

基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略

杨旭红^{1,2},尹聪聪^{1,2}

(1. 上海电力学院 自动化工程学院,上海 200090;

2. 上海电力学院 上海市电站自动化技术重点实验室,上海 200090)

摘要:针对由光伏电池、储能电池和负载组成的孤岛模式下的直流微电网中,光伏发电单元因为自身易受外界环境影响会出现微电网功率不平衡,而传统的微电网协调控制策略使得储能电池电能质量波动较大,导致其协调控制模式切换的频率较高,为此提出采用非对称模糊控制策略跟踪最大功率点,充分利用光能,同时将直流微电网母线电压进行分段式协调控制,使得系统间协同效率较高。最终通过 Matlab/Simulink 建模仿真,验证所提协调控制策略的可行性与有效性。

关键词:直流微电网;非对称模糊;布尔量;母线电压;分段式控制

中图分类号:TM727 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19174

Coordinated Control Strategy of Light Storage and DC Microgrid Based on Islanding Mode

YANG Xuhong^{1,2}, YIN Congcong^{1,2}

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

2. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In the islanded mode of micro grid composed by photovoltaic battery, storage battery and DC load, photovoltaic power generation unit itself is easily affected by the environment, so there will be micro grid power imbalance, while the traditional coordinated control strategy of micro grid energy storage battery which makes the power quality fluctuation, causes higher frequency coordination control mode switch. The asymmetric fuzzy control strategy of maximum power point tracking was proposed to make full use of solar energy, while the DC micro grid voltage busbar sectional coordination control was proposed to make higher the efficiency of collaborative systems. After the modeling and simulation of Matlab/Simulink, the feasibility and effectiveness of the proposed coordinated control strategy were verified.

Key words: DC microgrid; asymmetrical fuzzy; boolean quantity; bus voltage; stratified control

当前我国的经济与社会飞速发展,能源短缺的问题也愈发突出,为了使人们能高效地使用能源,微电网顺势而出。同时微电网光伏板、储能电池、直流负荷等的发展,使得这些直流分布式电源,对于工业直流负荷具有特殊优势^[1]。近年来有关直流微电网的稳定运行正逐步成为科研工作者们研究的热点。

为保障直流微电网的稳定运行及绿色能源的高效使用,文献[2]以独立直流微电网的能量协调控制策略的研究为主;文献[3]提出了基于神经网络滑模控制的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法,它的特点是以

先进控制理论作为基础,但是当电池板有差异时,参数就不同,操作麻烦,训练时间长;文献[4]提出了把阻抗和多模式相结合的最大功率点跟踪状态应用于微电网功率的协调控制策略,但是,这种方式会造成储能电池在面对系统功率失衡情况时,出现较高频率的切换,系统变换器的启动也易产生谐波,同时还会消减储能元件的工作寿命;文献[5]主要阐述了光储直流微电网里面的光伏系统的不同运行方式和变换的过程,但是未给出直流微电网系统间如何协调分配能量的完整方法;文献[6]提出了自适应变系数的下垂控制,去实现电池源的高效运行,但是未考虑

基金项目:上海市重点科技攻关计划(上海市科委地方院校能力建设项目)(14110500700);

国家自然科学基金(61203224);上海自然科学基金(13ZR1417800)

作者简介:杨旭红(1969-),女,博士,教授,Email: yangxuhong.sh@163.com

通讯作者:尹聪聪(1994-),男,硕士研究生,Email: 18817930732@163.com

有关系统母线电压上的波动而引起的控制方法的来回切换的问题。

本文在以上基础上进行了改进,提出了基于孤岛模式下光储直流微电网的协调控制策略。在直流微电网系统里,传统的光伏发电单元使用MPPT控制,但本文在这里使用了非对称模糊控制对其进行优化改进。接着,由于在直流微电网系统里,前面光伏部分使用了改进的MPPT控制,但是其并不直接介入到系统母线电压的控制中,因此直流微电网系统母线电压仍由储能单元控制其稳定运行,本文在这里提出由2个布尔量 α 、 β 构成的逻辑模块去抉择储能单元的不同运行状态。最后综合光伏与储能系统运行特点,本文在这里采用了一种两级分段式控制策略,把母线电压作为储能系统动作的信息载体,同时将电压分成5个区块,储能系统根据直流母线电压的大小并依据储能单元的荷电状态自主切换充放电状态,以实现系统经济可靠运行。

1 直流微电网系统变换器及其控制策略

本文采用由主电路及控制电路2个部分组成的孤岛模式下光储直流微电网,包含光伏源、储能电池、单/双向DC/DC变换器和DC负荷,如图1所示^[7]。

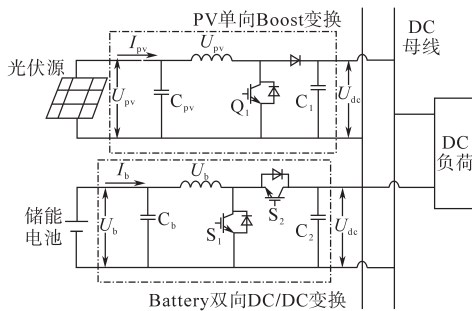


图1 系统主电路图

Fig.1 System master circuit diagram

图1中, U_{pv} 为光伏源的输出电压; I_{pv} 为光伏源的输出电流; U_{dc} 为直流母线端电压; U_b 为储能电池的端电压; I_b 为储能电池电感上的电流。

1.1 光伏部分

因为常规模糊控制隶属度函数具有对称性特征,而光伏电池最大功率点(maximum power point, MPP)两边的输出特性并不具有对称性特点,倘若采取有对称性特点的传统模糊控制,MPP两侧输出特性效果就会有所偏颇,具体体现

在MPP周边呈现小范围的振荡缺陷,所以依照光伏电池输出特性,这里提出并采用非对称模糊控制策略,在MPP两侧建立不同的隶属度函数与不同的控制策略,对MPP进行跟踪。

非对称模糊控制器(asymmetric fuzzy logic controller, AFLC)主要对其隶属度函数非对称模糊化进行设计。传统模糊控制器通常把误差 e 与误差变化量 Δe 作为模糊的输入,本文设计的非对称模糊逻辑控制器输入量分别是由光伏电池输出功率 P 的变化量与输出电压 U 的变化量的比值所表达的功率误差 e 和误差变化率 Δe 。第 k 时刻的表达式如下式所示:

$$e(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

式中: $P(k)$ 、 $U(k)$ 分别为光伏电池当前 k 时刻的输出功率与电压。

在极短时间内,可以将 $e(k)$ 看作 $P-U$ 特性曲线某一点的斜率。控制器的输出控制量为电压调节量 dU 。本设计中,选择梯形与三角形隶属度函数为主,多是具有非对称性能的。隶属度函数的设计原则是根据光伏电池 $P-U$ 特性曲线,由相同的电压变化引起的功率变化在光伏电池MPP右侧比左侧较大,为了更好地提升MPPT精度,对MPP右侧需要做较小的步长扰动,因此选择的输出变量里面负论域的最大值要比正论域的最大值小。经过多次调节后的隶属度函数如图2、图3所示。

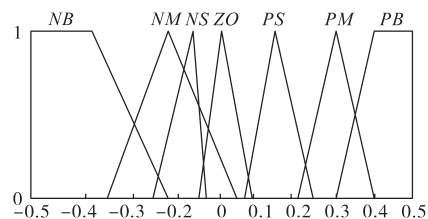


图2 误差 e 的隶属度函数

Fig.2 Membership function of error e

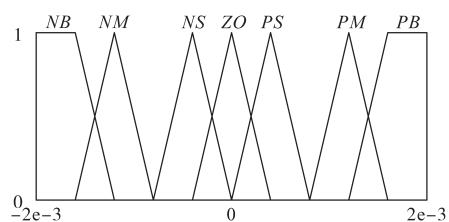


图3 模糊控制器输出量的隶属度函数

Fig.3 Membership function of the output of fuzzy controller

这里采用 $IF A AND B THEN C$ 模糊规则,得到模糊规则表1所示。

表1 模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NS	NS	NS	NS
NM	PB	PB	PM	NS	NS	NS	NS
NS	PM	PM	PM	NS	NS	NS	NS
ZO	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NS
PS	NB	NS	NS	PS	PS	PS	PB
PM	NB	NS	NS	PS	PS	PS	PB
PB	NB	NM	NS	PS	PS	PM	PB

光伏系统工作模式的切换采取最大允许的临界运行电压值与母线上电压的瞬时值相比较的方式,即 U_{dc-max} 与 U_{dc} 相比较。当 $U_{dc} < U_{dc-max}$ 时,Boost变换器工作在MPPT运行模式,直流微电网处于无扰动的正常运行状态,光伏源始终对外输出最大功率,而由储能系统去维持母线电压稳定;当 $U_{dc} > U_{dc-max}$ 时,Boost变换器切换为恒压工作模式,由光伏发电系统维持母线电压恒定,储能电池充电维持微电网内部功率平衡,如图4所示。

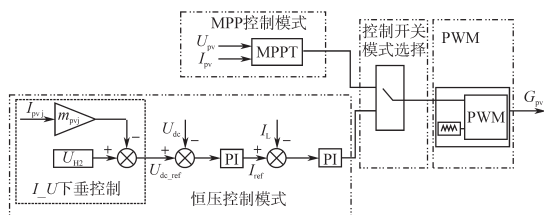


图4 光伏系统控制

Fig.4 PV system control

1.2 储能部分

双向DC/DC变换器是储能系统与系统直流母线相连接的重要转换装置,承担着微电网系统之间功率均衡的桥梁作用与升降电压的作用。当实际的直流母线电压值小于运行的临界最大电压值,且储能电池内部荷电状态在正常范围中时,储能电池组将对微电网系统进行放电,Buck/Boost变换器就处于Boost工作模式,向母线输出平衡功率。此时,储能系统将采用恒压放电的控制模式去调节母线电压的大小,保证光储直流微电网系统的功率平衡^[8-9]。

当直流母线电压达到其最大运行临界电压且满足负荷功率要求时,需进行储能系统的充电模式切换,将系统中多余的功率通过双向变换器流向储能模块,Buck/Boost变换器工作在Buck模式。本文在这里提出了采用2个布尔量 α, β 构成的逻辑选择模块去抉择储能电池组的运行模

式,逻辑选择模块结构如图5所示。

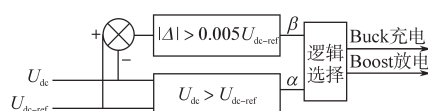


图5 逻辑选择模块结构

Fig.5 Logic selection module structure

这里的逻辑选择模块采取直流额定母线电压值与母线上电压的瞬时值相比较,即 U_{dc-ref} 与 U_{dc} 相比较,结果记为布尔量 α 的值,而布尔量 β 的值则由 $|\Delta I| = U_{dc} - U_{dc-ref}$ 与 $0.05U_{dc-ref}$ 相比较得出。具体各工作模式与布尔量 α, β 的关系如表2所示。

表2 储能系统各工作模式下逻辑选择

Tab.2 Logic selection under each working mode of energy storage system

α	β	Boost	Buck	工作模式
0	0	0	0	X
0	1	1	0	放电
1	0	0	0	X
1	1	0	1	充电

恒压放电控制的主要结构是以外环为电压环,同时以内环为电流环,采用电压、电流这2个环去实现放电控制,如图6所示。其中,在电流控制环前面加入了电流上、下限的限制,这是为了阻止放电过程中可能出现的对电池造成极大损坏的过电流放电现象的发生。

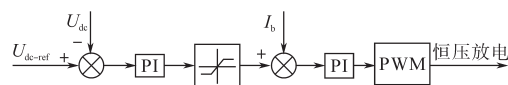


图6 恒压放电控制

Fig.6 Constant voltage discharge control

1.3 负荷部分

直流负荷与直流母线相连,而直流微电网根据直流侧实际负荷的重要性与优先级来抉择具体的甩负荷方案,恒压放电控制如图7所示。

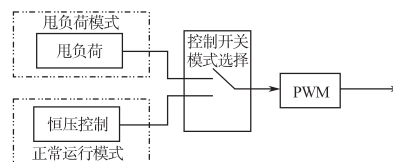


图7 恒压放电与甩负荷控制

Fig.7 Constant voltage discharge and load shedding control

2 直流微电网的工作模式及控制策略

为保障孤岛模式下的直流微电网可靠运行,

微电网系统中必须含有一个或多个松弛端,来保证母线上电压的稳定,同时均衡直流微电网内部系统之间的功率。忽略直流微电网线路上的功率损耗,孤岛模式下光储直流微电网,直流母线上的瞬时功率平衡如下式所示:

$$\sum_{i=1}^m P_{pvi}(t) + \sum_{j=1}^n P_{bj}(t) - \sum_{k=1}^l P_{lk}(t) = 0 \quad (3)$$

式中: l, n, m 依次为直流负荷的数量、储能电池组的数量与光伏板的数量; $P_{pvi}(t)$ 为第*i*个光伏板对微电网系统输入的功率; $P_{bj}(t)$ 为第*j*个储能电池对微电网系统输入的功率; $P_{lk}(t)$ 为第*k*个负荷所消耗的功率值。

同时规定储能电池组对微电网系统放电时,输入直流母线上的功率取为正值。

2.1 直流微电网模式

直流侧母线上瞬间的功率平衡,在数学上是一个多目标优化控制的问题。也就是说,直流微电网系统是为了求得光伏最大化发电功率的模式,同时优化储能系统利用率与直流母线上电压的稳定^[10-11]。所以,本文采用分段式控制策略去完成直流微电网系统的稳定安全运行。

分段式控制策略是依据直流母线电压作为信息载体,通过预设的电压阈值节点把直流母线电压分成5个区块,去选择光储直流微电网系统之间的工作模式,母线电压 $I-U$ 特性曲线如图8所示。

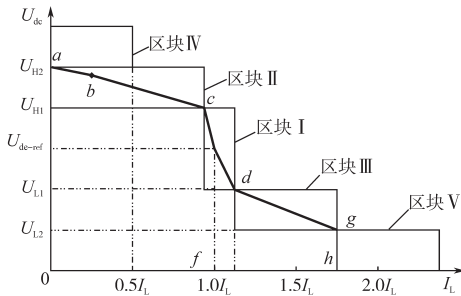


图8 母线电压 $I-U$ 特性曲线

Fig.8 Characteristic curve of bus voltage $I-U$

4个关键的节点阈值选择和系统额定母线电压值及光储微电网系统的稳定运行紧密相关,相邻节点电压阈值的选取必须恰当。本文直流母线电压额定值 U_{dc-ref} 与选取的4个阈值之间的关系如下式所示:

$$U_{L2} < U_{L1} < U_{dc-ref} < U_{H1} < U_{H2} \quad (4)$$

式中: U_{L2}, U_{H2} 分别为直流母线电压允许波动的上、下限临界电压值; U_{L1}, U_{H1} 分别为储能电池放电与充电临界值; U_{dc-ref} 为直流母线电压额定值。

5个区块的电压区间分别为:区块1, $U_{L1} < U_{dc} < U_{H1}$;区块2, $U_{L2} < U_{dc} < U_{L1}$;区块3, $U_{H1} < U_{dc} < U_{H2}$;区块4, $U_{dc} < U_{L2}$;区块5, $U_{H2} < U_{dc}$ 。

本文设置的系统母线电压电压节点阈值分布具体如表3所示,其中, U_{dc-ref} 为额定直流母线电压,相邻工作模式之间的母线电压值相差5%。

表3 母线电压电压节点阈值分布

U_{L2}	U_{L1}	U_{dc-ref}	U_{H1}	U_{H2}
$0.9U_{dc-ref}$	$0.95U_{dc-ref}$	$1.0U_{dc-ref}$	$1.05U_{dc-ref}$	$1.1U_{dc-ref}$

2.2 分段式控制策略

分段式控制策略,它的目的是为了让光伏源实现电能的最大功率输出,同时能够使孤岛模式下直流微电网实现可靠而高效的运行。具体通过两级控制,第1级在区块 I、区块 II、区块 III 中,使清洁能源被最大限度利用,同时提高光储微电网系统的稳定性,均衡储能电池组的充放电功率;第2级在区块 IV、区块 V 中,极端情况下依然可以保证光储微电网系统安全而稳定地运行。

1) 区块 I: $U_{L1} < U_{dc} < U_{H1}$ 。当母线电压大于 U_{L1} , 并小于 U_{H1} 时,光伏系统采用 MPPT 工作模式运行,这个过程全部由光伏系统提供负荷侧所消耗的功率。微电网系统在这个过程中,由于没有储能系统作为松弛终端来保证母线上电压的稳定,所以在区块 I 中母线电压值可以在较小范围内波动。区块 I 中,该系统内部之间的功率平衡可由下式表示:

$$\sum_{i=1}^m P_{pvi}(t) = \sum_{k=1}^l P_{lk}(t) \quad (5)$$

2) 区块 II: $U_{H1} < U_{dc} < U_{H2}$ 。当母线电压大于 U_{H1} , 并小于 U_{H2} 时,在负荷电阻减少或者光照强度良好的情况下,光伏源的输出功率大于负荷所需要的功率,那么光储微电网系统的母线电压将会上升并转入区域 II 范围内,储能系统的变换器将开始工作,使得储能系统处于充电状态,用以储存直流微电网系统中的多余电能。储能系统中下垂控制决定各储能电池组的充电功率,如图9所示。区块 II 在此里采用线性下垂控制,去平衡储能电池系统之间的电压调节能力,如下式所示:

$$U_{bi}^{ref} = \begin{cases} U_{H1} - m_{bi} I_{bi} & I_{bi} < 0 \\ U_{L1} - m_{bi} I_{bi} & I_{bi} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,规定储能电池组放电时 $I_{bi} > 0$, 充电时 $I_{bi} < 0$, U_{bi}^{ref} 为参考的电压, m_{bi} , I_{bi} 分别为第 i 个储能电池组的下垂曲线系数和母线电流。

区块 II 系统的下垂特性,见图 8 中线段 $c-a$ 。

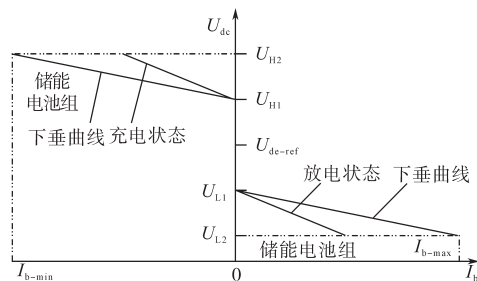


图9 储能电池组的下垂特性

Fig.9 Droop characteristics of energy storage battery pack

3) 区块 III: $U_{L2} < U_{dc} < U_{L1}$ 。当母线电压大于 U_{L2} , 并小于 U_{L1} 时, 光储微电网系统之间将出现短暂功率短缺, 光伏源输出的功率无法满足负荷侧需求, 则母线电压降低, 光储系统装入区块 III 中。在这个区块中, 光伏系统以 MPPT 形式对外输出功率, 此时储能系统以恒压模式运行, 并按照直流微电网系统之间功率缺额去补偿所需。区块 III 的下垂曲线, 见图 8 中线段 $d-g$ 。其中, 储能电池组放电的下垂特性见图 9。

4) 区块 IV: $U_{H2} < U_{dc}$ 。当母线电压大于 U_{H2} 时, 光伏源系统会先以 MPPT 形式工作, 储能电池是充电模式; 接着如果储能电池的容量已经饱和, 或者储能电池无法与光伏系统配合去满足直流母线侧电压下降至允许区间中, 那么光伏源系统就会切换到恒压模式工作, 保证直流母线电压的稳定。

5) 区块 V: $U_{dc} < U_{L2}$ 。当母线电压小于 U_{L2} 时, 光储微电网系统之间功率严重不足, 两者都无法满足负荷侧电力需求时, 在这种状态下, 为了防止母线电压的崩溃, 就必须甩掉一部分不重要的负荷, 保障母线电压上的稳定与直流微电网系统的安全运行。一般情况, 依据直流侧各负荷的重要性来抉择具体甩负荷方案。所以, 光伏源与储能电池的容量应选取适当, 以确保能够在大部分时间中满足系统安全运行。

3 仿真与分析

本文通过 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 验证所提出的孤岛光储直流微电网协调控制策略的可行性与有效性^[12-13]。仿真参数为: 光伏电源功率 1.8 kW, 储能电池容量 4.5 kW·h, 最大输出

功率约 ± 2 kW, 初始电量荷电状态 SOC 为 50%, 电池安全容量严格限制在 10% 与 90% 之间, 额定的母线电压 380 V。起始光照强度 1 400 W/m², 负荷电阻值 100 Ω ; 在 0.2 s 时刻, 使光照强度下降 400 W/m²; 在 0.3 s 时刻, 减小电阻至 80 Ω , 使系统增负荷运行; 最后, 在 0.4 s 时刻, 使光照强度上升 400 W/m²。孤岛直流微电网工作的系列曲线如图 10 所示, 直流微电网系统的各工作阶段功率变化如表 4 所示。

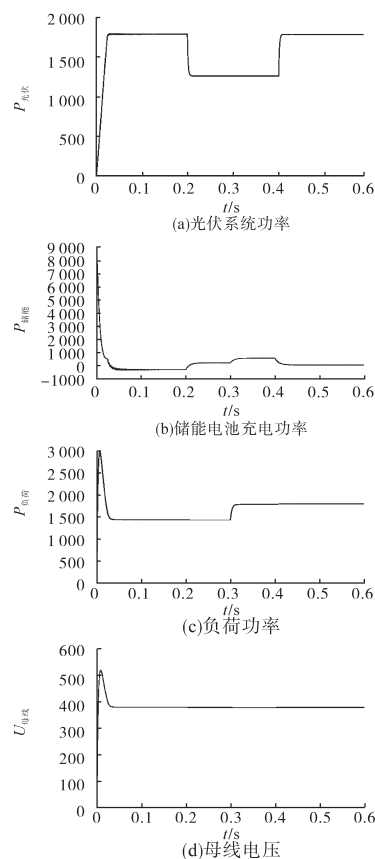


图10 孤岛直流微电网工作的系列曲线

Fig.10 Series curves of DC microgrid work in isolated island

表4 直流微电网系统的各工作阶段功率变化

Tab.4 Power changes at each stage of the DC microgrid system

	$P_{\text{光伏}}/\text{W}$	$P_{\text{储能}}/\text{W}$	$P_{\text{负荷}}/\text{W}$	$U_{\text{母线}}/\text{V}$
第1阶段	1 790	-340	1 450	380.5
第2阶段	1 260	190	1 450	379.5
第3阶段	1 270	520	1 790	379
第4阶段	1 790	0	1 790	379.5

由图 10 及表 4 可看出, 第 1 阶段, 在 0 ~ 0.2 s 时段, 光伏系统采用 MPPT 控制, 储能系统控制母线电压的稳定, 光伏系统此时功率约为 1 790 W, 负荷功率为 1 450 W, 储能电池充电功率约为 340 W, 母线电压控制在约 380.5V; 第 2 阶段, 由于在 0.2 s 时刻, 调节扰动使得光照强度下降 400

W/m^2 ,光伏发电功率在0.2 s时刻迅速减小至约1 260 W,同时为保障系统的正常运行与母线电压的稳定,此时的储能系统立刻由充电模式切换成放电模式约190 W,负荷功率仍然保持不变,为1 450 W,母线电压波动小,约为379.5 V,响应速度快;接着,第3阶段,在0.3 s时刻,通过减小电阻的方式,实现加投负荷,负荷功率在0.3 s时刻增加至约1 790 W,而光伏发电基本没有变化,输出功率约为1 270 W,此时储能系统继续保持放电状态,并且迅速提高到约520 W功率来满足系统功率平衡稳定,母线电压波动较小,约为379 V,响应速度较快;最后,在第4阶段,通过调节使光照强度上升 $400 \text{ W}/\text{m}^2$,则光伏发电功率上升约为1 790 W,而此时负荷功率为1 790 W,所以储能功率约为0,不对外输出功率,也就是只有光伏系统在工作,这个阶段光伏发电由MPPT模式转为下垂控制模式,此时稳定母线电压约为379.5 V,波动较小,响应速度较快。

4 结论

本文采用孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略,针对孤岛模式下直流微电网中,光伏发电单元因为自身易受外界环境影响会出现微电网功率不平衡,而传统的微电网协调控制策略使得储能电池电能质量波动较大,导致其协调控制模式切换的频率较高,为此提出了本文的协调控制策略。在Matlab/Simulink的仿真中,提出的协调控制策略使得光伏发电效率较高,同时能够降低储能系统的频繁切换,提高储能电池的工作寿命,均衡系统之间的功率,有效减小了母线电压波动,实现独立直流微电网稳定可靠运行,因此其具有重要的作用和意义。其他方面,这里只进行了较小功率非并网的单一微电网系统的验证,

而对较大功率、并网的混合微电网系统而言是否仍具有良好性能,有待下一步的研究。

参考文献

- [1] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
- [2] 宫娅宁,苏舒,林湘宁,等. 独立光伏发电储能系统能量管理与经济调度研究[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(2):3-9,30.
- [3] 阳同光,桂卫华. 基于神经网络滑模控制光伏系统最大功率点跟踪[J]. 太阳能学报,2016,37(9):2386-2392.
- [4] 熊远生,俞立,徐建明. 光伏发电系统多模式接入直流微电网及控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):37-43.
- [5] 米阳,吴彦伟,符杨,等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(8):37-45.
- [6] Dragicevic T, Guerrero J M, Vazquez 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.
- [7] 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,2014,38(9):2356-2362.
- [8] 薛亚林,周建萍,崔屹. 基于直流微电网的混合储能协调控制策略仿真研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(8):19-25,37.
- [9] 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):16-24,4.
- [10] 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.
- [11] 薛贵挺,张焰,祝达康. 孤立直流微电网运行控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):112-117.
- [12] 梁帅奇,牟晓春,赵雪,等. 含有储能单元的微电网运行控制技术[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(4):74-79,87.
- [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.

收稿日期:2018-06-08

修改稿日期:2018-07-31

(上接第19页)

- 变结构控制技术[J]. 电机与控制学报,2018,22(10):20-24,34.
- [6] 吴爱国,刘海亭,董娜. 机械臂神经网络非奇异快速终端滑模控制[J]. 农业机械学报,2018,49(2):395-404.
- [7] 常雪剑,刘凌,崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可边界滑模控制[J]. 西安交通大学学报,2015,49(6):53-59.
- [8] 张晓光,赵克,孙力. 永磁同步电动机混合非奇异终端滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(27):116-122.
- [9] 张巍巍,王京. 基于指数趋近律的非奇异Terminal滑模控制[J]. 控制与决策,2012,27(6):909-913.

- [10] 华玉龙,孙伟,迟宝山,等. 非奇异快速终端滑模控制[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(5):1119-1125.
- [11] Feng Y, Yu X H, Man Z. Nonsingular Terminal Sliding Mode Control of Rigid Manipulators [J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [12] Yang L, Yang J. Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control for Nonlinear Dynamical Systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(16): 1865-1879.

收稿日期:2019-04-02

修改稿日期:2019-05-28