

基于功率分层的直流微电网协调控制策略

孟 明¹, 陈世超¹, 卢玉舟¹, 赵树军², 李振伟²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 国网邯郸供电公司, 河北 邯郸 056001)

摘要: 针对以光伏发电为主的直流微电网, 描述了其基本结构和组成, 设定了系统各单元运行的约束条件, 为协调控制策略的实施奠定了基础; 依据系统净负荷和蓄电池充放电功率阈值划分了功率层区, 提出了基于功率分层的协调控制策略, 进一步分析了该协调控制策略下各单元的模式判别流程及变换器控制方法。仿真结果表明, 该控制策略可以适应直流微电网不同的运行状态, 维持直流母线电压的稳定, 延长蓄电池的使用寿命, 保证可再生能源的充分利用, 提高系统的灵活性和稳定性。

关键词: 直流微电网; 运行约束条件; 系统净负荷; 功率分层; 协调控制; 变换器控制

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.005

0 引言

微电网是由分布式电源、负荷单元及储能装置按照特定的拓扑结构组成的具备独立管理、保护、控制能力的新型电力网络, 对可再生能源具有良好的兼容性和广泛的接纳性^[1-3]。直流微电网以其诸多优势成为可再生能源消纳的理想途径, 是未来微电网技术的发展方向^[4-5]。系统控制策略是直流微电网的关键技术之一, 合理的控制策略是系统内功率平衡及直流母线电压稳定的保障^[6-7]。

直流微电网是以新能源发电技术为支柱、低惯性电力电子装置为主导的多约束、多状态、多维度的复杂自治电力系统, 其安全稳定运行需要源、网、荷、储之间的良好协调与互动^[8-10]。文献^[11]建立了直流微电网中带恒功率负载的变换器在平衡点处的小信号模型, 提出了提高直流母线电压稳定性的控制策略, 但其只是分别在孤岛、并网运行状态下进行了验证, 各运行状态间缺乏互动与转换, 不利于过渡状态下的无缝切换。文献^[12-13]提出了直流微电网电压分层控制策略, 通过检测直流母线电压的变化设定系统运行模式。文献^[14]提出了直流分层控制系统, 第一层控制直流母线电压, 第二层对跌落的电压进行补偿。文献^[15]研究了带恒功率负荷的直流微电网能量管理和协调控制方法, 通过各个模式的切换保持系统能量平衡。

现有的直流微电网协调控制研究大多集中于电压分层控制, 通过各电压等级的划分形成不同的电压层区, 根据电压的变化设置系统的运行模式, 而这种方法会引起直流母线电压的波动, 不利于系统的稳定, 同时各模式间切换标准不统一, 不利于直流微电网的无缝切换。针对上述问题, 本文提出了一种基于系统净负荷的功率分层协调控制策略, 当系统

功率达到平衡时, 直流母线电压将保持稳定。首先, 描述了直流微电网系统的基本构成, 设定了系统运行的约束条件; 然后, 依据系统净负荷和蓄电池充放电功率阈值划分了功率层区, 进一步分析了该协调控制策略下各单元的模式判别流程及变换器控制方法; 最后, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型, 研究了在并网、孤岛及过渡运行状态下, 当分布式电源输出或负荷发生变化导致系统出现功率不平衡时控制策略的有效性。

1 直流微电网系统简介

1.1 系统结构及组成

直流微电网系统的基本结构如图 1 所示, 其主要由以下 5 个部分组成。

a. A 为由光伏 PV (Photo Voltaic) 模块组成的分布式发电单元。其中, P_{pv} 为该单元输出的总功率。光伏模块通过 DC/DC 变换器接入系统, 正常情况下工作在最大功率点跟踪 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 模式, 以达到不同环境条件下新能源高效利用的效果; 而某些情况下工作在恒压模式, 通过降功率运行平衡系统能量。

b. B 为公共电网单元。其中, P_{grid} 为直流微电网

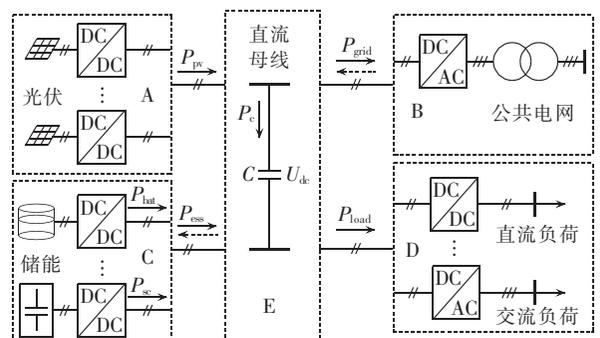


图 1 直流微电网系统的基本结构

Fig.1 Basic structure of DC microgrid system

馈入公共电网的功率。直流微电网通过双向 DC/AC 并网变换器与公共电网进行能量交换,双向 DC/AC 并网变换器可以根据直流母线电压调节功率流向,设定交换功率大小,判断系统的运行状态。

c. C 为由蓄电池和超级电容组成的混合储能单元。其中, P_{ess} 为储能单元的放电总功率; P_{bat} 为蓄电池的放电功率; P_{sc} 为超级电容的放电功率。蓄电池和超级电容通过双向 DC/DC 变换器控制充放电功率,从而维持系统的功率平衡及直流母线电压的稳定。蓄电池为系统的主要储能装置,而超级电容作为辅助储能装置在特定状态下投入使用,可提高系统的性能。

d. D 为负荷单元。其中, P_{load} 为该单元消耗的总功率。交流、直流负荷分别通过 DC/AC 和 DC/DC 变换器接入直流母线。系统中负荷包括重要负荷、可转移负荷和可中断负荷 3 种,根据负荷优先级可进行减载或加载控制,以保证系统功率平衡及新能源功率的充分利用。

e. E 为直流母线单元。其中, P_{c} 为直流母线等效电容的充电功率; C 为直流母线等效电容值; U_{dc} 为直流母线电压值。经分析,可得如下关系:

$$P_{\text{net}} = P_{\text{load}} - P_{\text{pv}} \quad (1)$$

$$P_{\text{c}} = P_{\text{pv}} + P_{\text{ess}} - P_{\text{grid}} - P_{\text{load}} \quad (2)$$

$$U_{\text{dc}} \frac{dU_{\text{dc}}}{dt} = \frac{1}{C} (P_{\text{pv}} + P_{\text{ess}} - P_{\text{grid}} - P_{\text{load}}) \quad (3)$$

其中, P_{net} 为系统净负荷。式(2)为系统各单元功率平衡方程,式(3)为直流母线电压与系统功率流动的关系方程。为了保证系统安全稳定地运行,必须在直流微电网不同的运行状态下采取特定的源、储、网、荷协调控制策略,从而实现直流母线电压的稳定和能量的动态平衡。

1.2 系统运行约束条件

针对图 1 中的直流微电网系统,为了保证直流微电网的正常运行及协调控制策略的有效实施,系统各单元需要满足特定的约束条件。

a. 设置蓄电池荷电状态 SOC(State Of Charge)约束和最高充放电功率约束,防止过充或过放;同时设置最低充放电功率约束,防止储能单元频繁充放电切换,延长蓄电池的使用寿命。需要注意的是,不同运行状态下最低充放电功率约束数值不同,具体如下:

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\max} \quad (4)$$

$$P_{\text{discharge}_{\min}} \leq P_{\text{bat}} \leq P_{\text{discharge}_{\max}} \quad (5)$$

$$P_{\text{charge}_{\min}} \leq |P_{\text{bat}}| \leq P_{\text{charge}_{\max}} \quad (6)$$

其中, SOC_{\min} 为蓄电池最低荷电状态, SOC_{\max} 为蓄电池最高荷电状态; $P_{\text{discharge}_{\min}}$ 为蓄电池开始工作的最低放电功率, $P_{\text{discharge}_{\max}}$ 为其最高放电功率; $P_{\text{charge}_{\min}}$ 为蓄电池开始工作的最低充电功率, $P_{\text{charge}_{\max}}$ 为其最

高充电功率。

b. 设置协调控制策略中各单元的功率关系约束^[16]。与控制策略相结合以保证系统在各运行状态下的安全性、经济性和高效性,即:

$$P_{\text{discharge}_{\max}} \geq P_{\text{critical}_{\text{load}}} \quad (7)$$

$$P_{\text{dc/ac}_{\text{rating}}} \geq P_{\text{pv}_{\max}} \quad (8)$$

$$P_{\text{pv}_{\max}} \geq P_{\text{load}_{\max}} + P_{\text{charge}_{\max}} \quad (9)$$

其中, $P_{\text{critical}_{\text{load}}}$ 为系统重要负荷消耗的功率; $P_{\text{dc/ac}_{\text{rating}}}$ 为双向 DC/AC 并网变换器的额定功率; $P_{\text{pv}_{\max}}$ 为分布式发电单元的最高输出功率; $P_{\text{load}_{\max}}$ 为系统负荷的最高消耗功率。

2 直流微电网协调控制策略分析

2.1 协调控制策略下的能量管理

正常情况下,直流微电网并网运行;而当公共电网出现故障时,直流微电网与公共电网断开进入孤岛运行状态。因此,直流微电网有并网、孤岛、并网转孤岛过渡、孤岛转并网过渡 4 种运行状态。提出适用于各个运行状态的基于功率分层的直流微电网协调控制策略,系统可根据净负荷的变化改变运行方案,从而实现各单元的平衡。图 2 为基于系统净负荷的功率分层示意图,图中并未给出储能单元荷电状态达到上限、下限的情况,而是在下文分析中说明。

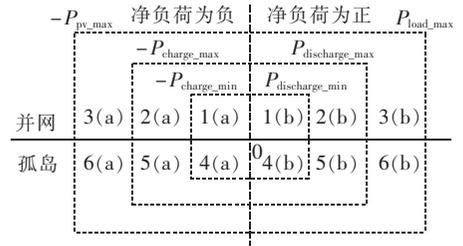


图 2 基于系统净负荷的功率分层示意图

Fig.2 Schematic diagram of power hierarchy based on system payload

功率分层的形成主要依靠四级判别:系统净负荷判别;系统净负荷与储能单元最小充放电功率比较;储能单元荷电状态判别;系统净负荷与储能单元最大充放电功率判别。需要注意的是,系统净负荷为正值和负值的情况是一一对应的,每级判别将形成不同的功率分配方案,各个单元也需要工作在不同的控制模式。图 3 为各变换器的控制模式示意图, A 为光伏变换器的控制模式, B 为蓄电池变换器的控制模式, C 为并网变换器的控制模式。超级电容只在 4(a)/4(b) 情况下投入运行,同时,在非计划孤岛时为运行状态的切换提供支撑,其他方案中均由蓄电池提供储能支撑。系统中的中央控制器可以根据功率等测量信号和设定的功率分层方案,通过通信线路设置各变换器的控制模式,还可以进行孤岛检测,

以应对非计划孤岛的产生。功率分层策略适用于直流微电网各个运行状态,功率分层的临界值可以根据系统运行状态、配置容量等信息进行调整。

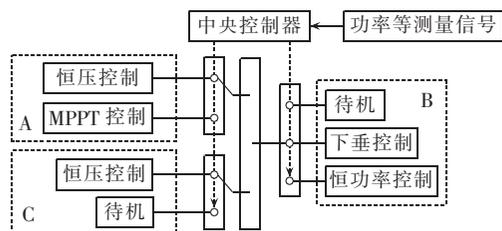


图3 各变换器控制模式

Fig.3 Control modes of different converters

2.2 协调控制策略下的功率分层方案

表1为协调控制策略下的功率分层方案,共有7种功率分层方案,下面结合协调控制策略下的能量管理对各方案进行说明。

表1 协调控制策略下功率分层方案

Table 1 Power hierarchy scheme under coordinated control strategy

运行状态	功率分配方案	系统净负荷	功率平衡单元
并网运行	1(a)/1(b)	负/正	公共电网
	2(a)/2(b)	负/正	蓄电池
	3(a)/3(b)	负/正	公共电网+蓄电池
	4(a)/4(b)	负/正	超级电容
孤岛运行	5(a)/5(b)	负/正	蓄电池
	6(a)/6(b)	负/正	各单元
	7(a)/7(b)	负/正	各单元

a. 方案 1(a)/1(b):直流微电网并网运行,系统净负荷小于蓄电池最小充放电功率,此时光伏变换器运行在 MPPT 控制模式,并网变换器运行在恒压控制模式以维持直流母线电压,储能变换器运行在待机状态,以提高蓄电池的使用寿命。当系统净负荷为正时,并网变换器工作在整流状态;净负荷为负时,并网变换器工作在逆变状态。同时当蓄电池荷电状态达到上限或下限时,系统也采用此方案。

b. 方案 2(a)/2(b):直流微电网并网运行,系统净负荷介于蓄电池最小和最大充放电功率之间,光伏变换器运行在 MPPT 控制模式,储能变换器运行在下垂控制模式。当系统净负荷为正时,蓄电池放电;系统净负荷为负时,蓄电池充电。蓄电池平抑系统功率波动,此时直流母线电压维持在额定值附近,公共电网与直流微电网间不发生功率交换,并网变换器处在待机状态,实现本地负荷对可再生能源的充分消纳,提高系统的经济性。

c. 方案 3(a)/3(b):直流微电网并网运行,系统净负荷大于蓄电池的最大充放电功率,此时光伏变换器运行在 MPPT 控制模式,储能变换器运行在恒功率控制模式,蓄电池以最大功率充电或放电,并网变换器采用恒压控制模式,公共电网参与系统功率

分配。

d. 方案 4(a)/4(b):直流微电网孤岛运行,系统净负荷小于蓄电池最小充放电功率,光伏变换器运行在 MPPT 控制模式,超级电容投入运行,采用下垂控制模式,蓄电池待机。由于超级电容具有动态性能好、循环寿命长的特点,此方案能防止蓄电池频繁充放电,有效延长蓄电池使用寿命,同时维持直流母线电压稳定。

e. 方案 5(a)/5(b):直流微电网孤岛运行,系统净负荷介于蓄电池最小和最大充放电功率之间,光伏变换器运行在 MPPT 控制模式,超级电容切除运行,储能变换器运行在下垂控制模式。

f. 方案 6(a)/6(b):直流微电网孤岛运行,系统净负荷大于蓄电池的最大充放电功率,储能变换器运行在下垂控制模式,此时系统净负荷超过了储能单元的调节上限。当系统净负荷为正时,系统切负荷运行,同时光伏变换器运行在 MPPT 控制模式;当系统净负荷为负时,需要光伏单元降功率运行,此时光伏变换器切换到恒压控制模式,以保证系统各单元的功率分配平衡。

g. 方案 7(a)/7(b):直流微电网孤岛运行,蓄电池荷电状态达到上限或下限,由于没有公共电网的支撑,因此需要切负荷或光伏单元降功率运行,以维持系统功率平衡。

2.3 系统协调控制流程

2.3.1 并网运行状态

当直流微电网并网运行时,系统功率和直流母线电压由公共电网单元和储能单元共同控制,此时系统具备较强的功率分配能力,可满足新能源的最大消纳和全部负荷的正常运行。光伏发电单元运行在 MPPT 模式,并网变换器和储能变换器则根据系统的净负荷大小进行运行模式的切换和功率的分配,当储能单元荷电状态达到上限或下限时停止工作,由公共电网维持系统能量平衡。并网状态下协调控制流程图如图4所示,图4中, P_{bat} 和 P_{grid} 数值的正负代表功率的流向, P_{load}^* 和 P_{pv}^* 分别为其前一时刻的数值大小。且当采用3(a)和3(b)方案时,有:

$$P_1 = |P_{\text{net}}| - P_{\text{charge_max}} \quad (10)$$

$$P_2 = -P_{\text{charge_max}} \quad (11)$$

$$P_3 = P_{\text{discharge_max}} - P_{\text{net}} \quad (12)$$

$$P_4 = P_{\text{discharge_max}} \quad (13)$$

考虑储能单元的荷电状态和最小充放电功率的协调控制策略,通过公共电网单元和储能单元的配合,可以有效地减少蓄电池充放电次数,提高其使用寿命,降低并网变换器的损耗。并网状态下,通过设定功率分层的临界值,可实现各单元控制模式和运行区间调整,提高系统的灵活性和交互性。

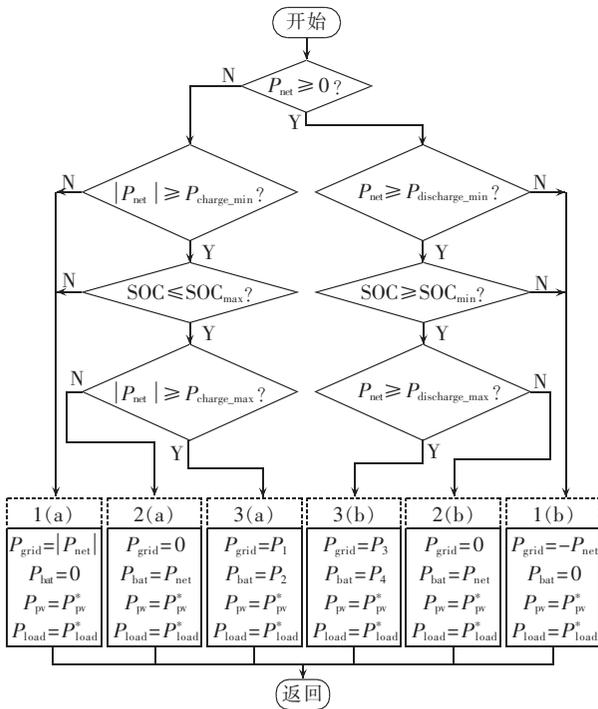


图 4 并网状态下协调控制流程图
Fig.4 Flowchart of coordinated control in grid-connected condition

2.3.2 孤岛运行状态

孤岛运行时,直流微电网失去了公共电网的支撑,系统的功率平衡和直流母线电压的稳定性将受限于储能单元的容量及系统功率调整能力,特殊情况下需要通过分布式发电单元的降功率运行或负荷单元的负荷投切来维持系统的稳定。图 5 为孤岛状态下协调控制流程图,其中:

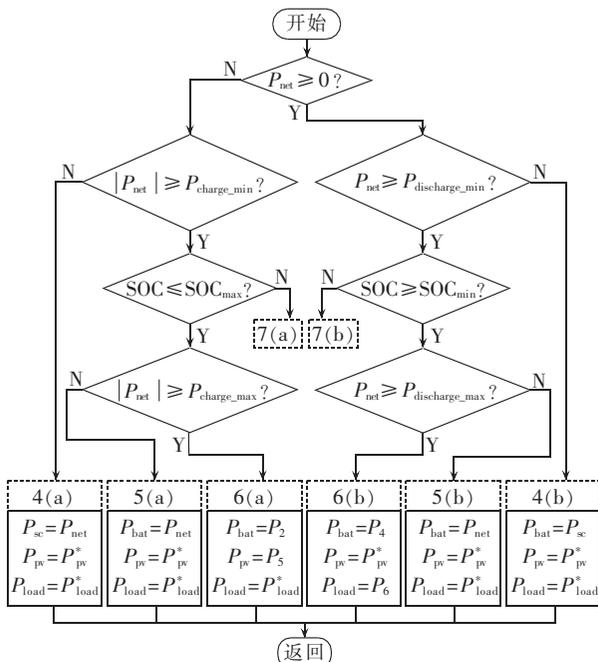


图 5 孤岛状态下协调控制流程图
Fig.5 Flowchart of coordinated control in islanding condition

$$P_5 = P_{pv}^* - (|P_{net}| - P_{charge_max}) \quad (14)$$

$$P_6 = P_{load}^* - (P_{net} - P_{discharge_max}) \quad (15)$$

在方案 4(a)/4(b)中合理设置储能单元的最小充放电功率,当系统不平衡功率较小时蓄电池处于待机状态,超级电容投入运行,以延长蓄电池的使用寿命。当系统不平衡功率较大且储能单元荷电状态达到上限或下限时,储能单元进入待机模式以防止过充或过放,系统将进入 7(a)/7(b)方案,需要进行分布式发电单元降功率或者负荷单元切负荷操作,从而达到新的功率平衡状态。式(16)为 7(a)方案下降功率运行的分布式发电单元输出功率,式(17)为 7(b)方案下切负荷后的负荷单元总功率,即:

$$P_{pv} = P_{pv}^* - |P_{net}| \quad (16)$$

$$P_{load} = P_{load}^* - P_{net} \quad (17)$$

2.3.3 过渡运行状态

过渡运行状态包括并网转孤岛和孤岛转并网 2 种,2 种状态切换的过程中系统功率平衡单元发生转变,而系统中的净负荷大小是保持恒定的。因此,基于系统净负荷的功率分层控制更有利于直流微电网的无缝切换,2 种状态下的协调控制策略操作流程保持一致,切换过程中只需根据系统状态和本地测量信息设定各单元控制模式,从而维持过渡状态下直流母线电压的稳定。

直流微电网的中央控制器通过通信线路检测并网点开断信息,当系统进行计划孤岛的状态转变时,需提前设定各单元的控制模式,此时系统整体控制目标是过渡状态下直流母线电压维持稳定,系统各单元运行在特定的过渡模式,不会进行各级判别。当系统发生非计划孤岛时,中央控制器检测到直流微电网状态发生变化,为了缓解系统功率不平衡的问题,超级电容与蓄电池立即投入运行。混合储能系统支撑非计划孤岛,超级电容的瞬时动态响应速度较快,而蓄电池的功率调节范围较广,这种互补特性有利于过渡状态下系统的稳定。在系统达到下个稳定状态后,需要根据上述的协调控制策略,重新调整自身的控制模式。表 2 为计划孤岛时过渡状态下各单元控制模式。

表 2 过渡状态下各单元控制模式
Table 2 Control modes of different units in transition conditions

净负荷	并网转孤岛		孤岛转并网		
	光伏	蓄电池	光伏	蓄电池	公共电网
正	MPPT	下垂控制	MPPT	下垂控制	恒压控制
负	恒压控制	下垂控制	MPPT	下垂控制	恒压控制

3 系统变换器及其控制

在上述的协调控制策略中,需要系统各变换器相互配合,在不同的状态下按照特定的约束条件、控

制模式和控制流程运行,以达到直流微电网整体的控制最优,图 6 为本文控制策略中各变换器基本架构及控制框图。

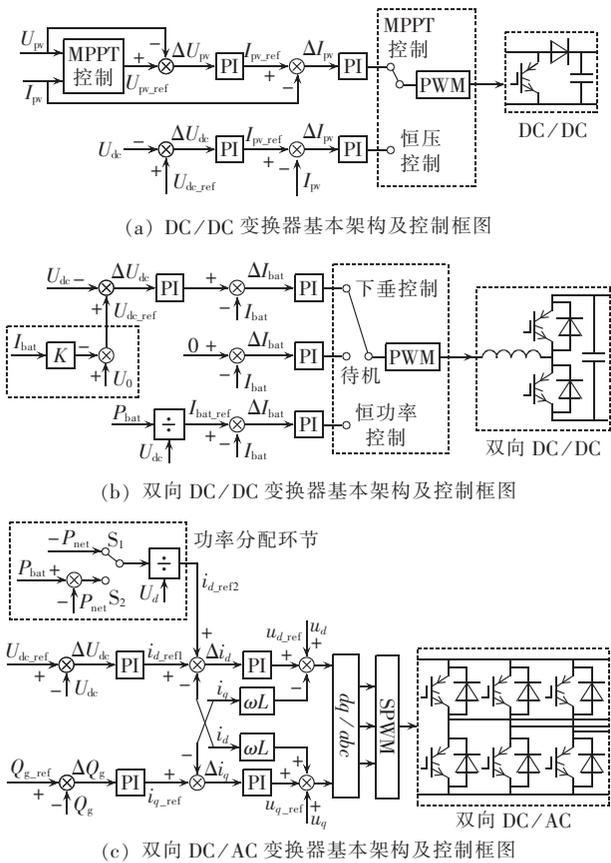


图 6 各变换器基本架构及控制框图

Fig.6 Block diagram of basic architecture and control for different converters

分布式发电单元的 DC/DC 变换器有 MPPT 控制和恒压控制 2 种模式。MPPT 控制中通过采用增量电导算法获得光伏模块最大功率点处的电压和电流,经电压外环和电流内环控制得到 PWM 脉冲信号,使光伏模块输出最大功率;而恒压控制在维持直流母线电压稳定的同时可达到降功率运行的效果。

蓄电池的双向 DC/DC 变换器有下垂控制、恒功率控制和待机 3 种模式,通过互补的 PWM 脉冲信号可实现蓄电池的充放电切换。待机模式可延长蓄电池的使用寿命;恒功率控制可使蓄电池与直流母线间进行最大功率交换;下垂控制^[17-18]可根据电压-电流的下垂关系得到直流母线参考电压,经电压、电流双环控制达到控制目标。当超级电容投入运行时,其控制方法与蓄电池变换器的类似。

双向 DC/AC 变换器通常工作在恒压模式,也可以工作在待机模式。在待机模式下其控制策略与 DC/DC 变换器的类似,此时公共电网与直流微电网间不发生功率交换。在恒压工作模式下,其通过公共电网电流的 d 轴和 q 轴分量可分别实现并网变换

器的有功、无功功率的控制,设定无功参考为 0,使系统以单位功率因数运行。本文在电流 d 轴分量的控制中加入了功率分配环节,通过公共电网单元所分配的功率得到与其输出或吸收的功率密切相关的电流内环部分的参考值 i_{d_ref2} ,将 i_{d_ref2} 作为 DC/AC 变换器电流内环控制的前馈补偿量,提高系统对功率的响应速度,增强系统对功率分层的适应性。当 S_1 接通时对应的是 1(a)和 1(b)方案, S_2 接通时对应的是 3(a)和 3(b)方案。并且, d 轴分量的外环控制包括用于维持直流母线电压稳定的电压环和用于系统功率调度的功率环 2 个部分,两者得到的参考分量 i_{d_ref1} 和 i_{d_ref2} 构成电流内环的 d 轴分量参考信号。

4 仿真分析

利用 MATLAB/Simulink 搭建上述直流微电网系统仿真模型,以验证协调控制策略的有效性。系统仿真模型的参数如下:直流母线额定电压为 500 V,分布式发电单元最大输出功率为 5.5 kW,储能单元最大充放电功率为 1.5 kW,储能单元处于并网和孤岛运行状态下最小充放电功率分别为 0.5 kW 和 0.3 kW,储能单元荷电状态为 20%~80%,最高负荷为 3.5 kW。其中本地负荷包括 1 kW 的重要负荷、1 kW 的可中断负荷和 1.5 kW 的可转移负荷,并分别由恒功率负荷和电阻模拟负荷 2 类组成。

4.1 并网运行状态

图 7 为并网运行状态下光伏出力变化时的系统运行特性(图中 U_{dc} 为标幺值,后同),0~3.5 s 时负荷功率为 2.5 kW,3.5~6.0 s 时负荷功率为 3.5 kW,各变换器对应的控制模式如表 1 所示,通过仿真以模拟

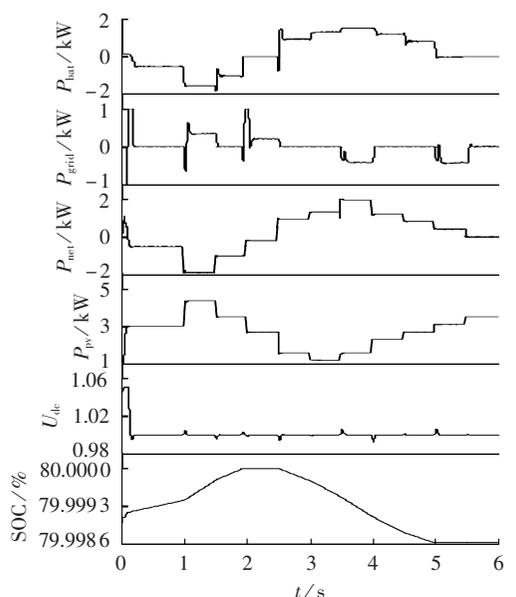


图 7 光伏变化时的系统运行特性

Fig.7 Operational performances of system during PV variation

实际系统中光照强度变化时协调控制策略的响应性能。仿真开始后, P_{pv} 约为 3.0 kW, $|P_{net}|$ 为 0.5 kW, 系统运行在 2(a) 方案下, 蓄电池充电以维持系统能量的平衡; 1.0 s 时光照强度突增至 1.2 kW/m², $|P_{net}| > P_{charge_max}$, 蓄电池进行恒功率充电, 而并网变换器进入恒压模式, 并通过功率分配环节吸收系统剩余净负荷; 1.5 s 时随着光照强度的降低并网变换器切换为待机模式; 1.9 s 时蓄电池荷电状态达到充电上限而处于待机模式, 并网变换器立即投入系统, 直流母线电压维持恒定。2.5 s 后随着光照强度的变化, 光伏输出功率发生改变, 从而引起 P_{net} 的变化, P_{net} 由负变正, 蓄电池开始放电。2.5~3.5 s 和 4~5 s 时蓄电池通过下垂控制独立维持直流母线电压稳定, 并保证可再生能源的充分利用; 3.5~4.5 s 时系统不平衡功率较大, 因此储能单元与公共电网同时投入工作, 蓄电池处于最大功率放电模式, 以减少微电网系统和公共电网的能量交换, 从而提高系统经济性; 5~6 s 时系统不平衡功率较小, $|P_{net}| < P_{discharge_min}$, 蓄电池切换为待机模式, 防止功率波动造成蓄电池频繁的开关机, 从而提高蓄电池寿命。

图 8 为并网运行状态下负荷变化时的系统运行特性, 0~4 s 光伏的输出功率为 1.8 kW, 4~6 s 光伏的输出功率为 4.5 kW, 1.5 kW 的可转移负荷变化引起系统控制模式的转变。仿真开始时, 系统负荷为 3.5 kW, $|P_{net}| > P_{discharge_max}$, 蓄电池以最大功率放电, 公共电网通过功率分配环节弥补功率缺额; 1 s 时可转移负荷开始逐步减少, 系统净负荷发生变化, $P_{discharge_min} < |P_{net}| < P_{discharge_max}$, 并网变换器停止工作, 储能单元由恒功率控制模式切换到下垂控制模式;

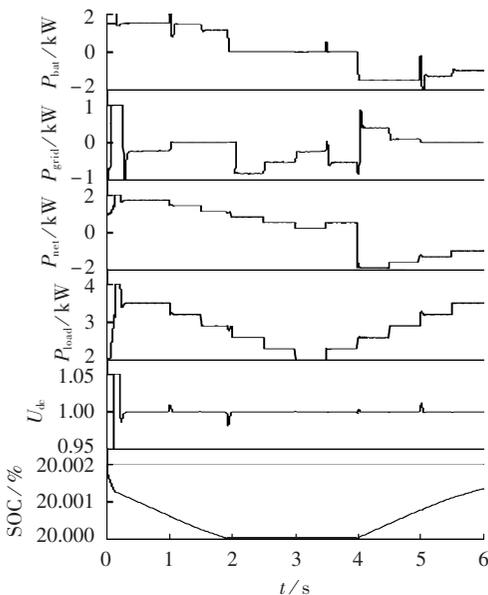


图 8 负荷变化时的系统运行特性
Fig.8 Operational performances of system during load variation

1.9 s 时蓄电池荷电状态达到放电下限, 系统运行模式由方案 2(b) 转换为方案 1(b), 从而形成对蓄电池的过放保护, 此时公共电网独立维持直流母线电压稳定; 4 s 时系统净负荷由正变负, 蓄电池开始充电, 并根据系统净负荷的大小调整充电功率; 5 s 时 $P_{charge_min} < |P_{net}| < P_{charge_max}$, 功率平衡单元由储能变为公共电网。

并网状态下, 分布式发电单元始终处于 MPPT 模式, 可保证可再生能源的充分利用。当外界环境发生改变而引起光伏输出功率的波动或负荷变化时, 基于系统净负荷变化形成功率分层, 通过不同功率层的源、储、网、荷的控制模式的切换, 维持直流母线电压的稳定; 同时通过蓄电池充放电功率区间的设定, 延长其使用寿命。

4.2 孤岛运行状态

图 9 为孤岛状态下的系统运行特性。仿真开始时, 系统负荷为 3.5 kW, 在储能单元的调节下直流母线电压维持稳定; 0.5 s 时光伏输出功率突降至 1.5 kW, 此时系统净负荷超过了 1.5 kW, 为了保证能量平衡切断了 0.5 kW 的可中断负荷; 1 s 时随着光伏输出功率的增加, 切断的可中断负荷重新接入。1~1.5 s 和 2~2.5 s 时系统运行在方案 5(b) 模式下。1.5 s 时光照强度继续增加, $|P_{net}| < P_{discharge_min}$, 蓄电池处于待机状态, 超级电容投入运行, 直流母线电压始终在额定值附近; 2.5 s 时光伏输出达到 3.7 kW 左右, 净负荷由正变负, 系统运行在方案 4(a) 模式下, 超级电容开始充电。3.5 s 时光照强度的增加和可转移负荷的减少导致净负荷超过了蓄电池设定的调节范围, 因此光伏由 MPPT 模式切换至恒压模式, 光伏降功率运行, 而蓄电池在恒功率模式下以最大功率充电, 4~5 s 时蓄电池参与系统能量调节, 直流母线电压波动较小。5 s 时刻后光伏输出保持恒定, 可转移负荷的变

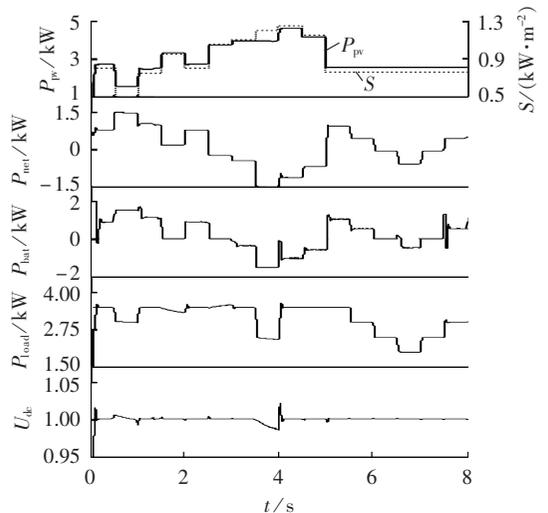


图 9 孤岛状态下的系统运行特性
Fig.9 Operational performances of system in islanding condition

化造成负荷的波动,6.0~6.5 s 和 7.0~7.5 s 时系统净负荷较小,蓄电池处于待机状态,而其他时间段蓄电池通过下垂控制维持直流母线电压稳定。

孤岛运行状态下,当系统净负荷较小时,蓄电池处于待机状态,防止频繁的启停及充放电转换,从而延长蓄电池使用寿命,将超级电容投入运行,以维持系统功率平衡;而当系统净负荷较大时,切除超级电容,将蓄电池投入工作,增加系统对较大功率波动的适应性。当光伏输出功率波动及负荷波动时,通过合理的功率分层协调控制策略,系统皆可处于正常运行状态。

4.3 过渡运行状态

图 10 为过渡状态下的系统运行特性,系统负荷为 3.5 kW,光伏输出功率为 3.1 kW,两者在过渡状态下保持不变。仿真开始时,微电网处于并网运行状态, $|P_{net}| < P_{discharge_min}$, 蓄电池处于待机状态,公共电网输出功率约为 0.4 kW,直流母线电压维持恒定;1 s 时系统由并网向孤岛转换,切换瞬间直流母线电压出现了一定波动,此时 $|P_{net}| > P_{discharge_min}$, 蓄电池迅速地切换为下垂控制模式,弥补系统功率缺额,直流母线电压重新趋于稳定;2 s 时微电网重新并网,转换过程中各单元协调运行以防止出现电压越限,并网后根据净负荷的大小系统各单元迅速切换控制模式,系统达到稳定后各单元运行在并网状态。

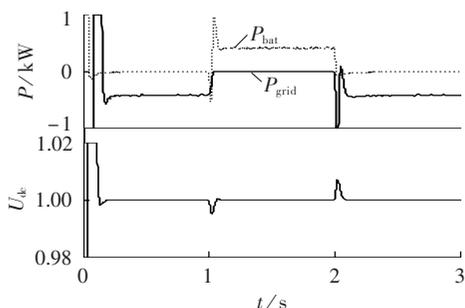


图 10 过渡状态下的系统运行特性

Fig.10 Operational performances of system in transition condition

5 结论

控制策略是直流微电网的关键技术之一,是其安全稳定运行的保障。本文描述了直流微电网系统的基本结构和组成,分析了协调控制策略实施的系统约束条件,根据系统净负荷形成功率分层,提出了基于功率分层的协调控制策略,并搭建仿真平台验证了所提控制策略的有效性,得到如下结论:

a. 储能单元可极大减小可再生能源随机性及负荷波动性对直流微电网的影响,平抑系统功率波动,提高直流微电网的性能;

b. 根据系统净负荷设置合理的功率区间,在直

流微电网不同的运行状态及不平衡功率下,各变换器采取不同的控制模式,可维持直流母线电压稳定,并保证可再生能源的充分利用;

c. 在双向 DC/AC 变换器的传统恒压控制中加入了功率分配环节,可提高电流内环对系统功率变化的响应速度,增强系统对功率分层的适应性;

d. 设定蓄电池的最低和最高充放电功率阈值,并计及蓄电池的荷电状态以防止过充与过放,基于功率分层的协调控制策略可有效地减少蓄电池充放电切换次数,延长蓄电池的使用寿命;

e. 系统的净负荷在直流微电网运行状态转换的过程中保持恒定,提出的协调控制策略可根据系统净负荷进行模式判别,有利于直流微电网“即插即用”和“无缝切换”技术的发展;

f. 进一步需要着重研究直流微电网孤岛状态下的动态性能,并详细分析非计划孤岛检测方法及其处于过渡状态时的控制策略。

参考文献:

- [1] 别朝红,李更丰,王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):1-6.
BIE Zhaohong,LI Gengfeng,WANG Xifan. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):1-6.
- [2] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(19):100-107.
- [3] 窦晓波,袁筒,吴在军,等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):26-32.
DOU Xiaobo,YUAN Jian,WU Zaijun,et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(3):26-32.
- [4] 支娜,肖曦,田培根,等. 微网群控制技术研究与展望[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):107-115.
ZHI Na,XIAO Xi,TIAN Peigen,et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):107-115.
- [5] 王毅,张丽荣,李和明,等. 风电直流微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.
- [6] 李霞林,王成山,郭力,等. 直流微电网稳定控制关键技术研究综述[J]. 供用电,2015,32(10):1-14.
LI Xialin,WANG Chengshan,GUO Li,et al. Review on the key stable control technologies of a DC microgrid[J]. Distribution & Utilization,2015,32(10):1-14.
- [7] CHEN D,XU L. Autonomous DC voltage control of a DC micro-grid with multiple slack terminals[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(4):1897-1905.

- [8] WU D,TANG F,DRAGICEVIC T,et al. A control architecture to coordinate renewable energy sources and energy storage systems in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(3):1156-1166.
- [9] KHORSANDI A,ASHOORLOO M,MOKHTARI H. A decentralized control method for a low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2014,29(4):793-801.
- [10] 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.
LIU Jiaying,HAN Xiaoqing,WANG Lei,et al. Operation and control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014,38(9):2356-2362.
- [11] 李玉梅,查晓明,刘飞,等. 带恒功率负荷的直流微电网母线电压稳定控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):57-64.
LI Yumei,ZHA Xiaoqing,LIU Fei,et al. Stability control strategy for DC microgrid with constant power load[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):57-64.
- [12] 孟润泉,刘家赢,文波,等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术,2015,41(7):2186-2193.
MENG Runquan,LIU Jiaying,WEN Bo,et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control [J]. High Voltage Engineering,2015,41(7):2186-2193.
- [13] 王盼宝,王卫,孟尼娜,等. 直流微电网离网与并网运行统一控制策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4388-4396.
WANG Panbao,WANG Wei,MENG Nina,et al. Unified control strategy of islanding and grid-connected operations for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(17):4388-4396.
- [14] 陆晓楠,孙凯,JOSEP G,等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报,2013,28(4):35-42.
LU Xiaonan,SUN Kai,JOSEP G,et al. DC hierarchical control system for microgrid applications [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(4):35-42.
- [15] 张学,裴玮,邓卫,等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5553-5562.
ZHANG Xue,PEI Wei,DENG Wei,et al. Energy management and coordinated control method for multisource/multi-load DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(31):5553-5562.
- [16] SUN Kai,ZHANG Li,JOSEP M G. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(10):3032-3045.
- [17] GUERRERO J M,VASQUEZ J C,MATAS J,et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(1):158-172.
- [18] 文波,秦文萍,韩肖清,等. 基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J]. 电网技术,2015,39(4):892-898.
WEN Bo,QIN Wenping,HAN Xiaoqing,et al. Control strategy of hybrid energy storage systems in DC microgrid based on voltage droop method[J]. Power System Technology,2015,39(4):892-898.

作者简介:



孟明

孟明(1967—),男,河北保定人,副教授,博士,研究方向为新能源发电、智能微电网、电机与控制等;

陈世超(1991—),男,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为新能源发电、智能微电网(E-mail:cscncepu@163.com);

卢玉舟(1990—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为新能源发电、智能微电网。

Coordinated control based on power hierarchy for DC microgrid

MENG Ming¹,CHEN Shichao¹,LU Yuzhou¹,ZHAO Shujun²,LI Zhenwei²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Handan Electric Power Company, Handan 056001, China)

Abstract: The basic structure and composition of DC microgrid mainly based on photovoltaic power generation are described and the operational constraints of different system units are set for the implementation of its coordinated control. The power hierarchy is set according to the system payload and the charge/discharge power threshold of battery, a coordinated control strategy based on the power hierarchy is proposed, and the mode discrimination processes of different units and the control modes of different converters under this coordinated control strategy are analyzed. Simulative results show that, the proposed strategy adapts to different operating conditions of DC microgrid, maintains the stability of DC bus voltage, prolongs the service-life of battery, ensures the full utilization of renewable energy and improves the flexibility and stability of system.

Key words: DC microgrid; operational constraints; system payload; power hierarchy; coordinated control; converter control