

交直流混合微电网协同控制策略

周 稳¹,戴瑜兴¹,毕大强²,范柱烽³

(1. 温州大学 电气数字化设计技术浙江省工程实验室,浙江 温州 325035;

2. 清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室,北京 100084;

3. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要: 为了保障交直流混合微电网供电可靠性与运行稳定性,基于改进直流母线分层思想,提出了一种综合协同控制的能量管理策略。根据直流侧直流母线电压变化,分别设计了并网和孤岛工况下微电网内微源的协同控制策略,其为无需通信线的分散控制,协调对光伏电池、储能电池、交直流接口变流器、直流负荷、交流负荷与大电网之间的控制。所提策略保障了分布式微源发电的充分利用与计划重要负荷的持续稳定供电,优化了储能电池能量利用。分析了微电网内控制器设计与微源能量分配方法。设计搭建了交直流混合微电网实验平台,实验验证了该协同控制的能量管理策略的可行性与正确性。

关键词: 交直流微电网; 协同控制; 并网/孤岛运行; 能量管理

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.008

0 引言

微电网由负荷、微型电源和储能装置构成,可同时提供电能和热能,微电网内部电源主要由电力电子器件负载能量转换,并提供必要的控制及接口^[1-2]。微电网可分为交流和直流 2 类,由于传统大电网以交流形式存在,导致目前研究较多的是交流微电网。但是相比交流微电网,直流微电网不存在相位同步、谐波和无功功率损耗等方面问题^[3-4],因此其研究得到了重视。实际微电网中,往往同时存在交流和直流 2 条母线,分别和微电网中的交流和直流部分相连,即形成交直流混合微电网^[5]。

文献[6]介绍了当前研究交直流混合微电网面临的挑战,分析了实际实现所需的关键技术。文献[7]提出了交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器控制策略,但缺乏对直流微电网内部微电源、储能系统以及直流负荷控制的研究。文献[8]提出一种基于直流总线电压信息的能量变换与管理方法,考虑了直流微电网系统的并网与孤岛运行,但未考虑系统各个接口变换器的功率上限优化设计,且只设计了直流负荷,不适用于当前供电方式。文献[9]提出以直流电压变化量为判定基准的电压分层协调控制策略,各变流器独立工作,无需相互通信,可简化控制系统结构,使直流微电网具备“即插即用”功能,但并网情况下,减少风电微源出力的策略不利于充分利用分布式电源的能量。采用多个逆变器分

别进行并网与直流微电网内供给交流负荷,效率低。文献[10]提出一种以直流总线电压作为控制信号的直流独立电网系统能量管理策略,但忽略了储能电池输入输出限制、负荷重载状态下直流母线过低可能会导致系统崩溃。文献[11]针对包含太阳能、储能电池、计划重要负荷的混合交直流微电网,提出一种新的功率控制方法,但研究只注重了孤岛运行模式,所设计分配负荷功率并未灵活利用微源间歇式发电的特点。文献[12]、[13]分别研究了在并网与孤岛模式运行下的交直流微电网系统电压控制,未对重载与过载情况进行处理,只进行仿真研究,缺乏实验验证。文献[14]针对光储微电网孤岛系统,提出一种新型超级电容与蓄电池储能系统的功率自适应控制策略,使输出功率得到合理分配、能量得到高效管理。其只研究了用于交流微电网的孤岛情况,未考虑并网工况运行。文献[15]研究一种低压单极型直流微电网的运行控制策略,通过滑模控制实现超级电容的快充快放,稳定直流母线电压。其需要通信线,采用中央控制器协调控制不方便,且仅进行仿真研究。文献[16]研究了交直流混合微电网的能量管理策略,介绍了含风力、光伏、电池、超级电容等的管理策略,但缺乏可靠的实验分析研究。

本文针对上述研究的不足,结合交直流微电网系统结构以及综合控制目标,提出一种综合协同控制的能量管理策略,保障微电网内计划重要负荷供电的可靠性、系统运行的稳定性。分析了交直流混合微电网各微源控制器能量分配设计方法,高效利用单个交直流接口变流器,降低成本,提高效率,实现并网与孤岛 2 种工况运行的策略转换。通过充放电限制保护,优化利用了储能电池。针对当前传统供

收稿日期:2015-01-27;修回日期:2015-08-18

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA-051201)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA-051201)

电方式,设计交直流混合微电网实验平台,采用直流母线电压分层控制的策略,微电网系统内各个接口控制器自治运行,协同控制维持微电网稳定可靠运行。

1 交直流微电网系统介绍

交直流微电网系统如图 1 所示,混合微电网系统包含直流与交流母线。

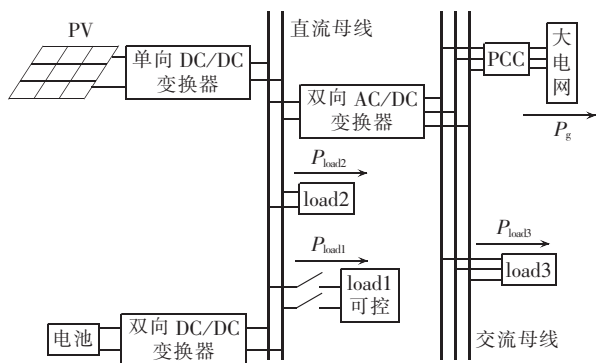


图 1 交直流微电网系统结构

Fig.1 Structure of AC-DC microgrid system

直流微电网部分包括由光伏发电及其控制电路单向 DC/DC 变换器、储能装置及其控制电路双向 DC/DC 变换器、直流负荷,并通过双向 AC/DC 变换器与交流母线连接,给交流侧负荷供电和连接大电网。

2 系统控制与能量管理策略

2.1 直流母线电压分层

结合微电网的运行状态,需要在不同状态下选择合适的控制策略,本文研究交直流系统,针对保障并网和孤岛运行 2 种工况,设计不同工况下的控制与能量管理策略。首先,本文以直流微电网内直流母线电压为基准^[7],分层设计协同控制光伏电池、储能、交直接口 AC/DC、直流负荷与交流负荷的能量传输交换策略,使其在不同工况下都能稳定运行,各个变流器独立工作,无需相互通信,提高了系统的实时性与经济性。如图 2 所示,将直流微电网的直流母线电压额定电压定为 U_N , $\pm 10\%$ 内电压浮动,将 $0.9U_N \sim 1.1U_N$ 内电压分为 4 层。其中, U_H 、 U_L 分别为

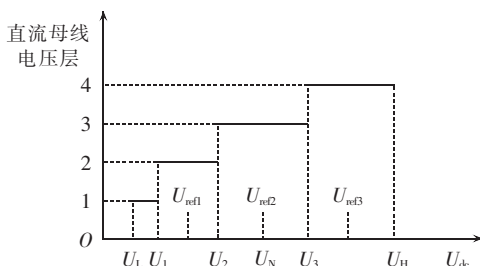


图 2 直流母线电压分层图

Fig.2 Layers of DC bus voltage

直流母线电压上界、下界, $U_L = 0.9U_N$, $U_H = 1.1U_N$; U_1 、 U_2 、 U_3 为直流母线电压切换层判断电压, $U_1 = 0.93U_N$, $U_2 = 0.98U_N$, $U_3 = 1.02U_N$; U_{ref1} 、 U_{ref2} 、 U_{ref3} 分别为需要稳定在该层次工作的参考电压。

2.2 微源基本控制策略

直流微电网内部光伏电池可采取的控制策略有最大功率点跟踪 (MPPT)、恒压控制 (CVT), 孤岛工况根据直流母线电压变化进行切换, 原理如图 3 所示。图中, I_{pv} 为光伏电池输出电流; U_{pv} 为光伏电池输出电压; U_{pv}^* 为光伏电池 MPPT 参考电压; U_{dc} 为直流母线电压; U_{dc}^* 为直流母线电压参考值。

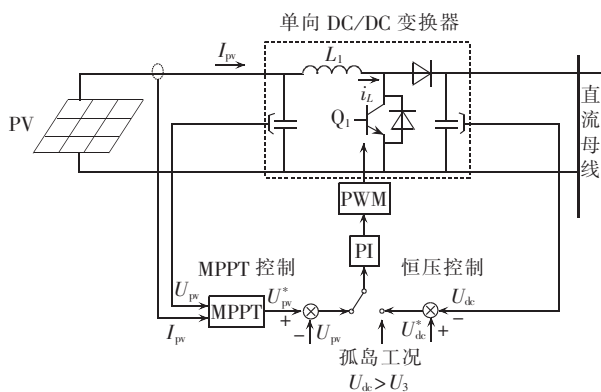


图 3 光伏系统控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of PV system control

储能蓄电池采用双向 DC/DC 变换器, 其控制原理如图 4 所示, 并网与孤岛运行工况都根据直流母线电压的变化, 采用限流或者稳压控制。图中, I_{bat} 为储能电池电流; I_{bat}^* 为储能电池参考电流。

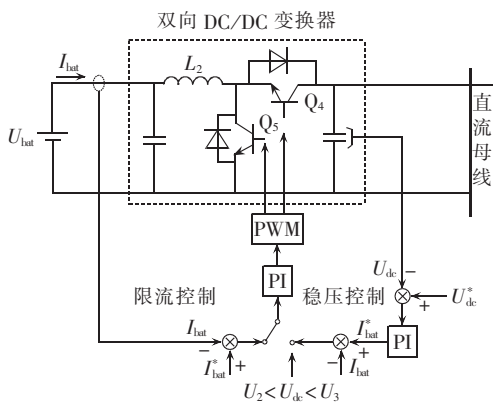


图 4 储能系统控制原理图

Fig.4 Schematic diagram of battery system control

交直接口是一个双向 AC/DC 变换器, 依据微电网系统并网工况或者孤岛工况运行进行策略选择, 并网工况交直接口要进行单位功率因数控制, 孤岛工况采取恒频恒压 (V/f) 控制, 其控制原理如图 5 所示。图中, v_d 、 v_q 为交直流变流器输出三相电压经 Park 变换计算后的有功与无功分量; i_d 、 i_q 为输出三相电流经 Park 变换计算后的有功与无功分量; v_d^* 、 v_q^* 、 i_d^* 、 i_q^* 分别为变流器控制电压、电流有功/无功参考

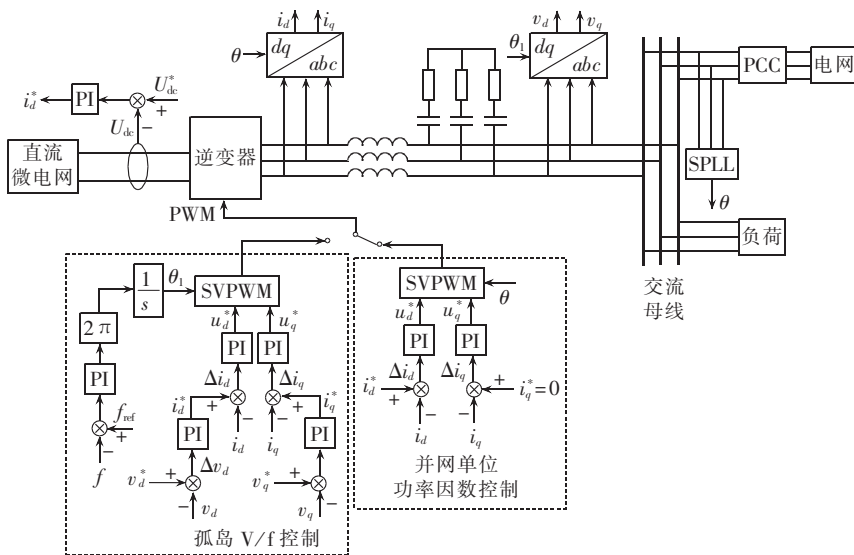


图 5 交直接口控制原理图

Fig.5 Schematic diagram of AC/DC converter control

量; θ 为并网锁相计算电网相位; θ_1 为孤岛 V/f 控制中参考相位; f 为变流器输出电压频率; f^* 为参考频率。

2.3 并网运行

并网工况下根据直流母线电压处于不同层,系统内各个部分控制策略与能量流动方向如表 1 所示。

表 1 并网控制策略

Table 1 Strategies of grid-connection control

直流母线 电压层	光伏控制 策略	储能控制 策略	交直接口 策略	电网能量 情况
1	MPPT	限流放电	整流	输出
2	MPPT	放电	整流稳压	输出
3	MPPT	稳压	待机	不交换
4	MPPT	限流充电	逆变稳压	吸收

微电网系统设计时,充分利用分布式微源发电,考虑保障交流母线侧重要负荷 P_{load3} 以及直流母线侧重要负荷 P_{load2} 持续稳定供电,理论上负荷变化都不能超过额定负载,当系统中直流微电网内部负荷或微源出力变化,会造成功率波动,引起直流母线电压上升或下降,依据负荷与功率供给间的变化,控制策略需要协同调整,策略设计分析如下。

第一层时,直流母线电压 $U_L < U_{dc} < U_1$,直流负荷持续重载、超载或光伏发电不足等情况,储能调压达输出功率上限,大电网通过交直接口提供电能也不足以维持系统内功率平衡,直流母线电压持续下跌。此时系统内功率情况:

$$P_{pv} + (P_{bat})_{\max} + P_{inv} < P_{load1} + P_{load2} \quad (1)$$

其中, P_{pw} 为光伏微源提供功率; P_{bel} 为储能交换功率; P_{mv} 为交直接口变流器交换功率; P_{load1} 为直流可控负荷; P_{load2} 为直流重要负荷; $(P_{\text{bel}})_{\text{max}}$ 为储能充放电上限值。

设计系统是不希望运行在第一层情况,此时有一种极限功率情况需要考虑:

$$P_{pv} + (P_{bat})_{\max} + (P_{inv})_{\max} = P_{load1} + P_{load2} \quad (2)$$

其中, $(P_{\text{inv}})_{\text{max}}$ 为交直接口变流器输出/输入上限值, 此式中为整流输入, 由此式可设计直流母线侧额定负荷大小, 实际要考虑裕量。

直流负荷满载或短暂过载时,光伏发电很小,储能处于最大输出限流放电,交直接口需要向直流微电网内提供能量($P_{inv} \max$),所以设计储能能够在光伏发电为 0 时,在过载等突发情况下,通过切除部分可控负荷,交直接口变流器以额定功率向直流微电网内部输送能量,光伏侧采用 MPPT,储能侧以上限输出限流放电,能使直流母线电压回升至第二层或者以上工作。

第二层时, $U_1 < U_{dc} < U_2$, 直流微电网内重载或光伏发电不足等情况, 储能已达到调压输出功率上限, 会造成直流母线电压下跌, 功率情况为:

$$P_{pv} + (P_{bat})_{\max} < P_{load1} + P_{load2} \quad (3)$$

此时,交流母线侧负荷由大电网供给,通过交直接口变流器整流控制向直流微电网内补充功率缺额,将直流母线电压稳压在 U_{nfl} 进行工作,使储能减少部分放电,光伏微源持续 MPPT 控制,系统内将重新达到功率平衡:

$$\begin{aligned} P_{pv} + P_{bat} + P_{inv} &= P_{load1} + P_{load2} \\ P_{net} &= P_{inv} + P_{load3} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, P_{net} 为反映与大电网侧交换能量情况。

利用大电网支撑作用,向微电网提供电能,减轻储能压力,对储能设备进行一定的保护。

第三层时, $U_2 < U_{dc} < U_3$, 系统最期望并网工况下工作在第三层, 策略设计也是从第三层向上下展开分析, 此时负荷与各微源之间能量分配为:

$$P_{pv} \pm P_{bat} = P_{load1} + P_{load2} \quad (5)$$

当光伏发电充足时,直流微电网内能量供需能够平衡,储能稳压调节功率波动,完全可以自治,为友好型微电网,设计直流微电网与交流母线侧不交换能量,交流母线侧负荷 P_{load3} 由大电网供给。通过储能充放电调节将直流母线电压稳定在 U_{ref2} 额定电压工作。

第四层时,直流母线电压 $U_3 < U_{dc} < U_H$,直流微电网内负荷 P_{load1} 、 P_{load2} 轻载,储能吸收已达上限或者光伏发电充足等情况,系统内功率情况为:

$$P_{pv} - (P_{bat})_{max} > P_{load1} + P_{load2} \quad (6)$$

直流母线电压会持续上升,通过交直接口变流器采取单位功率因数逆变控制,稳定直流母线电压在 U_{ref3} 进行工作,光伏侧持续 MPPT 控制,储能侧以上限输入限流充电,使系统重新达到功率平衡:

$$\begin{aligned} P_{pv} - (P_{bat})_{max} - P_{inv} &= P_{load1} + P_{load2} \\ P_{net} &= P_{inv} - P_{load3} \end{aligned} \quad (7)$$

此时,大电网侧 P_{net} 能依据交流母线侧负荷增减变化供给或吸收电能,充分利用微电网系统的富余电能。系统设计考虑下式极限情况:

$$P_{pv} - (P_{bat})_{max} - (P_{inv})_{max} = 0 \quad (8)$$

其中, $(P_{inv})_{max}$ 为交直接口变流器输出/输入上限值,此式中为逆变输出。

为了充分利用分布式电源发电,可依据此极限式,确定选型光伏侧微源的最大发电量,由此可以很经济地优化配置储能与交直接口的额定功率大小。

2.4 孤岛运行

孤岛工况下,失去大电网的支撑,将由储能单元起主要作用。根据直流微电网内部直流母线电压处于不同层,设计控制策略如表 2 所示。

表 2 孤岛控制策略
Table 2 Strategies of islanding control

直流母线电压层	光伏控制策略	储能控制策略	交直接口策略	负荷控制
1	MPPT	限流放电	逆变	卸荷
2	MPPT	稳压	逆变	无
3	MPPT	稳压	逆变	无
4	CVT	限流充电	逆变	无

控制策略的设计依然是基于直流微电网内部直流母线电压分层。不同于并网工况,孤岛工况时,交直流接口变流器将会一直采取 V/f 逆变控制,维持交流母线恒频恒压, P_{load3} 由直流微电网侧供给能量。由于失去大电网的支撑,系统内负荷将会做一定调整,协同控制策略需要相应改变,做以下设计分析。

第一层时,直流母线电压 $U_L < U_{dc} < U_1$,系统内负荷重载、储能放电达到输出上限、光伏微源发电不足等情况,功率缺额较大,导致直流母线电压拉低,系统内功率情况为:

$$P_{pv} + P_{bat} < P_{load1} + P_{load2} + P_{load3} \quad (9)$$

此时,为了使微电网系统不崩溃,采取卸荷操作保障重要负荷,光伏侧 MPPT 控制,储能侧输出上限限流放电,直流母线电压将会回升至第二层工作。

第二层、第三层时, $U_1 < U_{dc} < U_3$,系统内能量供需能够维持平衡,为保持设计策略的一致性,失去电网支撑后实际合为一层控制,系统内功率情况为:

$$P_{pv} \pm P_{bat} = P_{load1} + P_{load2} + P_{load3} \quad (10)$$

光伏侧维持 MPPT 充分利用,储能侧将稳压第二层以上或 U_{ref2} 电压工作。

第四层时, $U_3 < U_{dc} < U_H$,由于微电网内部负荷轻载,功率大量富余,储能以上限限流充电工作,导致直流母线电压上升。系统内功率情况为:

$$P_{pv} - P_{bat} > P_{load1} + P_{load2} + P_{load3} \quad (11)$$

储能侧采取输入上限限流充电,通过光伏侧微源调整为 CVT,降低光伏输出功率,将电压稳定在 U_{ref3} 工作。

3 实验分析

按前文所述协同控制策略搭建了相应的实验平台,设计额定直流母线电压为 125 V, U_{ref1} 、 U_{ref2} 、 U_{ref3} 分别为 118 V、125 V、130 V。交流母线电压额定值为 75 V,采用变比为 380/75 的变压器与大电网相连接。可控负荷 P_{load1} 阻值范围为 2.7~220 Ω ,直流负荷 P_{load2} 阻值范围为 0~25 Ω ,交流负荷 P_{load3} 阻值范围为 23~220 Ω ,储能最大放电电压/电流为 73 V/6 A,充电电压/电流为 112 V/2 A。光伏侧最大功率点电压/电流为 80 V/18 A。

3.1 并网运行

为了验证所设计控制策略的正确性,通过变动直流微电网内的直流负荷,造成功率波动,从而改变直流母线电压,来验证不同层的协同控制情况。为了最大化利用分布式电源发电,光伏侧利用光伏模拟器一直采取如图 6 所示 MPPT 控制。

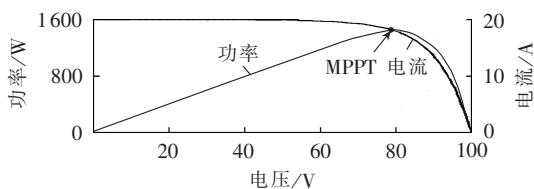


图 6 光伏电池 MPPT 控制下工作状态
Fig.6 Operating state of PV cell under MPPT control

图 7 给出了将微电网系统内直流负荷不断减轻情况下的运行特性。当光伏微源侧保持如图 6 所示 MPPT 控制,能够供给直流微电网内负荷,此时图 7 中直流母线电压 U_{dc} 处于第三层,且有富余能量将被储能吸收,储能侧通过图 7 中储能电流 I_{bat} (为负值) 进行充电稳压,稳定在 125 V 的参考电压工作,交流

侧负荷由大电网供给,交直接口控制不交换能量,如图 7 中三相电流中电流 I_a 所示。当逐渐减轻直流负荷至 t_1 时刻时,达到储能吸收输入上限,此时大量富余能量将通过交直接口变流器逆变输出给交流侧,如图 7 中所示三相电压中相电压 U_a 与相电流 I_a 相位相反表示逆变,通过储能侧如 I_{bat} 所示上限限流充电,交直接口进行逆变稳压在参考电压 130 V 工作,向交流侧提供能量。

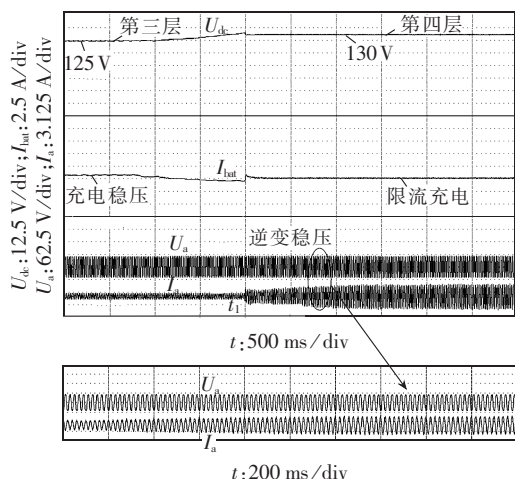


图 7 负荷减轻情况下的微电网运行特性

Fig.7 Operating characteristic of lightly loaded microgrid

图 8 为加大微电网系统内直流负荷至重载的过程,光伏侧保持如图 6 所示的 MPPT 控制,系统内微源出力逐渐无法满足负荷需求。由图 8 中直流母线电压 U_{dc} 可知处于第三层,此时如图 8 交流三相电流中电流 I_a 所示,交直接口控制保持与交流侧不交换能量,系统内微源出力还能保证负荷供给,如储能电流 I_{bat} 所示储能侧能够通过放电稳压在 125 V 工作。当不断加大负荷至 t_1 时刻时,如图 8 中 U_{dc} 所示将下跌至第二层工作,此时储能侧由图中 I_{bat} 可知以上限

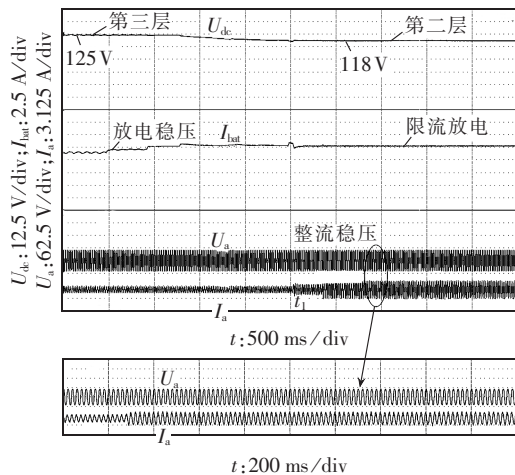


图 8 负荷加重情况下的微电网运行特性

Fig.8 Operating characteristic of heavily loaded microgrid

限流放,图 8 中三相电压中相电压 U_a 与电流 I_a 相位相同表示整流,可知交直接口整流稳压在参考电压 118 V 工作,通过交直接口从大电网网侧吸收能量对直流侧进行支撑,交流侧负荷由大电网侧供给。

图 9 为系统内直流负荷重载至过载情况,图 9 中直流母线电压 U_{dc} 所示处于第二层,缓慢加大可控负荷 P_{load1} ,微源出力不足,储能电流 I_{bat} 反映储能侧以上限限流放,通过如图 9 中交直接口输出电流 I_a 整流稳压。当可控负荷电流 I_{L1} 如图 9 中所示不断加大时,直流母线电压将在 t_1 时刻跌落至第一层,储能侧需要如图 9 所示 I_{bat} 快速上限大电流放电,由图 9 中可控负荷电流 I_{L1} 可知进行了卸载可控负荷,同时大电网侧保持通过交直接口整流输出支撑,使直流母线回升稳定至图 9 中 U_{dc} 所示第二层工作,由图 9 所示储能侧进行非输出上限限流放,交直接口处如图 9 所示进行整流稳压,大电网侧除供给交流侧负荷外,输出支撑直流微电网。

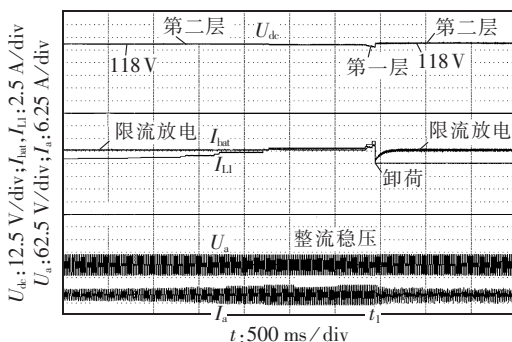


图 9 负荷加重至过载情况下的微电网运行特性

Fig.9 Operating characteristic of overloaded microgrid

3.2 孤岛运行

当检测到电网故障时微电网系统将转换到孤岛工况运行,失去大电网支撑后主要由储能进行稳压控制,第三层与第二层合为一层控制,要保障直流重要负荷 P_{load2} 与交流重要负荷 P_{load3} 。

图 10 为孤岛工况下加大直流负荷运行情况,光伏电池工作状态如图 6 所示保持 MPPT 控制,直流母线电压 U_{dc} 处于设计的第二层工作,图 10 中 I_{L1} 为可控负荷电流, U_{abc} 为交流侧负荷电压,因为交流侧保持 V/f 控制,其幅值、频率保持稳定不变,储能侧电流 I_{bat} 值为正时储能侧通过限流放满足系统内功率平衡,使其稳定在第二层内工作。当如 I_{L1} 所示可控负荷不断加大至 t_1 时刻时,储能已无法维持在第二层以上运行, I_{bat} 以最大上限放电稳压,直流母线电压跌落至第一层,将通过卸荷操作,如图 10 中所示可控负荷电流 I_{L1} 减值到 0,使直流母线回升至第二层工作,交流侧负荷保持不变,仍然持续稳定供电。

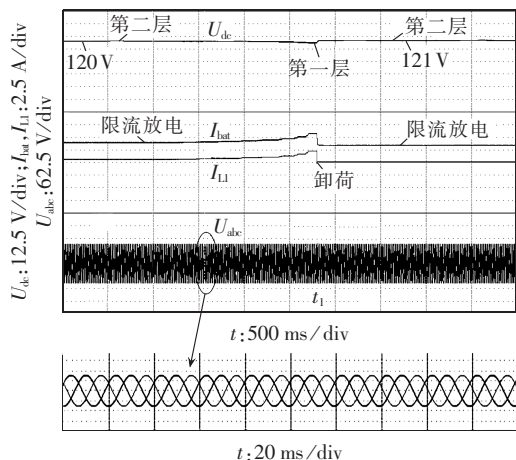


图 10 孤岛工况负荷加重情况下的微电网运行特性

Fig.10 Operating characteristic of heavily loaded microgrid in islanding operation mode

图 11 给出了直流负荷不断缓慢减轻时的运行情况,当直流重要负载 P_{load1} 缓慢减轻,直流可控负荷 P_{load2} 减小保持到轻载,储能侧 I_{bat} 可以通过充电进行稳压工作。持续减小负载能量至 t_1 时刻,富余储能吸收达上限,直流母线电压将上升至第四层,此时光伏如图 12 所示,转变为 CVT 控制。 I_{bat} 显示储能侧采取限流充电控制,孤岛整个过程中交流侧采取 V/f 控制,输出电压 U_{abc} 如图 11 中所示,其幅值、频率均保持稳定。

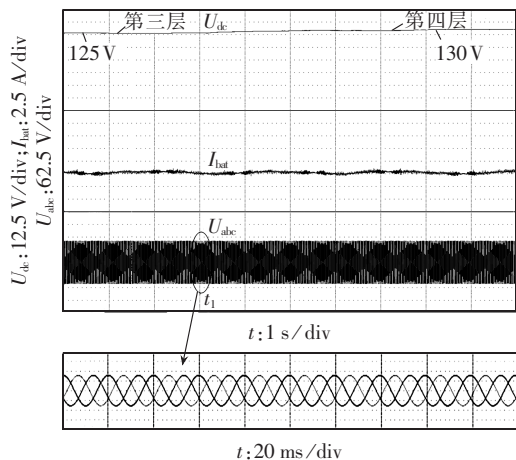


图 11 孤岛工况负荷减轻情况下的微电网运行特性

Fig.11 Operating characteristic of lightly loaded microgrid in islanding operation mode

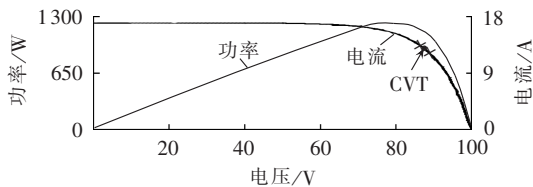


图 12 孤岛工况光伏电池 CVT 控制状态

Fig.12 Operating state of PV cell under CVT control in islanding operation mode

4 结语

目前,交直流混合微电网具有较强的应用前景,能分别利用直流与交流微电网的优势。本文提出的综合协同控制的能量管理策略,能很好地协同控制微电网内微源,以经济的工作方式进行能量的合理分配与利用,在并网与孤岛稳定运行工况下,能够维持微电网系统内重要负荷的稳定与可靠供电、直流微电网内部直流母线电压的稳定、交流侧母线电压的恒频恒压,实验研究验证了协同控制策略的可行性与正确性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(5):19-23.
- [3] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报,2012,27(1):98-105.
WU Weimin,HE Yuanbin,GENG Pan,et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):98-105.
- [4] 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.
- [5] LIU X,WANG P,LOH P C. A hybrid AC/DC micro-grid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011,2(2):278-286.
- [6] KAUSHIK R A,PINDORIYA N M. A hybrid AC-DC microgrid: opportunities & key issues in implementation[C]//Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE). Coimbatore, India:IEEE,2014,1-6.
- [7] 唐磊,曾成碧,苗虹,等. 交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器的控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(14):13-18.
TANG Lei,ZENG Chengbi,MIAO Hong,et al. One novel control strategy of the AC/DC bi-directional power converter in micro-grid[J]. Power System Protection and Control,2013,41(14):13-18.
- [8] 张犁,孙凯,吴田进,等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报,2013,28(2):248-254.
ZHANG Li,SUN Kai,WU Tianjin,et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(2):248-254.
- [9] 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.
- [10] BRYAN J,DUKE R,ROUND S. Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signaling[C]//Power Engineering Society General Meeting. Denver,Colorado,USA: IEEE,2004:977-982.
- [11] TAN Ma. Distributed control of hybrid AC-DC microgrid with solar energy,energy storage and critical load[C]//Power Systems Conference(PSC). Clemson SC,USA;IEEE,2014:1-6.
- [12] AKBARI M,GOLKAR M A,TAFRESHI S M M. Voltage control of a hybrid AC/DC microgrid in grid-connected operation mode [C]//2011 PES Innovative Smart Grid Technologies. Kollam, Kerala,India;IEEE,2011:363-367.
- [13] AKBARI M,GOLKAR M A,TAFRESHI S M M. Voltage control of a hybrid AC/DC microgrid in stand-alone operation mode[C]//2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Kollam, Kerala,India;IEEE,2011:358-362.
- [14] 李斌,宝海龙,郭力. 微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):8-14.
- LI Bin,BAO Hailong,GUO Li. Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):8-14.
- [15] 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.
- XUE Guiting,ZHANG Yan,ZHU Dakang. Operational control of stand-alone DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):112-117.
- [16] BO Dong,LI Yongdong,ZHENG Zedong. Energy management of hybrid DC and AC bus linked microgrid[C]//2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei,China;IEEE,2010:713-716.

作者简介:



周 稳

周 稳(1989—),男,湖南长沙人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为新能源微电网(E-mail:zhouwen403159758@163.com);

戴瑜兴(1956—),男,湖南长沙人,教授,博士,主要研究方向为大功率变流技术与逆变装备、新能源微电网技术及应用、数控技术与装备信息化;

毕大强(1973—),男,吉林敦化人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。

Coordinative control strategy for hybrid AC-DC microgrid

ZHOU Wen¹,DAI Yuxing¹,BI Daqiang²,FAN Zhufeng³

(1. Zhejiang Province Engineering Laboratory of Electrical Digital Design Technology,Wenzhou University, Wenzhou 325035,China;2. State Key Laboratory of Power Systems,Department of Electrical Engineering, Tsinghua University,Beijing 100084,China;3. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University,Jilin 132012,China)

Abstract: An energy management scheme with coordinative control strategy based on the layered DC bus voltage is proposed to guarantee the power supply reliability and operational stability of hybrid AC-DC microgrid. Coordinative control strategies of micro-source are designed for the grid-connected and islanded microgrids respectively,which is of the distributed control without communication lines to coordinate the control among its micro-sources according to the DC bus voltage variation,such as photovoltaic cell,storage battery,AC/DC converter,DC load,AC load and large grid. The proposed strategies make the full use of micro DGs,maintain the stable power-supply for critical loads and optimize the energy utilization of storage batteries. The design of microgrid controllers and the method of power distribution among micro-sources are analyzed. A test platform of hybrid AC-DC microgrid is built and the feasibility and correctness of the proposed strategies are verified by the experimental results.

Key words: AC-DC microgrid; coordinative control; grid-connecting/islanding mode; energy management