

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241728

市场导向条件下光储柴直流微电网能量协调控制策略优化研究

文雪茹¹, 武晓冬¹, 彭飘飘¹, 李德云¹, 朱燕芳², 孟子暄¹

(1. 山西大学电力与建筑学院, 山西 太原 030013; 2. 国网山西省电力公司电力调度控制中心, 山西 太原 030021)

摘要: 为提高全额保障性收购政策下系统的经济性和稳定性以及新能源的消纳率和自供给率, 以光储柴直流微电网系统为研究对象, 提出了一种新型的协调控制策略。介绍了保障并网参数、优先级判断参数和市场交易参数, 并将其与传统的能量控制策略结合, 旨在细化系统的运行模式、实现模式的最优切换和系统的稳定运行。同时搭建了综合评价体系和对应仿真模型, 对所提优化策略进行分析验证。仿真及对比结果表明: 所提新型能量协调控制策略在保证系统稳定运行的前提下, 新能源的自供给率提高了2%~8%, 自消纳率提高了4%~57%, 系统整体的运行收益提高了4%~28%。由此可得: 该策略可以有效提高系统的整体运行性能, 在“全额保障性收购+市场化交易”的新能源电量消纳背景下具有广泛的应用前景。

关键词: 光储柴直流微电网系统; 保障并网参数; 优先级判断参数; 市场交易参数; 新型能量协调控制策略; 综合评价体系

Optimization study on energy coordination control strategy for PV-storage-diesel DC microgrids under market-oriented conditions

WEN Xueru¹, WU Xiaodong¹, PENG Piaopiao¹, LI Deyun¹, ZHU Yanfang², MENG Zixuan¹

(1. School of Electric Power and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030013, China; 2. Power Dispatch Control Center, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021, China)

Abstract: To improve the economic efficiency, operational stability, and renewable energy utilization and self-sufficiency under the full guaranteed acquisition policy, this paper focuses on a PV-storage-diesel DC microgrid system and proposes a novel coordinated control strategy. It introduces grid-connection guarantee parameters, priority decision parameters, and market transaction parameters, which are integrated with traditional energy control strategies to refine system operation modes, achieve optimal mode switching, and ensure stable system operation. At the same time, a comprehensive evaluation system and corresponding simulation models are established to analyze and verify the proposed optimization strategy. Simulation and comparison results show that, while ensuring stable system operation, the proposed coordination control strategy increases renewable energy self-sufficiency by 2%~8%, enhances self-consumption by 4%~57%, and improves the overall system operating profit by 4%~28%. Therefore, it can be concluded that the proposed strategy can effectively improve the overall system operational performance and has broad application prospects in the context of renewable energy consumption under a “full guarantee acquisition + market-oriented trading” mechanism.

This work is supported by the Youth Fund of Shanxi Province (No. 202203021212484).

Key words: PV-storage-diesel DC microgrid system; grid-connection guarantee parameter; priority decision parameter; market trading parameter; new energy coordination control strategy; comprehensive evaluation system

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 国家对可再生能源

发展的支持力度不断加大, 颁布并施行了多项针对新能源消纳、发电系统运行以及电力市场交易等方面的举措, 新能源的装机规模快速增长, 电力市场交易机制也日益完善, 系统能源结构也更加多元化和灵活化。2024年4月, 国家出台了《全额保障性收购可再生能源电量监管办法》, 对新能源电量的并网消纳形式进行了更新。这一变化使得新能源并网

基金项目: 山西省青年基金项目资助(202203021212484); 2023年山西省研究生教育创新计划支持项目(2023AL05)“面向新型电力系统的分析与计算案例”

消纳的复杂性和多样性显著增加,新增了保障并网、市场交易以及绿电过多等多种场景。这对电力系统的灵活性和协调性提出了更高要求^[1]。因此亟需对系统的能量协调控制策略进行优化,以更好地适应新的消纳环境和市场需求。否则会引发系统运行模式切换不稳定、弃光率升高,以及新能源消纳率和运行收益降低等一系列问题。

针对系统运行稳定性问题,有学者从混合储能系统角度,提出应用电网多源多运行域协调调度策略,采用级联拓扑结构构建双层优化模型^[2-4],这类模型适用于分布式能源多接入的电网场景,但是提高新能源消纳率方面具有局限性。在系统抗干扰稳定策略方面,有学者提出了混合储能增强型自抗扰协调控制策略、自适应荷电状态(state of charge, SOC)均衡控制策略、虚拟轴控制策略和自适应分层控制策略等^[5-9],这些策略能够有效改善动态性能,适用于复杂工况下的微电网系统,但是其与政策和经济因素假设结合时,抗干扰结果具有不确定性。在模式切换控制策略方面,为保证切换的稳定性,多模式控制算法、非线性控制算法、平衡切换控制策略、模式切换控制策略等被提出^[10-13],这些策略在新能源占比较高的系统中能够有效实现功率精确分配和模式稳定切换,但是提高了系统的运行成本。

在提高新能源消纳率方面,文献[14]提出了新一代低压直流供电系统多运行模式控制策略,该策略适用于低压直流配电网,能够有效协调电能的产销储用,但是缺少对低概率极端情景的考虑。从模型预测角度,有学者提出了基于母线电压的模型预测控制策略^[15]和基于两阶段鲁棒优化的电力供需平衡模型^[16],都能够有效提高新能源消纳率,但是降低了系统运行的经济性。从协同规划角度,有学者提出了结合国家加权平均资本成本搭建的能源系统转型模型方法^[17]、考虑源荷匹配的光伏混合能源系统多目标协同规划方法^[18]和多模式监控和能源管理模型^[19]等,这些模型可以有效协调源网荷储,适用于大规模新能源接入的系统,但是未考虑到低概率极端情景对系统的影响。

为了提高新能源系统的运行收益,有学者从算法优化角度,提出了粒子群优化、蚱蜢优化算法、Salp Swarm 算法和蚁狮算法等^[20],这些算法在需要优化系统运行效率场景中可以有效改善系统电压电流,但是系统各单元之间的协调性一般。从市场交易角度出发,搭建了综合能源服务市场交易机制模型、源-负载双侧不确定性模型、概率最优潮流多目标优化模型和综合能源系统日前调度随机优化模型^[21-24],适用于需要优化市场交易和系统运行成

本的场景,但是未考虑到系统能源转换过程中的损耗。从调度优化角度,有学者提出了混合储能的两阶段调度模型^[25]、纳什讨价还价方法^[26]和电压成本敏感因子^[27],适用于需要优化系统调度和成本的场景,但是忽略了系统各级单元之间的协调调度。

为保证系统在稳定运行的基础上提高新能源的消纳率和运行收益,本文结合全额保障性收购政策和现货市场电价波动等因素,提出了保障并网参数,优先级判断参数和市场交易参数,并将其与传统的能量协调控制策略相结合,对系统的运行模式进行了更加细致的划分。同时通过搭建系统仿真模型来验证优化后策略的可行性,并以某具体的光储柴建筑一体化项目为例来验证优化后策略在提高新能源消纳率和系统运行收益方面的有效性。

1 光储柴直流微电网系统

1.1 系统结构介绍

本文所提出的光储柴直流微电网系统 (photovoltaic storage diesel DC microgrid system, PSDDMS)结构如图1所示,主要分为光伏单元、储能单元、负荷单元、电网单元和柴油机单元5个部

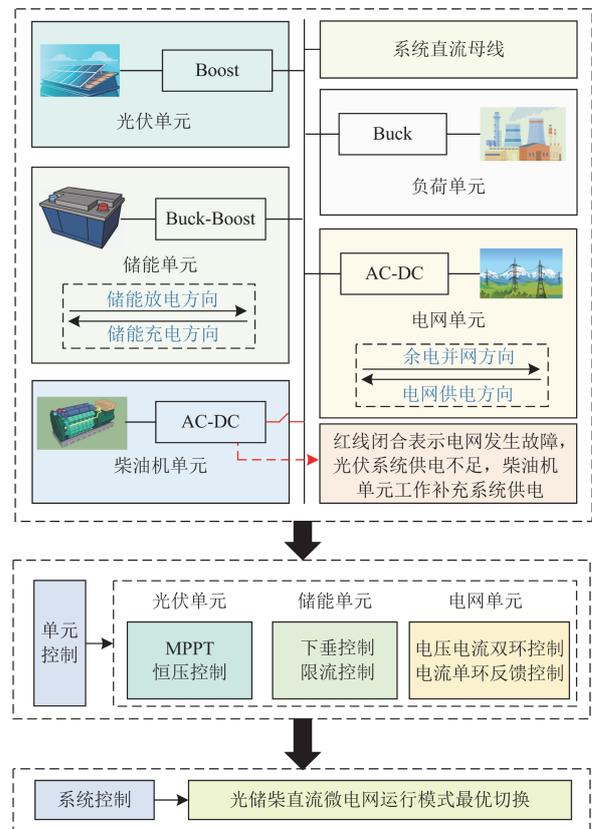


图1 光储柴微电网系统结构

Fig. 1 PSDDMS microgrid system structure

分。PSDDMS 系统采用双层控制：第一层为单元控制，主要包括光伏单元的最大功率点跟踪控制(maximum power point tracking, MPPT)和恒压控制，储能单元的下垂控制和限流控制以及电网单元的电压电流双闭环控制和电流单环反馈控制；第二层为系统控制，根据能量协调控制策略实现微电网运行模式的最优切换。

1.2 系统运行模式介绍

本文提出一种新型的能量协调控制策略(novel energy-coordinated control strategy, NECCS)，并基于此将 PSDDMS 运行模式划分为 4 大类，分别是并网优先模式(grid priority mode, GRM)、储能优先模式(ES priority mode, EPM)、电网故障模式(grid failure mode, GFM)和绿电不足模式(power deficit mode, PDM)。不同模式的具体介绍如下。

1) 在 GRM 模式下，现货市场交易电价达到系统期望价格，系统余电量先进行电网保障性收购，再进行现货市场交易，具体运行模式有：保障收购模式(secure purchase mode, R-SPM)、市场交易模式(market trade mode, R-MTM)、储能充电模式(ES charging mode, R-ECM)和绿电过多模式(power overload mode, R-POM)。

2) 在 EPM 模式下，现货市场交易电价未达到系统期望价格，系统余电量先进入储能单元存储，再进行电网保障性收购和现货市场交易，具体运行模式有：孤岛运行模式(island operation mode, E-IOM)、保障收购模式(E-SPM)、市场交易模式(E-MTM)和绿电过多模式(E-POM)。

3) 在 GFM 模式下，电网单元运行出现故障，具体运行模式有：储能工作模式(ES operation mode, G-EOM)和储能待机模式(ES standby mode, G-ESM)。

4) 在 PDM 模式下，系统光伏单元的发电量不满足负荷单元消耗，需要储能单元、电网单元和柴油机单元补充剩余电量，具体运行模式有：孤岛运行模式(P-IOM)、电网直接供电模式(direct grid supply mode, P-DGM)、柴油机直接供电模式(direct diesel supply mode, P-DDM)、电网补充供电模式(replenish grid supply mode, P-RGM)和柴油机补充供电模式(replenish diesel supply mode, P-RDM)。

由于 PSDDMS 系统需要快速响应场景变化并保持系统级的功率平衡切换，而且系统中存在着需要调整充放电状态的储能单元，为保证系统的稳定运行，切换时间尺度应设置在毫秒级^[14]，对应的功率流动平衡式如表 1 所示。

表 1 NGECCS 策略下 PSDDMS 系统运行模式

Table 1 PSDDMS operation mode under NGECCS strategy

运行模式	功率流动平衡式
GRM	R-SPM $P_{pv} = P_{load} + P_{ass}$
	R-MTM $P_{pv} = P_{load} + P_{ass} + P_{tra}$
	R-ECM $P_{pv} = P_{load} + P_{ass} + P_{tra} + P_{bess}$
	R-POM $P_{pv} = P_{load} + P_{ass} + P_{tra} + P_{ren,si}$
EPM	E-IOM $P_{pv} = P_{load} + P_{bess}$
	E-SPM $P_{pv} = P_{load} + P_{bess} + P_{ass}$
	E-MTM $P_{pv} = P_{load} + P_{bess} + P_{ass} + P_{tra}$
	E-POM $P_{pv} = P_{load} + P_{bess} + P_{ass} + P_{tra} + P_{ren,san}$
GFM	G-EOM $P_{pv} = P_{load} + P_{bess} + P_{ren,er}$
	G-ESM $P_{pv} = P_{load} + P_{ren,yi}$
PDM	P-IOM $P_{load} = P_{pv} + P_{bess}$
	P-DGM $P_{load} = P_{pv} + P_{grid}$
	P-DDM $P_{load} = P_{pv} + P_{diesel}$
	P-RGM $P_{load} = P_{pv} + P_{bess} + P_{grid}$
	P-RDM $P_{load} = P_{pv} + P_{bess} + P_{diesel}$

其中， P_{pv} 为光伏单元的工作功率； P_{load} 为负荷单元的消耗功率； P_{bess} 为储能单元的充放功率； P_{diesel} 为柴油机单元的工作功率； P_{ass} 为系统绿电量进行保障收购时的并网功率； P_{tra} 为系统绿电量进行现货市场交易时的并网功率； P_{grid} 为电网单元向系统供电时的能量流动功率； $P_{ren,yi}$ 为经负荷单元消耗后的剩余电量消纳功率； $P_{ren,er}$ 为经负荷单元消耗和储能单元充放后的剩余电量消纳功率； $P_{ren,san}$ 为经负荷单元消耗、储能单元充放、电网保障收购和现货市场交易后的剩余电量消纳功率； $P_{ren,si}$ 为经负荷单元消耗、电网保障收购和现货市场交易后的剩余电量消纳功率。

2 系统能量协调控制策略优化

2.1 传统的能量协调控制策略

传统的能量协调控制策略(conventional energy-coordinated control strategy, CECCS)以“可再生能源电量全额收购政策”为背景，以“系统功率平衡”为基础，根据光伏单元、储能单元的工作状态以及系统负荷确定 PSDDMS 的运行模式，主要有绿电剩余模式(power surplus mode, PSM)、绿电不足模式(PDM)和电网故障模式(GFM)3 类。

其中，PSM 模式可细分为 3 类，分别是直接收购模式(direct purchase mode, S-DPM)、孤岛运行模式(S-IOM)和全额收购模式(full purchase mode, S-FPM)，对应的功率流动平衡式如表 2 所示。PDM

模式和 GFM 模式与前文分析相同。其中, P_{acq} 表示系统绿电量进行全额收购时的并网功率。

表 2 CECCS 策略下 PSDDMS 系统 PSM 运行模式

Table 2 PSM mode of PSDDMS under CECCS strategy

运行模式	功率流动平衡式
S-DPM	$P_{pv} = P_{load} + P_{acq}$
PSM S-IOM	$P_{pv} = P_{load} + P_{bess}$
S-FPM	$P_{pv} = P_{load} + P_{bess} + P_{acq}$

PSDDMS 应用 CECCS 的运行模式分析过程如图 2 所示, 主要分为以下几个步骤。

1) 判断光伏单元产生的绿电量是否满足负荷单元消耗, 若不满足, 系统运行在 PDM 模式。

2) 在 PDM 模式中, 判断储能单元是否满足放电条件, 若满足, 判断放出电量是否满足负荷单元

消耗; 若满足, 运行在 P-IOM 模式; 若不满足, 判断电网单元是否正常运行; 若正常, 运行 P-RGM 模式, 否则运行在 P-RDM 模式。若储能单元不满足放电条件, 判断电网单元是否正常运行; 若正常, 运行 P-DGM 模式, 否则运行在 P-DDM 模式。

3) 若绿电量满足负荷单元消耗, 判断电网单元是否正常运行; 若电网故障, 运行在 GFM 模式。判断储能单元是否满足充电条件, 若满足, 运行在 G-EOM 模式, 否则运行在 G-ESM 模式。

4) 若绿电量满足负荷单元且电网单元正常, 系统运行在 PSM 模式。判断储能单元是否满足充电条件, 若不满足, 运行在 S-DPM 模式; 若满足, 判断剩余绿电量储能单元是否可以完全消耗; 若可以, 运行在 S-IOM 模式, 否则运行在 S-FPM 模式。

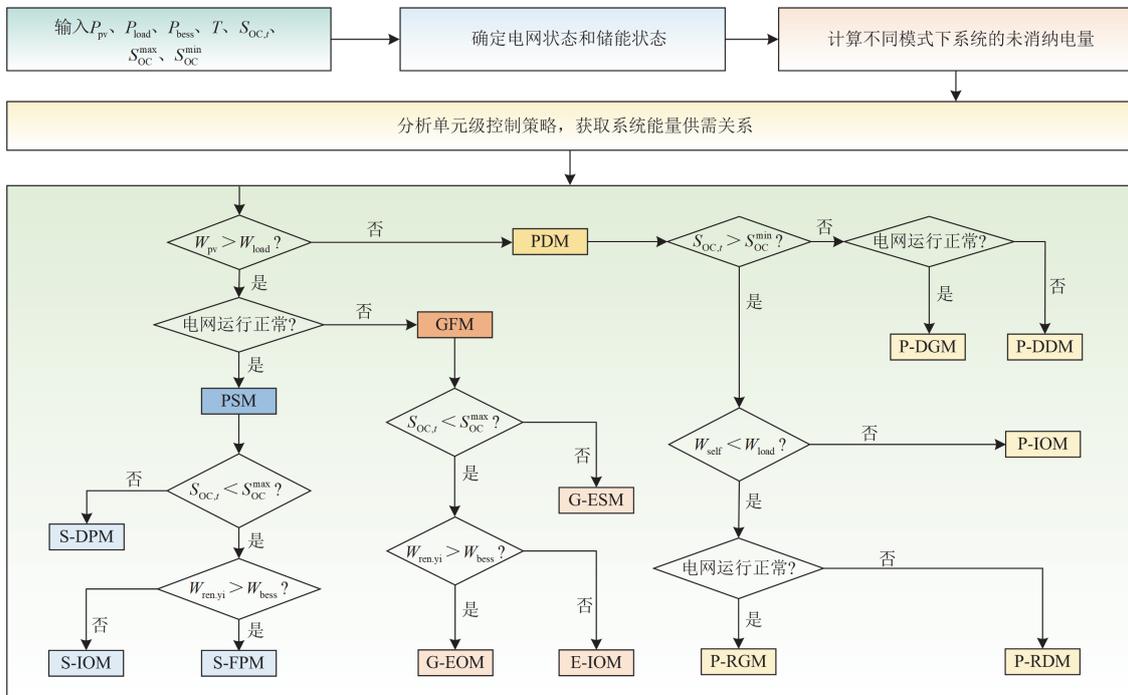


图 2 CECCS 策略下 PSDDMS 系统的运行模式分析

Fig. 2 Analysis of the operation mode of PSDDMS system under CECCS strategy

2.2 能量协调控制策略优化

2.2.1 相关参数确定

本文结合电网保障收购政策和电力现货市场波动电价等因素, 提出了保障并网参数、优先级判断参数和市场交易参数。这些参数主要应用于 GRM、EPM 和 PSM 模式, 即系统绿电量并网模式, 保障可再生能源电量的最优消纳和系统的最优运行。

1) 保障并网参数 (P_{GC}): 判断经过系统消耗后的剩余电量是否满足保障收购的并网条件, 具体计算

公式如式(1)所示^[28]。

$$P_{GC} = \frac{W_{pv} - W_{load} - W_{bess}}{W_{gua}} \quad (1)$$

式中: W_{gua} 表示电网保障收购电量, 由系统发电量与电网消纳容量共同决定。当 P_{GC} 计算结果大于 0 时, 系统进入 GRM 模式或 EPM 模式; 反之, 系统未达到并网条件。

2) 优先级判断参数 (P_{pj}): 判断系统余电量并网时的优先级, 具体计算公式如式(2)所示^[1]。

$$P_{PJ} = \frac{\gamma_{\text{real}}}{\gamma_{\text{expect}}} \quad (2)$$

式中: γ_{real} 表示电力现货市场的实时波动电价, γ_{expect} 表示系统期望的市场交易价格。当 P_{PJ} 计算结果大于 1 时, 系统进入 GRM 模式; 反之, 系统进入 EPM 模式。

3) 市场交易参数 (P_{MT}): 判断经过系统消耗和保障收购后的剩余电量是否在市场可交易电量之内, 具体计算公式如式(3)所示^[1]。

$$P_{MT} = \frac{W_{\text{pv}} - W_{\text{load}} - W_{\text{bess}} - W_{\text{ass}}}{W_{\text{deal}}} \quad (3)$$

式中: W_{deal} 表示电网可市场化交易电量。当 P_{MT} 计算结果小于 1 时, 系统余电量可被电网全额消纳; 反之, 系统余电量超出电网可消纳容量。

2.2.2 能量协调控制策略优化

本文通过将 P_{GC} 、 P_{PJ} 、 P_{MT} 参数与 CECCS 结合, 提出了一种新型的能量协调控制策略(NECCS)。该策略以“PSDDMS 系统功率平衡”为基础, 以“最大化消纳 + 最大化收益”为目标, 根据现货市场电价和系统内各单元的工作状态来确定微电网的运行模式。PSDDMS 系统应用 NECCS 策略的运行模式分析过程如图 3 所示。由图 3 可得 PDM 模式与 GFM 模式没有变化, 剩余模式分析主要分为如下步骤。

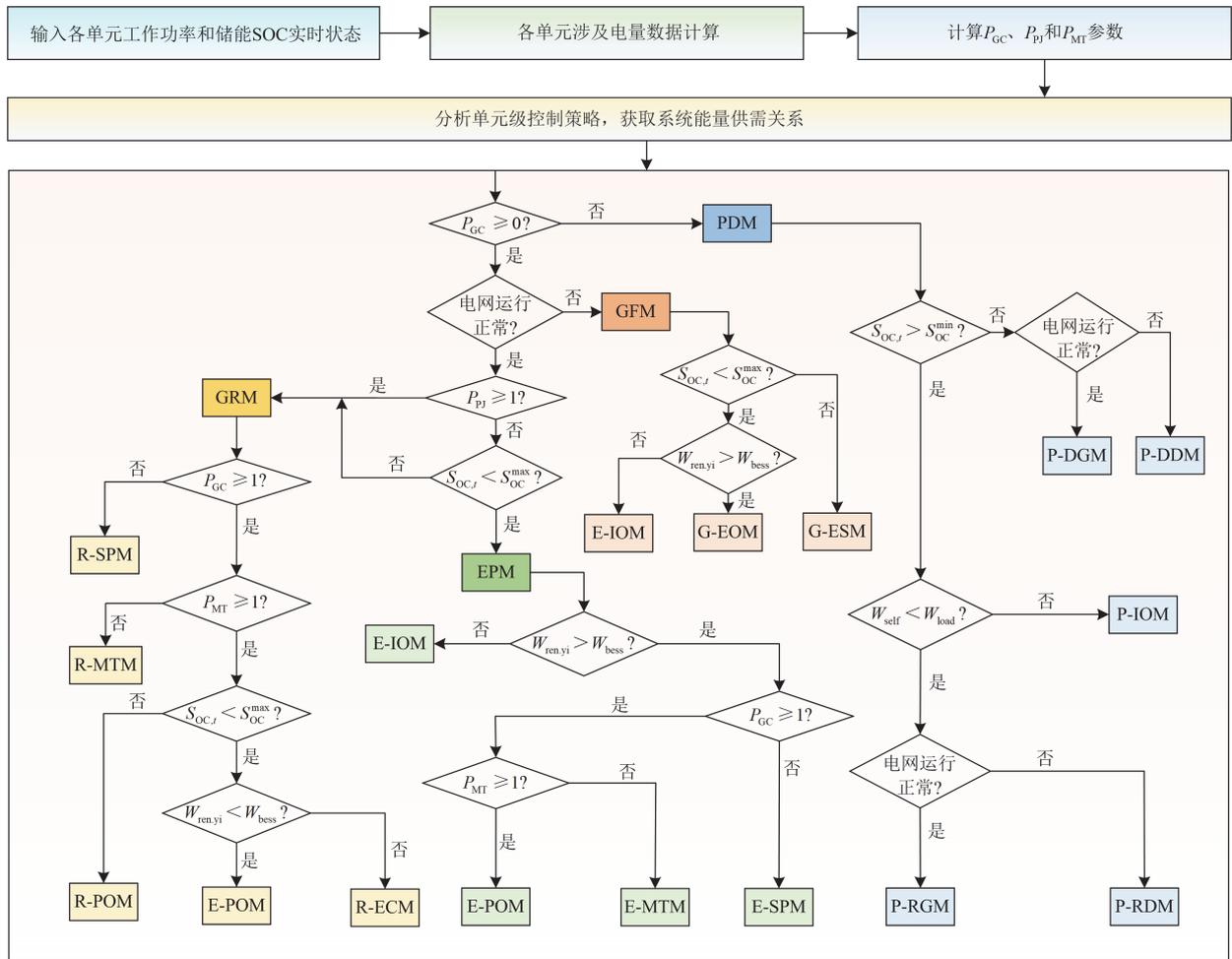


图 3 NGECCS 策略下 PSDDMS 系统的运行模式分析

Fig. 3 Analysis of the operation mode of PSDDMS system under NGECCS strategy

1) 计算 P_{GC} , 如果 $P_{GC} > 0$, 系统达到并网条件。计算 P_{PJ} , 如果 $P_{PJ} < 1$, 系统运行在 EPM 模式; 反之, 系统运行在 GRM 模式。

2) 若系统运行在 GRM 模式, 计算 P_{GC} , 如果

$P_{GC} < 1$, 系统运行在 R-SPM 模式; 反之, 计算 P_{MT} , 如果 $P_{MT} < 1$, 系统运行在 R-MTM 模式; 反之, 判断储能单元是否满足充电条件, 若满足, 系统运行在 R-ECM 或 E-POM 模式; 否则, 系统运行在

R-POM 模式。

3) 若系统运行在 EPM 模式, 判断储能单元是否满足充电条件, 若不满足, 系统切换到 GRM 模式; 若满足, 判断系统剩余绿电量储能单元是否可以完全消纳, 若可以, 系统运行在 E-IOM 模式; 若不可以, 计算 P_{GC} , 如果 $P_{GC} < 1$, 系统运行在 E-SPM 模式; 反之, 计算 P_{MT} , 如果 $P_{MT} < 1$, 系统运行在 E-MTM 模式; 否则, 系统运行在 E-POM 模式。

2.3 PSDDMS 各级单元运行策略原理

为实现 PSDDMS 系统运行模式切换稳定性和可再生能源产-销-储-用协调性, 本文分析了由于运行模式的切换系统内各级单元运行策略的计划切换过程, 如图 4 所示, 具体分析结果如表 3 所示。

1) 在 GRM 中, R-SPM 和 R-MTM 的系统绿电量可以被电网单元全额消纳, 光伏单元一直保持在 MPPT 运行状态, 系统稳压单元是处于恒压逆变状态的电网单元; R-ECM 的储能单元进入下垂控制状态, 电网单元由恒压逆变状态切换为电流反馈控制状态, 系统的稳压也由电网单元切换至储能单元; R-POM 模式下绿电量不能全额消纳, 光伏单元由

MPPT 状态切换至恒压运行状态, 储能单元也由下垂控制状态切换至限流运行状态, 系统的稳压单元也由储能单元切换至光伏单元。其中, 光伏单元由 MPPT 状态切换至恒压运行状态时, 会在一定程度上影响功率输出的稳定性, 因为切换后光伏单元无法动态调整输出功率, 所以会导致功率输出下降。然而, 这种变化通常都在系统可控范围内, 且通过系统内其他单元运行状态的动态调整可进一步降低影响。

2) 在 EPM 中, E-IOM 的绿电量被负荷单元和储能单元全部消纳, 电网单元处于待机状态, 系统稳压单元是处于下垂控制状态的储能单元; E-SPM 和 E-MTM 的绿电量可以被电网单元全额消纳, 光伏单元一直保持在 MPPT 运行状态, 储能单元由下垂控制状态切换至限流运行状态, 系统稳压单元是处于恒压逆变状态的电网单元; E-POM 模式下的绿电量过多不能全额消纳, 光伏单元由 MPPT 状态切换至恒压运行状态, 电网单元由恒压逆变状态切换为电流反馈控制状态, 系统的稳压单元也由电网单元切换至光伏单元。

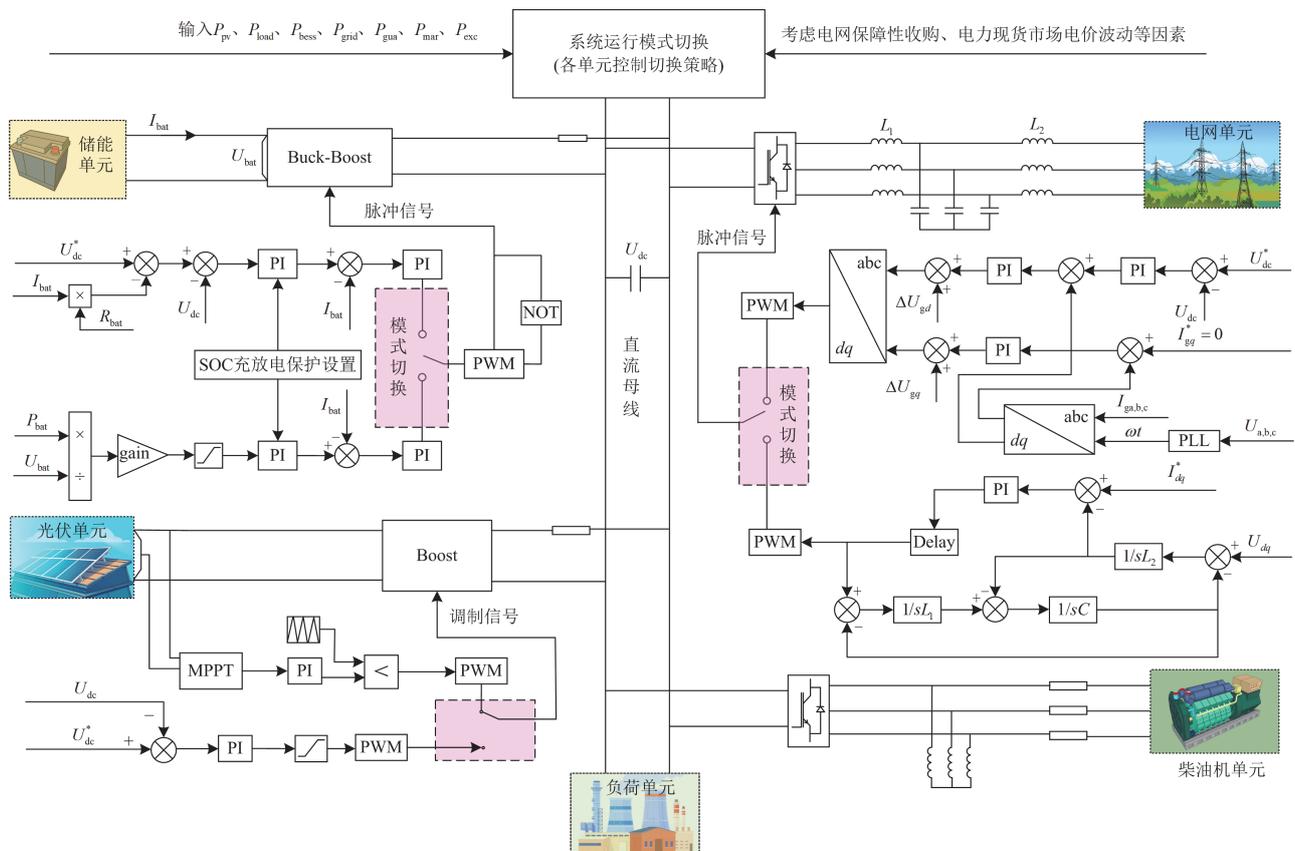


图 4 PSDDMS 系统各级单元运行策略计划切换原理图

Fig. 4 Schematic diagram of switching operation strategy plans for various levels of units in PSDDMS system

表 3 PSDDMS 系统不同运行模式下各级单元运行状态

Table 3 Operation status of units at all levels in different operating modes of PSDDMS system

运行模式	判断参数			稳压单元	PSDDMS 各单元运行状态				
	P_{GC}	P_{pj}	P_{MT}		光伏单元	储能单元	电网单元	柴油机单元	
GRM	R-SPM	>0	>1	<1	电网单元	MPPT	待机状态	恒压逆变	待机状态
	R-MTM	>0	>1	<1	电网单元	MPPT	待机状态	恒压逆变	待机状态
	R-ECM	>0	>1	>1	储能单元	MPPT	下垂控制	电流反馈	待机状态
	R-POM	>0	>1	>1	光伏单元	恒压运行	限流运行	电流反馈	待机状态
EPM	E-IOM	>0	<1	<1	储能单元	MPPT	下垂控制	待机状态	待机状态
	E-SPM	>0	<1	<1	电网单元	MPPT	限流运行	恒压逆变	待机状态
	E-MTM	>0	<1	<1	电网单元	MPPT	限流运行	恒压逆变	待机状态
	E-POM	>0	<1	>1	光伏单元	恒压运行	限流运行	电流反馈	待机状态
GFM	G-EOM	—	—	—	光伏单元	恒压运行	限流运行	故障停机	待机状态
	G-ESM	—	—	—	光伏单元	恒压运行	待机状态	故障停机	待机状态
PDM	P-IOM	<0	—	<1	储能单元	MPPT	下垂控制	待机状态	待机状态
	P-DGM	<0	—	<1	电网单元	MPPT	待机状态	恒压整流	待机状态
	P-DDM	<0	—	<1	柴油机单元	MPPT	待机状态	故障停机	P-V 控制
	P-RGM	<0	—	<1	电网单元	MPPT	限流放电	恒压整流	待机状态
	P-RDM	<0	—	<1	柴油机单元	MPPT	限流放电	故障停机	P-V 控制

3) 在 GFM 中, 电网单元由于故障处于停机状态; G-EOM 模式下的储能单元处于限流运行状态, G-ESM 模式下的储能单元处于待机状态; 为了保证新能源的消纳率, GFM 模式下的系统稳压单元是一直保持在恒压运行状态的光伏单元。

4) 在 PDM 中, 光伏单元一直保持在 MPPT 状态; P-IOM 的绿电量和储能单元存储电量满足系统负荷消耗, 故电网单元和柴油机单元处于待机状态, 系统稳压单元是处于下垂控制状态的储能单元; P-DGM 和 P-DDM 的储能单元处于待机状态, P-RGM 模式和 P-RDM 模式下的储能单元处于限流运行状态; P-DGM 和 P-RGM 的稳压单元是处于恒压整流状态的电网单元; P-DDM 和 P-RDM 的稳压单元是处于 P-V 控制状态的柴油机单元。

3 综合评价体系搭建

本文的综合评价体系包括自供给率 R_{SS} 、自消纳率 R_{SC} 以及运行净收益 R_{ON} 。具体指标分析如下。

1) 自供给率 R_{SS} 是指光伏单元产生并在系统内直接使用的能量与系统内负荷正常运行需要消耗的能量之比, 体现了 PSDDMS 的能源独立性。其计算公式为

$$R_{SS} = \frac{E_{pv,used}}{E_{load,exp}} = \frac{\sum W_{load} + \sum W_{bess} + \sum W_{ass} + \sum W_{tra}}{\sum W_{load}} \quad (4)$$

式中: $E_{pv,used}$ 表示系统自消纳的光伏绿电量; $E_{load,exp}$ 表示系统负荷单元正常运行所需电量。

2) 消纳率 R_{SC} 是指所消纳的光伏单元产电量与光伏单元总发电量之比, 体现了 PSDDMS 在 NECCS 的可再生能源电量消纳水平。其计算公式为

$$R_{SC} = \frac{E_{pv,used}}{E_{pv,total}} = \frac{\sum W_{load} + \sum W_{bess} + \sum W_{ass} + \sum W_{tra}}{\sum W_{pv}} \quad (5)$$

式中: $E_{pv,total}$ 表示系统光伏单元的总发电量。

3) PSDDMS 运行成本主要包括电网购电成本、柴油机燃料购买成本和各单元运行固有成本, 其中各单元运行固有成本包括单元内设备的购买成本和维护成本等; PSDDMS 运行收益主要包括系统绿电量的电网保障收购收益和现货市场交易收益。 R_{ON} 的计算公式为

$$\begin{cases} R_{ON} = C_{ope,gain} - C_{ope,cost} \\ C_{ope,gain} = C_{sec} + C_{mar} \\ C_{ope,cost} = C_{ele} + C_{fuel} + C_{dev} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C_{ope,cost}$ 表示系统运行成本; $C_{ope,gain}$ 表示系统运行收益; C_{sec} 表示系统绿电量进行电网保障性收购时的收益; C_{mar} 表示系统绿电量进行现货市场交易时的收益; C_{ele} 表示系统向电网购电的成本; C_{fuel} 表示系统购买柴油机燃料成本; C_{dev} 表示系统内各单元运行固有成本。

4 仿真算例分析

为验证所提 NECCS 策略在 PSDDMS 系统中应

用的有效性, 本文以北京市某绿色低碳园区光储柴建筑一体化系统改造项目为例, 分析验证 NECCS 策略的合理性。已知该园区总建筑面积约为 9872 m², 由发电功率为 1800 kW 的光伏单元、配置容量为 800 kWh 的储能单元、发电功率为 500 kW 的柴油机以及若干直流负荷组成。本文首先在 Simulink 平台中搭建了该系统的基本拓扑结构, 并通过模拟光伏单元和负荷单元功率变化, 验证 NECCS 策略下系统仿真模型运行的稳定性; 其次通过模拟不同的电网保障性收购电量和非保障性市场化交易电量, 验证 NECCS 策略对提高系统消纳率、自给率和经济性的有效性。

4.1 仿真案例 I

系统不同模式的切换会引起暂态不稳定, 因此本案例模拟光强突变和负荷突变, 对系统切换时的动态特性进行分析, 主要包括各单元功率分配、直流母线电压、电网输出功率和电压电流以及储能 SOC 状态等方面, 以此来验证 NECCS 策略下系统仿真模型运行的稳定性。表 4 总结了系统运行模式及部分仿真参数, 仿真结果如图 5 所示。

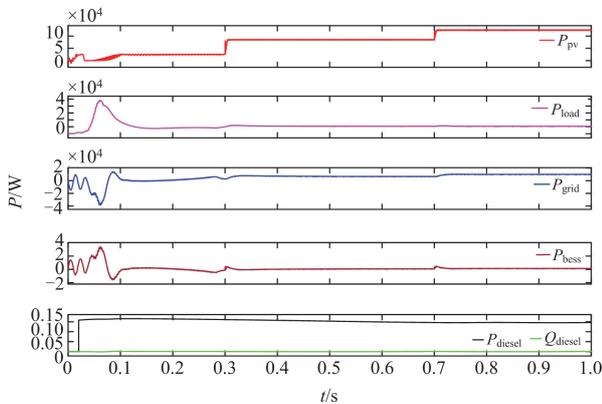
分析表 4 和图 5 可得:

1) 分析光照强度突变仿真情景时, 由图 5(a)可得: 在 0~0.3 s 时间段内, 系统发电量大于耗电量, 剩余电量经电网保障收购后全部进入电力现货市场,

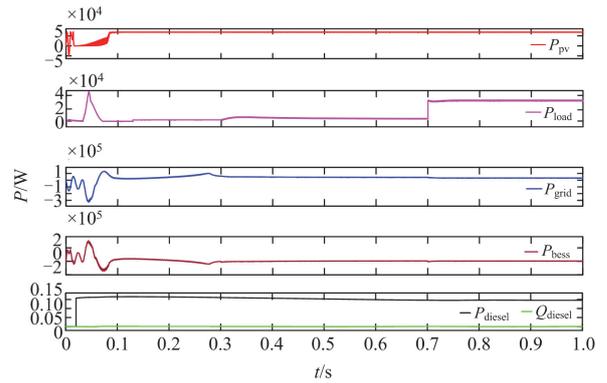
表 4 案例 I 的仿真情景汇总

Table 4 Summary of simulation scenarios for case I

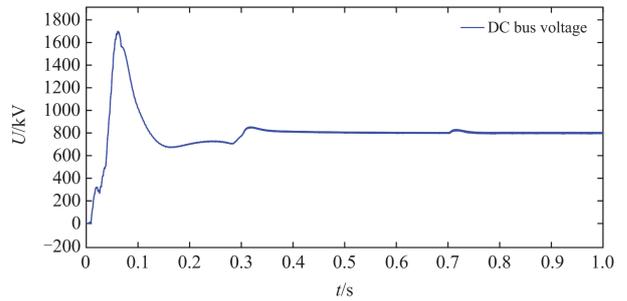
仿真情景	仿真时间/s	仿真光强/(W/m ²)	仿真负荷/ Ω	系统运行模式
光强突变	0~0.3	300	60	R-MTM
	0.3~0.7	1000	60	R-ECM
	0.7~1.0	1500	60	R-POM
负荷突变	0~0.3	800	15	E-MTM
	0.3~0.7	800	30	E-SPM
	0.7~1.0	800	60	P-RGM



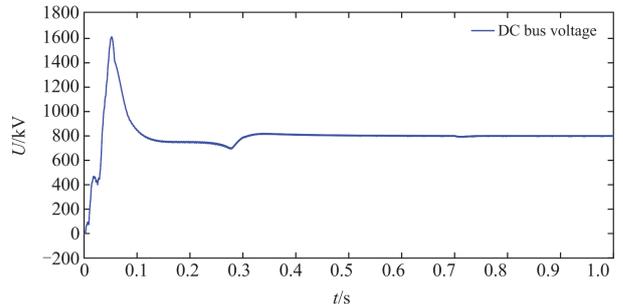
(a) 光强突变时各单元功率分配变化



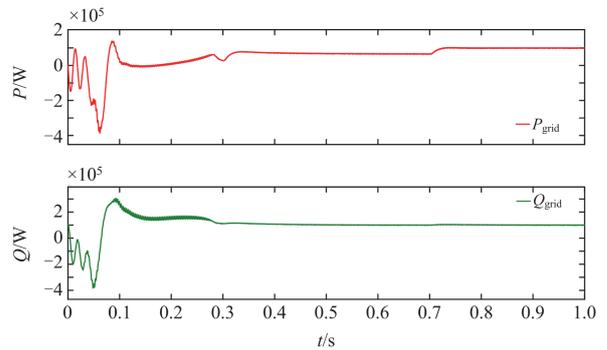
(b) 负荷突变时各单元功率分配变化



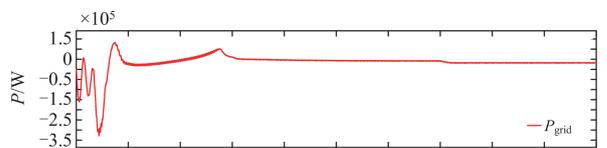
(c) 光强突变时直流母线电压变化

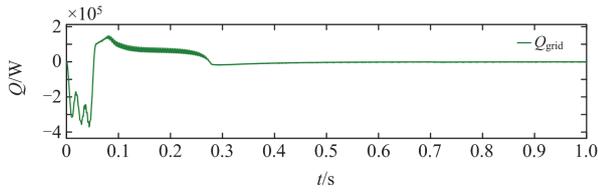


(d) 负荷突变时直流母线电压变化

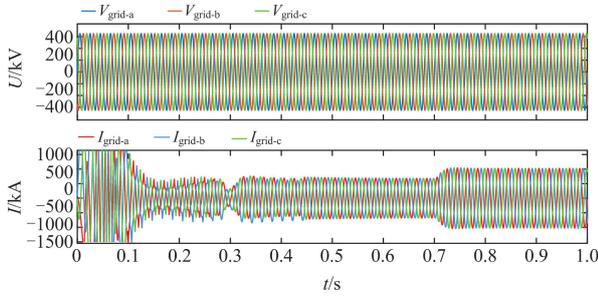


(e) 光强突变时电网单元输出功率变化

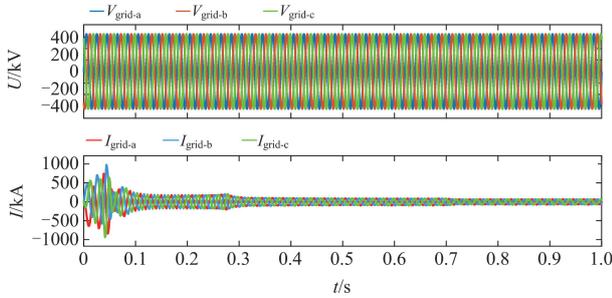




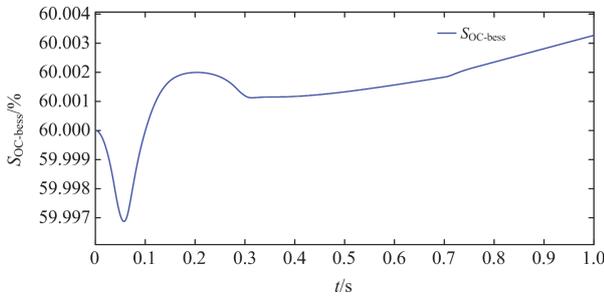
(f) 负荷突变时电网单元输出功率变化



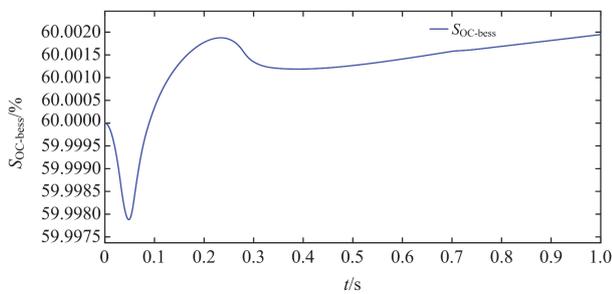
(g) 光强突变时电网单元电压电流变化



(h) 负荷突变时电网单元电压电流变化



(i) 光强突变时储能单元SOC状态变化



(j) 负荷突变时储能单元SOC状态变化

图5 案例I的仿真结果汇总

Fig. 5 Summary of simulation results for Case I

此时系统处于 R-MTM 模式。在 0.3~0.7 s 时间段内, 系统发电量增加, 剩余电量经过电网保障性收购和电力现货交易后, 余下电量进入储能单元, 系统由 R-MTM 模式切换至 R-ECM 模式。在 0.7~1.0 s 时间段内, 系统发电量再次增加, 剩余电量经电网收购、市场交易和储能充电后仍有剩余, 系统由 R-ECM 模式切换至 R-POM 模式。

2) 分析系统负荷突变仿真情景时, 由图 5(b) 可得: 在 0~0.3 s 时间段内, 系统发电量大于耗电量, 剩余电量经储能单元充电和电网保障收购后, 余电量全部进入电力现货市场进行交易, 此时系统处于 E-MTM 模式。在 0.3~0.7 s 时间段内, 系统耗电量增加, 剩余电量经储能单元充电后, 余电量全部进行电网保障性收购, 此时系统由 E-MTM 模式切换至 E-SPM 模式。在 0.7~1.0 s 时间段内, 系统耗电量再次增加, 发电量不满足系统正常运行, 储能单元由限流充电状态切换至限流放电状态, 仍不能满足负荷单元消耗; 电网单元由恒压逆变状态切换至恒压整流状态, 系统恢复稳定运行。此时系统由 E-SPM 模式切换至 P-RGM 模式。

3) 分析系统切换时的动态特性, 可得在几次突变过程中, 系统直流母线电压在短时间内失稳后仍能迅速恢复至参考值附近, 且失稳范围控制在额定电压的 5% 以内, 如图 5(c)~图 5(d) 所示; 电网输出功率和其电压电流的动态变化幅度不超过对应参考值的 3%, 并在短暂失稳后可以快速恢复到新的稳定状态, 如图 5(e)~图 5(h) 所示; 储能单元的 SOC 变化平稳, 未出现异常波动, 如图 5(i)~图 5(j) 所示。

综上所述, 在 NECCS 策略下 PSDDMS 系统在切换过程中表现出良好的动态特性, 这表明系统在动态切换过程中具有较强的稳定性, 在复杂情景下也可以保持可靠性和适应性。

4.2 仿真案例 II

本案例从光照强度、系统负荷大小和电网保障消纳量 3 个方面来分别对比说明 NECCS 策略对提高 PSDDMS 系统 R_{SS} 、 R_{SC} 和 R_{ON} 的有效性。表 5 总结了系统主要仿真参数, 图 6 展现了 PSDDMS 系统的各项评价指标在 CECCS 和 NECCS 策略下的对比结果。

分析表 5 和图 6 可得:

1) 光照强度在 100~300 W/m² 范围内时, NECCS 策略下的 R_{SS} 较于 CECCS 策略提高了 2%~8%; 光照强度在 600~1000 W/m² 范围内时, NECCS 策略下的 R_{SC} 较于 CECCS 策略提高了 4%~23%, R_{ON} 提高了 4%~17%。

表 5 案例 II 的仿真情景汇总
Table 5 Summary of simulation results for Case I

仿真光强	仿真光强/(W/m ²)	100	150	200	...	900	950	1000
变化	仿真负荷/ Ω	50	电网保障收购电量/kWh	3000	可市场化交易电量/kWh	1500		
仿真负荷	仿真负荷/ Ω	10	20	30	...	130	140	150
变化	仿真光强/(W/m ²)	900	电网保障收购电量/kWh	3000	可市场化交易电量/kWh	1500		
电网保障收购电量	电网保障收购电量/kWh	300	600	900	...	4500	4800	5100
变化	仿真光强/(W/m ²)	850	仿真负荷/ Ω	50	可市场化交易电量/kWh	3000		

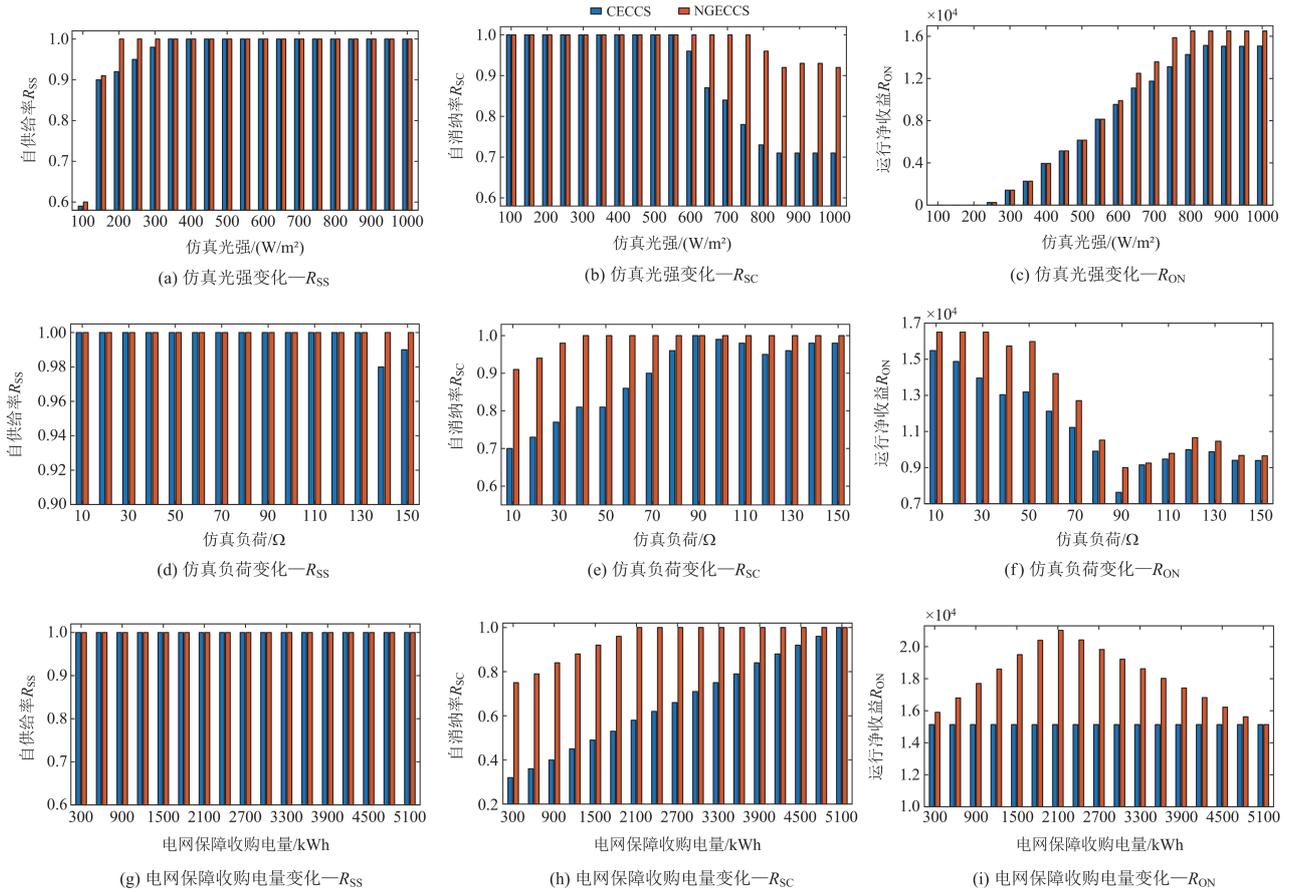


图 6 案例 II 的仿真结果汇总

Fig. 6 Summary of simulation results for Case II

2) 仿真系统负荷在 140~150 Ω 范围内时, NECCS 策略下的 R_{SS} 较于 CECCS 策略提高了 2%; 仿真系统负荷在 10~150 Ω 范围内时, NECCS 策略下的 R_{SC} 较于 CECCS 策略提高了 1%~22%, R_{ON} 提高了 1%~15%。

3) 电网保障收购电量在 300~5100 kWh 范围内时, NECCS 策略下的 R_{SC} 和 R_{ON} 较于 CECCS 策略都有不同程度的提高。其中, R_{SC} 提高 3%~57%, R_{ON} 提高 3%~28%。其中, 当电网保障收购电量为 2100 kWh 时, 系统的 R_{ON} 提高最明显, R_{SC} 达到

100%并一直保持。

综上所述, 经过光照强度、系统负荷大小和电网保障消纳量 3 个方面的对比, 证明了在 NECCS 策略下 PSDMS 系统的 R_{SS} 、 R_{SC} 和 R_{ON} 较于 CECCS 策略都有不同程度的提高。

5 结束语

本文针对可再生能源电量消纳方式由“全额收购+补贴”形式转为“全额保障性收购+市场交易”形式所引发的以“新能源+储能”为主的微电网系统的新能源自供给率、自消纳率以及运行经济性下

降等问题, 以 PSDDMS 系统为研究对象, 提出了 P_{GC} 、 P_{PJ} 、 P_{MT} 等一系列参数, 并将其与传统的能量控制策略结合, 提出了一种 NECCS 策略, 对基于市场化交易状态下的 PSDDMS 系统进行了运行模式动态切换的细化研究以及综合评价指标对比, 得出以下结论。

1) 在 PSDDMS 系统中应用 NECCS 策略后, 系统运行模式切换次数增加, 但是其运行稳定性和可靠性保持不变。

2) 在 PSDDMS 系统中应用 NECCS 策略, 系统可以通过 P_{PJ} 参数判断储能单元运行模式优先级排序, 有效提高了系统可再生能源电量的自给率和新能源的消纳率, 其中前者提高了 2%~8%, 后者提高了 4%~57%。

3) 在 PSDDMS 系统中应用 NECCS 策略, 系统可以通过 P_{GC} 和 P_{MT} 参数判断系统并网运行模式, 实现了运行收益的显著提升, 增幅达 4%~28%。

参考文献

- [1] 张栋, 冯凯辉, 时智勇, 等. 中国新能源并网发展现状与建议[J]. 太阳能, 2024(7): 89-97.
ZHANG Dong, FENG Kaihui, SHI Zhiyong, et al. Current states and recommendations for grid integration of new energy in China[J]. Solar Energy, 2024(7): 89-97.
- [2] 李江, 张永利, 刘强, 等. 分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 90-97.
LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, et al. Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 90-97.
- [3] 孙东磊, 赵龙, 孙凯祺, 等. 新能源接入下配电系统混合储能选址定容优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 423-432.
SUN Donglei, ZHAO Long, SUN Kaiqi, et al. Research on optimization strategy of HESS site and capacity selection in distribution system with renewable energy access[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(1): 423-432.
- [4] 董辉, 楚帅, 葛维春, 等. “源-储-荷”多运行域协调控制提升清洁能源消纳能力策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 119-125.
DONG Hui, CHU Shuai, GE Weichun, et al. Strategy of “source-storage-load” multi-operating domain coordinated control enhancing clean energy consumption capacity[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 119-125.
- [5] 陶珑, 马小勇, 王议锋, 等. 混合储能系统增强型自抗扰协调控制[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 668-677.
TAO Long, MA Xiaoyong, WANG Yifeng, et al. Coordinated control of hybrid energy storage based on enhanced active disturbance rejection control[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(9): 668-677.
- [6] 王凤, 许建中. 基于构网储能型 SVG 的自适应限流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 54-64.
WANG Feng, XU Jianzhong. Adaptive current limiting strategy based on grid-forming and energy-storage SVG[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 54-64.
- [7] 祁向龙, 陈健, 赵浩然, 等. 多时间尺度协同的配电网分层深度强化学习电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 53-64.
QI Xianglong, CHEN Jian, ZHAO Haoran, et al. Multi-time scale cooperative voltage control strategy of a distribution network based on hierarchical deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 53-64.
- [8] LAHMER A, CHANG J W, PARK S, et al. Consensus-based adaptive distributed hierarchical control of battery energy storage systems in a DC microgrid[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97.
- [9] 张文昕, 赵志勇, 于华龙, 等. 适用于直流链式储能的电池簇荷电状态自均衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(2): 159-166.
ZHANG Wenxin, ZHAO Zhiyong, YU Hualong, et al. Self-equalizing control strategy for state of charge of battery cluster in DC cascaded H-bridge converter-battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 159-166.
- [10] 何金陵, 沈力, 奚梦婷, 等. 交直流混联配电网运行模式分析及切换控制[J]. 电力电子技术, 2024, 58(5): 73-76, 79.
HE Jinling, SHEN Li, XI Mengting, et al. Operation mode analysis and switching control of AC/DC hybrid distribution network[J]. Power Electronics, 2024, 58(5): 73-76, 79.
- [11] YANG Yuanhang, YANG Yang, XIE Changjun, et al. A hierarchical energy management strategy for DC microgrid hybrid energy storage systems based on fractional-order sliding mode controller[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 99.
- [12] 李东东, 仇文杰, 周波, 等. 考虑源荷相关性及条件风险价值的综合能源系统参与电能量-备用市场优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 24-34.
LI Dongdong, QIU Wenjie, ZHOU Bo, et al. Optimization of an integrated energy system participating in energy and spinning reserve markets considering source-load correlation and conditional value of risk[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 24-34.

- [13] 姚钢, 王旭, 周荔丹. 基于模糊控制的光储微网实时电价能量管理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2): 1-8.
YAO Gang, WANG Xu, ZHOU Lidan. Real-time electricity price energy management strategy for photovoltaic storage microgrid based on fuzzy control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(2): 1-8.
- [14] 赵书慷, 孙媛媛, 马钊, 等. 新一代低压直流供电系统多工作模式下能量协调控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3483-3492.
ZHAO Shukang, SUN Yuanyuan, MA Zhao, et al. Energy coordination control strategy for low voltage direct current supply and utilization system with multiple operating modes[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3483-3492.
- [15] YUAN Zhi, DING Gao, YANG Xudong. Busbar voltage-based control strategy for energy flexibility in farmhouse coupled to photovoltaic systems[J]. Renewable Energy, 2024, 223.
- [16] LI Jiayi, WEN Ming, ZHOU Zhuomin, et al. Multi-objective optimization method for power supply and demand balance in new power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 161.
- [17] MOVSESSIAN M M, OYEWO A S, AGHAHOSEINI A, et al. Enabling central America's energy transition through renewable energy, energy citizenship, and regional integration[J]. Applied Energy, 2025, 377.
- [18] GUO Siyi, REN Fukang, WEI Ziqing, et al. A multi-objective collaborative planning method for a PV-powered hybrid energy system considering source-load matching[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 316.
- [19] BENAVIDES D, ARÉVALO P, CRIOLLO A, et al. Multi-mode monitoring and energy management for photovoltaic-storage systems[J]. Renewable Energy, 2024, 230.
- [20] MONTANO J, GUZMÁN J P, GARZÓN O D, et al. Techno-economic approach for energy management system: multi-objective optimization algorithms for energy storage in standalone and grid-connected DC microgrids[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 102.
- [21] 马佳彤, 张儒峰, 付麟博, 等. 输配电网多主体参与的碳-电耦合市场双层交易决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 12-26.
MA Jiatong, ZHANG Rufeng, FU Linbo, et al. A bi-level trading decision-making method for the carbon-electricity coupling market with multi-agent participation in transmission and distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 12-26.
- [22] SHU Hongchun, DAI Yue, LIAO Mengli, et al. Probabilistic power flow optimization of source network load storage in AC/DC systems based on SOC characteristics[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 228.
- [23] ZHANG Haibo, WEI Kai, HU Yukang, et al. An energy storage planning method for improving the security of receiving-end system considering the selection of power conversion systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 156.
- [24] 李东东, 仇文杰, 周波, 等. 考虑源荷相关性及其条件风险价值的综合能源系统参与电能-备用市场优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 24-34.
LI Dongdong, QIU Wenjie, ZHOU Bo, et al. Optimization of an integrated energy system participating in energy and spinning reserve markets considering source-load correlation and conditional value of risk[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 24-34.
- [25] DING Yixing, XU Qingshan, HAO Lili, et al. Day-ahead robust dispatch of interconnected multi-microgrids considering two-stage model of hybrid energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 92.
- [26] LIU Haiquan, ZHOU Suyang, GU Wei, et al. Coordinated planning model for multi-regional ammonia industries leveraging hydrogen supply chain and power grid integration: a case study of Shandong[J]. Applied Energy, 2025, 377.
- [27] LI Shengqing, LIU Bowen, LI Xin. A robust and optimal voltage control strategy for low-voltage grids utilizing group coordination of photovoltaic and energy storage systems via consensus algorithm[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 78.
- [28] 李明, 常永康, 毛永涛, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4773-4788.
LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773-4788.

收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-03-26

作者简介:

文雪茹(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统规划与运行; E-mail: 15536006693@163.com

武晓冬(1978—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统规划运行、“新能源+储能”规划运行、风电场运行与控制、电气设备故障诊断分析。E-mail: wuxiaodong@sxu.edu.cn

(编辑 石晋美)