

DOI: 10.7667/PSPC160589

独立光储直流微电网分层协调控制

米阳^{1,2}, 吴彦伟¹, 符杨¹, 王成山²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对独立运行的光储直流微电网, 提出分层协调控制策略。第一层控制光伏和储能系统等单元独立运行, 且各单元变流器可依次对母线电压进行自动调节。采用自适应下垂控制协调多组储能来稳定母线电压并根据最大功率和荷电状态自动协调不同储能电池之间的负荷功率分配。当独立直流微电网中所需储能系统充电功率超过其最大允许功率时, 光伏系统由最大功率跟踪控制切换为下垂模式控制母线电压稳定, 且不同光伏单元可根据各自最大功率自动分配负荷功率, 同时采用电压前馈补偿控制动态调整下垂控制器的参考电压将母线电压提升至额定值。为了提高运行效率并增强直流母线电压的稳定性, 第二层控制根据母线电压协调不同变流器的工作方式, 确保不同工作模式下均有变流器根据电压下垂特性控制直流电压来维持系统内的有功功率平衡。最后在 Matlab/Simulink 搭建仿真模块, 分别验证在三种不同工作模式下所设计分层控制策略的有效性。仿真结果表明, 该分层控制可实现独立直流微电网的稳定运行。

关键词: 直流微电网; 光伏发电; 自适应; 下垂控制; 负荷功率自动分配

Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system

MI Yang^{1,2}, WU Yanwei¹, FU Yang¹, WANG Chengshan²

(1. College of Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. College of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper presents a hierarchical coordinated control for autonomous DC microgrid with photovoltaic and storage system. In order to assure the voltage stability, under the primary control, units including photovoltaic and energy storage system operate independently, and converters in each unit are responsible for voltage stability in turn under different operation modes. Multi-groups of batteries that equipped with self-adaptation droop control are used to stabilize voltage and the load power is dynamically shared by the batteries according to their states of charge and maximum power. Photovoltaic system is switched to droop mode to stabilize bus voltage when the charge power of storage system in autonomous DC microgrid is more than its maximum limitation, the load power is dynamically shared by PV units according to their maximum power and the voltage feed forward control is used to reduce voltage fluctuation through dynamical adjusting reference voltage of droop controller. In order to improve the system efficiency and enhance bus voltage stability, the supervisory control is designed to control operation modes of converters, which assures that there's always have converters responsible for voltage stability through the droop control. Under the proposed hierarchical control, the autonomous DC microgrid runs in three different operation modes. The simulation results in Matlab software indicate the proposed strategy makes the DC microgrid operate stably.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61403246), Innovation Program of Shanghai Municipal Commission (No. 15ZZ085), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2014M560187), and Shanghai Green Energy Grid Connected Technology Engineering Research Center (No. 13DZ2251900).

Key words: DC microgrid; photovoltaic generation; self-adaptation control; droop control; load power dynamical sharing

0 引言

近年来, 以风能和太阳能为代表的分布式新能

源发电渗透率不断升高^[1-3], 世界各国都更加关注新能源的发展。微电网是一种将分布式电源、储能装置、可控负荷等单元结合在一起的新型电网形式, 存在交直流灵活供电模式并且可运行在孤岛和并网两种状态^[4-6]。

传统的电力系统属于交流系统, 因此对于微电网的研究大多集中在交流微电网上^[7-8]。而分布式电源(如光伏)、储能系统等许多新能源单元具有直流

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403246); 上海教委科研创新项目(15ZZ085); 中国博士后科学基金项目(2014M560187); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900)

输出形式,且直流微电网可有效连接源荷,减少交直流频繁转换,为直流负载提供高质量电能^[9-11]。此外,直流微电网不存在相位同步、谐波和无功功率损耗等方面的问题,因此,近年来直流微电网供电模式逐渐成为微电网重要的发展方向。

母线电压是反映系统稳定运行和功率平衡的关键指标^[12-13]。为了保持电压稳定,文献[14]提出一种风电直流微电网电压分层协调控制策略。该策略根据电压变化范围依次对电压进行自动调节,可有效控制母线电压稳定。文献[15]提出一种基于AC/DC/DS三端口功率交换的分布式控制方法,通过交直流网络的功率交换控制和各网络之间的功率管理来协调混合微电网稳定运行,该方法可减少功率损耗并延长储能的使用寿命,但未考虑新能源功率波动、负荷波动及运行故障等问题。文献[16]采用自适应下垂控制策略优化不同运行模式下储能电池的输出功率,并提出直流微电网源网荷三类变换器的协调控制策略,实现微电网在不同运行模式间平滑切换和平稳运行,但未考虑源荷功率波动的影响。

直流微电网通常采用储能系统平滑分布式电源功率波动和保持源荷功率平衡^[17]。文献[18]提出通过分布式电源侧的功率来控制储能系统,避免充放电频繁切换,提高了系统运行效率并延长了储能电池的使用寿命。但是,该控制策略响应速度较慢且电压波动较大。文献[19]提出一种自适应下垂控制策略,通过自动调整各储能单元下垂控制器的虚拟阻抗来实现不同储能单元之间的负荷功率自动分配和不同储能单元之间的荷电状态(SOC)均衡,有利于避免储能电池的过充和过放。但是,源荷功率受扰时母线电压波动较大。

基于以上分析,本文提出一种独立光储直流微电网分层协调控制策略。为了维持母线电压稳定,第一层控制下,对光伏系统分别设计最大功率跟踪控制(MPPT)和下垂控制。当储能系统充电功率超过其最大允许功率时,光伏系统由最大功率控制模式切换为下垂控制模式,自动分配不同光伏单元的负荷功率并保持电压稳定,同时采用电压前馈补偿控制通过动态调整下垂控制器的电压参考值将母线电压提升至额定值。针对储能系统,采用自适应下垂控制协调多组储能来稳定母线电压并根据最大功率和SOC自动协调不同储能电池之间的负荷功率分配。第二层控制根据母线电压协调不同变流器的工作方式,确保不同工作模式下均有变流器根据电压下垂特性控制直流电压,保持系统内的有功功率平衡。

1 直流微电网的结构及建模

本文研究的直流微电网结构如图1所示,主要包括光伏系统、储能系统和交直流负载等。

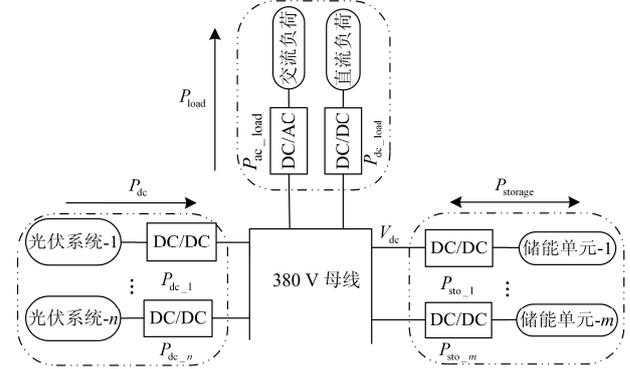


图1 直流微电网结构

Fig. 1 Structure of DC microgrid

其中： P_{dc_n} 是 n_{th} 光伏单元的发电功率且

$$P_{dc} = \sum_{i=1}^n P_{dc_i}; P_{ac_load} \text{ 和 } P_{dc_load} \text{ 分别是交直流负荷功率且 } P_{load} = P_{ac_load} + P_{dc_load}; V_{dc} \text{ 是直流母线电压,}$$

P_{sto_m} 是 m_{th} 储能单元的功率且 $P_{storage} = \sum_{i=1}^m P_{sto_i}; n$

和 m 分别是光伏和储能单元数量。直流微电网各部分具体建模如下。

1.1 光伏发电系统

光伏系统输出电流为^[20-22]

$$I = I_{ph} - I_d \left[e^{\frac{q(U+IR_s)}{AkT}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中： R_s 和 R_{sh} 分别为等效串并联阻抗； I_{ph} 和 I_d 分别是光生电流和二极管的反向饱和漏电流； U 和 I 分别是光伏系统的端电压和输出电流； T 为光伏温度； q 为电子电荷量； A 是常数； k 是波尔兹曼常数。

1.2 储能系统

储能电池的输出电压为^[23-24]

$$V_b = V_o + R_b \cdot i_b - K \frac{Q}{Q + \int i_b dt} + C \exp\left(B \int i_b dt\right) \quad (2)$$

$$SOC = 100 \left(1 + \frac{\int i_b dt}{Q} \right) \quad (3)$$

式中： R_b 是电池内阻； V_b 是电池端电压； V_o 是电池开路电压； i_b 是电池充电电流； K 是电池极化电压； Q 是电池容量； B 和 C 均为拟合系数。

2 直流微电网运行模式及控制方法

本文提出分层控制策略控制独立光储直流微电网中的母线电压稳定, 为了验证控制策略的效果, 分别考虑三种不同运行模式。本节主要考虑系统运行模式划分和具体的控制策略。

2.1 直流微电网运行模式

本文主要研究如下三个工作模式: 独立运行时储能系统控制母线电压稳定(模式 I); 独立运行时部分储能单元或光伏系统故障(模式 II); 独立运行时光伏系统控制母线电压稳定(模式 III)。

1) 模式 I

主要研究独立直流微电网中储能系统控制母线电压稳定情况。该模式下, 光伏系统采用 MPPT 控制, 储能系统采用自适应下垂控制通过双向变流器平滑新能源发电功率波动并控制电压稳定。此时, 储能系统功率为

$$P_{\text{storage}} = P_{\text{load}} - P_{\text{dc}} \quad (4)$$

2) 模式 II

主要研究部分储能单元和光伏发电系统由于故障等原因退出运行, 由独立直流微电网中剩余部分储能系统控制母线电压的情况。光伏系统仍采用 MPPT 控制, 当储能系统部分退出运行时, 正常运行的储能单元自动调整输出功率承担故障单元的功率, 以确保母线电压稳定。当光伏系统部分或全部退出时, 储能系统可根据母线电压自动调整输出功率确保负荷正常供电。此时, 储能系统功率为

$$P_{\text{storage}} = \sum_{i=1}^u P_{\text{sto}_i} = P_{\text{load}} - P_{\text{dc}} \quad (5)$$

式中, u 是正常运行的储能单元数量且 $u \leq n$ 。

特别的, 当独立直流微电网中所需的储能系统放电功率超过其最大允许输出功率时, 微网内有功不足将导致母线电压下降。为了确保重要负荷正常供电, 此时需根据负荷优先级切除次要负荷来确保系统有功功率平衡。

3) 模式 III

主要研究储能系统充电功率超过其最大允许功率时, 微电网中过剩的有功功率将导致母线电压升高, 此时需要通过控制光伏系统降低发电功率来保持母线电压稳定。本文采用下垂控制, 根据负荷功率自动调整光伏发电功率。光伏系统输出功率为

$$P_{\text{dc}} = P_{\text{load}} \quad (6)$$

特别的, 当光照或负荷功率波动使光伏系统发电功率不能满足负荷正常供电时, 储能系统可通过放电来平衡微电网中有功功率供需。当部分光伏单

元由于故障等原因退出运行时, 正常运行的光伏单元自动调整发电功率, 承担故障单元的输出功率。此时, 光伏系统功率为

$$P_{\text{dc}} = \sum_{i=1}^v P_{\text{dc}_i} = P_{\text{load}} \quad (7)$$

式中, v 是正常运行的光伏单元数量且 $v \leq m$ 。

2.2 独立直流微电网第一层控制

母线电压直接影响直流微电网系统稳定运行, 因此需要将母线电压控制到允许范围并平衡微电网内源荷功率供需。光伏系统和储能系统在第一层控制下独立运行。

2.2.1 光伏系统控制

当独立直流微电网在模式 I 和模式 II 运行时, 储能系统控制母线电压稳定。此时, 光伏系统均采用 MPPT 控制。在模式 III 时, 如图 2 所示, 光伏系统切换至下垂控制, 根据负荷功率需求调整发电功率来控制母线电压稳定, 各光伏单元之间根据其最大功率自动调整负荷功率分配并采用电压前馈补偿控制提升母线电压至额定值, 切换信号 M_{choice1} 由第二层控制给出。

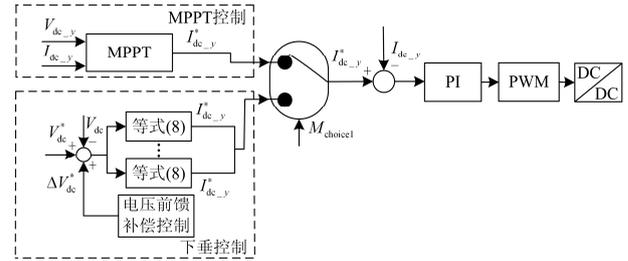


图2 光伏系统控制

Fig. 2 Control of PV system

式中: I_{dc_y} 是 y_{th} 光伏单元的输出电流, $I_{\text{dc}_y}^*$ 是其参考值; V_{dc_y} 是 y_{th} 光伏单元的端电压, V_{dc}^* 是其参考值。

光伏单元的下垂特性为^[15]

$$V_{\text{dc}_y} - I_{\text{dc}_y} Z_{\text{dc}_y} - V_{\text{dc}}^* = V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^* = d_y P_{\text{dc}_y} \quad (8)$$

$$d_y = \frac{V_{\text{dc}}^{\min} - V_{\text{dc}}^{\max}}{P_{\text{dc}_y}^{\max}} \quad (9)$$

式中: Z_{dc_y} 是 y_{th} 光伏单元的输出阻抗; V_{dc}^{\min} 和 V_{dc}^{\max} 是光伏系统的最小和最大输出电压; $P_{\text{dc}_y}^{\max}$ 是 y_{th} 光伏单元的最大功率。各光伏单元功率为

$$\frac{P_{\text{dc}_1}}{P_{\text{dc}_1}^{\max}} = \frac{P_{\text{dc}_2}}{P_{\text{dc}_2}^{\max}} = \dots = \frac{P_{\text{dc}_y}}{P_{\text{dc}_y}^{\max}} = \frac{V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^*}{V_{\text{dc}}^{\min} - V_{\text{dc}}^{\max}} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 各光伏单元可根据其最大功率自动调整发电功率, 有利于模式 III 中重要负荷

的电压稳定。

此外, 光伏下垂控制中增加前馈补偿控制(如图 3 所示)用于减小电压波动。利用检测母线电压与参考电压的偏差量, 并将 PI 控制器输出的补偿量叠加到光伏下垂控制器的电压参考值上, 实现对参考电压的动态补偿来减小母线电压波动。

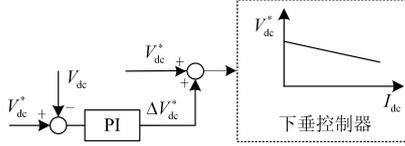


图 3 电压前馈控制

Fig. 3 Voltage feed forward control

2.2.2 储能系统控制

储能系统对于稳定母线电压和缓冲新能源发电波动起到关键作用。本文采用自适应下垂控制, 根据各储能单元的最大功率和 SOC 自动调整储能单元之间的负荷功率分配。

定义

$$\zeta = (V_{dc})' \quad (11)$$

式中: ζ 是常数; V_{dc} 是母线电压并可通过式(12)规范化^[15]。

$$(V_{dc})' = \begin{cases} \frac{V_{dc} - V_{dc}^*}{V_{dc}^{\max} - V_{dc}^*}, & \text{if } V_{dc} > V_{dc}^* \\ \frac{V_{dc} - V_{dc}^*}{V_{dc}^{\min} - V_{dc}^*}, & \text{if } V_{dc} < V_{dc}^* \end{cases} \quad (12)$$

因此, $-1 < (V_{dc})' < 1$, 当 $0 < (V_{dc})' < 1$ 时储能系统放电, 当 $-1 < (V_{dc})' < 0$ 时充电。各储能系统的输出功率为

$$\zeta = b_z P_{sto_z} \quad (13)$$

式中: P_{sto_z} 是 z_{th} 储能单元的输出功率, 为正表示放电, 为负表示充电; b_z 为 z_{th} 储能单元下垂控制器的下垂系数。

$$b_z = \begin{cases} \left(\frac{SOC_z}{SOC_z^*}\right)^\lambda / P_{sto_z}^{\max} & \text{if } P_{sto_z} < 0 \\ \left(\frac{SOC_z^*}{SOC_z}\right)^\lambda / P_{sto_z}^{\max} & \text{if } P_{sto_z} > 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{sto_z}^{\max}$ 为 z_{th} 储能单元的最大功率; SOC_z 和 SOC_z^* 分别为 z_{th} 储能单元荷电状态的瞬时值和参考值, $\lambda = 1$ 且 $SOC_z^* = 0.5$ 。

因此, 各储能单元可根据其 SOC 通过自适应下垂控制自动调整负荷功率分配。

$$\frac{P_{sto_1}}{P_{sto_1}^{\max}} = \frac{P_{sto_2}}{P_{sto_2}^{\max}} = \dots = \frac{P_{sto_m}}{P_{sto_m}^{\max}} = \begin{cases} \left(\frac{SOC_z}{SOC_z^*}\right)^\lambda \zeta & \text{充电} \\ \left(\frac{SOC_z^*}{SOC_z}\right)^\lambda \zeta & \text{放电} \end{cases} \quad (15)$$

储能单元之间的负荷功率自动分配有利于不同储能单元 SOC 的快速均衡和避免储能系统的过充和过放, 可提高储能系统的安全性。

同时, 为提高蓄电池的寿命, 蓄电池能量管理系统负责将蓄电池的充放电功率和容量限制在一定范围内^[25]。本文选取 SOC 的额定范围为 10%~90%。当 SOC 达到 90%时, 充电电流为零, 当 SOC 下降到 10%时, 为确保重要负荷的电压稳定, 储能系统继续放电, 但为了保护蓄电池, 应根据优先级采取切负荷操作。储能系统的控制策略如图 4 所示。

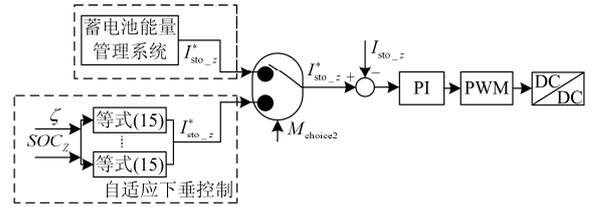


图 4 储能系统控制

Fig. 4 Control of energy storage system

其中, I_{sto_z} 是 z_{th} 储能单元的电流, 且 $I_{sto_z}^*$ 是其参考值。模式切换信号 $M_{choice2}$ 由第二层控制给出。

2.2.3 负荷控制

交直流负荷通过变流器连接至直流母线。图 5 为负荷功率控制, 负荷可根据重要程度划分优先级以确保重要负荷的稳定供电。

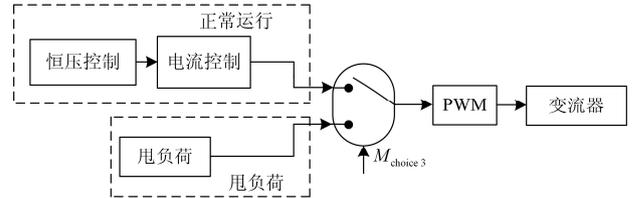


图 5 负荷控制

Fig. 5 Control of load converter

2.3 直流微电网第二层控制方法

为了减少功率损耗, 如图 6 所示, 第二层控制利用母线电压信号控制独立直流微电网中的功率流动及光伏系统等运行模式的切换。具体的, 第二层控制结合母线电压和图 7 所示的工作逻辑图控制光伏系统等的模式切换, 同时根据母线电压控制模式 I 和模式 II 中储能系统输出功率的大小。且储能系统采用自适应下垂控制稳定母线电压并根据各自最

大功率和 SOC 自动调整各储能单元之间的负荷功率分配, 有利于提高储能系统的安全性。当直流微电网运行在模式 III 时, 光伏系统由 MPPT 切换为下垂控制来控制母线电压稳定, 各光伏单元根据最大输出能力自动调整负荷功率分配, 并采用电压前馈补偿控制调整光伏下垂控制器的电压参考值将母线电压提升至额定值, 可减小母线电压波动。

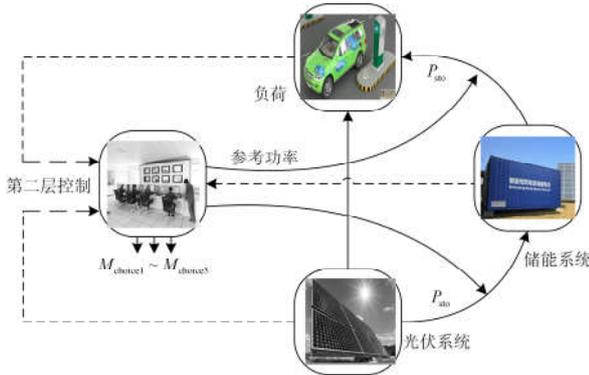


图 6 第二层控制方法

Fig. 6 Secondary control of island DC microgrid

定义:

$$|(V_{dc} - \varepsilon_{V_{dc}})'| > |(V_{dc})'_s| \quad (16)$$

本文取 $|(V_{dc})'_s| = 0.2$, $\varepsilon_{V_{dc}}$ 是电压波动值, 当母线电压在该范围波动时, 储能系统不进行功率交换以减小功率损耗。当超出该范围时, 储能系统通过充放电来控制母线电压稳定。

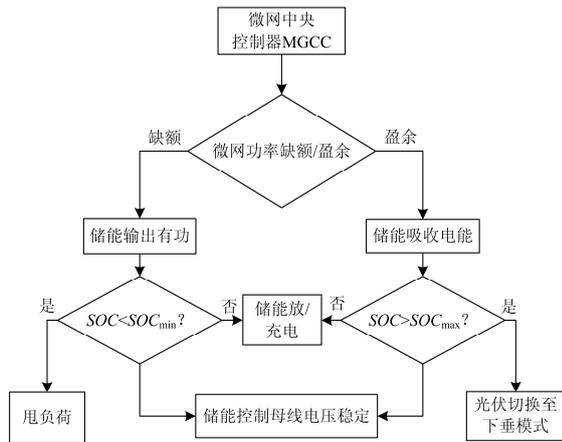


图 7 独立直流微电网工作逻辑图

Fig. 7 Logic diagram of island DC microgrid

此外, 各单元模式切换信号 $M_{choice1} \sim M_{choice3}$ 由该层控制结合等式(16)和该控制逻辑发出。

3 仿真分析

为了验证本文提出的直流微电网分层控制策略

的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型。仿真系统包含最大功率 4 kW 和 2 kW 的光伏发电系统两组, 采用三组容量均为 4.5 kWh 的储能单元, SOC 分别为 40%, 60% 和 80%, 最大输出功率为 ± 3 kW, ± 2 kW 和 ± 2 kW, 且在本仿真中设置了充放电安全容量限制(放电安全容量不低于 10%, 充电安全容量不高于 90%)。仿真中考虑在三种不同的工作模式下, 采用可变负荷来验证系统应对负荷波动等扰动时的稳定性, 负荷按照重要程度划分优先级, 以便必要时进行切负荷操作。直流母线额定电压为 380 V。

1) 模式 I

该模式下, 光伏系统采用 MPPT 控制, 储能系统控制母线电压稳定。通过配置多组小容量储能单元减小变流器电流来提高储能系统安全性。主要仿真分析了光伏系统发电功率波动和负荷功率波动等扰动对母线电压的影响。仿真波形如图 8 所示。

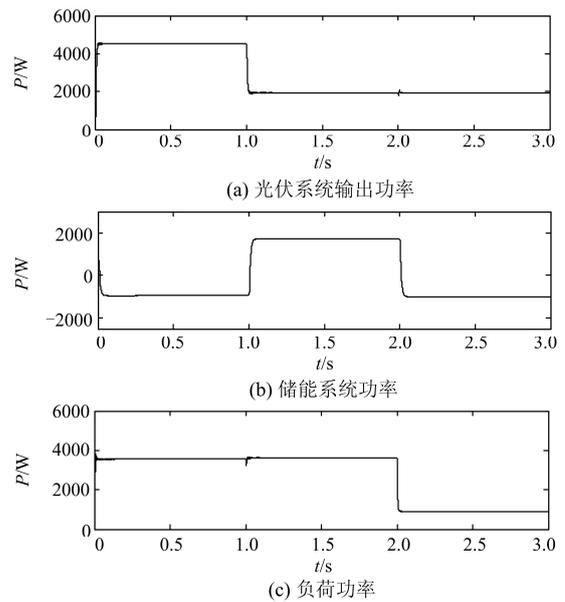


图 8 独立直流微电网中储能稳压时工作特性

Fig. 8 Operation performance when energy storage system in autonomous DC microgrid stabilizes bus voltage

从图 8 可看出, 在 0~1.0 s 时光伏系统采用 MPPT 控制, 储能系统控制母线电压稳定, 光伏系统此时功率约为 4.5 kW, 负荷功率为 3.6 kW, 此时储能系统充电功率约为 0.9 kW, 如图 9 所示, 在该模式下母线电压控制在 379 V。由于光照波动, 光伏发电功率在 1.0 s 减小至约 2.0 kW, 为了确保电压稳定和系统正常运行, 此时储能系统迅速调整输出功率约为 1.6 kW, 且充放电切换速度快, 电压波动小。负荷功率在 2.0 s 时减小至约 1.0 kW, 光伏发电功率仍为 2.0 kW, 此时储能系统迅速由放电状态切换

为充电状态,提供约 1.0 kW 功率来满足系统有功功率平衡和母线电压稳定。由图 8 可看出,当源荷功率波动时储能系统可在充放电模式之间平滑切换,有效平衡系统有功功率供需;由图 9 可看出,不同扰动时母线电压波动小,响应速度快。

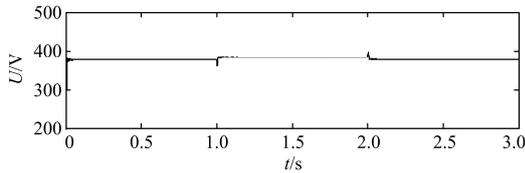


图 9 直流母线电压

Fig. 9 Bus voltage of DC microgrid

储能单元之间的负荷功率分配如图 10 所示。采用本文自适应下垂控制时储能系统的负荷功率分配如图 10(a)所示。相比采用如图 10(b)所示传统下垂控制可看出,采用自适应下垂控制可根据不同储能单元的 SOC 和最大功率自动调整负荷功率分配,有利于避免储能系统的过充过放和不同储能单元之间 SOC 的快速均衡,且充放电模式之间切换速度快,波动小。

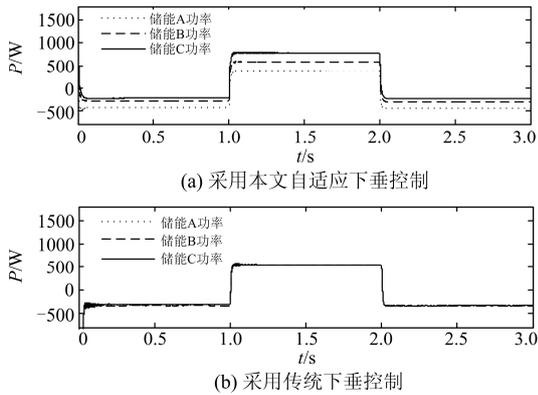
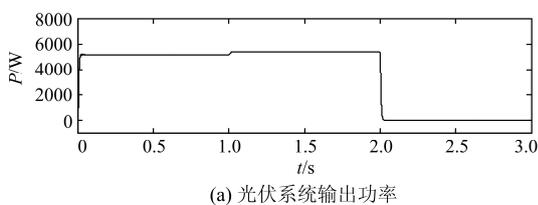


图 10 储能单元之间的负荷功率分配

Fig. 10 Power sharing among storage units

2) 模式 II

该模式下,光伏系统仍采用 MPPT 控制,储能系统控制母线电压稳定。主要仿真分析了储能系统中部分单元故障和光伏系统故障退出等扰动情况下母线电压的稳定性。仿真波形如图 11 所示。



(a) 光伏系统输出功率

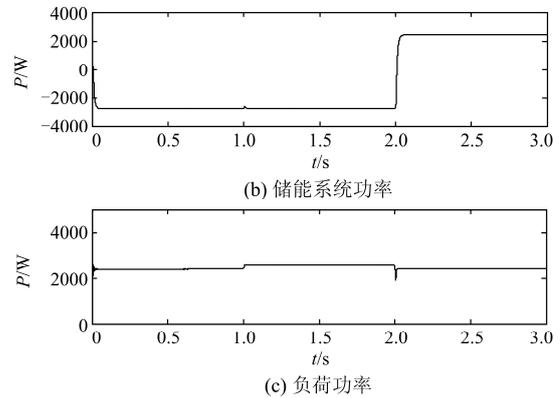


图 11 独立直流微电网中部分储能单元故障工作特性

Fig. 11 Operation performance when part of storage units or photovoltaic system in autonomous DC microgrid quit

从图 11 可看出,在 0~1.0 s 时光伏系统采用 MPPT 控制,储能系统控制母线电压稳定,光伏系统此时功率约为 5.1 kW,负荷功率为 2.6 kW,此时储能系统充电功率为 2.5 kW,如图 12 所示,在该模式下母线电压控制在约 382 V。储能系统中一组储能单元在 1.0 s 时由于故障等原因退出运行,为了确保电压稳定和系统正常运行,正常运行的储能单元迅速调整输出功率以确保负荷正常供电,此时储能系统充电总功率仍为 2.5 kW,且故障发生时,如图 12 所示,母线电压波动小,响应速度快。光伏系统在 2.0 s 时发电功率降为 0,此后正常运行的储能单元由充电状态迅速切换至放电状态来确保负荷的正常供电,提供负荷约 2.6 kW 功率,且切换速度快,母线电压波动小。由以上分析可看出,当光伏系统退出运行和部分储能单元退出运行等扰动发生时,母线电压波动小,响应速度快,有效减小了负荷电压波动。

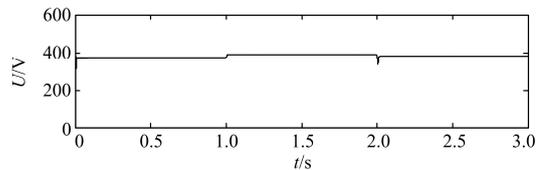


图 12 直流母线电压

Fig. 12 Bus voltage of DC microgrid

储能单元之间的负荷功率分配如图 13 所示。对比图 13(a)和图 13(b)可看出,储能系统采用本文提出的自适应下垂控制可根据最大功率和 SOC 自动调整各储能单元之间的负荷功率分配。当部分储能单元故障和光伏故障时,正常运行的储能单元可迅速调整输出功率以满足负荷正常供电,提高了独立直流微电网的稳定性,且响应速度快,电压波动小。

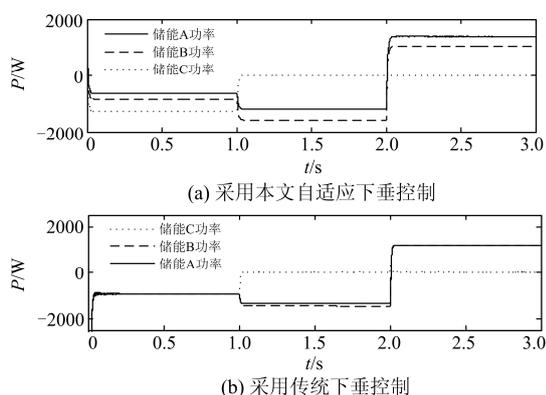


图 13 储能单元之间的负荷功率分配

Fig. 13 Power sharing among storage units

当其中某组储能单元退出运行后, 正常工作的储能单元迅速调整输出功率承担故障单元的功率, 有利于减小母线电压波动。此外, 采用多组小容量储能可减少变流器电流, 可提高储能系统安全性。

3) 模式 III

当独立运行的直流微电网中光伏系统发电功率多于负荷需求且蓄电池达到容量限定值时, 为了确保重要负荷的电压稳定, 光伏系统由 MPPT 切换为下垂控制, 根据负荷功率需求自动调整输出功率。在该模式下, 主要仿真分析了储能系统退出运行、部分光伏单元故障和负荷波动等扰动对电压稳定性的影响。该模式下的仿真波形如图 14 所示。

在 0~1.0 s 时光伏系统采用 MPPT 控制且储能系统控制母线电压稳定。此时, 光伏系统功率约为 4.7 kW, 储能系统充电功率为 0.6 kW 和负荷功率为 4.1 kW。储能系统在 1.0 s 时与微电网断开连接, 光伏系统切换至下垂控制来稳定母线电压。如图 14 所示, 该切换过程响应速度快, 波动小。光伏单元 1 在 2.0 s 时退出运行, 光伏系统 2 迅速调整发电功率来确保重要负荷供电。此后, 光伏单元 2 根据负荷功率需求自动调整发电功率, 必要时采取切负荷操作来确保重要负荷的正常供电。

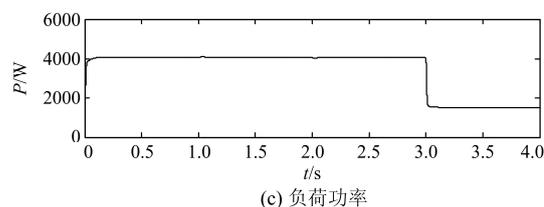
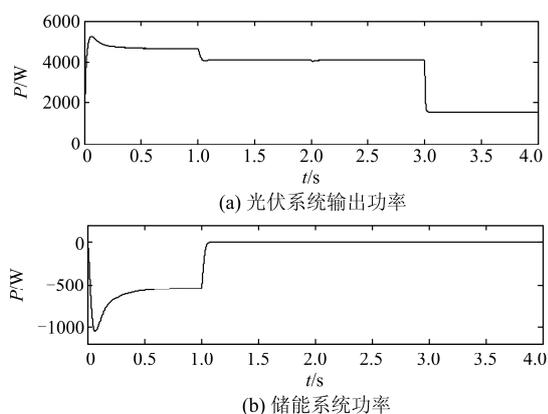


图 14 离网光伏稳压时微电网运行特性

Fig. 14 Operation performance when PV system in island DC microgrid stabilizes bus voltage

图 15 所示为各光伏单元之间的负荷功率分配。在 1.0~2.0 s, 储能系统退出运行后光伏单元采用下垂控制。由于最大输出功率不同, 各光伏单元之间的负荷功率分配也不同。因此, 各光伏单元根据其最大功率自动调整负荷功率分配来控制系统平稳运行。此外, 2.0 s 时光伏单元 1 故障时的系统切换平滑, 响应速度快。特别的, 若此时光伏单元 2 不能满足负荷供电, 则需根据负荷优先级执行切负荷操作来确保该模式下重要负荷的电压稳定。

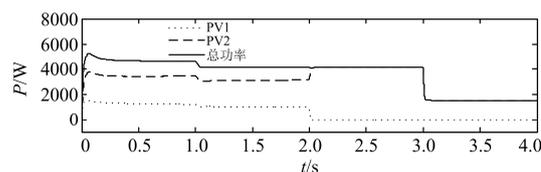


图 15 光伏单元之间的负荷功率分配

Fig. 15 Power sharing among PV units

图 16 所示分别为采用和未采用本文提出的电压前馈补偿控制时的母线电压, 扰动发生时母线电压分别跌落约 0.1 V 和 15 V。通过对比图 16(a)和图 16(b)可看出, 本文采用的电压前馈补偿控制可有效减小光伏下垂控制模式时的母线电压波动, 响应速度快。

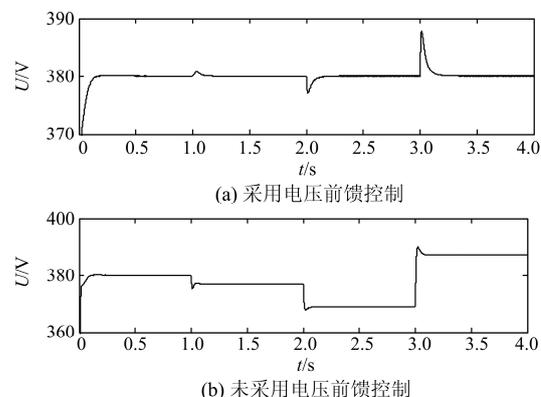


图 16 直流母线电压

Fig. 16 Bus voltage of DC microgrid

通过以上分析可以看出, 光伏系统 MPPT 和下垂控制之间的切换有利于确保重要负荷的电压稳定。

4 结论

本文提出独立光储直流微电网分层协调控制策略。第一层控制光伏和储能系统等单元独立运行, 且各单元变流器可依次对母线电压进行自动调节。当独立直流微电网中所需储能系统充电功率超过其最大允许功率时, 光伏系统切换至下垂控制来稳定母线电压。同时, 采用电压前馈控制减小该模式下母线电压波动。通过考虑各储能单元的最大功率和 SOC, 采用自适应下垂控制来协调各单元之间的负荷功率自动分配。为了提高系统效率和电压稳定, 第二层控制根据母线电压协调不同变流器的工作方式, 确保不同工作模式下均有变流器根据电压下垂特性控制直流电压来确保系统内的有功功率平衡。利用 Matlab 搭建仿真模型, 仿真结果表明, 本文提出的分层控制可有效减小母线电压波动并控制独立微电网稳定运行。

参考文献

- [1] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, 等. 新能源直流微电网的控制架构与层次划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 33(9): 156-162.
LI Wuhua, GU Yunjie, WANG Yuxiang, et al. Control architecture and hierarchy division for renewable energy DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 33(9): 156-162.
- [2] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70-79.
MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 70-79.
- [3] 周啸, 金新民, 唐芬, 等. 微电网孤岛工况下基于四桥臂变流器的不平衡负载分配策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 76-86.
ZHOU Xiao, JIN Xinmin, TANG Fen, et al. Four-leg converter based unbalanced load sharing method in islanding microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 76-86.
- [4] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [5] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [6] 田崇翼, 李珂, 张承慧, 等. 基于切换模型的双向 AC-DC 变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 70-76.
TIAN Chongyi, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Control strategy for bi-directional AC-DC converter based on switched system model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 70-76.
- [7] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 37-46.
LU Xiaonan, SUN Kai, HUANG Lipei, et al. Dynamic load power sharing method with elimination of bus voltage deviation for energy storage systems in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 37-46.
- [8] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [9] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [10] 麻常辉, 潘志远, 刘超男, 等. 基于自适应下垂控制的风光储微网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 21-27.
MA Changhui, PAN Zhiyuan, LIU Chaonan, et al. Frequency regulation research of wind-PV-ES hybrid microgrid system based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 21-27.
- [11] 刘海涛, 吕志鹏, 苏剑, 等. 具有功率精确分配能力的逆变器电压谐波分频下垂控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 9-14.
LIU Haitao, LÜ Zhipeng, SU Jian, et al. Inverter's frequency dividing droop controller with accurate load

- sharing ability[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(19): 9-14.
- [12] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(5): 2214-2223.
- [13] 施婕, 郑漳华, 艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(2): 86-90.
SHI Jie, ZHENG Zhanghua, AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(2): 86-90.
- [14] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微电网的电压分层协调控制[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(4): 16-24.
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(4): 16-24.
- [15] WANG P, JIN C, ZHU D X, et al. Distributed control for autonomous operation of a three-port AC/DC/DS hybrid microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 62(2): 1279-1290.
- [16] 刘家赢, 韩肖清, 王磊, 等. 直流微电网运行控制策略[J]. *电网技术*, 2011, 26(3): 886-896.
LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operation and control strategy of DC microgrid[J]. *Power System Technology*, 2011, 26(3): 886-896.
- [17] DIAZ L N, VASQUEZ C J, GUERRERO M J. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids—a new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(5): 2476-2485.
- [18] ZHANG Y, JIA H J, GUO L. Energy management strategy of islanded microgrid based on power flow control[C] // *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. Washington, USA: 2012: 1-8.
- [19] DRAGICEVIC T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 29(2): 695-706.
- [20] GU Y J, XIANG X, LI W H, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [21] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. *电网技术*, 2011, 35(8): 47-52.
LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(8): 47-52.
- [22] 刘志红, 刘明明. 风水互补微电网的功率波动节能控制数学建模[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(10): 123-127.
LIU Zhihong, LIU Mingming. Power fluctuations energy saving control mathematical modeling of the wind and hydro power complementary microgrid[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(10): 123-127.
- [23] TREMBLAY, DESSAINT L A, DEKKICHE A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C] // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2007: 284-289.
- [24] 杨涛, 赵兴勇, 王帅. 基于反馈阻抗的微电网下垂控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(10): 34-38.
YANG Tao, ZHAO Xingyong, WANG Shuai. Droop control strategy of microgrid based on feedback impedance[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(10): 34-38.
- [25] QIAN H, ZHANG J H, LAI J S, et al. A high-efficiency grid-tie battery energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(3): 886-896.
-
- 收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-06-29
作者简介:
米 阳(1976-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为微网控制、电力系统稳定与控制等; E-mail: miyangmi@163.com
吴彦伟(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微网控制; E-mail: electricalvip@163.com
符 杨(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微网控制、电力系统规划等。E-mail: mfdong@126.com
- (编辑 魏小丽)