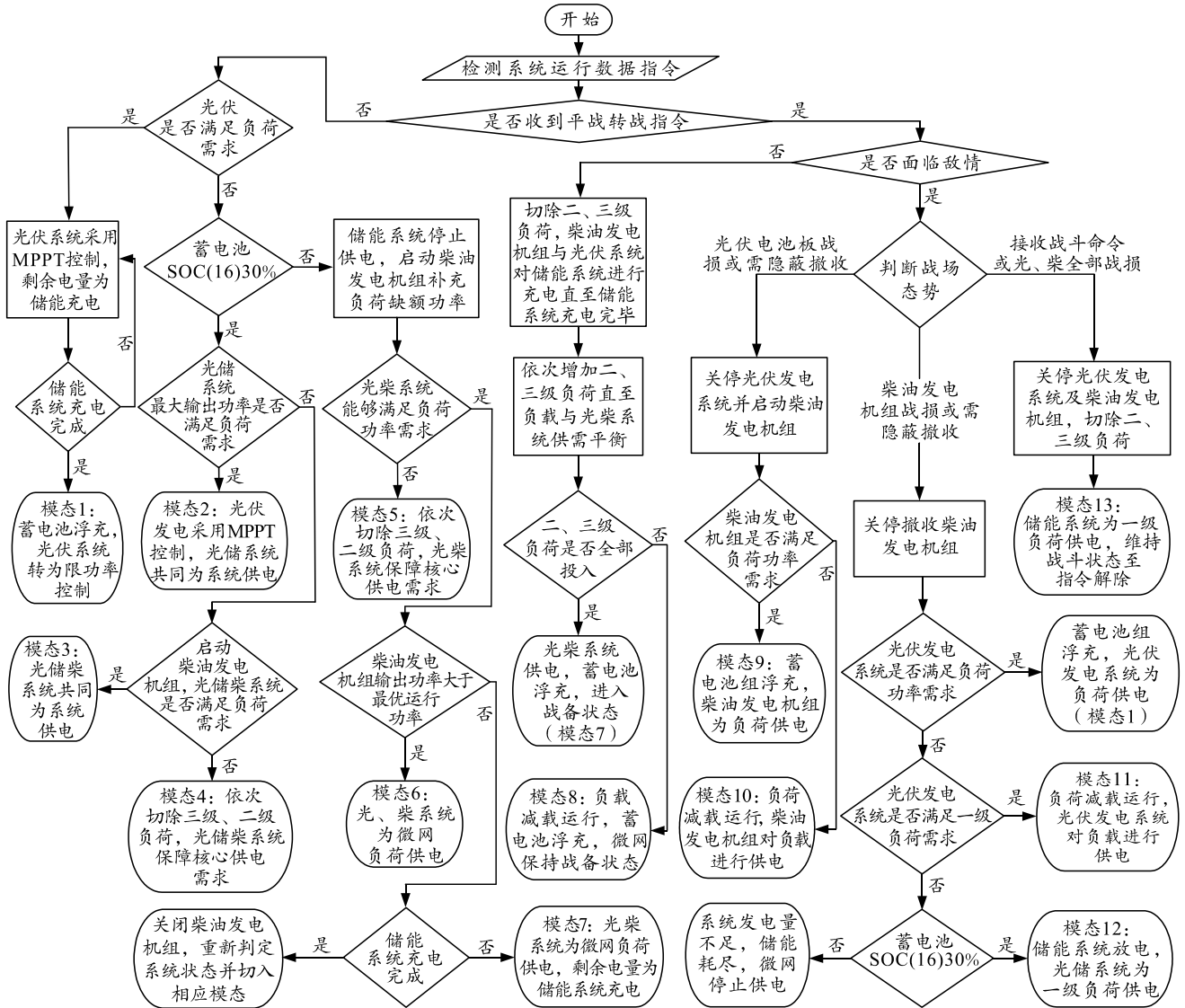


图 2 微网系统工作模式流程

备注 1: 光伏系统发电, 储能系统与发电机组切除, 违背平时供电优先级中储能 > 二、三级负荷切除的原则, 储能系统必须处于充电状态。

备注 2: 储能系统放电, 光伏发电系统与柴油发电机组切除, 负荷满载运行, 违背战时供电优先级中二、三级负荷切除 > 储能系统的原则, 在这一状态下应减载运行, 保障核心负荷长时间供电。

备注 3: 柴油发电机组供电, 光伏发电系统与储能系统切除, 违背战时供电优先级中二、三级负荷切除 > 储能系统的原则, 储能系统必须处于充电状态。

备注 4: 储能系统、柴油发电机组供电, 光伏发电系统切除, 当满载时违背战时供电优先级中二、三级负荷切除 > 储能的原则, 储能系统不能放电; 当减载运行时违背 $P_{Diesel} \geq P_{Load1}$ 的原则, 储能系统

不需要放电。

表 2 微源、负荷状态及模式运行

光伏发电系统	储能系统	柴油发电机组	负荷	模式
1	0	0	0	备注 1
1	0	0	1	备注 1
1	1	0	0	11
1	1	0	1	1
1	2	0	0	12
1	2	0	1	2
1	0	1	0	5
1	0	1	1	6
1	1	1	0	8
1	1	1	1	7
1	2	1	0	4
1	2	1	1	3
0	2	0	0	13
0	2	0	1	备注 2
0	0	1	0	备注 3
0	0	1	1	备注 3
0	1	1	0	10
0	1	1	1	9
0	2	1	0	备注 4
0	2	1	1	备注 4

通过 13 种模式的切换,微网系统能够应对不同战场环境与需求,实现系统的稳定运行与平战转换。

3 微网运行模态仿真

如图 3 所示,根据系统结构,建立光储柴微网系统综合仿真模型。

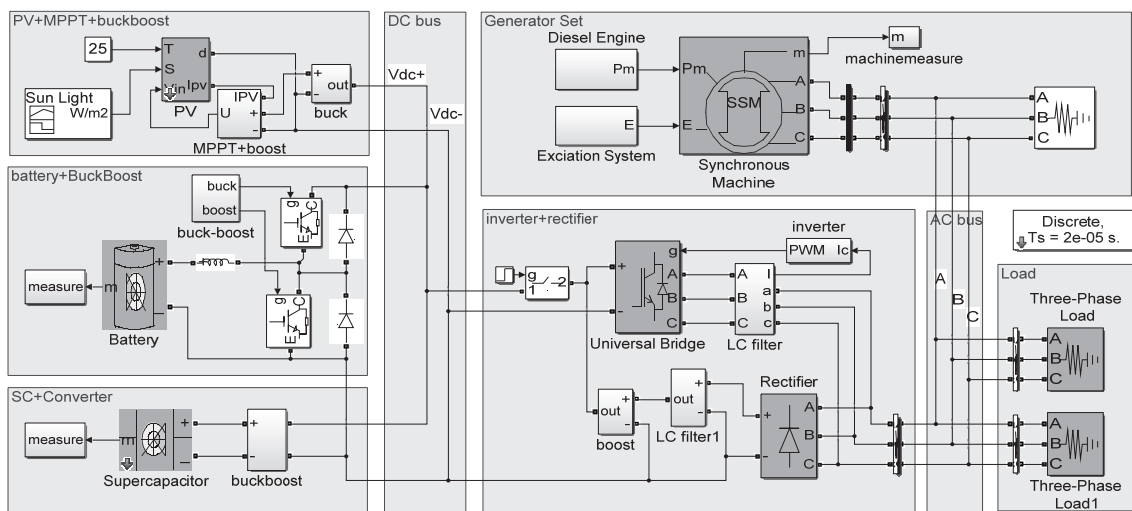


图 3 光储柴系统仿真结构

其中光伏发电系统、铅酸蓄电池和超级电容通过 Buck-Boost 变换连接到直流母线中 (700 V)^[15], 直流母线连接变流器后与柴油发电机组在交流母线进行汇流,为系统负载供电^[16]。系统参数如表 3 所示。

表 3 微网系统仿真参数

参数类型	参数值
直流母线额定电压/V	700
交流母线额定电压/V	380
交流母线额定频率/Hz	50
光伏发电系统容量/kWp	28
系统工作温度/°C	25
蓄电池组额定电压/V	144
蓄电池组容量/(kW/h)	177.12
超级电容容量/F	500
柴油发电机组额定功率/kW	10
一级负荷/kW	≤2
二级负荷/kW	≤5
三级负荷/kW	≤5

针对提出的控制策略,对微网系统选取多种模式及其转换过程在 Matlab/Simulink 软件中进行仿真分析,观察光照、蓄电池荷电状态、直流母线电压、交流母线电压和各微源输出功率等波形,验证控制方式的有效性。

3.1 模态 1 转换至模态 2 运行仿真

仿真模拟工况为系统在模态 1 下运行,光照强度发生波动,同时在 1 s 时系统加入 4 kW 负载,系统进入模态 2 运行。此时光伏和储能系统输出如图 4 所示,光伏电池输出功率随光照强度改变,储能系统输出功率配合系统维持正常运行,直流与交流

电压稳定,系统由光伏供电转为光储联合供电,运行状态良好。

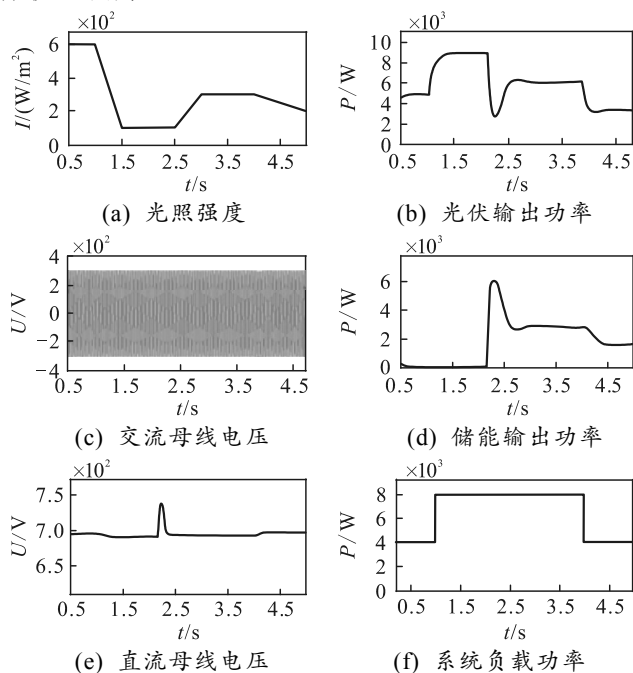


图 4 模态 1 转换至模态 2 运行系统参数波形

3.2 模态 7 转换至模态 2 运行仿真

仿真工况为系统在无光照条件下的模态 7 运行,总负荷为 2 kW,发电机组运行在最优工况,输出功率为 7 kW,剩余能量为蓄电池组充电,当蓄电池组完成充电时,柴油发电机组退出运行,系统由蓄电池组进行供电,系统转换至模态 2,实现稳定运行,输出波形如图 5 所示。

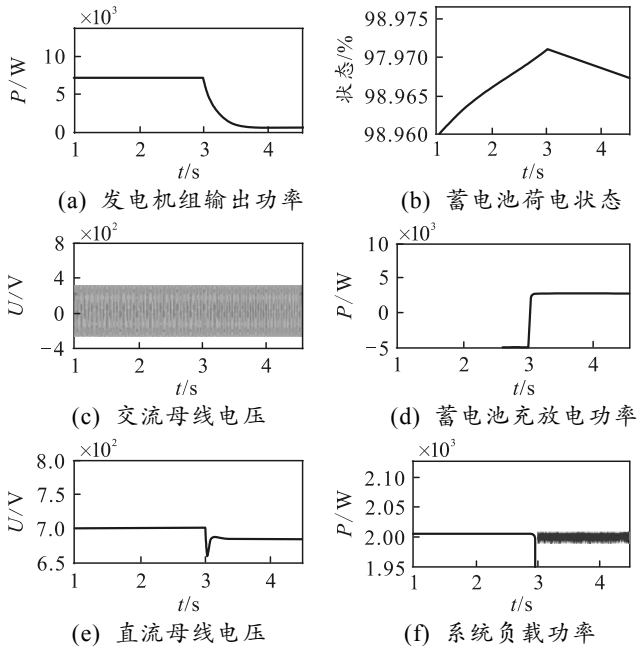


图 5 模态 7 转换至模态 2 运行系统参数波形

3.3 模态 2 转换至模态 3 运行仿真

仿真工况为系统在模态 2 下运行，光储系统为 15 kW 负载供电，系统在 2 s 时加入 5 kW 负荷，光储系统难以满足需求，柴油发电机组启动并网系统，由光伏及柴油发电机组共同供电，系统转为模态 3 运行。此时发电机组不提供余量电能，不对蓄电池进行充电，系统运行状态稳定，输出波形如图 6。

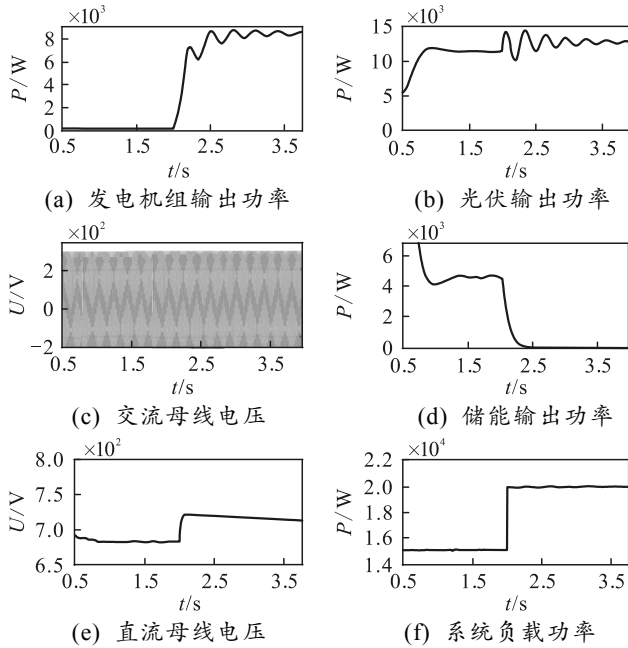


图 6 模态 2 转换至模态 3 系统参数波形

3.4 模态 2 转换至模态 7 运行仿真

仿真模拟工况为系统在模态 2 状态下，夜间蓄

电池组为系统供电时，在 2 s 时收到平战转换指令，系统保留一级负荷 (2 kW)，同时切除二、三级负荷，柴油发电机组启动为储能系统充电，充电完成后系统切入二、三级负荷 (5 kW) 并维持储能系统的满电状态，转换至模态 7 运行。此时储能和柴油发电机组输出如图 7 所示，直流与交流电压稳定，系统运行状态良好。

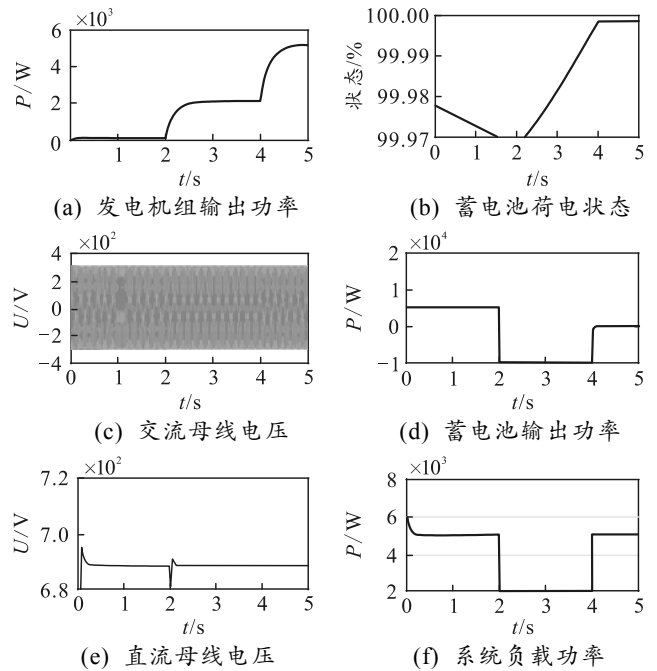
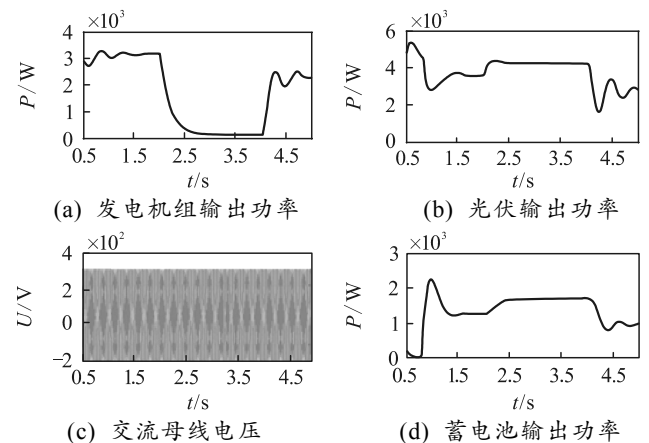


图 7 模态 2 转换至模态 7 系统参数波形

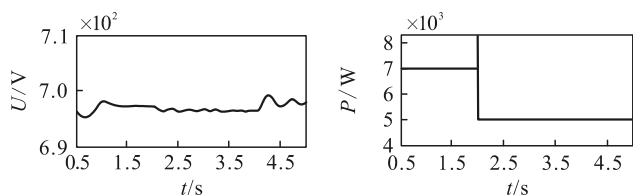
3.5 模态 3 转换至模态 11 运行仿真

仿真模拟工况为系统在模态 3 下运行，在 2 s 时收到抗敌侦察指令，系统保留一级负荷 (2 kW)，同时切除二、三级负荷，发电机组关闭、撤收，光伏系统与储能系统为负荷供电，系统切入二、三级负荷 (5 kW)，系统在模态 11 下运行。4 s 时指令解除，光伏系统切入模态 3 恢复运行，输出波形如图 8 所示。



(c) 交流母线电压

(d) 蓄电池输出功率



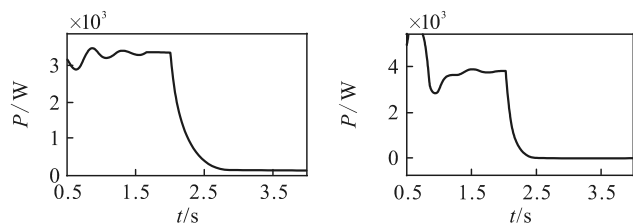
(e) 直流母线电压

(f) 系统负载功率

图 8 模态 2 转换至模态 7 系统参数波形

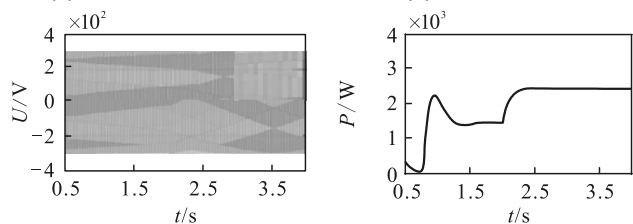
3.6 模态 3 转换至模态 13 运行仿真

仿真模拟工况为系统在模态 3 下运行，在光储柴协调供电情况下，在 2 s 时收到战斗指令，系统保留 1 负荷 (2 kW)，同时切除光伏、发电机组、二级与三级负荷，系统转换至模态 13，保障核心负载稳定运行，输出波形如图 9 所示。



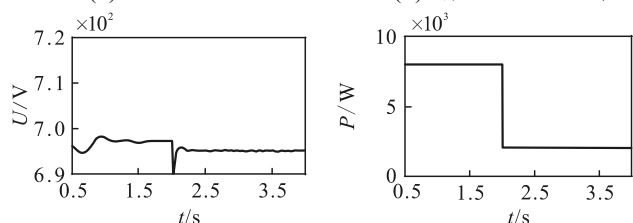
(a) 发电机组输出功率

(b) 光伏输出功率



(c) 交流母线电压

(d) 蓄电池输出功率



(e) 直流母线电压

(f) 系统负载功率

图 9 模态 3 转换至模态 13 系统参数波形

通过以上模态的仿真验证可知：系统在面对不同运行环境与作战命令时，能够自动调配各微源工作状态，实现负载与能源的供需协调统一，从而满足各类军事任务需求。

4 结束语

笔者依据军用独立型光储柴微电网的结构特点和军事应用需求，通过分析系统的运行模态与作战指令要求，确定系统 13 种稳定工作运行模态，实现了光伏电池、储能系统和柴油发电机组的稳定协调

运行。通过 Matlab/Simulink 仿真验证可知：该系统在各工况不断变化的情况下，可以实现各模态的切换和稳定运行，从而验证了策略的有效性与可靠性，能够满足各类军事任务的需求。

参考文献：

- [1] 胡文雷. 风光柴蓄微网系统能量管理与控制研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2014.
- [2] 郭雅娟, 陈锦铭, 何红玉, 等. 交直流混合微电网接入分布式新能源的关键技术研究综述[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 9-18.
- [3] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91.
- [4] 纪秀美, 闫玉铎. 边海防独立微电网系统优化配置方法[J]. 系统仿真技术, 2018, 14(4): 242-247, 313.
- [5] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 虚拟同步发电机在光储柴独立微电网中的控制研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017: 26-32.
- [6] 赖昌伟, 黎静华, 陈博, 等. 光伏发电出力预测技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1201-1217.
- [7] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [8] 柴英博, 解璞. 多元直流微网能量协调控制策略[J]. 国外电子测量技术, 2020(2): 47-52.
- [9] 刘向民. 微电网中光-储-柴的协调控制策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [10] HE J W, LI Y W. An Enhanced Microgrid Load Demand Sharing Strategy[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.
- [11] 杨奎国, 沈卫东, 阮喻. 野战微电网能量管理需求分析与系统设计[J]. 科技风, 2019(29): 183.
- [12] 李春平, 杨万清, 王跃东, 等. 基于 Homer 仿真的微网能量管理与控制策略[J]. 电测与仪表, 2014, 51(20): 91-94.
- [13] 杨亮, 王聪, 吕志鹏, 等. 基于同步逆变器的预同步并网方式[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3103-3108.
- [14] 贾科, 陈奕汝, 毕天姝, 等. 微网中储能系统的能量管控方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2665-2673.
- [15] 张瑞成, 翟电杰, 张怡. 含混合储能系统直流微电网分布式协调控制策略[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(4): 232-236.
- [16] 武筱彬, 程志江, 柴万腾, 等. 边防哨所风光发电微电网存储建模仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(1): 134-137, 238.