

# 微电网中储能运行模式自发切换的对策研究

张程翔<sup>1</sup>,汪科<sup>1</sup>,陆莹<sup>1</sup>,贺军<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014;

2. 杭州意能电力技术有限公司,浙江 杭州 310014)

**摘要:**十三五期间,新能源建设由集中式光伏电站向分布式光伏全面推进,构建含储能的微电网成为消纳分布式光伏的有效运行方式。依托浙江某分布式能源示范工程,通过储能系统主、从PCS分散控制及顺控同期并网策略实现光储微电网的并/离网平滑切换。但在切换试验时发现,由于各分系统之间的通讯延时与内部计算延时,微电网并网后储能主PCS充放电运行模式自发切换,电流骤增并触发限功率运行。通过建立储能等效模型与理论分析,提出避免限功率运行及减小大电流充电时间的对策,并对工程进行回路改造与软件升级后再次并网。试验结果验证所提对策可有效提高此分布式能源示范工程运行安全性与经济性,亦对今后实际微电网工程具有借鉴意义与指导作用。

**关键词:**微电网;储能运行模式自发切换;限功率运行;分系统延时;安全经济运行

**中图分类号:**TM76 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21684

## Research on Countermeasures for Spontaneously Mode Switching of Energy Storage System in Microgrid

ZHANG Chengxiang<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1</sup>, HE Jun<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Electric Power Research Institute of State Grid Corporation Limited, Hangzhou 310014,

Zhejiang, China; 2. Hangzhou Yineng Electric Power Technology Corporation Limited,

Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

**Abstract:** During the 13th five-year plan period, the construction of new energy has been promoted from centralized photovoltaic power stations to distributed photovoltaics. Thus, microgrid with energy storage system is becoming an effective way to consume distributed photovoltaics. In a distributed energy demonstration project in Zhejiang province, the seamless switch of photovoltaic-storage microgrid operation mode was realized by decentralized control of master-slave PCS in energy storage system and sequential synchronous grid connection strategy. However, in the project testing, there are communication delays and calculation delays between actual engineering subsystems, which result in the main PCS mode switching spontaneously after grid connected. Then, the current surges and triggers the energy storage system power-limited operation. By establishing the energy storage equivalent model and conducting theoretical analysis, the countermeasures were proposed to avoid power-limited operation and shorten the charging time of energy storage system. Grid-connection was retested after the circuit modification and the software update. The test results verify that the proposed countermeasures not only effectively improve the safety and economy of this project, but also have great reference significance as well as guiding role for actual microgrid project in the future.

**Key words:** microgrid; spontaneously mode switching of energy storage system; power-limited operation; subsystem delay; safe and economic operation

十三五期间,我国非化石能源消费占比已达15%以上,新能源发展重心由集中式光伏电站向

分布式光伏全面推进<sup>[1-2]</sup>,但分布式光伏过快的装机增量给电网带来的随机性与间歇性,使其消纳

**基金项目:**国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS180036);杭州意能电力技术有限公司科技项目(EPRD2019-04)

**作者简介:**张程翔(1992—),男,硕士,工程师,Email:1576859620@qq.com

成为难点问题。储能系统调节灵活,能有效应对光伏的随机出力<sup>[3-5]</sup>,并可对负荷曲线削峰填谷,搭配分布式光伏构建成微电网系统,成为提高配网侧分布式能源渗透率的有效运行方式<sup>[6-8]</sup>。因此,在当前分布式光伏急速增长的时期,研究含光储的微电网系统具有重要意义。

微电网系统并/离网平滑切换是其运行中的关键技术,国内外专家学者已就此做出诸多研究。文献[9-10]基于相位预同步控制策略,将VF控制与PQ控制相互闭环跟踪,实现微电网离/并网转换瞬间储能变流器的平滑切换。文献[11]提出一种可同时适用于直流与交流微电网的改进型电压外环调节方法,在并/离网切换前重置PI调节器输出需求,较好地解决了切换瞬间交、直流母线电压波动的问题。文献[12]将储能变流器电流内环输出反馈给电压环,并利用软件锁相方法使微电网模式切换前后电压外环稳态输出保持不变,从而维持母线电压恒定。文献[13]对非计划离网时的储能电压采用积分控制,可适用于主从控制与对等控制结合的光储微电网并/离网平滑切换。文献[14]用线性自抗扰控制器替代主控单元电压外环控制器,对扰动进行实时估计,并主动补偿电流内环参考值,达到快速消除微电网非计划离网过程中扰动的效果,但文章未对离网转并网过程进行研究。此外,上述研究均将主控单元变流器理想化,未考虑实际工程中各分系统内部、分系统之间延时对微电网离/并网切换过程造成的影响。

以浙江某分布式能源示范工程为依托,对光储微电网进行并/离网切换试验。结果验证该光储微电网在并/离网模式之间相互切换时电压无明显波动且超调时间短。但观察录波装置发现,即使并网后微电网内部存在功率缺额,储能主变流器仍自发地由放电状态切换为充电状态,随后触发限功率运行,进一步增大了联络线上的负荷压力,折损设备使用寿命,而且存在安全隐患。通过建立储能系统等效模型与理论分析,确定此异常运行原因为分系统内部及分系统之间的各类工程延时。针对储能运行模式自发切换与功率波动采取改进对策,可有效提升此工程运行安全性与经济性。

## 1 微电网系统

### 1.1 微电网拓扑结构

此示范工程在原380 V配电系统的基础上扩

建,新增一条380 V交流母线,将原系统中部分办公负荷、空调负荷、设备电源负荷改接至新母线,并增设晶硅光伏与集装箱式储能系统。通过分/合同期装置的进线开关实现与配网的并网或隔离,由此构建含光储的微电网系统,其拓扑如图1所示。

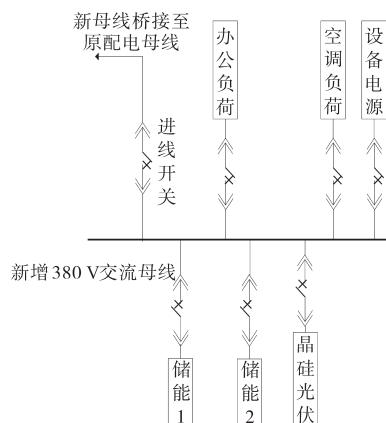


图1 新增微电网系统拓扑图

Fig.1 The topology of new microgrid system

### 1.2 储能系统

集装箱式储能系统内两组电池堆并行运行,分别经两台功率变换系统(power conversion system, PCS)接入380 V微电网交流母线。每堆电池中三簇电池簇通过汇流柜并联,每簇均由19个电池模块依次首尾串联构成,储能系统结构图如图2所示。图中,PCS包含AC/DC双向变流器与控制单元。在储能系统交流断路器母线侧实时监测母线电压与PCS输出电流,并通过录波装置记录微电网并/离网切换瞬间的波形图。

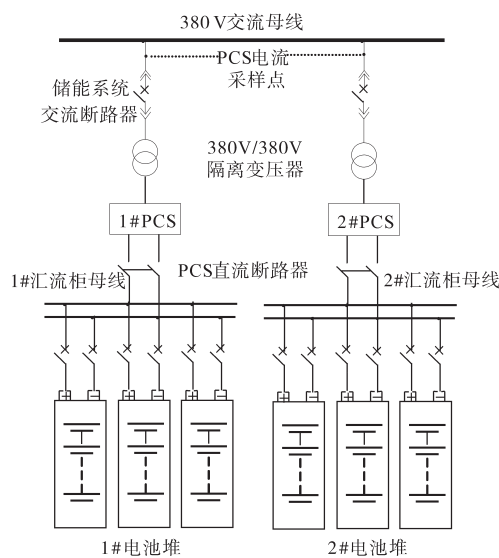


图2 储能系统结构图

Fig.2 The structure chart of energy storage system

储能系统参数如下:额定功率250×2 kW;额

定容量  $525.3 \times 2 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ; 直流电压上限  $900 \text{ V}$ , 下限  $580 \text{ V}$ ; 额定电流  $367 \times 2 \text{ A}$ ; 功率因数  $-0.99 \sim 0.99$ 。

### 1.3 微电网控制策略

微电网采用主从控制策略: 并网运行时储能系统与晶硅光伏均采用 PQ 控制; 离网运行时一台以 VF 控制运行的主 PCS 为微电网提供电压、频率基准, 另一台 PCS 与光伏逆变器继续保持 PQ 控制运行。

当微电网需离网运行时, 储能系统采用分散控制。率先指定一台主 PCS 切换至 VF 控制并待机, 另一台辅 PCS 继续以 PQ 控制运行, 随后分进线开关; 当离网微电网向配电系统并网时, 集控站采用顺控并网操作, 流程如图 3 所示。图中 ECS(electrical control system) 为电气控制系统。

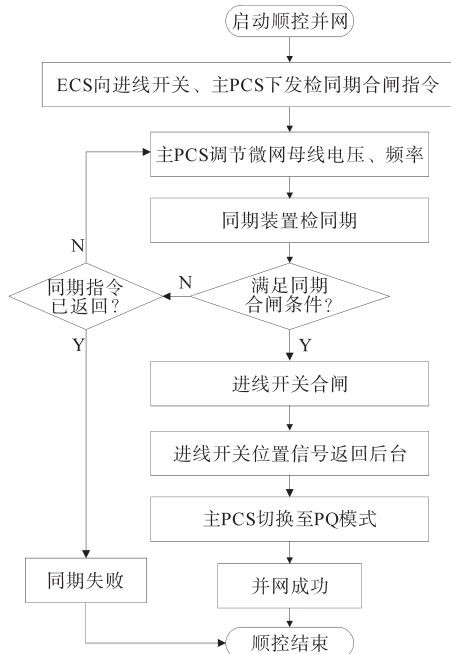


图3 离网微电网顺控并网流程图

Fig.3 The flow diagram of sequential control when off-grid microgrid connects to grid

## 2 微电网并/离网切换

微电网作为消纳分布式新能源的重要载体, 其并/离网切换是运行中的关键环节。对本工程微电网进行并/离网切换试验, 检验切换过程是否平滑, 且储能系统是否具备支撑微电网短时离网运行的能力。

微电网并网转离网试验前设定储能 1#PCS 为 VF 控制并待机, 2#PCS 为 PQ 控制, 放电功率  $P_{\text{pcs}2} = 50 \text{ kW}$ , 晶硅光伏采用最大功率点跟踪法确定其出力  $P_{\text{pv}}$ 。设置 1#PCS 在离网转并网后切换

回 PQ 控制, 放电功率为  $0 \text{ kW}$ 。试验中微电网内部负荷工况以及联络线上功率如下: 光伏发电  $P_{\text{pv}} = 11.6 \text{ kW}$ , 办公负荷  $P_{\text{Lwork}} = 14.7 \text{ kW}$ , 空调负荷  $P_{\text{Lrvv}} = 107.6 \text{ kW}$ , 设备负荷  $P_{\text{Ldevice}} = 12.1 \text{ kW}$ , 联络线功率  $P_{\text{line}} = 72.7 \text{ kW}$ 。故微电网并网运行时总负荷  $P_{\text{L}} = P_{\text{Lwork}} + P_{\text{Lrvv}} + P_{\text{Ldevice}} = 134.4 \text{ kW}$ , 总电源  $P_{\text{G}} = P_{\text{pv}} + P_{\text{pcs}2} = 61.6 \text{ kW}$ 。易得微电网仍需通过联络线从配网吸收功率  $P_{\text{line}} = 72.7 \text{ kW}$ 。

### 2.1 微电网并网转离网运行

微电网并网转离网瞬间, 交流母线三相电压有微弱波动, 幅值衰减  $9.34\%$ , 持续  $0.143 \text{ s}$  后波形立即恢复正常, 如图 4 所示。此外, 离网瞬间微电网失去了联络线功率, 1#PCS 还需承担微电网内部功率缺额, 因此放电电流呈现暂态尖峰但迅速稳定。以  $a$  相为例, 波形如图 5 所示。

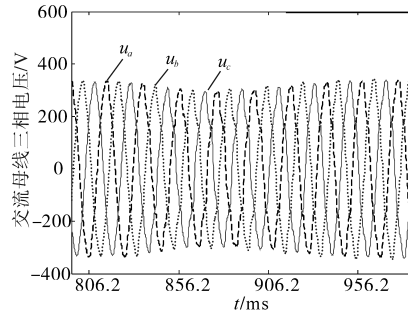


图4 并转离瞬间微电网交流母线电压波形

Fig.4 AC bus voltage at the instant of on-grid microgrid to off-grid

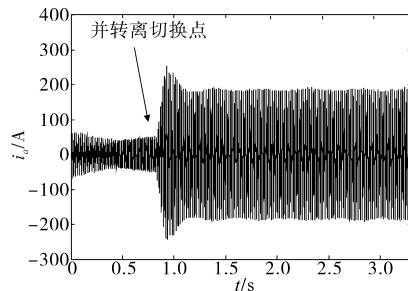


图5 并转离瞬间1#PCS电流波形图

Fig.5 1#PCS current at the instant of on-grid microgrid to off-grid

由图 4 与图 5 易得, 微电网可由并网向离网平滑切换, 且能稳定离网带载运行。

### 2.2 微电网离网转并网运行

离网转并网瞬间交流母线电压波形如图 6 所示, 保持 2#PCS 放电功率不变, 离网微电网通过顺控操作并网, 电压波形在并网前后无明显波动, 实现无缝切换。

但录波装置显示, 微电网进线开关合闸后, 储能主 PCS 电流先降低, 随后显著增长, 最终稳定在额定电流。图 7 为离网转并网瞬间 1#PCS 电

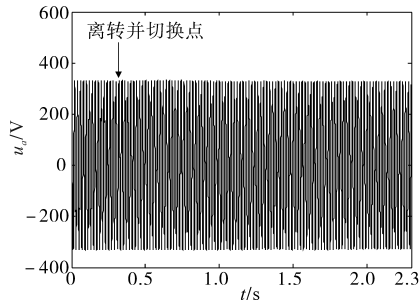


图6 离转并瞬间交流母线电压波形  
Fig.6 AC bus voltage at the instant of off-grid microgrid to on-grid (phase a)

流波形,当顺控并网流程结束,且1#PCS从VF控制切换回PQ控制后, $i_a$ 才回落至正常值,整个过程持续4.153 s。因此,微电网虽可以平滑并网,但1#PCS电流自发性骤升,导致储能功率异常升高,最终触发限功率运行,属于非正常运行状况。

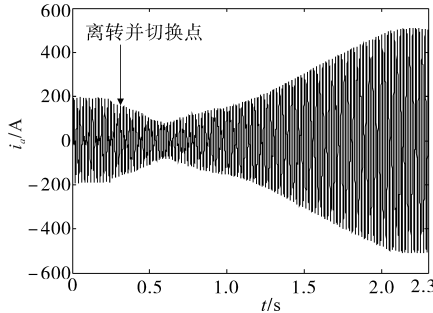


图7 离转并瞬间1#PCS电流波形  
Fig.7 1# PCS current at the instant of off-grid microgrid to on-grid

### 3 储能变流器功率波动研究

为探究储能功率波动的原因,进一步分析微电网并网后母线电压与1#PCS电流相位关系,以a相为例,电流衰减时和电流增长时交流母线侧波形分别如图8、图9所示。

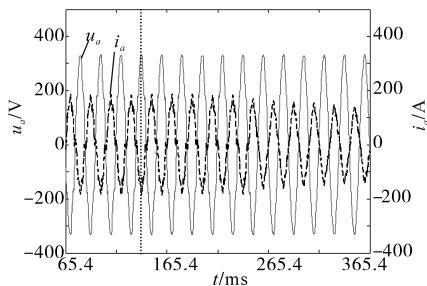


图8 电流衰减时交流母线侧a相波形图  
Fig.8 Phase a waveforms at AC bus-side when current attenuation

图8中微电网并网前,因内部功率需实时平衡,储能系统运行在放电模式。此时母线电压与1#PCS电流反向,相位差接近180°。并网后交流母线电压无波动,1#PCS电流逐渐减小,但与母线

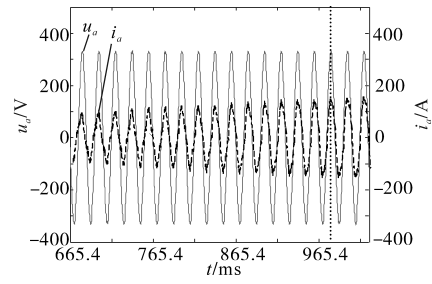


图9 电流增长时交流母线侧a相波形图  
Fig.9 Phase a waveforms at AC bus-side when current growth

电压相位差保持不变,说明此阶段中储能系统仍处在放电模式。当电流穿越最低点开始升高时,图9显示1#PCS电流相位接近改变180°,开始略滞后于母线电压。由此,1#PCS从放电模式转换为充电模式,同时电流逐渐增加,导致联络线功率进一步升高。

储能系统等效模型如图10所示。

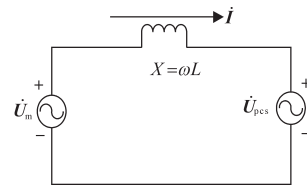


图10 1#PCS与380 V交流母线等效电路模型  
Fig.10 The equivalent model of 1#PCS and 380 V AC bus

图10中, $\dot{U}_m$ 为交流母线相电压,即采样电压, $\dot{U}_{pcs}$ 为1#PCS输出相电压, $X$ 为交流母线与1#PCS之间隔离变压器的等效电抗, $\dot{i}$ 为1#PCS电流,即采样电流,并规定图中箭头方向为采样电流正方向。其数学模型如下式:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{pcs} + j\omega L \dot{i} \quad (1)$$

设 $\dot{U}_m$ 与 $\dot{U}_{pcs}$ 的相角分别为 $\varphi_m$ 与 $\varphi_{pcs}$ ,则二者相角差为 $\delta = \varphi_m - \varphi_{pcs}$ ,由式(1)可得:

$$\begin{aligned} \dot{i} &= \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_{pcs}}{j\omega L} \\ &= \frac{1}{\omega L} (U_m \sin\varphi_m - U_{pcs} \sin\varphi_{pcs}) - \\ &\quad j \frac{1}{\omega L} (U_m \cos\varphi_m - U_{pcs} \cos\varphi_{pcs}) \end{aligned} \quad (2)$$

故在规定的电流正方向下,储能系统通过PCS向配电系统输出的三相视在功率 $\dot{S}_{pcs}$ 为

$$\begin{aligned} \dot{S}_{pcs} &= P + jQ = 3\dot{U}_{pcs} \cdot (-\dot{i}^*) \\ &= -\frac{3U_{pcs}}{\omega L} [U_m \sin\delta + j(U_m \cos\delta - U_{pcs})] \end{aligned} \quad (3)$$

其有功与无功功率 $P, Q$ 分别为

$$P = -\frac{3U_{pcs}}{\omega L} U_m \sin\delta \quad (4)$$

$$Q = \frac{3U_{pcs}(U_{pcs} - U_m \cos \delta)}{\omega L} \quad (5)$$

由式(4)易得,PCS充放电模式取决于相角差 $\delta$ 。当 $\dot{U}_m$ 相位超前 $\dot{U}_{pcs}$ ,即 $\delta > 0$ 时, $P < 0$ ,PCS处于充电状态;同理,当 $\dot{U}_m$ 相位滞后 $\dot{U}_{pcs}$ 时, $\delta < 0$ ,PCS处于放电状态。

微电网并网前,同期装置设定的准同期频率为49.95 Hz,即1#PCS调整微电网交流母线电压频率:

$$f_m = f_{pcs} = 49.95 < f_g = 50 \quad (6)$$

式中: $f_m$ 为微电网交流母线频率; $f_{pcs}$ 为1#PCS输出电压频率; $f_g$ 为配网频率。

当同期合闸成功但合位信号未返回之前,微电网交流母线的电压与频率已受配网钳制,而仍运行于VF控制的1#PCS成为孤立电源,与配网共同运行。此后,由于 $\dot{U}_{pcs}$ 频率小于 $\dot{U}_m$ ,致使 $\dot{U}_{pcs}$ 围绕 $\dot{U}_m$ 顺时针旋转,作电压矢量图,如图11所示。

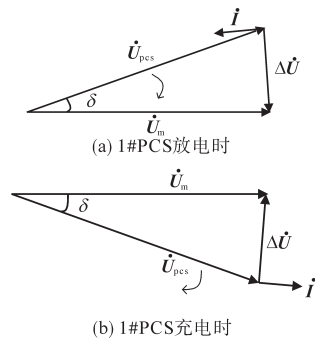


图11 1#PCS充、放电时输出电压与交流母线电压矢量图

Fig.11 The vector diagram of 1# PCS voltage and AC bus voltage when charging or discharging

图11中, $\Delta\dot{U}$ 为微电网交流与1#PCS的电压矢量差,由于回路仅含感性电抗,故作滞后于 $\Delta\dot{U}$  90°的回路电流*i*。微电网经检同期并网,实际 $\dot{U}_{pcs}$ 与 $\dot{U}_m$ 幅值略有差异,但 $\delta$ 很小,因此,并网后1#PCS在放电时*i*与 $\dot{U}_m$ 反向,充电时*i*与 $\dot{U}_m$ 同向。

综上,当微电网由离网切换至并网运行后, $\delta$ 逐渐由负转正,发生过零点跃变,使*i*的方向发生改变,导致运行于VF控制的1#PCS从放电状态自发切换至充电状态。同时,由于回路阻抗小,随着 $\dot{U}_{pcs}$ 的旋转,*i*先减小后骤增,即使 $\delta$ 在零点时,微小的电压幅值差也将产生不可忽略的回路电流。加之进线开关合位信号在分系统间传输存在延时,所以在1#PCS切换回PQ控制模式前,*i*将达到额定电流,触发储能系统限功率运行。

## 4 对策研究

经研究分析,储能运行模式自发切换与功率波动的根本原因在于微电网并网后储能PCS无法从VF控制及时更新为PQ控制,由工程中各分系统内部延时与分系统之间的通讯延时共同导致。试验中虽无保护动作,但储能系统大电流、限功率运行将导致PCS与电池使用寿命下降,甚至存在隔离变压器与联络线过热、保护误动等安全隐患。考虑到该工程日后电气试验多、离/并网切换频次高,为提升系统安全性与经济性,故提出以下对策:

1)将进线开关位置信号通过干接点与两台PCS硬连接,则合位信号无需经ECS二次传递,直接触发主PCS切换回PQ控制模式。通过提升分系统之间指令的传输速度,缩短储能大电流或限功率运行的时间。

2)优化PCS软件计算能力,精简PCS收到进线开关合位信号以后的计算与处理时间,加速下发控制模式切换指令并提升切换速度。通过减少分系统内部延时进一步缩短储能大电流或限功率运行时间。

依据上述对策,改造工程分系统控制与信号回路,同时对储能系统软件进行升级,在相同工况下复现离网微电网并网试验。采用所提对策改进后与改进前1#PCS电流对比如图12所示。

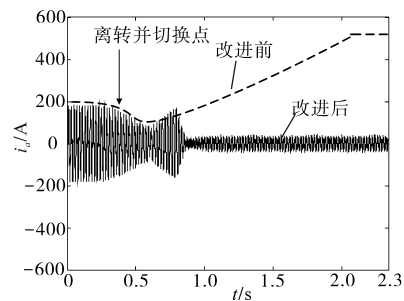


图12 改进前后离转并瞬间1#PCS电流(a相)

Fig.12 1# PCS current at the instant of off-grid microgrid to on-grid before and after improvement(phase a)

图12中,在微电网并网0.476 s后,储能主PCS立即切换回PQ控制并且电流迅速衰减。相较图7的运行状况,改进后储能系统控制模式切换速度与大电流运行时间均获得显著改善,也避免了储能系统限功率运行。

## 5 结论

此分布式能源示范工程微电网可实现并/离

网平滑切换,且在储能额定容量内,微电网能稳定离网带载运行。但多次离网转并网试验均出现储能运行模式自发切换,同时伴随大电流充电,最终触发限功率运行的现象。文章基于工程中各分系统运行机制与储能PCS工作原理的研究,在分析储能系统异常运行原因后,提出两条用于缩短储能大电流运行时间从而避免限功率的对策,并对系统进行相应改造与升级后重新进行并网试验。结果验证了所提对策的正确性与有效性,不仅有利于系统的安全经济运行,还可为其他含储能微电网实际工程的建设与调试提供借鉴与技术支持。

后续检查录波结果发现,微电网离网运行时母线电压中存在高次谐波分量。故在今后工作中将调整储能PCS的控制参数与滤波电路的硬件参数,从而改善离网电压波形。

#### 参考文献

- [1] 李琼慧,王彩霞. 从电力发展“十三五”规划看新能源发展[J]. 中国电力,2017,50(1):30-36.
- [2] 田星星,李征,李利明. 计及微电网并网两种工况的储能容量优化配置[J]. 电源学报,2018,16(4):62-70.
- [3] Bragard Michael, Soltau Nils, Thomas Stephan, *et al.* The balance of renewable sources and user demands in grids: power electronics for modular battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3049-3056.
- [4] 马艺玮,杨苹,王月武,等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):168-175.
- [5] 丁明,陈忠,苏建徽,等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):19-25.
- [6] 黄辉,王林,魏亚龙,等. 微网中虚拟同步发电机技术研究[J]. 电气传动,2019,49(11):45-50.
- [7] 师郸雅,智泽英,田志杰. 基于储能系统的微网平滑切换控制策略[J]. 电气传动,2016,46(11):56-60.
- [8] Guerrero Josep M, Chandorkar Mukul, Lee Tzung Lin, *et al.* Advanced control architectures for intelligent microgrids——Part I: decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [9] 李鑫卓. 基于主从控制的微电网平滑切换控制[J]. 电气自动化,2019,41(4):26-29.
- [10] 朱作滨,黄绍平,李振兴. 微网储能变流器平滑切换控制方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(12):137-143.
- [11] 薄鑫,吴倩,赵菲菲,等. 一种光储交直流微网并/离网无缝切换策略[J]. 现代电力,2018,35(3):70-76.
- [12] 陈杰,陈新,冯志阳,等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3089-3097.
- [13] 杨彦杰,杨康,邵永明,等. 微电网的并离网平滑切换控制策略研究[J]. 可再生能源,2018,36(1):36-42.
- [14] 袁晓冬,楼冠男,陈亮,等. 基于线性自抗扰的微电网平滑切换控制策略[J]. 电网技术,2017,41(12):3824-3831.

收稿日期:2020-03-27  
修改稿日期:2020-05-29