



上海交通大学学报  
Journal of Shanghai Jiaotong University  
ISSN 1006-2467, CN 31-1466/U

## 《上海交通大学学报》网络首发论文

题目: 考虑分布式储能 SOC 均衡的光储微网黑启动协调控制策略  
作者: 周霞, 陈文剑, 戴剑丰, 解相朋  
DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.395  
收稿日期: 2023-08-14  
网络首发日期: 2023-12-18  
引用格式: 周霞, 陈文剑, 戴剑丰, 解相朋. 考虑分布式储能 SOC 均衡的光储微网黑启动协调控制策略[J/OL]. 上海交通大学学报.  
<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.395>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 考虑分布式储能SOC均衡的光储微网黑启动协调 控制策略

周霞<sup>1</sup>, 陈文剑<sup>1</sup>, 戴剑丰<sup>2</sup>, 解相朋<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学 碳中和先进技术研究院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 南京 210023)

**摘 要:** 随着新能源在电网中的占比逐步增加, 配备大容量分布式储能的光伏微网支撑火电厂黑启动成为可能。针对黑启动期间微网有功频繁波动, 分布式储能荷电状态(State of Charge, SOC)越限导致黑启动失败的问题, 提出了一种考虑分布式储能 SOC 均衡的光储微网黑启动协调控制策略。该策略根据分布式储能单元 SOC, 将光伏系统负荷跟踪控制与最大功率跟踪控制相结合, 使光伏出力有效跟踪微网负荷以避免 SOC 越限。在光伏出力与黑启动负荷不平衡时, 分布式储能系统用于平滑系统有功功率差。对储能单元下垂控制进行改进, 确保基于储能 SOC 的有功分配, 实现各储能单元 SOC 均衡。通过基于一致性协议的储能二次控制, 实现黑启动过程中系统有功波动下的频率稳定。仿真结果表明了光储微网黑启动可行性与所提控制策略的有效性。

**关键词:** 光储系统; 孤岛微网黑启动; 负荷跟踪; 分布式储能; SOC 均衡

中图分类号: TM614 文献标志码: A DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.395

## Black-Start Coordinated Control Strategy of Optical Storage Microgrid Considering SOC Balance of Distributed Energy Storage

ZHOU Xia<sup>1</sup>, CHEN Wenjian<sup>1</sup>, DAI Jianfeng<sup>2</sup>, XIE Xiangpeng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of

收稿日期: 2023-08-14 修回日期: 2023-10-27 录用日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61933005)

作者简介: 周霞(1978-), 副教授, 高级工程师, 从事电力通信、电力系统分析与控制研究。

通信作者: 陈文剑, 硕士生; E-mail: 1221056010@njupt.edu.cn.

**Abstract:** With the increasing proportion of new energy in the power grid, it is possible for photovoltaic microgrid equipped with large-capacity distributed energy storage to support the black start of thermal power plants. Aiming at the problem that the active power of the microgrid fluctuates frequently during the black-start period, and the distributed energy storage SOC exceeds the limit, which leads to the failure of the black-start, a coordinated control strategy for the optical storage microgrid black-start considering the SOC balance of the distributed energy storage is proposed. According to the SOC of the distributed energy storage unit, the strategy combines the load tracking control of the photovoltaic system with the maximum power tracking control, so that the photovoltaic output can effectively track the microgrid load to avoid the SOC limit. When the photovoltaic output is unbalanced with the black-start load, the distributed energy storage system is used to smooth the active power difference of the system. The droop control of the traditional energy storage unit is improved to ensure the active power distribution based on the energy storage SOC and realize the SOC balance between each energy storage unit. Through the secondary control of energy storage based on distributed consensus protocol, the frequency stability under the active power fluctuation during the black start process is realized. The simulation results show the feasibility of black start and the effectiveness of the proposed control strategy.

**Keywords:** optical storage system ; black start of island microgrid ; load tracking ; distributed energy storage ; SOC equilibrium

为实现“碳达峰·碳中和”目标，以新能源为主体的新型电力系统成为传统电力系统转变趋势<sup>[1-3]</sup>。其中新能源配备分布式储能的微电网凭借其可控性强、运行方式灵活的特点在新型电力系统中占据重要地位<sup>[4-5]</sup>。随着新能源在微网中所占比例逐步升高，新能源出力的波动性为电力系统的稳定运行带来挑战。微网中大量应用的电力电子装置使得新能源换流器控制方法对孤岛微网的运行性能起重要作用。在停电事故发生之后，对微网黑启动过程进行仿真模拟，探讨以新能源系统为黑启动电源的孤岛微电网的新型构网控制方式与黑启动控制策略，具有重要的现实意义和工程应用价值<sup>[6-8]</sup>。

新能源出力的波动性、随机性对新能源参与黑启动提出了更高的要求。针对新能源参与黑启动，通过大容量储能装置平抑新能源功率波动，建立运行稳定，高可控性的新能源联合系统成为目前研究聚焦点<sup>[9-12]</sup>。光储系统作为黑启动电源时，在光伏出力与黑启动负荷长时间失衡的情况下，考虑到分布式储能的电量约束，可能会出现储能过充过放的情况，导致储能单元脱网，黑启动失败。与此同时，光伏出力波动性与频繁投切的启动负荷相叠加，使得黑启动过程中的协调控制愈加复杂。如何协调光储间的出力以保证充足的负荷供给，直接决定了黑启动的成功与否。现有研究集中于新能源控制器设计，储能系统配置与控制，各分布式电源间协调控制三方面。

在新能源电源控制器设计方面，文献[13]使用柴油发电机作为容量支撑，针对风电场频率支撑能力不足的问题，采取新的基于虚拟惯量的频率协同策略有效提升了黑启动过程中系统频率稳定性。文献[14]提出了一种以直驱风电机组为主电源的孤岛微网黑启动控制策略。通过将输出功率与直流电压相关联，根据各风电机组之间不同的下垂系数进行黑启动负荷的分配，通过系统黑启动负荷变化自动调节系统频率。文献[15]使用小容量柴油发电机支撑海上风电机组进行启动，同时利用风机网侧变流器作为静止无功发生器进行动态补偿以稳定黑启动过程中的电压越限。以上研究聚焦于新能源控制，并没有将新能源与微网中剩余分布式电源的协同控制纳入思考。

在储能系统配置与控制方面，文献[16]通过非线性补偿模块将黑启动期间交流母线的频率、电压暂态波动引入储能下垂控制模块，以实现黑启动过程中新能源功率波动时的紧急控制。文献[17]在黑启动过程中，由配置于风机机侧的小容量储能为风电场启动提供能量。风电机组作为自启动电源，并网后风电机组采用基于无功功率的频率控制，直流系统采用基于有功功率的电压控制，两者共同维持送端交流母线电压及频率稳定。在新能源机侧配备储能减少了所需储能容量，但是增加了建设成本，且需要对各个单元进行改造，缺乏实际应用价值。

在各分布式电源之间的协调控制上，文献[18]对光伏换流器采取负荷跟踪与最大功率跟踪相结合的控制策略以减少储能配置容量，但是缺少了对储能荷电状态的管理，可能会出现储能过充过放的现象，导致黑启动失败。文献[19]基于模型预测控制，对风光储系统参与黑启动提出了一种协调优化策略以防止储能参与黑启动过程中荷电状态越限。文献中更多考虑了整体储能系统参与黑启动的优化策略，缺少了对各个分布式储能单元功率电量约束与各储能间 SOC 均衡设计。

基于上述讨论，本文聚焦于光储微网黑启动过程中储能 SOC 失衡与光储协同问题，提出了一种考虑分布式储能 SOC 均衡的光储微网黑启动协调控制策略。首先针对黑启动过程中新能源功率与黑启动负荷

变化频繁的特点，提出了光储系统黑启动协同控制策略。其次根据储能 SOC 是否越限对光伏 DC/DC 换流器进行设计，将光伏工作模式分为 MPPT 模式与负荷跟踪模式。同时光伏逆变器采取基于电压-无功控制方式的动态无功以实现对微网无功支撑。再次，基于分布式储能 SOC 设计储能单元变下垂控制器以实现分布式储能 SOC 均衡，基于多智能体一致性设计二次控制器以平抑黑启动过程中频率波动。最后，仿真结果证明了所提控制策略有效性。

## 1 光储联合黑启动过程分析

### 1.1 微网黑启动负荷分析

光储微网黑启动拓扑结构如图 1 所示。光伏系统经过工作模式控制器、DC/AC 换流器、升压变压器、并网开关连接到交流母线上；分布式储能系统通过 DC/AC 换流装置、升压变压器与交流母线相连，储能单元通过分布式稀疏通信网络进行连接，允许储能单元与其邻居进行双向通讯；系统负荷通过降压变压器、并网开关与交流母线相连。光伏系统与分布式储能系统共同组成新能源微电网，经过输电线路为外部电网供电。火电机组及其辅机通过升压变与并网开关与交流母线相连接，在黑启动情况下闭合开关。

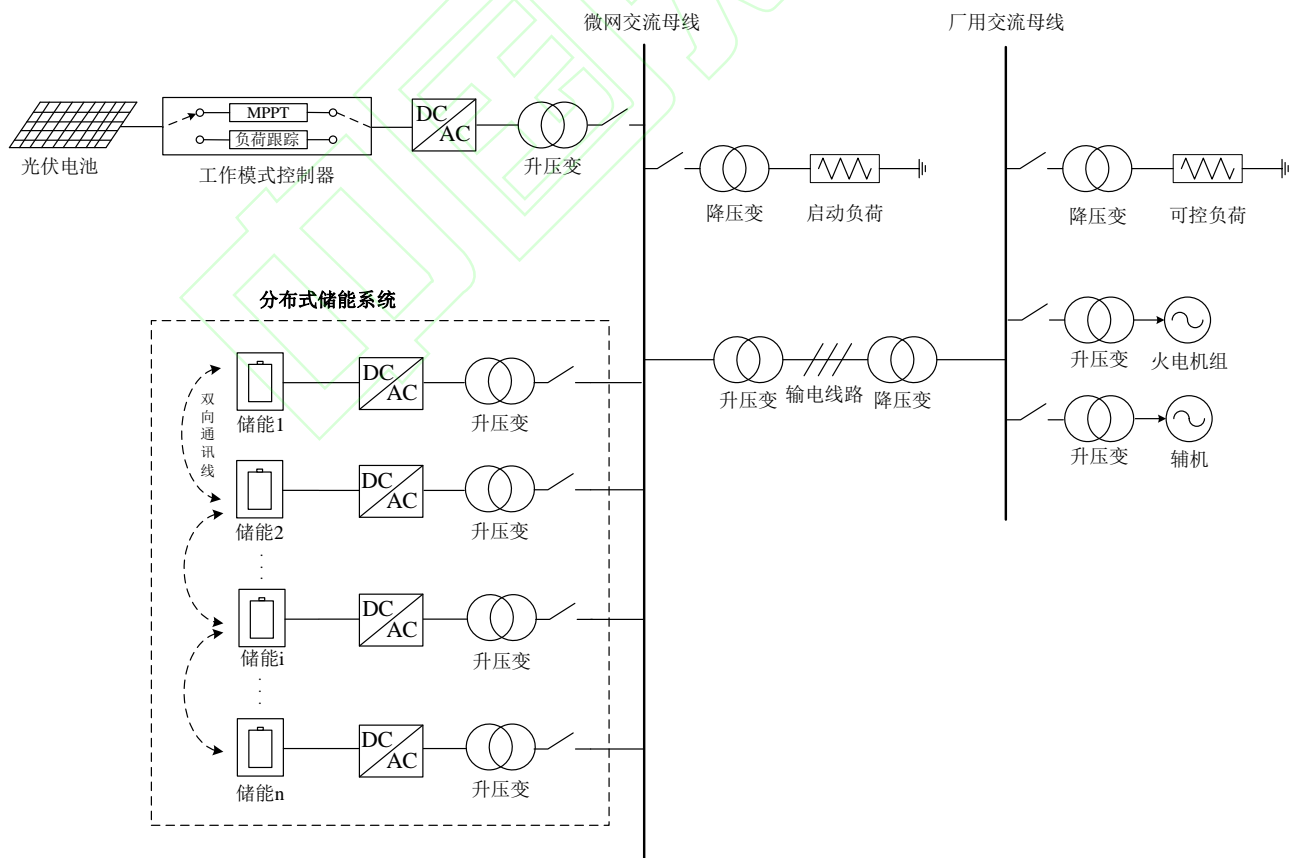


图 1 光储微网黑启动拓扑结构

Fig.1 Black start topology of photovoltaic energy storage microgrid

黑启动是指当电力系统因故障停运后，通过自身电网中具备自启动能力的电源，带动电网中剩余不具备自启动能力电源，逐步恢复电网供电，达成整个电网恢复的目标<sup>[20-22]</sup>。系统各阶段启动负荷如下：

1) 分布式储能自启动阶段，分布式储能系统从零升压自启动，为微网变压器与交流母线充电，同时向光伏电站提供启动功率，使其能够黑启动成功并入电网。此阶段系统存在有功约束：

$$\sum_{i=1}^n P_{Bati \max} > P_e + P_{Lj} + P_{PVload} \quad (1)$$

式中：  $P_{Bati \max}$  为第  $i$  个分布式储能系统最大输出有功功率；  $n$  为分布式储能单元个数；  $P_e$  为微网变压器有功损耗；  $P_{Lj}$  为微网输电线路有功损耗；  $P_{PVload}$  为光伏电站启动负载

2) 光伏电站启动并网阶段。在系统频率电压逐渐稳定的情况下，非自启动电源光伏电站并网，为确保系统不会因光伏并网冲击导致启动失败，存在功率约束：

$$\sum_{i=1}^n P_{Bati \max} > P_e + P_{Lj} + P_{sk} + P_{PVload} \quad (2)$$

式中：  $P_{sk}$  为光伏电站并网最大冲击功率。

3) 受端辅机恢复阶段。辅机恢复过程主要是利用已启动的电源，快速的恢复辅机启动负荷，并在恢复过程中维持系统交流母线电压、频率稳定。此阶段存在各类换流器与泵类负载接入，为确保系统不会出现二次停电故障，此时微网存在功率约束：

$$\sum_{k=1}^{N_{DG}} P_{DG_k \max} - \sum_{l=1}^{N_{load}} P_{load_l} - P_e - P_{Lj} > P_M \quad (3)$$

式中：  $P_{DG_k \max}$  为微网中第  $k$  个已恢复分布式电源最大有功出力；  $N_{DG}$  为微网中已恢复分布式电源单元个数；

$P_{load_l}$  为微网中第  $l$  个黑启动负荷；  $N_{load}$  为微网中已恢复黑启动负荷个数；  $P_M$  为恢复过程有功裕量。

## 1.2 黑启动过程协同控制困难点

黑启动过程中系统负荷持续变化，不同新能源电源间的工作特性与出力约束使得光储微网系统间的协同控制存在如下问题<sup>[23-24]</sup>：

1) 黑启动过程中负荷频繁变化，光伏出力存在波动。微网中新能源出力波动性与频繁变化的启动负荷对黑启动电源提出了更高要求。微网黑启动所选微源应具备有电压源特性，作为具备自启动能力电源，所选微源采取下垂作为构网控制，能够给电网提供稳定的电压频率参考，同时也应当具备二次调频、调压能力，保证孤岛微网在黑启动全过程中的电压和频率稳定。

2) 多储能并联运行存在稳定性问题，存在 SOC 约束。具备自启动能力的黑启动电源由多个分布式储能单元并联组成，采取下垂控制进行构网控制，在并列运行的过程中，微网有功功率频繁波动使得系统出



现功率震荡，储能单元间环流、负荷分配不均等问题。同时各分布式储能存在着不同初始 SOC，启动过程中部分储能单元受自身 SOC 约束影响脱网导致系统功率波动。

3) 新能源电源、厂用辅机并网冲击。系统中新能源电站与厂用辅机负荷存在各式各样的变压器与泵类设备，在上述两类电力器件并网后对电网有功无功平衡造成较大冲击。其产生的励磁电流、启动电流对电网造成较大冲击。系统有功的剧烈变化使得母线电压、频率可能突破临界值从而导致系统黑启动失败。

## 2 光储系统黑启动协调控制策略

### 2.1 基于分布式储能 SOC 的光储协同控制

光储系统黑启动期间，光伏输出功率的随机性、波动性导致了黑启动的不确定性。在黑启动过程中，批次增加的大量启动负载与光伏出力的波动性相叠加，容易导致黑启动失败。

黑启动过程中，微网有功功率平衡表达式为：

$$\sum_{i=1}^n P_{Bati} + \sum_{j=1}^m P_{PVj} = P_e + P_{Lj} + \sum_{l=1}^{N_{load}} P_{load_l} \quad (4)$$

式中：n 为分布式储能单元个数； $P_{Bati}$  为第 i 个分布式储能单元输出有功功率；m 为光伏电站中光伏机组数量； $P_{PVj}$  为第 j 个光伏机组输出有功功率。

储能系统作为自启动能力电源，负责给交流母线充电，带动不具备自启动能力的光伏电站启动。在启动过程中光伏因为光照强度变化出力出现波动时，储能系统及时平衡系统有功功率差。黑启动过程中负荷变化频繁，使得黑启动过程中期间储能的与光伏间的协调控制更加复杂，分布式储能凭借自身响应迅速的特点为系统负荷变化提供动态支撑，随后根据自身二次控制环节改善孤岛电网一次频率响应特性。黑启动过程中储能可能会出现过充过放、输出功率越限从而导致黑启动失败，如何协调黑启动期间光伏系统与分布式储能系统有功输出，使储能系统 SOC 维持在合理水平成为黑启动过程中关键<sup>[9]</sup>。针对这一问题，提出光储系统黑启动协同控制策略，具体策略如图 2 所示。

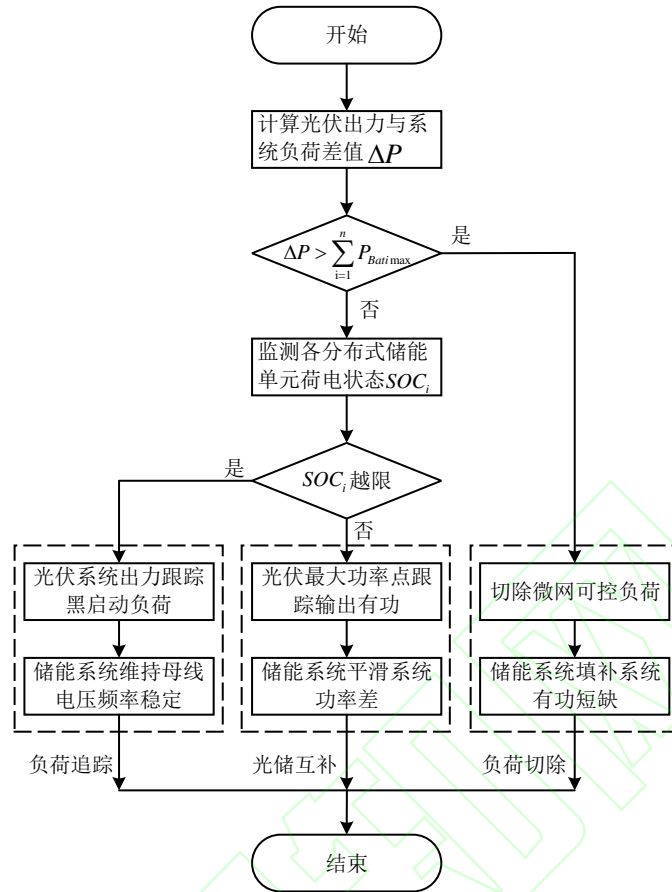


图 2 基于储能 SOC 的光储协同控制流程图

Fig.2 Flow chart of optical storage cooperative control based on energy storage SOC

储能单元 SOC 不仅反映了目前储能单元剩余电量，同时也指示出当前孤岛微网内光伏电站与黑启动负荷间的功率差变化。作为孤岛微网的构网型电源，储能单元在出现 SOC 越限时将无法正常工作。为避免储能投切导致系统波动，在黑启动期间应充分协调控制光伏、储能、负荷三者防止储能单元陷入异常。

根据出于对可再生能源的充分利用，光伏电站正常工作时处于 MPPT 模式。在系统分布式储能单元 SOC 越限时，光伏电站切换工作模式，采取负荷跟踪模式，输出功率跟踪微网有功负荷，维护储能 SOC 稳定在安全范围内。在光伏电站输出功率低于要求启动功率最低值，导致系统功率缺额过大时，储能由于自身换流器功率限制无法弥补此时微网功率差距时，按照负荷等级优先切除部分可控负荷，以保证光储微网黑启动成功进行。切除微网可控负荷原则如下：根据微网负荷切除后对系统稳定性与经济性影响对微网可控负荷进行分级，在启动切除可控负荷装置时，按照先次要后重要的原则依次切除可控负荷，直至系统达到功率供需平衡。低频切负荷不应导致微网其他设备过载或联络线超出稳定极限，负荷切除后应保证微网频率恢复到 49.8Hz 以上，不得超出 50.2Hz。

所提控制策略将储能系统运作与光伏系统出力紧密结合，在所提协同控制策略的作用下，有功功率方



面分布式储能系统用于补偿光伏出力与黑启动负荷有功功率差以保持系统频稳定，无功方面分布式储能系统凭借其快速响应速度为整体系统提供暂态无功支撑。为避免黑启动期间分布式储能 SOC 越限，提出基于分布式储能 SOC 的变有功下垂控制策略以达成黑启动期间储能 SOC 一致性，所提策略避免了储能单元过充或过放，延长了储能单元工作寿命。最后根据多智能体动态一致性设计了分布式二次控制器以保持分布式储能单元黑启动期间输出频率的一致性与稳定性。

## 2.2 基于分布式储能 SOC 的光伏黑启动模式切换

光伏单元控制模型如图 3 所示，光伏系统控制器分为两部分：DC/DC 控制模块、DC/AC 控制模块。

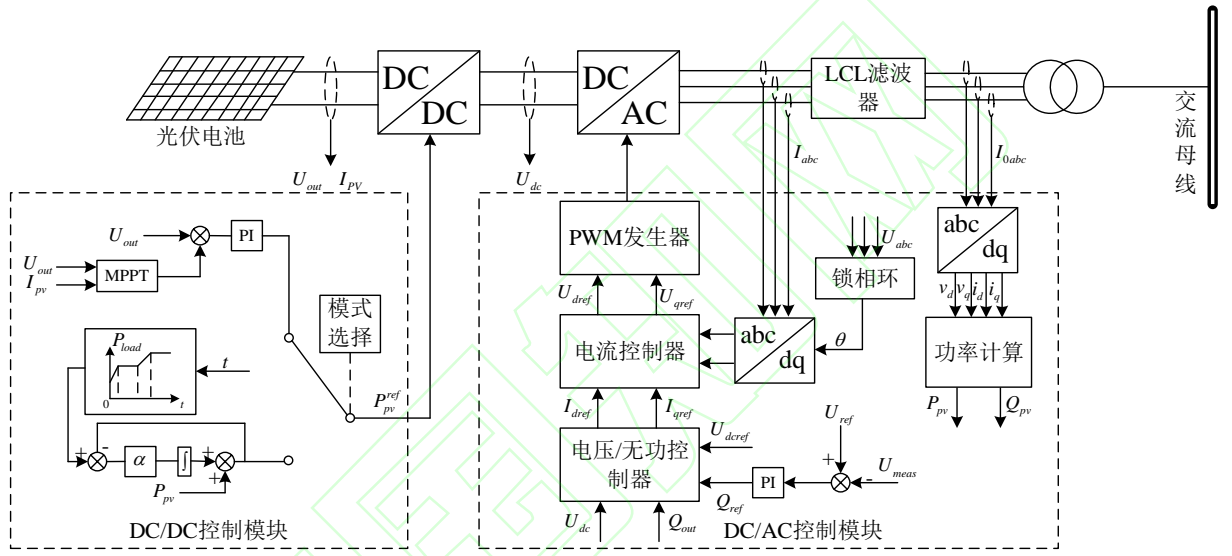


图 3 光伏单元控制结构图

Fig. 3 Control structure diagram of photovoltaic unit

根据分布式储能 SOC 是否越限，将光伏工作模式分为两种：负荷跟踪模式、MPPT 模式。在 MPPT 模式下，光伏电站采集光伏阵列的输出电压  $U_{out}$  与输出电流  $I_{pv}$  作为控制输入量，通过基于扰动观察法实现的 MPPT 算法实现最大功率点跟踪，最大程度输出有功功率。在负荷跟踪模式下，光伏系统输出功率追踪黑启动负荷功率。

在 DC/DC 控制模块中，光伏系统采取负荷跟踪模式时光伏系统输出为：

$$P_{pvref} = P_{pv} + \alpha \int_0^t [P_{load}(\tau) - P_{pvref}(\tau)] d\tau \quad (5)$$

式中： $P_{pvref}$  为光伏系统输出有功功率指令值； $P_{pv}$  为光伏系统输出实时有功； $\alpha$  为增益系数； $P_{load}(\tau)$  为  $\tau$  时刻微网黑启动负荷； $P_{pvref}(\tau)$  为  $\tau$  时刻光伏系统输出有功指令值。

在 DC/AC 控制模块中，采集线路数据经过功率计算获得光伏系统有功测量量  $P_{pv}$ 、无功测量量  $Q_{pv}$ 。

将 DC/DC 模块输出电压  $U_{dc}$  与光伏系统无功测量量  $Q_{pv}$  作为外环电压/无功控制器输入量, 与其参考值  $U_{dcref}$ 、 $Q_{pvref}$  进行比较, 求得内环电流控制器输入。其中光伏换流器采取基于电压-无功控制方式的动态无功调节。

$$Q_{ref} = (K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s})(U_{ref} - U_{meas}) \quad (6)$$

式中:  $Q_{ref}$  为无功功率指令;  $K_{pq}$ 、 $K_{iq}$  为 PI 控制器参数;  $U_{ref}$  为交流母线电压参考值;  $U_{meas}$  为交流母线电压测量值。

通过引入交流母线电压偏差, 通过 PI 控制器控制换流器输出无功, 抑制光储微网黑启动过程中负荷并网引起的系统电压波动。在分布式储能系统零起升压后稳定运行的情况下, 单独启动部分光伏单元网侧换流器对整体系统提供无功支撑, 光伏换流器以交流母线电压稳定为控制目标, 抑制黑启动过程中内负荷投切、光伏电站并网、厂用辅机启动等操作产生的无功电压波动, 以满足光储微网孤岛黑启动过程电压波动在  $\pm 10\%$  内的要求, 维持系统无功平衡。

$$\begin{cases} i_{dref} = (K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s})(U_{dcref} - U_{dcfilt}) \\ i_{qref} = (K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s})(Q_{pvref} - Q_{pvfilt}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  为外环电压、无功控制器输出;  $K_{pu}$ 、 $K_{iu}$ 、 $K_{pq}$ 、 $K_{iq}$  为 PI 控制器参数;  $U_{dcref}$ 、 $Q_{pvref}$  分别为光伏 DC/DC 模块输出电压与光伏无功输出参考值;  $U_{dcfilt}$ 、 $Q_{pvfilt}$  分别为上述两者滤波后测量值。

将其与 DC/AC 换流器侧电流经过 dq 变换后分量进行比对, 输出控制信号:

$$\begin{cases} U_{dref} = (K_{pd} + \frac{K_{id}}{s})(i_{dref} - i_{Ld}) - \omega L i_q + u_d \\ U_{qref} = (K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s})(i_{qref} - i_{Lq}) + \omega L i_d + u_q \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_{dref}$ 、 $U_{qref}$  分别为电流内环控制器输出;  $K_{pd}$ 、 $K_{id}$ 、 $K_{pq}$ 、 $K_{iq}$  为 PI 控制器参数;  $i_{Ld}$ 、 $i_{Lq}$  为换流器输出电流 dq 分量;  $\omega$  为角速度;  $L$  为滤波器电感值;  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_{Ld}$ 、 $i_{Lq}$  为网测电压电流 dq 分量。

电流内环控制器输出信号经 PWM 发生器调制后得到六相换流桥桥臂控制信号, 达成控制目的。

### 2.3 考虑分布式储能黑启动 SOC 均衡的有功下垂调频控制策略

分布式储能单元控制模型由两部分组成。一部分为基于储能 SOC 的有功下垂控制; 另一部分为基于多智能体一致性的二次调频控制。通过功率计算单元、下垂控制单元和电压电流双闭环控制单元实现黑启动期间各分布式储能单元间有功、无功负荷合理分配与各储能单元间 SOC 均衡。根据二次控制单元, 以修

正下垂控制引起的交流母线频率偏差。储能单元整体控制结构图如图 4 所示。

其中，储能单元检测本地线电压和相电流，经功率计算单元和低通滤波器得到电池有功功率  $P_0$ 、无功功率  $Q_0$ 。根据储能单元荷电状态信息，光伏系统预测功率  $\hat{P}_{pv}$ 、黑启动计划负荷  $\hat{P}_{load}$  得到有功下垂系数  $m_{pi}$ ，作为下垂控制器输入量。下垂控制器根据不同的有功下垂系数，得到最终参考频率  $\omega_{ref}$ ，实现有功负荷在储能单元间的分配。

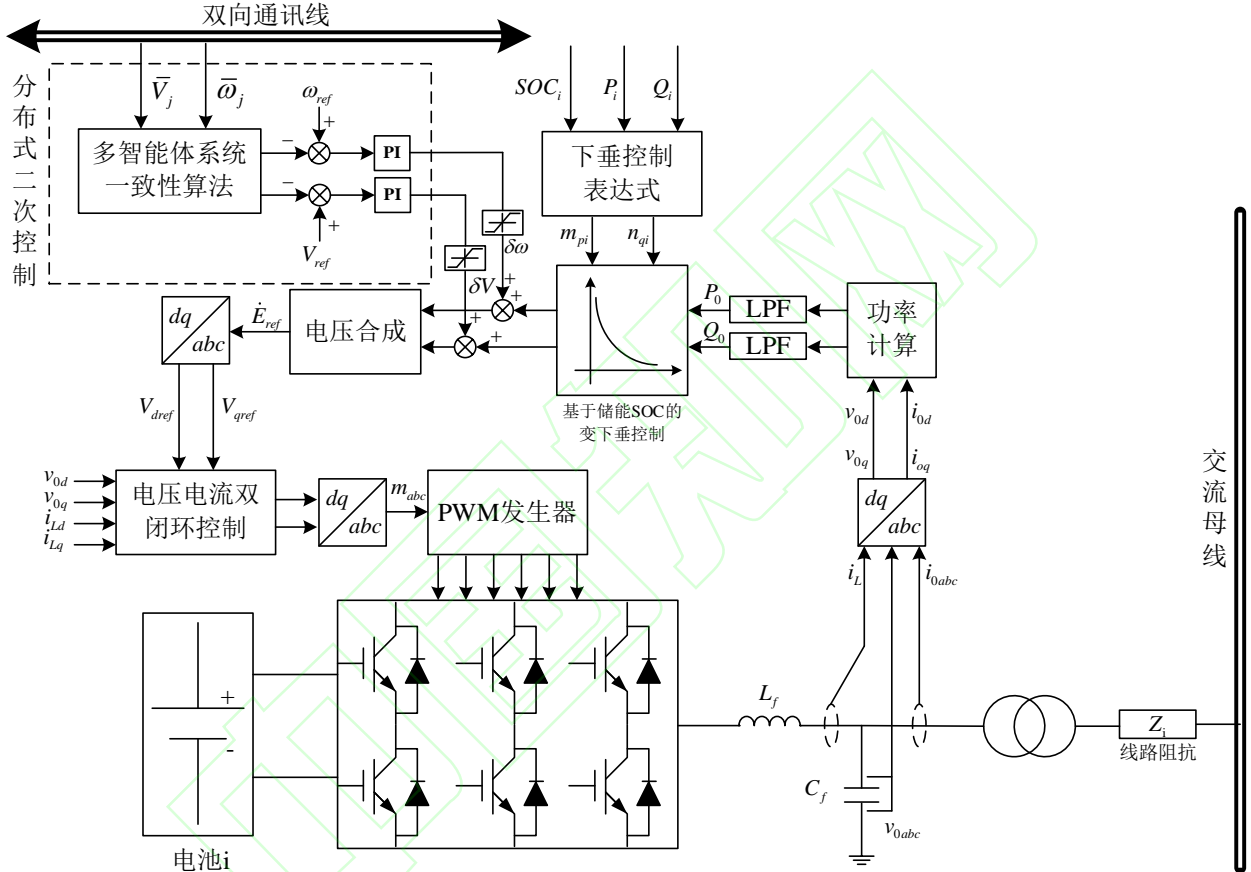


图 4 分布式储能单元控制结构图

Fig. 4 Control of distributed energy storage unit

### 2.3.1 基于分布式储能 SOC 的有功变下垂控制策略

在输出端口阻抗成感性时，第  $i$  个分布式储能单元常规下垂控制表达式为：

$$\begin{aligned}\omega_i &= \omega_{ref} - m_{pi} P_i \\ V_i &= V_{ref} - n_{qi} Q_i\end{aligned}\quad (9)$$

式中： $\omega_i$ 、 $V_i$  为实际输出频率与电压； $\omega_{ref}$ 、 $V_{ref}$  分别为频率、电压给定值； $m_{pi}$ 、 $n_{qi}$  分别为有功无功下垂系数； $P_i$ 、 $Q_i$  为经低通滤波后实际输出有功功率、无功功率。

于是由下垂控制特性可以得出分布式储能单元输出有功功率为：

$$P_i = P_{BESS} \frac{1/m_{pi}}{\sum_{j=1}^n 1/m_{pj}} \quad (10)$$

其中： $P_i$  为第  $i$  个储能单元输出有功功率； $P_{BESS}$  为分布式储能系统整体输出有功功率； $m_{pj}$  为第  $j$  个分布式储能单元下垂系数。

电池 SOC 的估算采用库伦计数法进行，有计算公式：

$$SOC_i = SOC_{i\_ini} - \frac{1}{C_i} \int i_{bati} dt \quad (11)$$

其中： $SOC_i$  为第  $i$  个储能单元荷电状态； $SOC_{i\_ini}$  为第  $i$  个储能单元初始电量； $C_i$  为电池容量； $i_{bati}$  为第  $i$  个储能单元输出电流。

定义储能单元 SOC 变化率  $\delta$ ，将变化率表示为：

$$\delta = \frac{-1/m_{pi}}{C_i V_i \sum_{j=1}^n 1/m_{pj}} P_{BESS} \quad (12)$$

为了使分布式储能单元的 SOC 随时间逐渐减少的同时趋于一致，采用幂指数函数构建不同储能单元间变化率比例，将不同储能单元间 SOC 变化率设计为：

$$\frac{\delta_i}{\delta_j} = \frac{1/m_{pi}}{1/m_{pj}} = \frac{SOC_i^n e^{SOC_i^n}}{SOC_j^n e^{SOC_j^n}} \quad (13)$$

在系统黑启动过程中光伏单元有功输出  $\Delta P < 0$  时，储能处于放电状态，各储能单元放电大小与本身 SOC 处于正相关，在储能处于充电状态时，各储能单元与自身 SOC 处于负相关。于是根据系统光伏环节与有功负载有功功率差，使用符号函数对下垂系数进行设计，有

$$m_{pi} = \frac{m_0}{(SOC_i^n e^{SOC_i^n})^\lambda} \quad (14)$$

在启动过程中，当光伏有功出力从小于微网负荷转变为大于微网负荷，此时储能系统为维持微网有功平衡，从输出有功功率弥补光伏输出有功与负荷差值转为吸收光伏过剩有功功率，维持微网频率稳定。此时分布式储能单元根据自身有功功率变化改变下垂控制器中充放电切换参数  $\lambda$ ，反之亦然。其表达式为：

$$\lambda = \text{sgn}(P_i) \quad (15)$$

式中： $\text{sgn}$  为符号函数，当输入  $P_i$  大于 0 时， $\lambda = 1$ ；当输出  $P_i$  小于 0 时， $\lambda = -1$ ；当输入为 0 时， $\lambda = 0$ 。

即在输入第  $i$  个分布式储能单元有功功率为负值，储能单元吸收功率的情况下，分布式储能下垂系数

与自身 SOC 成正比，储能单元吸收有功与 SOC 成反比，即储能单元 SOC 越低，吸收有功功率越大。在输入第  $i$  个分布式储能单元为正值，储能单元输出有功功率的情况下，分布式储能下垂系数与自身 SOC 成反比，储能单元放出有功与 SOC 成正比，即储能单元 SOC 越低，输出有功功率越低。

随着黑启动进行储能单元荷电状态逐渐下降，在各分布式储能 SOC 较低且 SOC 差值较小的情况下，此时较大的  $n$  值影响系统稳定。当  $n$  值越大时，随着储能单元在黑启动过程中 SOC 降低，此时下垂系数更容易到达约束范围内最大值，降低了 SOC 均衡能力，同时较大的下垂系数使得频率偏移严重，在系统投切负荷时容易导致系统失去平衡<sup>[25]</sup>。

因此采取放电储能单元本地信息对下垂系数均衡修正因数  $n$  进行设计：

$$n = n_0 + c \arcsin(SOC^v) \quad (16)$$

式中： $n_0$  为初始下垂系数均衡修正因数； $c$  为修正因数线性变化系数； $v$  为修正因数指数性变化系数。

对下垂系数表达式（9）进行修改，有基于储能 SOC 的有功变下垂控制公式为：

$$\omega_i = \omega_{ref} - \frac{m_0}{(SOC_i^n e^{SOC_i^n})^\lambda} P_i \quad (17)$$

式中： $m_0$  为初始有功下垂系数； $n$  为下垂系数均衡修正因数。

### 2.3.2 基于多智能体一致性的分布式储能黑启动二次调频控制策略

为了调节下垂控制引起的频率偏差，同时抑制黑启动过程中非线性负荷变化导致的频率波动，通过二次控制器输出频率补偿量  $\delta\omega$  补偿到下垂控制器输出的参考信号上，得到相应的频率修正值以合成虚拟电压。于是有加入二次频率控制的有功变下垂控制为：

$$\omega_i = \omega_{ref} - \frac{m_0}{(SOC_i^n e^{SOC_i^n})^\lambda} P_i + \delta\omega \quad (18)$$

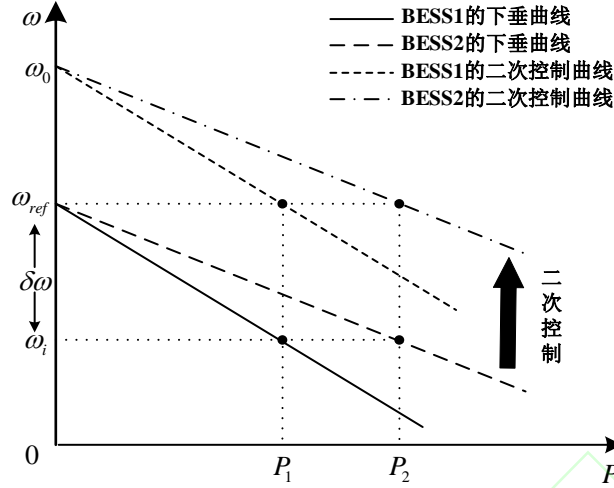


图 5 储能单元输出频率二次控制过程

Fig.5 Secondary control process of output frequency of energy storage unit

为使得经过二次控制后各分布式储能的下垂特性曲线仍然交于同一点，同时避免二次控制器采取主从控制带来的系统冗余性，采用基于多智能体的二次控制策略以获取各分布式储能单元平均频率估计。在光储微网黑启动多智能体模型中，将分布式储能单元作为节点构成分布式稀疏通信网络，各储能单元间通讯网络由联通无向图表示  $G=(V,E,A)$ 。其中  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为系统中节点集合； $E$  为图中边的集合； $A=[a_{ij}]_{n \times n}$  为节点间权重系数矩阵。当  $BESS_i$  与  $BESS_j$  之间存在通讯线路时， $a_{ij} > 0$ 。令  $N_i$  为  $BESS_i$  的邻居集，当  $a_{ij} > 0$  时，有  $j \in N_i$ 。分布式储能系统间通信网络模型如图 6 所示。

每个分布式储能单元都通过式 (19) 中的基于多智能体一致性算法的平均频率算法<sup>[26]</sup>，根据本地信息与邻近单元信息来更新平均频率  $\bar{\omega}_i$  的本地估计。

$$\bar{\omega}_i(t) = \omega_i(t) + \frac{\alpha_{\bar{\omega}}}{|N_i|} \int_0^t \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} (\bar{\omega}_j(\tau) - \bar{\omega}_i(\tau)) d\tau \quad (19)$$

式中： $\bar{\omega}_i(t)$  为  $t$  时刻平均估计频率； $\omega_i(t)$  为  $t$  时刻本地下垂控制模块输出频率； $\alpha_{\bar{\omega}}$  为平均频率一致性增益； $|N_i|$  为  $BESS_i$  邻近储能单元数目； $\alpha_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间通讯权重； $\bar{\omega}_j(t)$  为  $BESS_i$  邻近储能单元  $BESS_j$  的  $t$  时刻平均估计频率。

根据一致性算法，存在

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{\omega}_i - \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \bar{\omega}_j) = 0, i \in V \quad (20)$$

从而使得各分布式储能单元输出的本地频率估计值处处相同。



二次调频控制器如图 7 所示。分布式储能单元在每个采样周期读取本地下垂控制器输出的本地频率  $\omega_i$ ，同时根据邻居单元频率平均估计值  $\bar{\omega}_j$ ，通过多智能体一致性算法求得本地平均频率估计值  $\bar{\omega}_i$ ，最后将平均值送入 PI 控制器中以产生频率修正量  $\delta\omega$ ，用于消除下垂控制导致的电压、频率偏移，保证黑启动全过程的稳定运行。频率二次控制设计为：

$$\delta\omega = k_{p\omega}(\omega_{ref} - \bar{\omega}_i) + k_{i\omega} \int (\omega_{ref} - \bar{\omega}_i) dt \quad (21)$$

式中： $\delta\omega$  分别为二次控制器输出量； $k_{p\omega}$ 、 $k_{i\omega}$  为 PI 控制器控制参数； $\omega_{ref}$  为微网频率参考值； $\bar{\omega}_i$  为本地频率平均估计值。

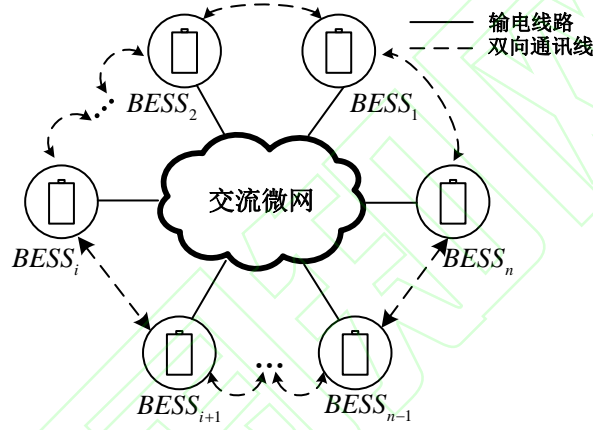


图 6 分布式储能系统通信网络示意图

Fig.6 Communication network diagram of distributed energy storage system

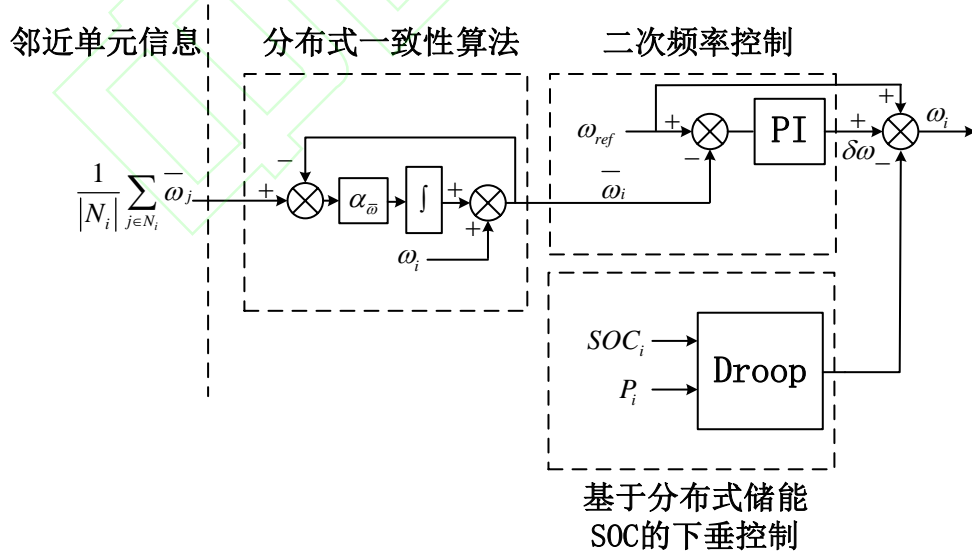


图 7 基于多智能体平均一致性策略的二次控制结构

Fig.7 Secondary control structure based on multi-agent average consensus strategy

### 3 算例分析

为验证本文所提光储系统黑启动协同控制策略的有效性。在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中

建立如图 1 所示光储微网黑启动模型，系统由分布式储能系统，光伏电站，变压器，可变负荷，输电线路，同步电动机组成。光伏系统参数如表 1 所示；分布式储能系统参数如表 2 所示；输电线路参数如表 3 所示；厂用辅机参数如表 4 所示；分布式下垂控制器参数如表 5 所示。

表 1 光伏系统参数  
Tab. 1 Photovoltaic system parameters

参数	数值	参数	数值
最大功率/MW	0.5	额定电压/V	380
光伏单元数目	20	光伏升压变变比	380/33000

表 2 分布式储能系统参数  
Tab. 2 Distributed energy storage system parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	2	额定电压/V	380
储能单元数目	4	储能升压变变比	380/33000
电池充电保护值/%	80	电池放电保护值/%	20

表 3 输电线路参数  
Tab. 3 Transmission lines parameters

参数	数值	参数	数值
线路长度/km	30	正序电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$0.33 \times 10^{-7}$
正序感抗率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$0.59 \times 10^{-6}$	正序容抗率/( $\text{M}\Omega \cdot \text{m}$ )	$1.93 \times 10^{-8}$

表 4 厂用辅机参数  
Tab. 4 Factory auxiliary machine parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	2	额定线电压/kV	6
电动机基准角频率/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	314.1593	定子绕组电阻/ $\text{M}\Omega$	0.01
转子绕组电阻/ $\text{M}\Omega$	0.02	定子绕组电感/mH	0.5
转子绕组电感/H	0.42	辅机漏感/H	2.1

表 5 下垂控制器设计参数  
Tab. 5 Droop controller parameters

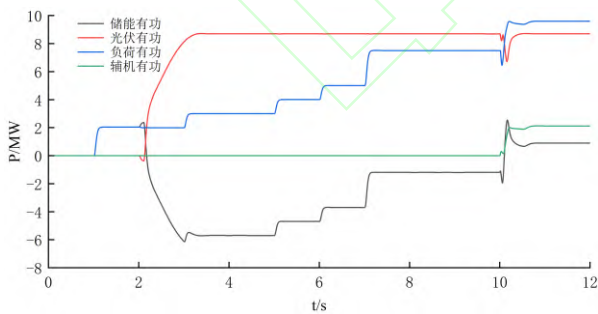
参数	数值	参数	数值
$m_{p0}$	0.05	$n_0$	1
$c$	9	$v$	2
$n_{\max}$	6	$n_{\min}$	1
$\xi$	0.5	$n_q$	0.002

### 3.1 光储系统黑启动协同策略仿真分析

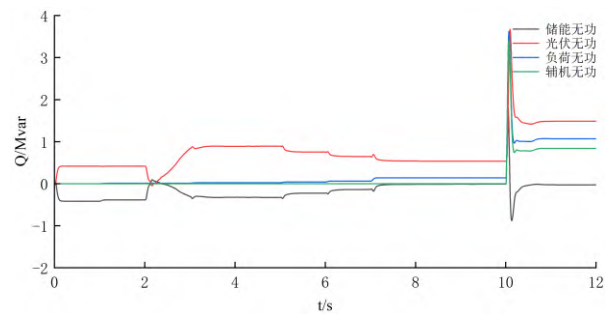
#### 3.1.1 光伏 MPPT 模式下黑启动仿真分析

设定 0-0.2s 分布式储能系统从零起升压至额定电压, 在 1s 载入 2MW 光伏系统启动负荷, 在 2s 时光伏系统并网, 在 3s 时投入 1MW 可控有功负荷, 在 5s 时投入 1MW 一级负荷, 在 6s 时投入 1MW 二级负荷, 在 7s 时投入 1.5MW 火电场启动负荷, 在 10s 时投入 2MW 火电机组辅机负荷。

光储微网黑启动全程有功、无功功率变化如图 8(a)、图 8(b)所示。其中储能有功功率、无功功率代表所有分布式储能单元有功、无功之和。由储能系统在黑启动过程中维持光伏出力与黑启动负荷平衡。分布式储能系统自启动, 开始对交流母线空载充电, 在建立起稳定的交流母线电压、频率后, 在 1s 时带动光伏启动负荷, 协助光伏电站启动; 在光伏系统并网后, 逐步增加启动负载, 扩大黑启动面, 在 10s 时光储系统联合对厂用辅机供电, 实现火电厂启动。光伏网侧换流器采取电压-无功控制方式输出无功, 在 10s 辅机并网时通过储能进行暂态无功支撑。各分布式储能单元黑启动过程中有功、无功变化如图 8(c)、图 8(d)所示。在黑启动过程中, 各分布式储能系统按照自身 SOC 进行有功负荷分配。储能下垂控制器输出频率如图 8(e)所示, 在系统频率变化时各分布式控制器输出迅速趋于一致并维持在设定频率。分布式储能 SOC 如图 8(f)所示, 基于 SOC 的储能变下垂控制器实现了黑启动过程中各分布式储能 SOC 逐渐趋于一致。厂用辅机转矩与交流母线电压、频率如图 8(g)、图 8(h)所示, 在黑启动全过程中交流母线频率、电压波动在合理范围内, 在辅机启动时母线电压为 0.9 标么值, 满足电动机启动要求。在启动后经历短暂波动后, 电机转矩维持在标么值, 厂用辅机启动成功。



(a)微网有功功率



(b)微网无功功率

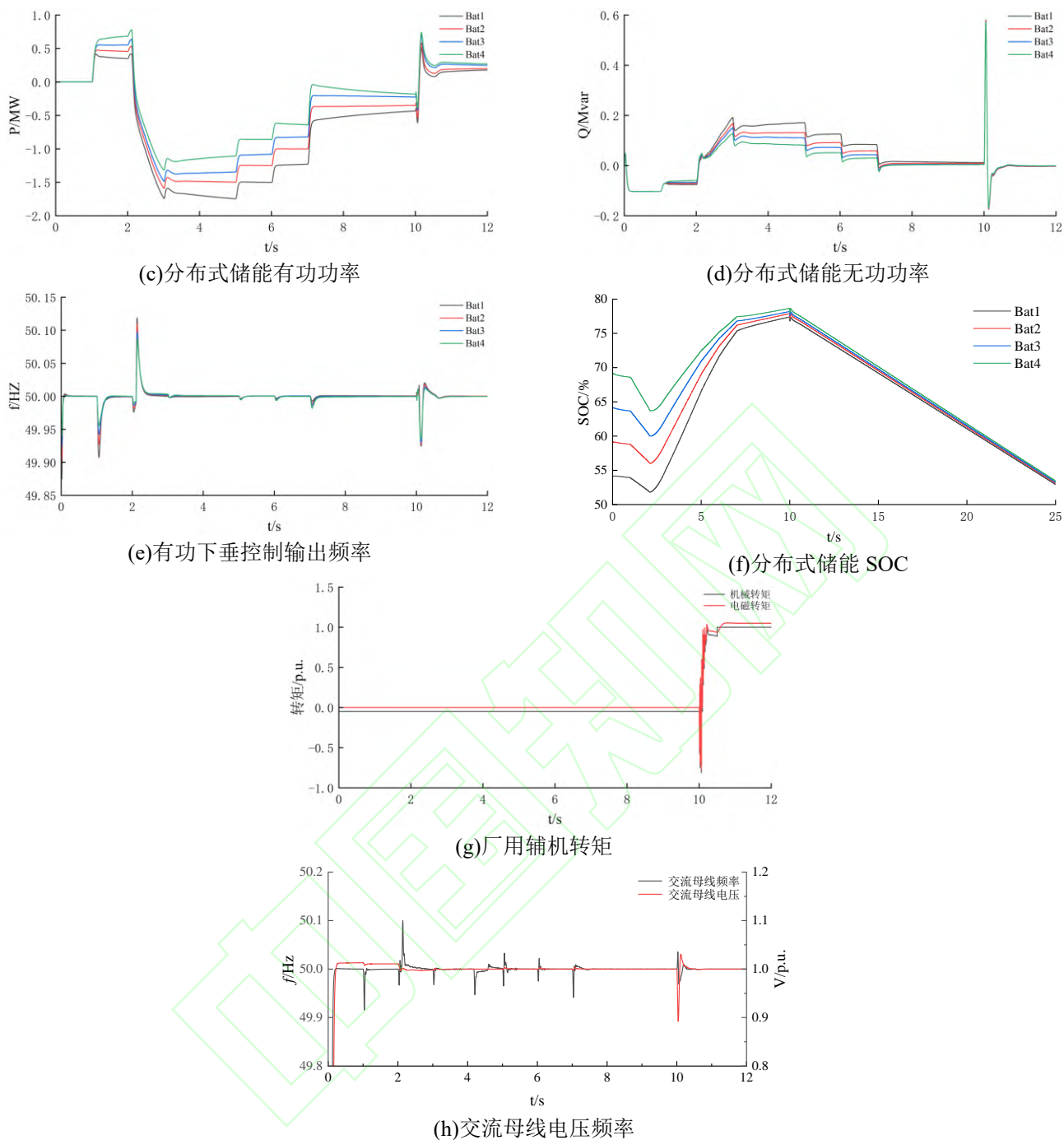


图 8 光伏 MPPT 模式黑启动仿真结果

Fig.8 Simulation results of black start in PV MPPT mode

### 3.1.2 光伏负荷跟踪模式下黑启动仿真分析

光伏电站切换模式至负荷跟踪模式时黑启动仿真结果如图 9 所示。图 9(a)、图 9(b)为微网黑启动期间有功功率与无功功率变化图。在 4.5s 时，储能单元 4 触及设定 SOC 保护上限，导致光伏工作模式随机切换至负荷追踪模式以避免分布式光伏 SOC 越限。分布式储能黑启动期间有功、无功功率变化如图 9(c)、图 9(d)所示。在 5.2s 时，光伏电站实现工作模式切换，此时储能系统提供稳定电压、频率，在系统有功失衡时给予动态支撑。不同工作模式下储能 SOC 对比如图 9(e)所示，光伏在黑启动过程中全程采取 MPPT 控

制的情况下，储能 SOC 越过设定上限保护值，储能闭锁脱网导致系统黑启动失败。

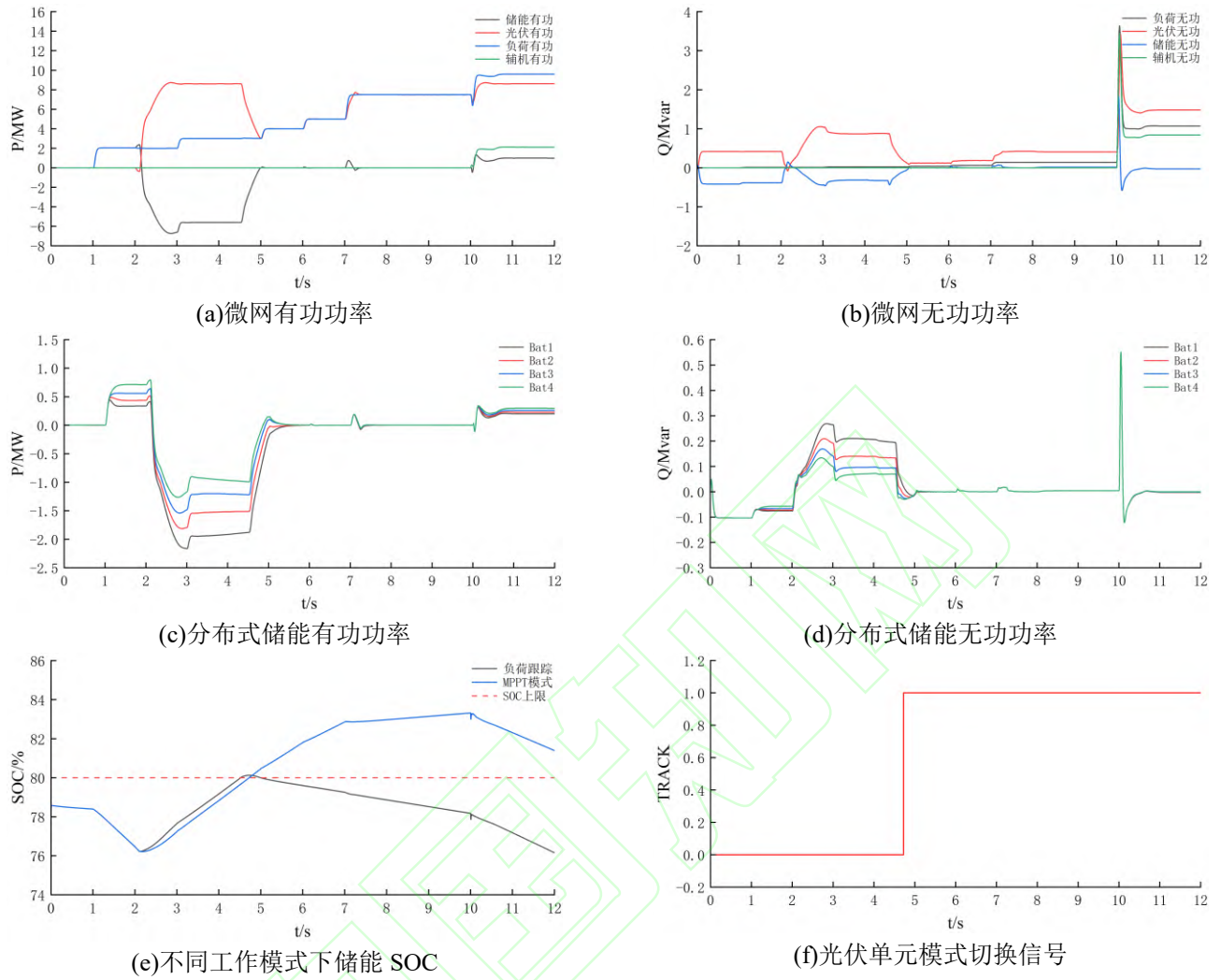
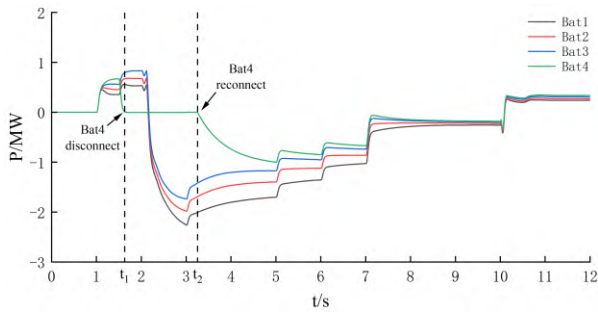


图 9 光伏负荷跟踪模式黑启动仿真结果

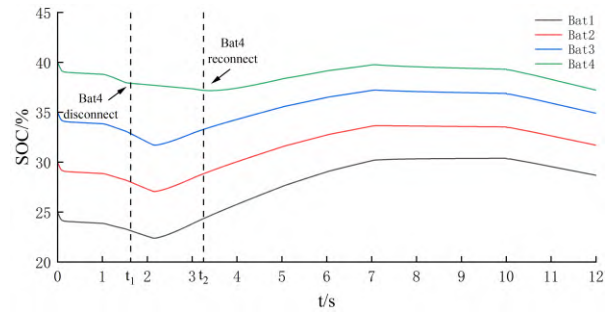
Fig. 9 Simulation results of black start in PV load tracking mode

### 3.1.3 突发故障状况下系统黑启动分析

本文采用控制结构优点体现在应对分布式储能故障时的鲁棒性。在  $t_1$  时刻将电池 4 换流器闭锁，同时断开其与微网及通讯网络之间的连接。并在  $t_2$  时重新将其接入微网。分布式储能单元的断开使得剩余单元重新分配微网黑启动负载以保持微网功率平衡。在电池 4 重新连接上微网后，电池 4 充电功率缓慢增加，重新加入到分布式储能间 SOC 均衡中。可以看出，本文设计分布式光储系统在单个储能因故障从微网切除时仍能保持系统稳定，并且在后续储能单元故障排除后能够实现将其重新接入再启动的目标。



(a)分布式储能有功功率



(b)分布式储能 SOC

图 10 分布式储能故障下系统仿真结果

Fig.10 System simulation results under distributed energy storage fault

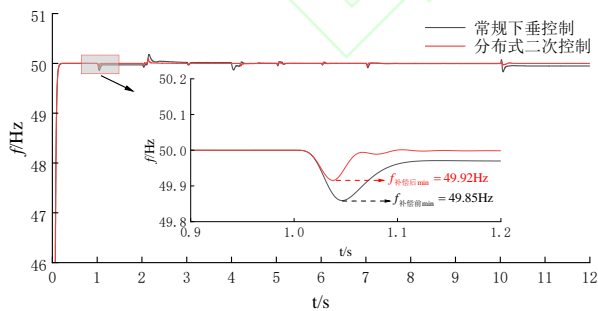
### 3.2 二次控制策略下黑启动过程频率对比分析

图 11 为采取不同储能控制策略下微网黑启动全程频率波动对比图。通过采取二次控制对下垂控制进行补偿，消除了下垂控制的静态误差，同时减少光储系统在黑启动过程中频率的暂态波动。

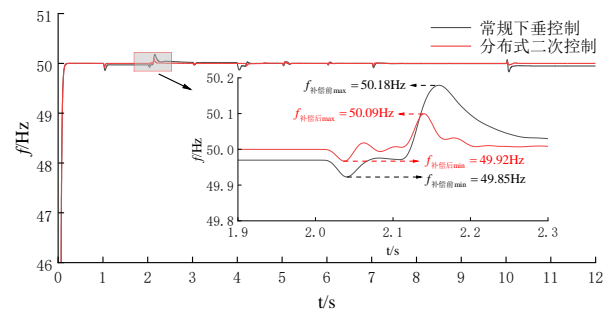
在 1s 时，线路载入初始启动负荷时，交流母线频率由原先的 49.85Hz 升高至 49.92Hz。当 2s 时，光伏系统接入电网，交流母线频率波动最大最小值分别为 50.18Hz、49.92Hz。通过采取二次控制将频率波动限制在 49.97Hz 到 50.09Hz。分别将最低值抬升了 0.05Hz，将最高值降低了 0.09Hz。

在 4s 处，储能 4 的 SOC 达到了设定的充电保护值 0.8，于是根据光储黑启动协同控制策略，将光伏工作模式从 MPPT 模式调整至负荷跟踪模式以避免储能 4 过充。通过采取二次控制将暂态过程中频率最低值从 49.92Hz 抬升至 49.97Hz。消除了切换过程后半段波动峰值。

在 10s 处，将代表厂用辅机的同步电动机并网。电动机并网使得系统频率出现严重暂态波动，同时并网后母线频率出现了较大的稳态误差。二次控制分别将系统频率限制在 49.97Hz 至 50.03Hz 的同时，消除了母线频率的稳态误差，维持了系统的稳定。

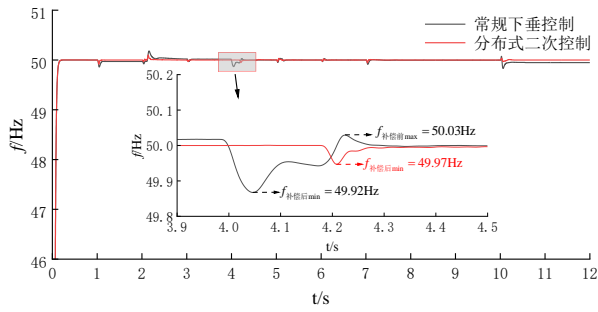


(a)光伏启动负荷并网过程

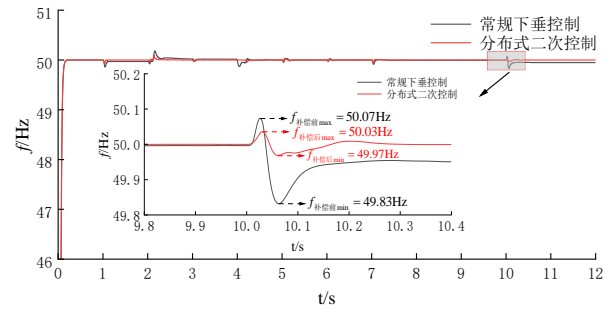


(b)光伏电站并网过程





(c)光伏模式切换过程



(d)厂用辅机并网过程

1

图 11 常规下垂控制与分布式二次控制在黑启动过程中各阶段频率对比

Fig. 11 Frequency comparison between conventional droop control and distributed secondary control in each stage of black start process

#### 4 结论

本文提出了一种考虑分布式储能 SOC 均衡的光储微网黑启动协调控制策略，使得光储微网在系统全黑的情况下具备了启动并网与协调恢复的能力。得出结论如下：

1) 本文所提控制策略能够实现光储微网从自启到带动受端火电厂启动的目标。利用微网中分布式储能系统作为黑启动电源，带动微网中光伏电站并网从而扩大启动面，根据光储系统出力互补特性实现对黑启动过程中负载支撑。

2) 本文控制策略综合考虑光储荷三者，通过光伏系统的模式切换与可控负荷的投切避免启动过程中因分布式储能 SOC 越限而导致的黑启动失败。

3) 本文设计的分布式储能采取基于自身 SOC 的下垂控制，根据自身电量合理分配黑启动负荷的同时实现了分布式储能间 SOC 均衡。

4) 本文设计的分布式储能单元具备“即插即用”特性。在单个储能出现故障脱离微网后，剩余储能单元仍能实现 SOC 均衡，系统仍能正常运行实现黑启动目标。证明了本文设计系统在遭遇故障时存在鲁棒性。

5) 储能单元采取分布式控制，通过双向通讯线实现数据交换，避免了设计中央控制器带来的系统冗余性。其基于多智能体一致性协议的二次频率控制器，可有效抑制黑启动过程中因光伏出力波动与负荷投切导致的频率振荡，提高了黑启动过程的可靠性和安全性。

#### 参考文献：

[1]. 李鹏,王瑞,冀浩然,等.低碳化智能配电网规划研究与展望[J].电力系统自动化,2021,45(24):10-21.

LI Peng, WANG Rui, JI Haoran, *et al.* Research and prospect of low-carbon smart distribution network planning [J].Power system

---

automation, 2021, 45 ( 24 ) : 10-21.

[2] 周劫英, 张晓, 邵立嵩, 等. 新型电力系统网络安全防护挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 15-24.

ZHOU Jieying, ZHANG Xiao, SHAO Lisong, *et al.* Challenges and prospects of cyber security protection for new power system[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2023, 47(8): 15-24.

[3] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.

GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2022, 46(10): 18-32.

[4] 桑博, 张涛, 刘亚杰, 等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3077-3093.

SANG Bo, ZHANG Tao, LIU Yajie, *et al.* Energy management system research of multi-microgrid: A review[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(10): 3077-3093.

[5] HU J F, SHAN Y H, CHENG K W, *et al.* Overview of power converter control in microgrids—Challenges, advances, and future trends[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2022, 37(8): 9907-9922.

[6] 李琳, 冀鲁豫, 张一驰, 等. 巴基斯坦“1·9”大停电事故初步分析及启示[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 655-663.

LI Lin, JI Luyu, ZHANG Yichi, *et al.* Preliminary analysis and lessons of blackout in Pakistan power grid on January 9, 2021[J]. **Power System Technology**, 2022, 46(2): 655-663.

[7] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.

WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, *et al.* Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. **Power System Protection & Control**, 2023, 51(5): 172-179.

[8] DANG H P, VILLEGAS PICO H N. Blackstart and fault ride-through capability of DFIG-based wind turbines[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2023, 14(3): 2060-2074.

[9] LI J H, YOU H F, QI J, *et al.* Stratified optimization strategy used for restoration with photovoltaic-battery energy storage systems as black-start resources[J]. **IEEE Access**, 2019, 7: 127339-127352.

[10] 陈春, 高靖, 曹一家, 等. 多源配网主动孤岛恢复过程电压频率波动的平抑方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 543-553.

CHEN Chun, GAO Jing, CAO Yijia, *et al.* Voltage and frequency suppression of intentional islanding restoration process for distribution system with multi-generations[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(5): 543-553.

[11] ZHANG B, DEGHANIAN P, KEZUNOVIC M. Optimal allocation of PV generation and battery storage for enhanced resilience[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2019, 10(1): 535-545.

[12] 周宜昌, 刘艳, 顾雪平. 考虑多风电场黑启动价值的机组恢复顺序双层优化决策[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 87-97.

ZHOU Yichang, LIU Yan, GU Xueping. Bi-level optimization decision for unit recovery sequence considering black-start value of multiple wind farms[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2020, 44(16): 87-97.

[13] 汤奕, 戴剑丰, 冯伟鑫, 等. 基于虚拟惯量的风电场黑启动频率协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 19-24.

TANG Yi, DAI Jianfeng, FENG Yixin, *et al.* Cooperative frequency control strategy for wind farm black-start based on virtual inertia[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2017, 41(3): 19-24.

[14] 桑顺, 齐琛, 张新松, 等. 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3168-3180.

SANG Shun, QI Chen, ZHANG Xinsong, *et al.* Grid-forming control and black start of PMSG-based direct-driven wind turbine[J]. **Power System Technology**, 2022, 46(8): 3168-3180.

[15] 陈夏, 辛妍丽, 唐文虎, 等. 海上风电场黑启动系统的风柴协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 98-105.

CHEN Xia, XIN Yanli, TANG Wenhui, *et al.* Coordinated control strategy of wind turbine and diesel generator for black-start system of offshore wind farm[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2020, 44(13): 98-105.

[16] 谢楠, 杨沛豪, 何萍, 等. 风光储微电网-火电机组黑启动全过程储能控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 75-82.

XIE Nan, YANG Peihao, HE Ping, *et al.* Research on energy storage control strategy during whole black start process of wind-PV-

---

energy storage microgrid and thermal power unit[J]. **Proceedings of the CSU-EPSC**, 2023, 35(2): 75-82.

- [17] 何秀强, 耿华, 杨耕, 等. 接入 LCC-HVDC 的双馈风电场孤岛启动与并网控制策略[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(9): 99-107.
- HE Xiuqiang, GENG Hua, YANG Geng, *et al.* Startup and integration control strategy of DFIG based isolated wind farm connected with LCC-HVDC[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(9): 99-107.
- [18] 刘英培, 侯亚欣, 梁海平, 等. 一种适用于黑启动的光储联合发电系统协调控制策略[J]. **电网技术**, 2017, 41(9): 2979-2986.
- LIU Yingpei, HOU Yaxin, LIANG Haiping, *et al.* A coordinated control strategy of PV battery-energy storage hybrid power system for black start[J]. **Power System Technology**, 2017, 41(9): 2979-2986.
- [19] 李军徽, 尤宏飞, 李翠萍, 等. 基于模型预测控制的风光储黑启动功率协调策略[J]. **电网技术**, 2020, 44(10): 3700-3708.
- LI Junhui, YOU Hongfei, LI Cuiping, *et al.* Power coordination strategy based on model predictive control for black start with PV-wind-battery system[J]. **Power System Technology**, 2020, 44(10): 3700-3708.
- [20] 闫来清, 曹丽源, 薛太林, 等. 风电场黑启动储能容量优化配置: 一种考虑储能运行策略的方法[J]. **电力系统保护与控制**, 2022, 50(16): 131-139.
- YAN Laiqing, CAO Liyuan, XUE Tailin, *et al.* Optimal configuration of wind farm black start energy storage capacity: A method considering energy storage operation strategy[J]. **Power System Protection & Control**, 2022, 50(16): 131-139.
- [21] 赵昱宣, 孙磊, 林振智, 等. 微网作为黑启动电源的电力系统网架重构优化策略[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(17): 9-17.
- ZHAO Yuxuan, SUN Lei, LIN Zhenzhi, *et al.* Power network reconfiguration strategy with microgrids as black-start power sources[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(17): 9-17.
- [22] 张英敏, 吴谨轶, 江琴, 等. 基于风储联合系统的受端电网黑启动技术及协调恢复策略[J]. **工程科学与技术**, 2023, 55(2): 72-83.
- ZHANG Yingmin, WU Jinyi, JIANG Qin, *et al.* Receiving-end power grid black start technology and coordinated restoration strategy based on wind-storage combined system[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2023, 55(2): 72-83.
- [23] 赵晶晶, 朱天天, 陈凌汉, 等. 风光储电站对临近火电厂黑启动的协调控制策略[J]. **电力系统及其自动化学报**, 2021, 33(11): 105-111.
- ZHAO Jingjing, ZHU Tiantian, CHEN Linghan, *et al.* Coordinated control strategy for black start of adjacent thermal power plants using wind-PV-storage power station[J]. **Proceedings of the CSU-EPSC**, 2021, 33(11): 105-111.
- [24] QIU F, ZHANG Y C, YAO R, *et al.* Power system restoration with renewable participation[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2023, 14(2): 1112-1121.
- [25] 王伟信, 段建东, 张润松, 等. 孤岛电网中多储能设备 SOC 一致性优化策略[J]. **电工技术学报**, 2015, 30(23): 126-135.
- WANG Weixin, DUAN Jiandong, ZHANG Runsong, *et al.* Optimal state-of-charge balancing control for paralleled battery energy storage devices in islanded microgrid[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2015, 30(23): 126-135.
- [26] MORSTYN T, SAVKIN A V, HREDZAK B, *et al.* Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2018, 9(5): 4735-4743.