

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210710

# 基于储能荷电状态的主从控制微电网离网协调控制策略

张运<sup>1</sup>, 姜望<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 黄晓巍<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 赵上林<sup>2</sup>

(1. 国网盐城市大丰区供电公司, 江苏 盐城 224100; 2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 双碳和新型电力系统建设目标下集成优化资源的微电网将是电网公司实现该目标的重要载体。微电网支持并网或离网运行, 其离网运行可以提高供电可靠性, 这是微电网的重要特性。离网运行的微电网需要合适的稳态控制策略, 以保证微电网的长期稳定运行。目前一些依赖预测信息和采用模糊智能算法的能量管理方法在微电网的长期实际运行中会产生较大的稳态控制误差。为了更好地解决微电网离网运行时电力电量平衡定量的计算问题, 提高微电网离网稳态控制精度, 研究了基于储能电池荷电状态的主从控制微电网离网实时稳态协调控制策略, 提出了微电网离网有功协调控制间歇电源调整、负荷调整、微电网停运等关键操作中储能荷电状态控制节点值的精确工程计算方法。针对实际微电网应用工程开展了协调控制策略的具体应用, 仿真和实际运行证明了所提控制策略和计算方法的有效性。

**关键词:** 微电网; 协调控制策略; 主从控制; 荷电状态; 离网

## Off-grid coordinated control strategy of a master/slave control microgrid based on the state of charge of energy storage

ZHANG Yun<sup>1</sup>, JIANG Wang<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, HUANG Xiaowei<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, ZHAO Shanglin<sup>2</sup>

(1. State Grid Yancheng Dafeng District Electric Power Company, Yancheng 224100, China; 2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** A microgrid which integrates and optimizes resources within the goal of dual-carbon and new power system construction will be an important carrier for grid companies. The microgrid supports grid-connected or off-grid operation, and its off-grid operation can improve the reliability of power supply. This is an important feature of the microgrid. The off-grid microgrid requires a suitable steady-state control strategy to ensure long-term stable operation. At present, some energy management methods that rely on predictive information and use fuzzy intelligent algorithms will produce greater state control error in the actual long-term operation of the microgrid. In order to better solve the problem of quantitative calculation of power and electricity balance during off-grid operation of the microgrid, and to improve the accuracy of off-grid steady-state control, the real-time steady-state coordination of an off-grid microgrid based on master-slave control of the energy storage battery state of charge is studied. The control strategy puts forward an accurate engineering calculation method for the control node value of the energy storage state of charge in key operations such as intermittent power supply adjustment, load adjustment, and microgrid outage in the off-grid active power coordinated control of the microgrid. The specific application of coordinated control strategy is carried out for an actual microgrid application project. Simulation and actual operation prove the effectiveness of the control strategy and calculation method.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. SGJS0000DKJS1901020).

**Key words:** microgrid; coordinated control strategy; master-slave control; state of charge; off-grid

## 0 引言

中国“碳达峰、碳中和”目标的世界宣告和“要

构建以新能源为主体的新型电力系统”目标的提出, 预示着未来电力领域将产生深刻变革。有效集成分布式电源、储能和负荷等资源的微电网将成为电网公司双碳行动的一个重要载体。微电网并网运行时能起到集成优化的效果, 在电网发生故障或检修时, 微电网可切换成离网运行继续保持对负荷的供电,

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目“源网荷储互动的综合能源调控技术研究及应用”(SGJS0000DKJS1901020)

从而提高电网的供电可靠性。同时在一些高海拔、海岛、边防、无电地区,由于地理位置偏远,负荷较少且较为分散,电网覆盖的成本很高,离网型微电网则是一个很好的供电解决方案。

离网运行的微电网内电源基本为风力发电和光伏发电,为了平抑间歇性能源发电的波动性,微电网内需配置储能设备<sup>[1-5]</sup>,除有特殊运行工况外,微电网内基本不再配置燃料电源(如柴油发电机)。微电网的控制技术目前以主从控制和对等控制为主,主从控制相对简单且运行更为可靠稳定<sup>[6-10]</sup>。主从控制模式微电网内的间歇性电源、储能和负荷之间一般都没有通信联系,微电网还需配置上级协调控制系统以保证微电网长时间稳定运行。

目前微电网的离网稳态运行控制策略有多时间尺度的优化调度策略,基于鲁棒优化、概率优化等不确定性方法的调度策略等<sup>[11-21]</sup>,这些方法存在依赖预测信息和大量历史统计数据的问题,增加了能量管理策略的实现复杂度,降低了微电网实际运行中的控制精确性。文献[22-25]研究了基于储能电池荷电状态(State Of Charge, SOC)值的微电网离网控制策略,但还存在缺乏控制策略定量计算方法的问题。本文针对典型的主从控制模式微电网,研究了微电网的工程实用离网协调控制策略定量计算方法,并应用于实际微电网工程,可为主从控制微电网工程建设应用提供参考。

## 1 主从控制模式微电网

主从控制模式微电网的典型结构如图1所示。微电网中的电源含有风力发电和光伏发电,负荷划分为重要负荷和非重要负荷两类,整个微电网配置一套储能。

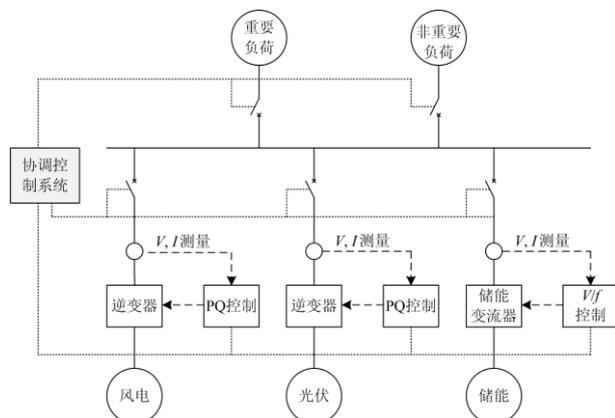


图1 主从控制模式微电网典型结构

Fig. 1 Typical structure of master-slave microgrid

正常运行时,储能单元采取恒压恒频控制(V/f控制),用于稳定微电网母线电压,向微电网中的风力发电和光伏发电提供电压和频率参考,其在微电网控制中起主控作用<sup>[9]</sup>,风力发电和光伏发电则采用功率控制(PQ控制),其在微电网控制中起从控作用。微电网内功率的动态波动由储能来吸收,当电源的功率大于负荷的功率时,储能表现为充电,当电源的功率小于负荷的功率时,储能表现为放电。微电网内的储能控制器、风力发电控制器和光伏发电控制器都根据各自变换器输出端口所测量得到的电压 $V$ 和电流 $I$ 信息进行控制,控制器相互之间没有通信交互。

储能作为微电网内的主控设备,其利用储能变流器的充放电控制实时跟踪微电网内的功率波动。由于储能电池的容量有限,当微电网内的电源功率长期高于负荷功率时,储能电池长期充电将导致电池SOC值逐渐逼近最大极限值,当微电网内的电源功率长期低于负荷功率时,储能电池长期放电将导致电池SOC值逐渐逼近最小极限值。储能电池SOC值达到最大最小极限值时会触发电池管理系统(Battery Management System, BMS)的保护,停止对电池的使用,从而导致微电网失去其主控设备,只能停止运行。因此微电网内还需配置一个上级协调控制系统<sup>[10]</sup>,其采集微电网内的设备信息,进行综合分析判断,对微电网内的电源和负荷及时进行调整,以保证微电网的长期稳定运行。

如图1所示,微电网协调控制系统与风电控制器、光伏控制器、储能控制器、各个支路上的测量仪表等通信获取到支路功率、支路开关状态、电池SOC值、电池直流总电压值等信息,运行于系统上的协调控制程序根据这些信息生成控制结果,由通信下发给相应开关和控制器执行。

## 2 离网协调控制策略

微电网离网协调控制分为有功协调控制和无功协调控制,由于微电网内的无功负荷相对较小,微电网内的无功波动可完全由储能变流器承受,而不需协调部分无功给风电逆变器和光伏逆变器,因此微电网无功协调控制不需设计,风电和光伏逆变器以整功率因数输出运行。

离网有功协调控制策略的核心思想是根据储能电池的剩余电量决定电源和负荷功率的调节方法。协调控制策略中储能电池SOC值的节点设置如图2所示,协调控制的核心内容是确定各个SOC节点值的计算方法和不同SOC节点区间内的操作控制过程。



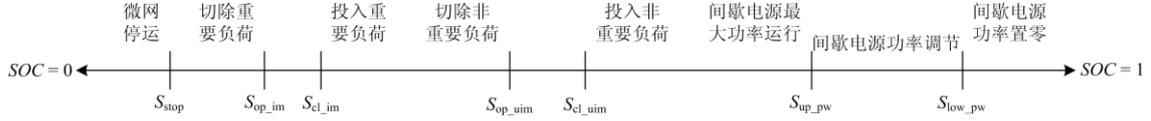


图2 有功协调控制节点设置示意图

Fig. 2 Node settings of active power coordination control

## 2.1 间歇电源调整

储能的SOC值不断增大最终会导致电池保护动作引发微电网停运，因此协调控制需考虑储能的过充保护，在SOC达到一定限值时调整间歇电源，使得SOC值不会达到电池保护动作值。间歇电源的调整涉及到两个定值，即间歇电源功率置零定值 $S_{low\_pw}$ 和间歇电源最大功率运行定值 $S_{up\_pw}$ 。当SOC小于 $S_{up\_pw}$ 时，微电网内的间歇电源都设定为最大功率运行。当SOC大于 $S_{up\_pw}$ 时，开启间歇电源的功率调节，减缓电池的充电速度。当SOC大于 $S_{low\_pw}$ 时，强制将所有间歇电源的输出功率调节至零，使储能电池转换为放电。两个定值的具体计算方法见式(1)和式(2)。

$$S_{low\_pw} = S_{max} - \frac{P_{pw\_max} - P_{self}}{W_N} \times t_{inv} - k_c \quad (1)$$

式中： $S_{max}$ 为储能电池最大SOC值； $P_{pw\_max}$ 为间歇电源最大发电功率总和； $P_{self}$ 为微网站内二次设备的自耗电功率； $t_{inv}$ 为协调控制程序循环执行时间间隔； $W_N$ 为储能电池额定容量； $k_c$ 为过充保护系数，为储能电池额定容量的百分比。

$$S_{up\_pw} = S_{low\_pw} - \frac{P_{ld\_max}}{W_N} \times t_{disc} \quad (2)$$

式中： $P_{ld\_max}$ 为最大负荷功率； $t_{disc}$ 为以功率 $P_{ld\_max}$ 放电使得SOC从 $S_{low\_pw}$ 降低至 $S_{up\_pw}$ 的时间，该值为工程指定，既不能过大(降低间歇电源的利用率，损失经济效益)，也不能过小(造成间歇电源的频繁调整)。

式(1)的物理意义是当储能电池SOC值达到了某个值，若此时间歇电源都满功率发电，则再经过一个循环执行时间间隔后，储能电池SOC值将达到最大SOC值，为了工程的可靠性，引入了系数 $k_c$ 。当SOC大于 $S_{low\_pw}$ 时，协调控制系统向有功可控的间歇电源发送功率给定值零，并断开功率不可控的间歇电源的支路开关，微电网内的间歇电源发电功率将变为零。

式(2)的物理意义是当储能电池SOC值达到 $S_{low\_pw}$ 后，微电网内的间歇电源发电功率都置为零，此时微电网若以最大负荷功率运行，则储能电池经

过 $t_{disc}$ 时间的放电，SOC由 $S_{low\_pw}$ 降到 $S_{up\_pw}$ 。当SOC小于 $S_{up\_pw}$ 时，解除对间歇电源功率的置零，将间歇电源设为最大功率运行。

当电池SOC大于 $S_{up\_pw}$ 时，协调控制系统调节间歇电源的发电功率，降低电池的充电功率，拉长SOC由 $S_{up\_pw}$ 增加到 $S_{low\_pw}$ 的时间，尽量避免SOC达到 $S_{low\_pw}$ 后产生的有功不可控间歇电源支路开关断开操作(间歇电源支路的逆变器交流输出端有可能含有隔离变压器，重新投入时会产生励磁涌流，严重时会导致储能变流器过流保护动作而致微电网停运)。间歇电源发电功率的调节方法为：获取储能变流器的交流出口功率值，若为放电功率，则不用考虑，若为充电功率，则尝试调节有功可控间歇电源功率使该充电功率值降为零，间歇电源功率的设定值参照式(3)计算。

$$\begin{cases} P_{i\_set} = \begin{cases} P_{i\_ref}, & P_{i\_ref} > 0 \\ 0, & P_{i\_ref} \leq 0 \end{cases} \\ P_{i\_ref} = P_i - \frac{P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} P_{char} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_{i\_set}$ 为第 $i$ 个有功可控间歇电源的功率设定值； $P_{i\_ref}$ 为第 $i$ 个有功可控间歇电源的功率设定参考值； $P_i$ 为第 $i$ 个有功可控间歇电源的功率实测值； $n$ 表示有功可控的间歇电源个数； $P_{char}$ 为储能变流器交流出口充电功率。

式(3)是按照单个间歇电源的当前发电功率在间歇电源总发电功率中的权重来分配调整值。由于各个间歇电源和储能功率实测值不能保证同步采样，式(3)的计算精度不高。由于该功率调节是一种趋势控制，对控制精度并没有严格要求，因此式(3)的计算可以接受。

根据上述内容，间歇电源调整的全部行为可描述如下。

当储能SOC大于定值 $S_{up\_pw}$ 时，协调控制程序开始按照式(3)对间歇电源发电功率进行调节。受通过通信采集底层设备数据的限制，协调控制程序的循环执行时间间隔不会很快，一般为10s以上，这

期间间歇电源的功率会产生波动,且微电网内可能存在有功不可控间歇电源,因此储能 SOC 值仍可能上升,但其速度会被减缓,当储能 SOC 上升到大于  $S_{low\_pw}$  时,有功可控的间歇电源功率给定将设为零,有功不可控的间歇电源支路开关将被断开。在整个过程中,若 SOC 重新降低至  $S_{up\_pw}$  之下,则恢复所有间歇电源的最大功率发电。

## 2.2 微电网停运

由于微电网离网运行时没有电网连接,在没有备用电源(如柴油发电机)时,若储能 SOC 值逐渐逼近电池最小 SOC 值,需考虑将微电网停运,保留部分电池电量,为今后的微电网正常开机保留可能。当储能 SOC 值小于微电网停运  $S_{stop}$  定值时,协调控制程序停运微电网。定值的计算方法见式(4)。

$$S_{stop} = S_{min} + k_t \quad (4)$$

式中:  $S_{min}$  为储能电池最小 SOC 值;  $k_t$  为停运保电系数,为储能电池额定容量的百分比。

## 2.3 负荷调整

储能的 SOC 值不断减小最终会导致微电网停运,因此协调控制需考虑储能的过放保护,在 SOC 达到一定限值时调整负荷使得 SOC 值不会降低到微电网停运定值。负荷调整包括非重要负荷和重要负荷的调整。重要负荷调整涉及到两个定值,即切除重要负荷定值  $S_{op\_im}$  和投入重要负荷定值  $S_{cl\_im}$ 。

当 SOC 小于  $S_{op\_im}$  时,切除重要负荷,微电网处于间歇电源最大功率运行和无用户负荷状态,使储能电池以最快速度充电。当 SOC 大于  $S_{cl\_im}$  时,重新投入重要负荷,  $S_{op\_im}$  与  $S_{cl\_im}$  形成了重要负荷投切的滞环,避免形成“投切振荡”。非重要负荷调整也涉及到两个定值,即切除非重要负荷定值  $S_{op\_uim}$  和投入非重要负荷定值  $S_{cl\_uim}$ ,其操作原理与重要负荷调整相类似。负荷调整四个定值的计算方法见式(5)一式(8)。

$$S_{op\_im} = S_{stop} + \frac{P_{im\_max}}{W_N} \times t_{inv} + \frac{P_{self}}{W_N} \times t_{self} + k_f \quad (5)$$

式中:  $P_{im\_max}$  为最大重要负荷功率;  $t_{self}$  为重要负荷切除后若间歇电源发电功率为零,电池 SOC 在到达  $S_{stop}$  之前可供微电网站内二次设备自耗电负荷运行的时间,该值为工程指定;  $k_f$  为过放保护系数,为储能电池额定容量的百分比。

$$S_{cl\_im} = S_{op\_im} + \frac{P_{im\_max}}{W_N} \times t_{im\_disc} \quad (6)$$

式中,  $t_{im\_disc}$  为以功率  $P_{im\_max}$  放电使得 SOC 从  $S_{cl\_im}$

降低至  $S_{op\_im}$  的时间,该值为工程指定,其值的大小决定了重要负荷投切滞环的宽度。

$$S_{op\_uim} = S_{cl\_im} + \frac{P_{uim\_max}}{W_N} \times t_{im} \quad (7)$$

式中,  $t_{im}$  为以功率  $P_{im\_max}$  放电使得 SOC 从  $S_{op\_uim}$  降低至  $S_{cl\_im}$  的时间,该值为工程指定,其值的大小决定了重要负荷投切滞环与非重要负荷投切滞环的距离。

$$S_{cl\_uim} = S_{op\_uim} + \frac{P_{uim\_max}}{W_N} \times t_{uim\_disc} \quad (8)$$

式中:  $P_{uim\_max}$  为最大非重要负荷功率;  $t_{uim\_disc}$  为以功率  $P_{uim\_max}$  放电使得 SOC 从  $S_{cl\_uim}$  降低至  $S_{op\_uim}$  的时间,该值为工程指定,其值的大小决定了非重要负荷投切滞环的宽度。

式(5)的形成与式(1)相似,只是增加了一项,需考虑微电网在间歇电源发电功率为零时储能 SOC 值跌落至  $S_{stop}$  定值之前可维持微电网内二次设备自耗电负荷的时间。

综上所述,主从控制微电网离网有功协调控制策略如表 1 所示。

表 1 有功协调控制策略

SOC	控制策略
$SOC > S_{low\_pw}$	间歇电源功率置零
$S_{low\_pw} > SOC > S_{up\_pw}$	间歇电源功率调节
$SOC < S_{up\_pw}$	间歇电源作大功率运行
$SOC > S_{cl\_uim}$	投入非重要负荷
$SOC < S_{op\_uim}$	切除非重要负荷
$SOC > S_{cl\_im}$	投入重要负荷
$SOC < S_{op\_im}$	切除重要负荷
$SOC < S_{stop}$	停运微电网

## 3 微电网工程应用

用于本文控制策略验证的实际微电网系统结构如图 3 所示,采用单母线 380 V 三相网架结构,含有两路风电支路(各 10 kW),两路光伏支路(各 15 kW),一路储能支路(864 kWh, 100 kW),一路重要负荷支路(为乡政府、卫生院、学校等供电),一路非重要负荷支路(为居民供电)。重要负荷最大功率估算为 10 kW,非重要负荷最大功率估算为 70 kW。

该微电网配置一套微电网监控系统,实现数据采集、数据管理、通信管理、设备控制、故障告警、协调控制等功能,协调控制作为一个独立的模块嵌入监控系统中。

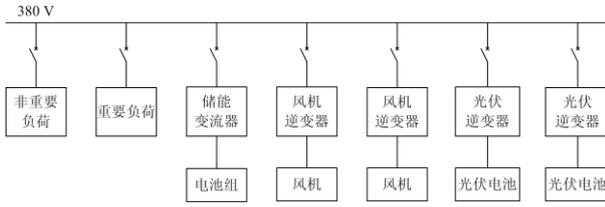


图3 实际工程微电网结构示意图

Fig. 3 Structure of the actual microgrid

该微电网协调控制定值的具体计算如下。根据设备信息得到  $W_N$  为 864 kWh,  $P_{pw\_max}$  为 50 kW,  $P_{im\_max}$  为 10 kW,  $P_{uim\_max}$  为 70 kW,  $P_{self}$  根据测量为 0.5 kW,  $P_{ld\_max}$  为重要负荷、非重要负荷和自耗电功率之和, 计算得到 80.5 kW; 由 BMS 的技术手册得到  $S_{max}=0.99$  及  $S_{min}=0.2$ ; 根据 BMS 的 SOC 估算精度小于 8%,  $k_c$  取 0.13,  $k_f$  取 0.08,  $k_t$  取 0.15;  $t_{inv}$  取 5 min,  $t_{disc}$  取 30 min,  $t_{self}$  取 48 h,  $t_{im\_disc}$  取 4 h,  $t_{im}$  取 12 h,  $t_{uim\_disc}$  取 1 h。根据上述数据计算得到:  $S_{stop}=0.35$ ,  $S_{op\_im}=0.45$ ,  $S_{cl\_im}=0.5$ ,  $S_{op\_uim}=0.64$ ,  $S_{cl\_im}=0.72$ ,  $S_{up\_pw}=0.8$ ,  $S_{low\_pw}=0.85$ 。

结合上述协调控制定值的设置, 对该微电网进行 PSCAD/EMTDC 仿真, 以验证协调控制策略的有效性。由于微电网规模较小, 线路参数可忽略不计, 重要负荷和非重要负荷用电阻模拟, 50 kW 的间歇电源用一路 25 kW 功率可控电源和一路 25 kW 功率不可控电源模拟, 为了模拟对可控电源的功率调节, 设定重要负荷为 7.3 kW, 非重要负荷为 29 kW。电源和储能的直流端均用直流电源模拟, 以简化仿真模型, 其并不影响协调控制策略的验证。由于储能电池 SOC 的变化很缓慢, 仿真中直接给定 SOC 的变化曲线, 仿真时长 5 s, 步长 20  $\mu$ s。

仿真波形如图 4 所示, SOC 为给定的电池 SOC 曲线,  $P_{ss}$  为储能变流器有功,  $P_{dg1}$  为可控电源的有功,  $P_{dg2}$  为不可控电源的有功,  $P_{il}$  为重要负荷的有功,  $P_{nil}$  为非重要负荷的有功,  $U_a$  为微电网母线 A 相电压的幅值,  $f$  为微电网的频率。1 s 之前属于微电网启动阶段: 0.3 s 之前为储能启动, 电源和负荷都未投入, 0.3 s 时投入重要负荷, 0.4 s 时投入非重要负荷, 0.5 s 时投入可控电源, 0.7 s 时投入不可控电源。1 s 之后进入协调控制阶段: 1.5 s 时 SOC 为 0.81, 调节可控电源; 2 s 时 SOC 为 0.86, 切除不可控电源; 2.5 s 时 SOC 为 0.79, 可控电源和不可控电源都恢复最大功率运行; 3 s 时 SOC 为 0.63, 切除非重要负荷; 3.5 s 时 SOC 为 0.44, 切除重要负荷; 4 s 时 SOC 为 0.51, 投入重要负荷; 4.5 s 时

SOC 为 0.73, 投入非重要负荷。从  $U_a$  和  $f$  的波形来看, 每个控制发生后, 都会产生一个持续时间很短的小扰动。

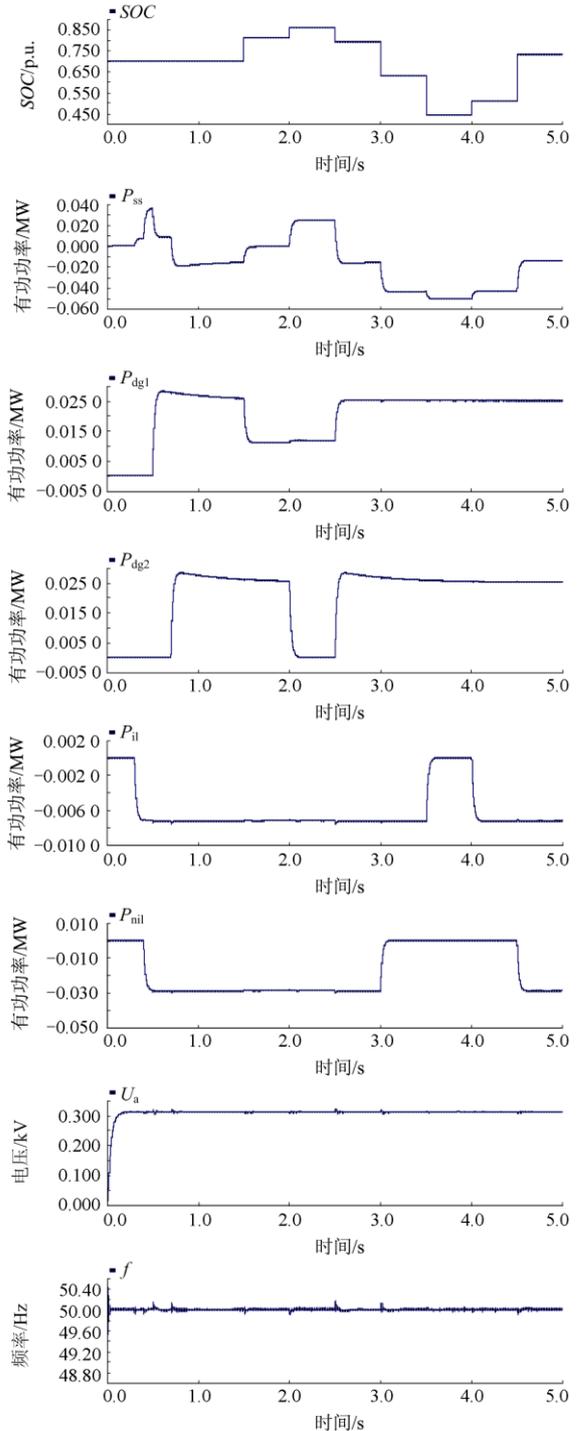


图4 协调控制仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms of coordination control

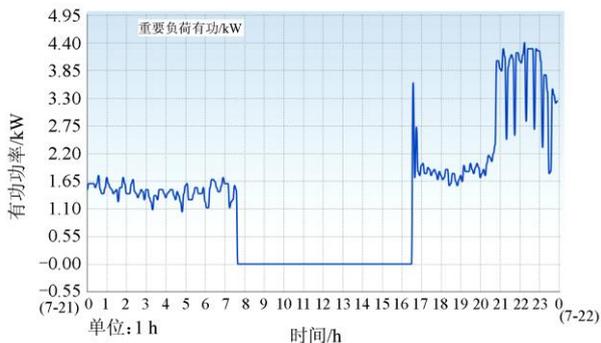
该微电网实际工程已正式投入运行(如图 5 所示)。前期微电网中的光伏和风力发电都为不可控电

源, 非重要负荷的供电线路尚未铺设完毕, 只为重要负荷供电。由于光伏尚未满功率安装, 而风力发电量较少, 发生过几次重要负荷的投切操作, 如图 6 所示。后期光伏满功率安装后, 发电量充足, 发生过几次电源的投切操作, 如图 7 所示, 图中只示出了光伏 1 和风机 1, 光伏 2 和风机 2 与其类似。



图 5 微电网现场

Fig. 5 Scene of microgrid



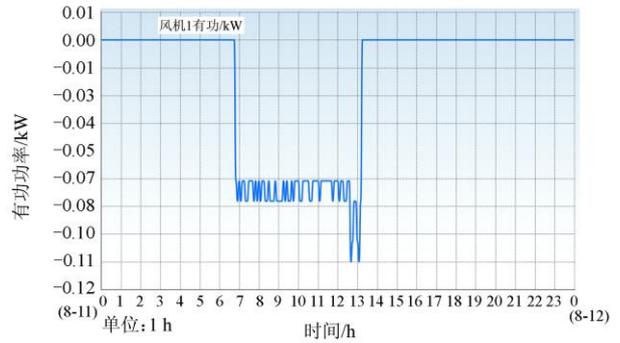
(a) 重要负荷有功功率



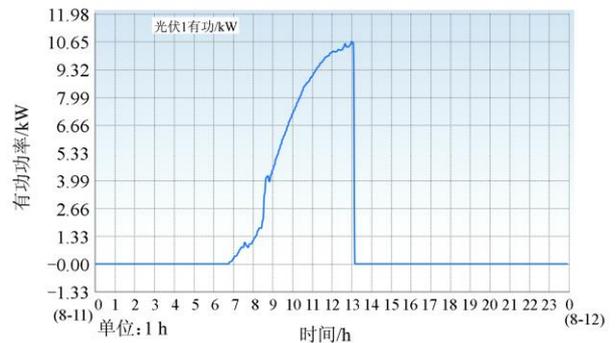
(b) 电池SOC

图 6 微电网中的重要负荷投切

Fig. 6 Switch on/off of important load in actual microgrid



(a) 风机1有功功率



(b) 光伏1有功功率



(c) 电池SOC

图 7 微电网中的电源投切

Fig. 7 Switch on/off of power in actual microgrid

实际微电网工程投入运行以来的现场运行表明, 微电网协调控制策略是有效的、实用的。

## 4 结论

本文分析了主从控制微电网建设的典型结构, 针对典型结构研究了离网运行时的微电网协调控制策略, 可以保障微电网长时间稳定运行。在实际的主从控制离网运行微电网工程中, 本文的协调控制策略得到了应用, 实施效果证明了控制策略的有效性, 可以为主从控制离网运行微电网的工程建设提供技术借鉴。

参考文献

[1] 唐西胜, 邓卫, 李宁宁, 等. 基于储能的可再生能源微电网运行控制技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 99-103.  
TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning, et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 99-103.

[2] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 95-100.  
LIU Xia, JIANG Quanyuan. An optimal coordination control of hybrid wind/photovoltaic/energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 95-100.

[3] 徐玉琴, 方楠. 基于稳压控制的独立光储微电网控制策略研究及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 67-74.  
XU Yuqin, FANG Nan. Control strategy research and simulation analysis of an independent optical storage microgrid based on voltage stabilizing control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 67-74.

[4] 刘瑞明, 王生铁, 刘广忱, 等. 基于虚拟阻抗的孤岛交流微电网混合储能控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 116-123.  
LIU Ruiming, WANG Shengtie, LIU Guangchen, et al. Research on control strategy of hybrid energy storage in islanded AC micro-grid based on virtual impedance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(14): 116-123.

[5] KANVHEC H, DI L, COLAS F. Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4583-4592.

[6] 王岳, 杨国华, 庄家懿, 等. 基于一致性算法的微电网无差调频控制策略[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 187-191.  
WANG Yue, YANG Guohua, ZHUANG Jiayi, et al. Zero-error frequency regulation control method for microgrids based on consensus algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 187-191.

[7] BADAL F, DAS P, SARKER S, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113.

[8] 王立地, 吴登盛, 周志巍, 等. 用户级微电网实验平台研究与设计[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(3): 1-6.  
WANG Lidi, WU Dengsheng, ZHOU Zhiwei, et al. Research and design of user-level microgrid experiment platform[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(3): 1-6.

[9] CASSIUS R, GUILHERME H, RICARDO Q, et al. An adaptive power sharing control for management of DC microgrids powered by fuel cell and storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3726-3735.

[10] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微电网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.  
WANG Chengshan, YANG Zhangang, WANG Shouxiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.

[11] 窦晓波, 徐恣慧, 董建达, 等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 48-55.  
DOU Xiaobo, XU Minhui, DONG Jianda, et al. Multi-time scale based improved energy management model for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 48-55.

[12] BAO Z, ZHOU Q. A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution—part I: model and methodology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(5): 2257-2266.

[13] 张倩, 丁津津, 刘童, 等. 基于满意度原理的光柴储微电网系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 88-95.  
ZHANG Qian, DING Jinjin, LIU Tong, et al. Optimal operation of PV-diesel-battery microgrid based on satisfying degree[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 88-95.

[14] 周成, 芮涛, 王群京. 基于模型预测控制的微电网多目标协调优化[J]. 电测与仪表, 2019, 56(22): 44-50.  
ZHOU Cheng, RUI Tao, WANG Qunjing. Multi objective coordination optimization of micro-grid based on model predictive control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 44-50.

[15] 刘青, 赵洋, 李宁, 等. 基于分布式神经动力学算法的微电网多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 105-114.  
LIU Qing, ZHAO Yang, LI Ning, et al. Multiple objective optimization of a microgrid based on a distributed neural

- dynamics algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 105-114.
- [16] XU G, SHANG C, FAN S, et al. A hierarchical energy scheduling framework of microgrids with hybrid energy storage systems[J]. IEEE Access, 2017, 6: 2472-2483.
- [17] MURTY V, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20.
- [18] 孙瑛爽, 罗聪, 葛乐矣. 基于确定性解法的新能源微电网经济运行优化[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 149-155.  
SUN Yingshuang, LUO Cong, GE Leyi. Economic operation optimization for new energy microgrid based on deterministic method[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 149-155.
- [19] FIRUZI M, ROOSTA A, GITIZADEH M. Stability analysis and decentralized control of inverter-based AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 65-86.
- [20] 赵佳, 孟润泉, 王磊, 等. 考虑预测误差下孤岛直流微电网的经济调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(6): 68-76.  
ZHAO Jia, MENG Runquan, WANG Lei, et al. Economic dispatching strategy of the isolated DC microgrid considering prediction error[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6): 68-76.
- [21] SIDUN F, YAN X, ZHENGMAO L, et al. Two-step multi-objective management of hybrid energy storage system in all-electric ship microgrids[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3361-3373.
- [22] 赵波, 张雪松, 李鹏, 等. 储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 161-167.  
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, LI Peng, et al. Optimal design and application of energy storage system in Dongfushan island stand-alone microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 161-167.
- [23] 姚莉娜, 杨东海, 段运鑫. 微电网离网运行缺额计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 137-144.  
YAO Lina, YANG Donghai, DUAN Yunxin. A calculation method of active power shortage in off-grid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 137-144.
- [24] 郝飞, 袁贞, 袁志彬, 等. 离网型微电网稳态功率控制策略研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 174-179.  
HAO Fei, YUAN Zhen, YUAN Zhibin, et al. Research and practice on off-grid microgrid steady power control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 174-179.
- [25] 董继军, 陈浩, 周雪松, 等. 直流微电网孤岛运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 115-121.  
DONG Jijun, CHEN Hao, ZHOU Xuesong, et al. Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 115-121.

收稿日期: 2021-06-16; 修回日期: 2021-08-13

作者简介:

张运(1978—), 男, 学士, 高工, 主要研究方向为微电网运行控制技术; E-mail: jbdlgs@163.com

张超(1984—), 男, 学士, 高工, 主要研究方向为配电网规划;

陈曦(1984—), 男, 硕士, 高工, 主要研究方向为电力调度技术。

(编辑 张爱琴)