

DOI: 10.7667/PSPC151466

# 复杂拓扑结构光储型微电网黑启动策略

杨苹<sup>1,2</sup>, 许志荣<sup>1,3</sup>, 郑群儒<sup>1</sup>, 曾智基<sup>1</sup>, 周少雄<sup>4</sup>, 尹旭<sup>4</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 511458;  
3. 华南理工大学风电控制与并网技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 511458;  
4. 广东智造能源科技研究有限公司, 广东 广州 511458)

**摘要:** 随着微电网大力发展, 逐渐形成了结构及控制模式更加复杂的微电网。针对较具推广价值的光储型微电网, 研究安全有效的黑启动方案对提高其供电可靠性具有重要意义。在分析具有复杂拓扑的光储型微电网及控制系统的基础上, 提出一种基于分层控制的光储型微电网黑启动策略。综合考虑多个储能系统当前状态以选定黑启动主电源, 结合光伏发电系统多种运行状态, 以网架串行恢复形式进行分层分级黑启动。经仿真验证, 所提方法可安全有效地完成复杂拓扑结构的光储型微电网黑启动, 为相应实际微网工程黑启动方式提供一定的借鉴意义。

**关键词:** 微电网; 黑启动; 分层控制; 复杂拓扑结构

## Black start strategy of PV-ESS microgrid with complicated topology structure

YANG Ping<sup>1,2</sup>, XU Zhirong<sup>1,3</sup>, ZHENG Qunru<sup>1</sup>, ZENG Zhiji<sup>1</sup>, ZHOU Shaoxiong<sup>4</sup>, YIN Xu<sup>4</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 511458, China; 3. National-Local Joint Engineering Laboratory for Wind Power Control and Integration Technology, South China University of Technology, Guangzhou 511458, China; 4. Guangdong Intetwork Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

**Abstract:** With the rapid development of microgrids, the microgrids with complicated structures and control modes are gradually formed. For the photovoltaic (PV) / energy-storage system (ESS) microgrids which have popularization value, it is important to study the safe and effective black start strategy of microgrids for improving the power supply reliability. Based on the analysis of the structure and control system of the PV-ESS microgrid with complicated topology structure, this paper puts forward a black start strategy based on the hierarchical control theory. The current states of multiple energy storage systems are considered to select the main power supply in the initial stage of the black start. Taking the multiple running modes of the photovoltaic systems into consideration, the microgrid restores based on a serial strategy. The simulation results show that the proposed method can safely and effectively complete the black start of the microgrid with complicated topology structure, providing a reference for the actual project.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA052001).

**Key words:** microgrid; black start; hierarchical control; complicated topology structure

## 0 引言

近年来, 随着经济的快速发展, 能源的需求急剧增加, 分布式发电技术以其低污染性、高能源利用率和安装位置灵活等特点得到越来越广泛的应

用, 但是分布式电源(Distributed Generation, DG)存在着单电源接入成本高、控制困难和并网运行对大电网的安全稳定运行有重大影响等问题<sup>[1-2]</sup>。

为了协调大电网与分布式电源之间的矛盾, 微电网将分布式电源与本地负荷组成一个整体, 通过控制策略降低分布式电源直接并网对大电网的影响。微电网的灵活性使其既能够并网运行, 又可以在大电网故障时与大电网断开连接, 进入孤岛运行状态, 保证微电网内的供电可靠性<sup>[3-6]</sup>。

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划, 2014AA052001); 广东省科技计划项目(2012B040303005); 南沙区科技计划项目资助(2013P005)

微电网难免因内部或外部故障停运进入全黑状态, 这将会给居民日常生活带来不便, 并且带来经济损失。为了减少停电时间以及停电引起的经济损失, 迅速可靠的微电网黑启动方案不可或缺。所谓的黑启动, 是指整个系统因故障停运后, 不依赖于其他的网络帮助, 通过启动系统中具有自启动能力的电源, 带动无自启动能力的电源, 逐步扩大系统恢复范围, 最终实现整个系统恢复的过程<sup>[7-8]</sup>。

传统电力系统的黑启动过程可以划分为三个阶段: 准备阶段, 恢复阶段, 负荷恢复阶段。准备阶段中, 需确定系统分区、选择网架恢复策略、选择恢复路径、确定黑启动电源等; 恢复阶段需完成输电线路的充电、启动相应的黑启动机组、同步子系统、维持有功无功平衡等; 负荷恢复阶段, 需尽快恢复负荷<sup>[7-12]</sup>。

由于微电网系统结构特殊、微电源的特性与大电网系统中的传统旋转电机不尽相同, 使得微电网的黑启动在黑启动电源以及黑启动方案的选择等方面有一定的区别<sup>[13]</sup>。微电网黑启动方案中的网架恢复策略可分为并行恢复和串行恢复。并行恢复方式中, 具有黑启动能力的微电源完成自启动, 建立多个子系统, 通过同期并列装置进行同步。并行恢复方式具有恢复速度快、需要同期并列装置和系统复杂等特点, 存在并联时冲击电流大的问题<sup>[13-15]</sup>。串行恢复方式中, 主电源建立稳定的电压和频率, 其他微电源以其作为参考进行启动。串行恢复方式具有无需同期并列装置、结构简单和恢复速度较并行控制方式慢等特点<sup>[16]</sup>。

微电网分层控制通过中央处理器和下层控制器实现多微网内各元件协调控制, 是当前微电网控制的研究热点<sup>[17-18]</sup>。文献<sup>[19-20]</sup>基于分层控制的思想提出一种三层结构的控制策略, 采用网架串行恢复的方式实现具有复杂结构的多微电网黑启动, 其中第一层控制由中央自主管理控制器担任, 第二层控制由微电网中央控制器担任, 第三层控制由底层控制器组成, 包括负荷控制器和微源控制器。

本文在分析光储型微电网结构及控制系统的基础上, 提出一种基于分层控制的光储型微电网黑启动策略: 综合考虑多个储能系统当前状态以选定黑启动主电源, 结合光伏发电系统多种运行状态, 以网架串行恢复形式进行光储型微电网分层分级黑启动。

## 1 光储型微电网结构分析

光储型微电网结构如图 1 所示。该光储微电网为两层结构, 上层结构包含子微电网 M0, 下层结构包含子微网 M1 和分布式电源接入区域 M2。M0 和 M1 中均包含负荷、光伏发电系统以及储能装置, M2 则包含光伏发电系统和负荷。子微电网 M0 中的负荷、光伏发电系统和储能装置分别通过开关 L1、L2 和 L3 接入 380 V 交流母线, 而子微电网 M1 和分布式接入 M2 通过子微网并/离网控制开关 L4 和 L5 接入 380 V 交流母线。整体微电网则通过微电网并/离网控制开关 L0 接入配电网。光储微电网各部分组成如表 1 所示。

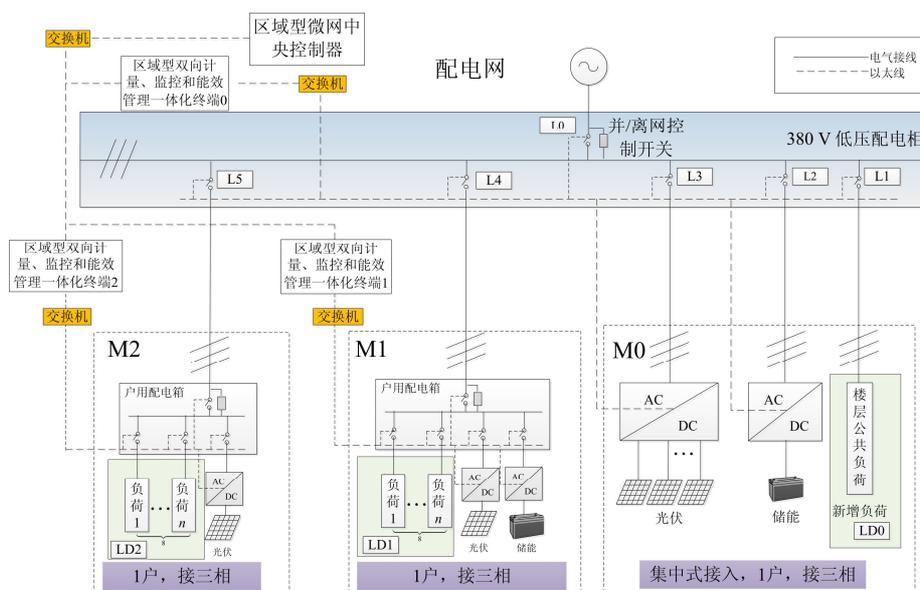


图 1 光储型微电网拓扑

Fig. 1 Topology of photovoltaic/energy-storage microgrid system



表 1 光储型微电网各部分的组成

Table 1 Composition of PV-ESS microgrid system

子单元	编号	组成
上层微电网	M0	光伏发电系统、储能系统、负荷
下层微电网	M1	光伏发电系统、储能系统、负荷
分布式电源接入	M2	光伏发电系统、负荷

如图 1 中给出光储微电网的二次拓扑主接线。该微电网设置一台区域型微电网中央控制器和 3 台区域型双向计量、监控、能效管理一体化终端。

其中，一体化终端 0 负责上层微电网 M0 内控制功能的实现，一体化终端 1 和一体化终端 2 则分别负责下层微电网 M1 和分布式接入 M2 区域内控制功能的实现。该微电网控制系统不需要设置以服务器为基础的微电网控制系统，而是分散至各控制器，能低成本、就地、分散地运算，只传输必要信息作为区域协调控制使用。

## 2 微电网分层控制

对光储型微电网而言，光伏发电系统发电功率受光照、温度等外界环境条件影响较大，具有明显的波动性和间歇性等不足；储能系统可通过适当的充放电控制，改变充放电状态和功率大小，与光伏发电系统实现功率输出互补，但由于成本问题，储能电池的容量受限，只能作为短时的能量补充。

针对光储型微电网的特点以及大规模推广应用的需求，本文采用基于分层结构的微电网控制系统。按照响应速度、时间尺度和通信需求，基于分层控制思想将微电网控制系统分为三层，如图 2 所示。

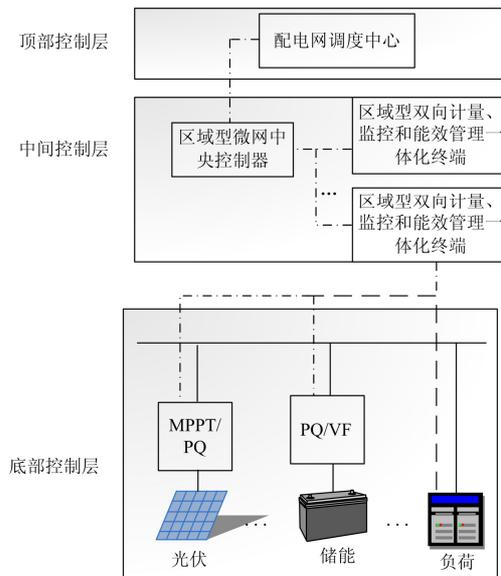


图 2 基于分层控制思想的微电网控制系统

Fig. 2 Control system based on the hierarchical control

第一层为顶部控制层，由配电网调度中心组成。

配电网调度中心主要功能是：

- (1) 负责多微电网之间的协调控制；
- (2) 基于电压或频率调节制定配电网功率需求；
- (3) 依据有关约束条件(功率损耗最小、经济成本最低等)协调各微电网出力。

第二层为中间控制层，由区域型微电网中央控制器和区域/户用型双向计量、监控和能效管理一体化终端组成。

区域型微电网中央控制器的主要功能是：

- (1) 接受来自中间控制层的数据进行处理，并基于这些电气信息量对一体化终端进行控制，维持多层光储型微电网电压和频率稳定，以保障微电网内部安全稳定运行和满足功率限制等；

- (2) 通过对一体化终端控制参数的设置，调整光储型微电网的输出功率和出口电压。

区域型双向计量、监控和能效管理一体化终端主要功能是：

- (1) 基于光照、温度和历史数据等信息，实现对光伏发电系统和负荷的短期和超短期预测，对光伏发电系统和负荷进行控制；

- (2) 接收来自底部控制层的电气信息量，并基于实时数据向底部控制层发送控制信号，以维持单个微电网或者分布式接入区域的电压和频率稳定，保障单个微电网或者区域内的安全稳定运行和满足功率限制需求等；

- (3) 接受顶部控制层区域型微电网中央控制器的控制，负责单个微电网或分布式接入区域与整体微电网的同步，调整子微电网或分布式电源接入区域与微电网的功率流动，减少子微网对整体微电网的冲击。

第三层为底部控制层，由负荷控制器、光伏发电系统控制器和储能控制器组成。主要功能是：

- (1) 负荷控制器、光伏发电系统控制器和储能控制器接收中间控制层的各种控制指令后，在无需其他通信的前提下，基于本地测量信息实现对具体开关、光伏发电系统与储能的变流器以及可控负荷的控制和保护；

- (2) 将储能荷电状态(State of Charge, SOC)和单体设备出口处的电压、电流、功率等工况信息上送至中间控制层，为微电网内部的运行控制提供实时数据。

## 3 黑启动策略

### 3.1 主电源选取

黑启动主电源的选择是微电网黑启动的关键。

微电网的黑启动依靠具有黑启动能力的微电源进行自启动, 建立稳定的电压频率后, 带动系统中不具备自启动能力的电源, 逐步扩大微电网的恢复范围, 最终实现微电网的黑启动。

传统电力系统中, 在黑启动电源选择上, 有如下要求: 黑启动电源在电网中的位置要求离大型机组近、启动路径短、电压等级变换少(历的变压器数目少)、离重要负荷中心近、启动速度快、带负荷能力强、具有电压和频率调节功能、供电时间长<sup>[21]</sup>。

光储型微电网在结构上比传统电力系统不同, 微电网中微电源的特性与传统电网中的旋转机组也极为不同, 因此对光储型微电网黑启动主电源的选择有如下要求:

- (1) 具备储能功能;
- (2) 具有调压调频能力, 以保证微电网在离网情况下母线电压频率保持稳定;
- (3) 具备足够备用容量;
- (4) 具备充足发电容量。

因此, 针对具有复杂结构的光储微电网的黑启动电源选择, 应综合考虑储能装置的剩余电量  $S \cdot SOC$  及其变流器额定功率  $P_{pcs}$  共同作为主电源选取依据。

$$E = \lambda_1 \cdot S \cdot SOC + \lambda_2 \cdot P_{pcs} \quad (1)$$

式中:  $E$  为黑启动电源评价指标;  $S$  为储能装置的容量;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为主电源决策影响系数。黑启动为短时过程, 主要考虑变流器的额定功率以支撑微网源荷启动, 容量及  $SOC$  则为其次, 故一般选取  $\lambda_1=0.3$ 、 $\lambda_2=0.7$ 。

### 3.2 网架串行恢复

在采用基于串行恢复策略的光储微电网黑启动过程中, 主电源首先启动以建立交流母线的电压和频率, 其控制方式采用  $V/f$  控制。然后逐步投入一定的负荷, 再以  $PQ$  控制方式启动其他微电源, 扩大微电网的恢复范围, 最终实现微电网的黑启动。

其中, 网架各组成部分的恢复顺序值得探讨。本文对储能系统、负荷、光伏发电系统各部分内部进行恢复次序上的分级排序:

(1) 对于储能系统, 作为主电源的某台储能系统以  $V/f$  控制方式最先被恢复, 然后闭合各层微电网的并/离网控制开关、依次闭合微电网中的各个储能开关, 将其余的储能装置投入, 并将其设置为  $PQ$  控制方式。在黑启动过程中, 为了能尽快增加微电网系统内部电源的总备用容量, 储能系统根据容量由大到小逐次投入。

(2) 对于负荷, 根据微电网分层顺序以及实际负

荷的重要程度进行排序。不考虑特殊情况, 在如图 1 所示的光储微电网拓扑中, 微电网/分布式接入区域的分层顺序为:  $M0 > M1 > M2$  (其中 “>” 表示优先级高于), 即对应具体负荷的恢复顺序为:  $LD0 > LD1 > LD2$ 。考虑特殊情况 ( $M1$  中  $LD1$  负荷最为重要时), 则负荷恢复顺序修改为  $LD1 > LD0 > LD2$ 。

(3) 对于光伏发电系统, 应当先投入最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 类光伏发电系统 (下面简称为 MPPT 光伏), 其次是  $PQ$  类光伏发电系统 (恒功率输出的光伏发电系统, 下面简称为  $PQ$  光伏)。由于发电容量大的光伏可控性比较差, 利用黑启动前期较大的备用容量能维持系统的平衡, 因此光伏发电系统的投入顺序根据发电容量从大到小进行排列。

### 3.3 光储微电网黑启动路径及指令执行

根据前文的描述, 本文采用基于串行恢复策略的黑启动方案。以图 1 所示的微电网系统拓扑为例, 针对具体的光储微电网的黑启动操作流程如下:

(1) 区域型微电网中央控制器检查光储微电网是否满足黑启动条件。具体判断依据是:

- 1) 整体微网并/离网控制开关处于断开状态;
- 2) 所有负荷和微电源侧的控制开关处于断开状态;
- 3) 微电网交流母线上的电压和频率均为 0;
- 4) 具有黑启动能力的储能系统能正常工作, 且备用容量充足。

(2) 区域型微电网中央控制器择优选择系统中的一台储能装置作为黑启动主电源, 并以  $V/f$  控制方式进行启动。在满足 3.1 节所述主电源选择依据的前提下, 选择  $SOC$  高、额定充放电功率大的储能系统作为主电源。

(3) 区域型微电网中央控制器根据采集到的电气量信息, 判断电压和频率的稳定条件为

$$\begin{cases} f_{n\min} < f < f_{n\max} \\ U_{n\min} < U < U_{n\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f$  为微电网母线的实际频率;  $f_{n\max}$  为微电网规定频率的上限值;  $f_{n\min}$  为微电网规定频率的下限值;  $U$  为微电网母线的实际电压;  $U_{n\max}$  为微电网规定电压的上限值;  $U_{n\min}$  为微电网规定电压的下限值。若频率和电压在以上范围内, 则视为稳定。

(4) 闭合所有子微网和分布式接入区域的并/离网控制开关, 根据 3.2 节所述储能投入顺序逐次投入所有储能装置, 并将除主电源外的储能系统设置为  $PQ$  控制方式。

(5) 微电网中央控制器判断负荷投入条件为

$$K_{L_j} \cdot P_{L_j} + P_{net} \leq \sum P_{Bat,max} \quad (3)$$

式中： $P_{L_j}$ 表示将要投入负荷 $j$ 的功率； $P_{net}$ 表示系统的净功率(净功率=负荷总有功功率—光伏发电系统总有功功率)； $K_{L_j}$ 表示负荷 $j$ 投入时候的冲击系数； $P_{Bat,max}$ 表示各储能系统的最大输出功率。

当条件符合时，一体化终端向 PQ 可调储能(下面简称为 PQ 储能)发送功率调整信号，PQ 储能完成调整后，一体化终端向负荷控制器发送投入指令，闭合负荷开关，负荷投入。

(6) 区域型微电网中央控制器先检验 MPPT 光伏的投入条件。

$$\sum_{x=1}^{h-1} P_{pv,x} + \sum P_{Bat,max} \geq \sum P_L \quad (4)$$

$$P_{pv,mppt,h} + \sum_{x=1}^{h-1} P_{pv,mppt,x} + \sum P_{Bat,min} \leq \sum P_L$$

式中： $P_{pv,mppt,h}$ 表示第 $h$ 个 MPPT 光伏的功率；

$\sum_{x=1}^{h-1} P_{pv,mppt,x}$ 表示已经完成投入 MPPT 光伏的总功率；

$P_{Bat,min}$ 表示各储能的最小输出功率。当条件符合时，一体化终端向 PQ 储能发送功率调整信号，完成调整后，一体化终端向光伏控制器发送投入指令，闭合光伏开关，MPPT 光伏投入。

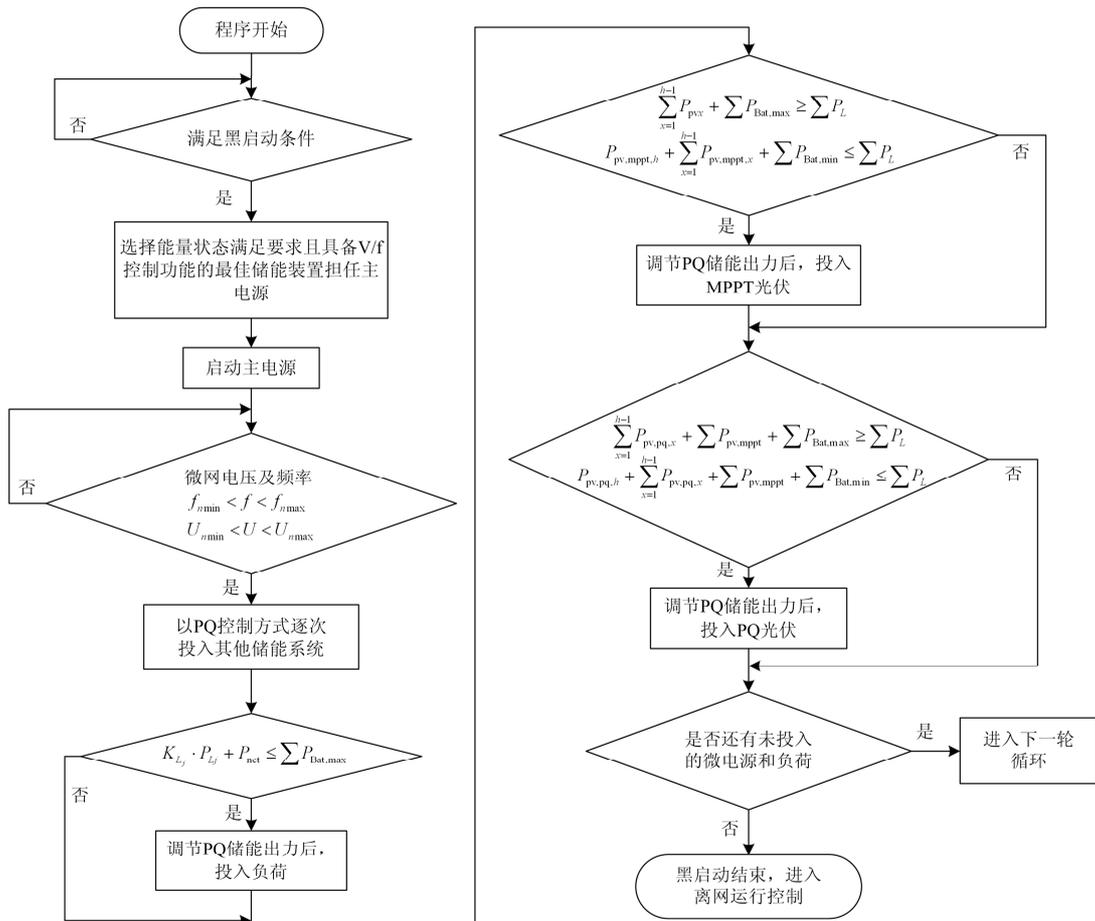


图 3 光储微电网黑启动控制流程

Fig. 3 Program flow chart of PV-ESS microgrid black start

(7) 当 MPPT 光伏完成投入后，区域型微电网中央控制器检验 PQ 光伏的投入条件为

$$\sum_{x=1}^{h-1} P_{pv,pq,x} + \sum P_{pv,mppt} + \sum P_{Bat,max} \geq \sum P_L \quad (5)$$

$$P_{pv,pq,h} + \sum_{x=1}^{h-1} P_{pv,pq,x} + \sum P_{pv,mppt} + \sum P_{Bat,min} \leq \sum P_L$$

式中： $P_{pv,pq,h}$ 表示第 $h$ 个 PQ 光伏的功率； $\sum_{x=1}^{h-1} P_{pv,pq,x}$

表示 $(h-1)$ 个已经完成投入的 PQ 光伏； $\sum P_{pv,mppt}$ 表示 MPPT 光伏总功率； $P_{Bat,min}$ 表示各个储能装置的最小输出功率。当条件符合时，一体化终端向 PQ

储能的控制器发送功率调整信号, PQ 储能完成调整后, 一体化终端向光伏控制器发送投入指令, 闭合光伏开关, 光伏发电系统投入。

(8) 检验是否还有未投入的负荷以及微电源, 如果有则返回步骤(5), 若无, 则进入步骤(9)。

(9) 微电网中央控制器结束黑启动控制流程, 退出黑启动控制模式, 进入离网运行控制模式。

## 4 实例验证

为了验证本文提出的光储微电网黑启动方法, 本文在 PSCAD/EMTDC 平台上设置了一种典型工况进行仿真验证。

光储微电网拓扑如图 4 所示。微电网系统由光伏、储能和负荷组成: 光伏系统由 1 台额定容量为 30 kW 的 MPPT 类型光伏和 2 台额定容量为 30 kW 的 PQ 类型光伏组成; 储能系统由 1 台主电源和 1 台辅助电源组成, 主电源额定容量为 90 kW, 辅助电源额定容量为 30 kW; 负荷为 3 台额定容量为 50 kW 的静态负荷。

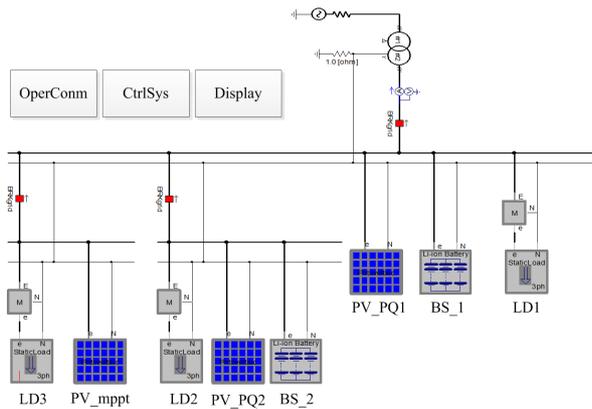


图 4 光储微电网仿真拓扑图

Fig. 4 Simulation topology of PV-ESS microgrid

如表 2 所示是典型工况的初始条件, 包含仿真的环境信息、储能信息、光伏信息和负荷信息。

黑启动仿真波形如图 5 所示。

区域型微电网中央控制器检测到微电网满足黑启动条件后, 选择能量状态与容量更优的储能 BS\_1 担任系统黑启动主电源, 并向储能 BS\_1 发送 V/f 控制信号和投入信号, 使储能 BS\_1 采用 V/f 控制模式启动并投入微电网。储能 BS\_2 则采用 PQ 控制模式启动并投入。

在 1.2 s 时, 主电源 BS\_1 建立了稳定的母线电压和频率, 此时区域型微电网中央控制器检测到 LD1 满足负荷投入条件, 在调节储能 BS\_2 的出力后, 负荷 LD1 投入。

表 2 典型工况的初始条件

Table 2 Concrete details of the typical condition

环境信息	光照强度	1000 W/m <sup>2</sup>	
	温度	25 °C	
储能信息	储能	SOC	功率
	BS_1	65%	90 kW
	BS_2	60%	30 kW
光伏信息	光伏	类型	功率
	PV_mppt	MPPT	30 kW
	PV_PQ1	PQ	30 kW
	PV_PQ2	PQ	30 kW
负荷信息	负荷	类型	功率
	LD1	静态	50 kW
	LD2	静态	50 kW
	LD3	静态	50 kW

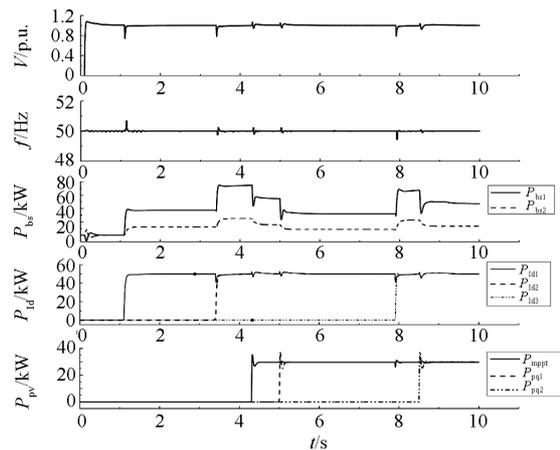


图 5 光储微电网黑启动仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of the microgrid black start

在 3.4 s 时, 区域型微电网中央控制器检测到 LD2 满足负荷投入条件, 在调节储能 BS\_2 的出力后, 负荷 LD2 投入。

在投入 LD1 和 LD2 后, LD3 不再满足负荷的投入条件。区域型微电网中央控制器继而判断光伏发电系统是否满足投入条件。

在 4.3 s 时, 检测到光伏 PV\_mppt 满足 MPPT 类光伏发电系统的投入条件, 在调节储能 BS\_2 的出力后, 光伏 PV\_mppt 投入。

在 5.0 s 时, 检测到光伏 PV\_PQ1 满足 PQ 类光伏发电系统的投入条件, 在调节储能 BS\_2 的出力后, 投入光伏 PV\_PQ1。光伏发电系统的投入增大了系统容量。

在 7.9 s 时, 区域型微电网中央控制器判断 LD3 满足负荷投入条件, 在调节储能 BS\_2 的出力后,

负荷 LD3 投入。

在 8.5 s 时,检测到光伏 PV\_PQ2 满足 PQ 类光伏发电系统的投入条件,在调节储能 BS\_2 的出力后,光伏 PV\_PQ2 投入。

至此,所有负荷恢复供电,并且所有微电源成功投入,系统电压和频率满足运行要求,微电网黑启动成功。区域型微电网中央控制器退出黑启动控制模式,进入离网运行控制模式。

## 5 结论

本文针对结构及控制模式更加复杂的光储型微电网,提出一种基于分层控制的微电网黑启动策略。该策略考虑多个储能系统当前状态以选定黑启动主电源,结合光伏发电系统多种运行状态,以网架串行恢复形式进行光储型微电网分层分级黑启动。

仿真结果表明,在较短时间内负荷、储能系统和光伏发电系统重新投入,光储微电网系统恢复稳定运行状态。所提方法可安全有效地完成复杂结构光储型微电网的黑启动,为相应实际工程黑启动方式提供一定的借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 王鹤,李国庆.含多种分布式电源的微电网控制策略[J].电力自动化设备,2012,32(5):19-23.  
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19-23.
- [2] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 李瑞生.微电网关键技术实践及实验[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):73-78.  
LI Ruisheng. Practice and experiment of the key microgrid technologies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 73-78.
- [4] 唐西胜,邓卫,李宁宁.基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J].电力自动化设备,2012,32(3):99-103.  
TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 99-103.
- [5] 张建华,刘大川,曾博.应用于微电网的复合储能技术研究综述[J].电器与能效管理技术,2014(12):49-52.  
ZHANG Jianhua, LIU Dachuan, ZENG Bo. Overview of hybrid energy storage technology for micro-grid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(12): 49-52.
- [6] 谢永涛,贾嵘,董开松,等.交流微网整体建模及仿真研究[J].高压电器,2015,51(6):101-107.  
XIE Yongtao, JIA Rong, DONG Kaisong, et al. Modeling and simulation of an AC microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 101-107.
- [7] 熊思敏,房鑫炎,郁惟镛,等.电力系统全网停电后的恢复——黑启动综述[J].电力系统及自动化学报,1999,11(3):12-17.  
XIONG Simin, FANG Xinyan, YU Weiyong, et al. The summary of black-start restoration of electrical power system after blackout[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(3): 12-17.
- [8] 乔红,温智平,周倩,等.含分布式电源配电网的黑启动运行特性研究[J].电网与清洁能源,2015,31(7):54-59.  
QIAO Hong, WEN Zhiping, ZHOU Qian, et al. Research on the feature of the black-start with distributed generation in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 54-59.
- [9] 顾雪平,王大江,李少岩,等.电力系统扩展黑启动方案的后效性研究[J].电工技术学报,2015,30(8):238-246.  
GU Xueping, WANG Dajiang, LI Shaoyan, et al. Investigation on after effect of power system extended black-start schemes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 238-246.
- [10] 孙俊博,解大,娄宇成,等.充放储一体化电站的黑启动方案[J].电力系统保护与控制,2015,43(5):43-50.  
SUN Junbo, XIE Da, LOU Yucheng, et al. Black-start scheme for charging-discharging-storage integrated station[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 43-50.
- [11] 孙洁,王增平,王英男,等.含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J].电力系统保护与控制,2014,42(2):56-62.  
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,

- 2014, 42(2): 56-62.
- [12] 李振坤, 周伟杰, 钱啸, 等. 有源配电网孤岛恢复供电及黑启动策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 67-75.
- LI Zhenkun, ZHOU Weijie, QIAN Xiao, et al. Distribution network restoration and black start based on distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 67-75.
- [13] 牟龙华, 夏明栋, 刘仲, 等. 微电网的黑启动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 32-37.
- MU Longhua, XIA Mingdong, LIU Zhong, et al. Research on black-start for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 32-37.
- [14] MOREIRA C L, RESENDE F O, LOPES J. Using low voltage microgrids for service restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 395-403.
- [15] 孟强, 牟龙华, 许旭锋, 等. 孤立微电网的黑启动策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 59-64.
- MENG Qiang, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Black-start strategy of isolated microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 59-64.
- [16] 黄杏, 金新民, 马琳, 等. 微网离网黑启动优化控制方案[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 182-190.
- HUANG Xing, JIN Xinmin, MA Lin, et al. An optimized island micro-grid black-start control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 182-190.
- [17] 郭文明, 刘仲, 牟龙华. 微电源控制策略及微电网分层管理体系[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 64-70.
- GUO Wenming, LIU Zhong, MU Longhua. Micro-sources control strategies and hierarchy management structure of microgrid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(24): 64-70.
- [18] 周念成, 金明, 王强钢, 等. 串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 13-18.
- ZHOU Niancheng, JIN Ming, WANG Qianggang, et al. Hierarchical coordination control strategy for multi-microgrid system with series and parallel structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 13-18.
- [19] RESENDE F O, GIL N J, LOPES J A. Service restoration on distribution systems using multi-microgrids[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(2): 1327-1342.
- [20] HATZIARGYRIOU N. Operation of multi-microgrids [M]. Wiley-IEEE Press, 2013.
- [21] 陈湘匀. 电力系统黑启动及黑启动电源研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- CHEN Xiangyun. Study on the black start and black start supply of the power system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005.

收稿日期: 2015-08-19; 修回日期: 2016-01-08

作者简介:

杨 苹(1967-), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源并网发电及控制;

许志荣(1989-), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为微电网运行控制; E-mail: 407849739@qq.com

郑群儒(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行控制。

(编辑 周金梅)