

DOI: 10.7667/PSPC160692

一种新型模块化交直流混合微电网拓扑优化设计及研究

于 芑¹, 张 用¹, 孙 辉², 刘兴华³, 赵 鹏¹, 程 艳¹, 孙树敏¹,
李广磊¹, 曲玉瑶⁴, 王瑞琪¹

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024;
3. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255000; 4. 国网东营市供电公司, 山东 东营 257100)

摘要: 微电网是促进分布式电源与可再生能源大规模接入电网的有效手段。针对微电网模块化接入及与大电网友好互动的运行需求, 提出一种利用背靠背变流器对交直流混合微电网进行模块化封装组网拓扑, 并研究了该拓扑多目标、多状态运行控制策略。通过合理设计蓄电池-超级电容器混合储能系统结构及在微电网中接入位置, 蓄电池和超级电容器可发挥各自优势为微电网多模式运行提供快速功率/能量支撑。仿真分析表明, 所提出的模块化微电网组网拓扑及其运行控制方式是切实可行的, 不仅使得并网/孤岛双模式无缝切换成为微电网自然属性, 同时还可实现微电网整体有功/无功精确调度, 使得微电网成为多特性电源/负荷模块与大电网进行“友好”功率交互。
关键词: 微电网; 拓扑; 储能; 模式切换; 模块

Optimum design on the new pattern AC-DC mixed modular microgrid topology

YU Peng¹, ZHANG Yong¹, SUN Hui², LIU Xinghua³, ZHAO Peng¹, CHENG Yan¹, SUN Shumin¹,
LI Guanglei¹, QU Yuyao⁴, WANG Ruiqi¹

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. State Grid Zibo Electric Power Company, Zibo 255000, China;
4. State Grid Dongying Electric Power Company, Dongying 257100, China)

Abstract: Microgrid is one of the most effective technique means for promoting the development of distribution power generation and renewable energy. In order to realize the modular design and friendly operation for the microgrid, this paper proposes a new modular topology for the AC-DC mixed microgrid which is encapsulated by the back-to-back converter. Also, the control algorithm for the multiple operation modes of that modular microgrid topology is studied. By the reasonable design on the topology and the location of battery-supercapacitor hybrid system in the microgrid, the hybrid energy storage system could supply the rapid power and energy support for the microgrid system under different operation modes. At the same time, the energy storage merits of battery and supercapacitor are fully developed. It can be indicated by the simulation analysis that the modular topology of microgrid and the control strategy are feasible, and therefore the seamless switching between the grid-connected mode and the isolated mode becomes the natural property for the modular microgrid. Furthermore, it can conclude by that simulation that the active and reactive power of the modular microgrid can be dispatched precisely. As a result, the microgrid can be considered as a power/load module with multiple characteristics to realize the friendly power interaction with the power grid.

Key words: microgrid; topology; energy storage; mode switching; modular

0 引言

微电网是一种新型的小型发配电网, 既可接入大电网并网运行, 也可在电网故障时与大电网断开独立孤岛运行^[1-2]。微电网能够解决大规模分布式电源给配网带来的谐波污染、电压闪变等不利影响,

同时能够减少配电网网损, 起着协调大电网与分布式电源发展的纽带作用^[1-4]。

与此同时, 微电网的接入给电网的传统运行控制方式带来一系列影响, 如并网/孤岛切换对大电网及微电网内部的冲击、电网电能质量、微电网接入后大电网的功率/能量平衡控制及运行调度等问题^[5-7]。

实现微电网的即插即用和整体功率平稳可调度是解决微电网与大电网间协调控制难题的有效手段, 同时也是解决可再生分布式能源大规模并网难题的有效途径之一[8-9]。

微电网中微源多样性及其组合的灵活性使得微电网系统的运行控制变得复杂, 微电网的即插即用以及整体功率平稳可调度的实现方式与微电网的组网拓扑息息相关。针对组网拓扑的优化设计会给微电网的运行控制带来极大便利。文献[10-12]分别提出了直流、交流及交直流混合微电网组网拓扑。上述拓扑皆遵循了美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)的典型组网思路, 即负荷、储能系统、分布式电源均以电流源方式接入母线并联运行。该类拓扑是目前微电网的主流组网方式, 但普遍存在着并网/孤岛转换过程中微电网母线电压暂态振荡是难以抑制的问题。针对微网中环流、谐波、频率等电能质量调节问题, 文献[13]提出一种串联型微电网结构。但是, 利用该结构难以解决微电网并网/孤岛平稳切换以及整体出力平稳可控的难题。文献[14-15]对于微电网的组网及运行方式进行了优化, 但其本质仍沿袭了CERTS的典型拓扑。储能系统作为微电网中的功率/能量缓冲单元, 其在微电网中的接入方式对于微电网的运行控制具有十分重要的意义[16]。文献[17]将储能装置作为微电网能量转换的枢纽进行组网, 旨在消除分布式电源输出电压波动对主电网造成的冲击, 提高微电网系统的稳定性。但是, 该方法尚未解决微电网并网/孤岛双模式无缝切换的难点。

本文利用背靠背变流器对多类型分布式电源及负荷进行模块化封装, 并合理设计混合储能系统结构及接入方式, 提出一种基于混合储能的模块化交直流混合微电网组网拓扑。通过分析该组网拓扑数学模型, 进而优化设计其多状态、多目标运行控制策略并进行仿真验证。仿真分析表明, 利用本文设计的微电网组网拓扑及其控制方式可实现微电网模块化接入、并网/孤岛双模式无缝切换以及整体有功/无功出力平稳可调度, 且无需对微电网中各类变流器进行复杂控制算法设计。该拓扑为实现微电网与大电网间模块化接入和功率“友好”互动支撑奠定了结构基础。

1 基于混合储能系统的模块化微电网组网拓扑

1.1 模块化微电网组网拓扑结构

本文所提出的微电网模块化组网拓扑如图1所示。

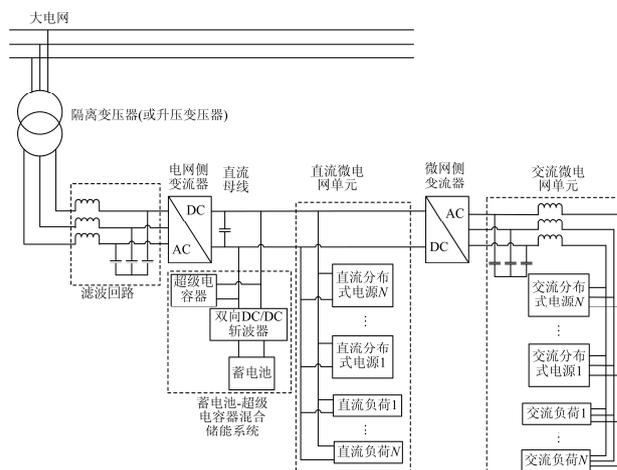


图1 模块化微电网结构示意图

Fig. 1 Diagram of modular microgrid

该组网拓扑由隔离变压器(或升压变压器)、滤波回路、背靠背变流器、直流母线、混合储能系统、直流微电网单元以及交流微电网单元构成。

背靠背变流器由电网侧变流器及微网侧变流器构成, 二者经直流母线并联。电网侧变流器交流侧经滤波回路以及隔离变压器(或升压变压器)接入大电网。微网侧变流器交流侧经 LC 滤波环节作为交流微电网单元的交流母线。光伏等直流分布式电源及直流负荷接入直流母线, 构成直流微网单元。该拓扑利用背靠背变流器将交、直流微电网单元进行模块化封装。电网侧变流器用于控制微电网与大电网间的接入及解列, 同时承担着微电网与大电网间功率/能量交换的任务。

混合储能系统采用有源并联式结构, 由蓄电池组、超级电容器组及双向 DC/DC 斩波器构成。蓄电池组接入斩波器低压侧, 斩波器高压侧并联接入超级电容器组。该混合储能系统整合蓄电池、超级电容器各自储能优势, 超级电容器并联接入直流母线, 快速提供功率/能量支撑, 充分发挥其响应速度快、功率密度大、循环寿命长的优势; 蓄电池组充放电功率由斩波器精确管理, 为超级电容器提供后备能量支撑, 在发挥蓄电池能量密度大的优势的同时降低其充放电响应频率。

直流微电网单元、交流微电网单元以及混合储能系统间的功率/能量交汇在直流母线处完成。由于直流解耦作用, 电网侧、微网侧变流器可以分别进行独立控制, 同时阻止交流微电网单元的无功需求传递到大电网。电网侧变流器作为模块化微电网的对外唯一接口, 对其交流侧有功/无功控制即为对模块化微电网整体有功/无功出力的控制, 且该过程无需交、直流微电网单元参与。

直流母线电压的稳定为该模块化微电网在并网、孤岛模式以及模式切换暂态过程中稳定运行的关键因素。微电网与大电网解列的暂态过程中，并联接入直流母线的超级电容器可以天然(无需额外控制)为直流母线提供暂态功率/能量支撑，维持直流母线电压相对稳定，保障暂态过程中交、直流微电网单元稳定运行。并网/孤岛双模式无缝切换为该模块化微电网拓扑的天然属性。

该组网结构利用背靠背变流器对交直流混合微电网进行模块化整合封装，各个变流器在直流母线处交互，使其各自运行控制相对独立，为实现微电网与大电网间的并网/孤岛双模式无缝切换及功率“友好”互动支撑奠定了结构基础。

1.2 模块化微电网拓扑模型分析

1.2.1 背靠背变流器模型分析

电网侧变流器及微网侧变流器均采用三相半桥VSR拓扑^[18]。

1) 电网侧变流器模型分析

电网侧变流器交流输出侧与大电网连接，运行于并网状态，用于精确控制模块化微电网与大电网间有功/无功功率交换，电路模型如图2所示。

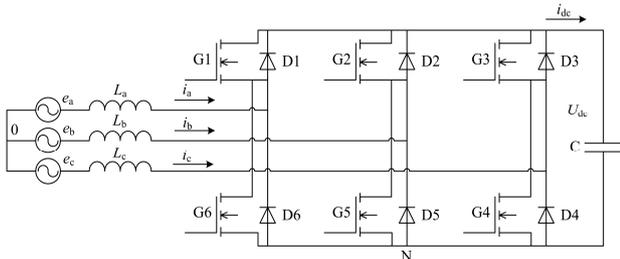


图2 电网侧变流器电路结构

Fig. 2 Structure of grid-side converter

电网三相电压分别用 e_a 、 e_b 、 e_c 表示，三相电感电流分别用 i_a 、 i_b 、 i_c 表示，对三相回路分别运用基尔霍夫电压定律，建立回路方程为

$$\begin{cases} C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{k=a,b,c} i_k S_k \\ L \frac{di_k}{dt} = e_k - U_{dc} (S_k - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j) \quad k = a, b, c \end{cases} \quad (1)$$

式中， S_j 、 S_k 为开关函数，上桥臂导通时为 0，下桥臂导通时为 1。由式(1)可知，通过调节三相桥臂开通与关断，可以精确控制 i_a 、 i_b 、 i_c ，从而实现对电网侧变流器交流侧与大电网间有功、无功交换功率的精确调节。

2) 微网侧变流器模型分析

微网侧变流器运行于 V/F 模式输出幅值、频率稳定的三相交流电压，保障风电等交流分布式电源

以及交流负荷稳定运行，电路模型如图3。

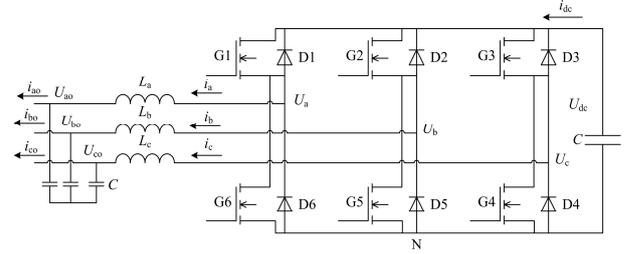


图3 微网侧变流器电路结构

Fig. 3 Structure of microgrid-side converter

利用基尔霍夫电压、电流定律可得微网侧变流器数学模型为

$$\begin{cases} L \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{ao} \\ U_{bo} \\ U_{co} \end{bmatrix} \\ C \begin{bmatrix} \frac{dU_{ao}}{dt} \\ \frac{dU_{bo}}{dt} \\ \frac{dU_{co}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{ao} \\ i_{bo} \\ i_{co} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

三相桥臂电压可由三相桥臂开关函数得出

$$\begin{cases} U_a = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{dc} \\ U_b = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} U_{dc} \\ U_c = \frac{2S_c - S_b - S_a}{3} U_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

式中， S_a 、 S_b 、 S_c 为开关函数，上桥臂导通时为 0，下桥臂导通时为 1。

由式(2)、式(3)可知，通过调节三相桥臂的导通与关断，可以精确控制三相交流输出电压 U_{ao} 、 U_{bo} 、 U_{co} ，保障交流微电网单元稳定运行。

1.2.2 混合储能系统模型分析

双向DC/DC斩波器采用BUCK-BOOST型双向斩波器拓扑，结合蓄电池、超级电容器等效电路模型，得出混合储能系统电路模型如图4。

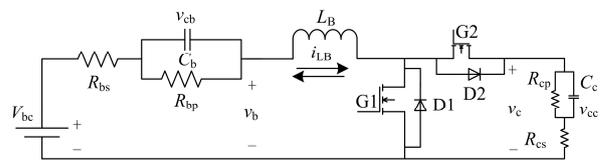


图4 混合储能系统等效电路结构

Fig. 4 Equivalent circuit of hybrid energy storage system

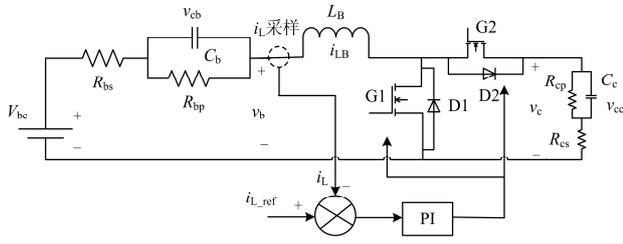


图 7 双向斩波器电感电流控制算法
Fig. 7 Control algorithm for inductor current of bidirectional chopper

通过该算法可实现对蓄电池充放电电流 i_{bat} (即斩波器电感电流 i_L) 大小和方向的精确调试。

并网状态, 模块化微电网内部功率流向如图 8。

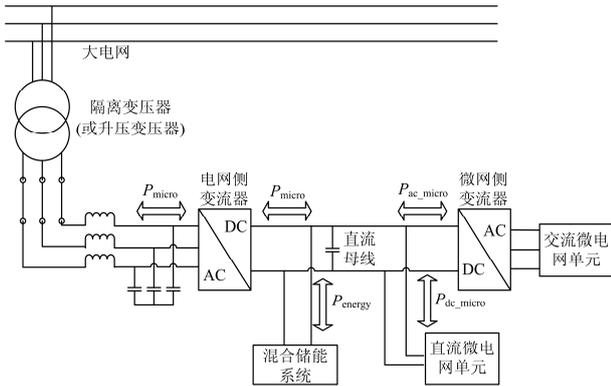


图 8 模块化微电网并网状态内部功率流向
Fig. 8 Power flow of modular microgrid under grid-connected state

在维持直流母线电压稳定的前提下, 模块化微电网整体出口有功功率 P_{micro} 为直流微电网单元接口功率 P_{dc_micro} 、交流微电网单元接口有功功率 P_{ac_micro} 以及混合储能系统接口功率 P_{energy} 三者之间的矢量和。

$$P_{Micro} = P_{dc_Micro} + P_{ac_Micro} + P_{energy} \quad (7)$$

由于交、直流分布式电源输出功率的间歇性以及交、直流负荷的波动性, 因此模块化微电网与大电网间的总交换有功功率 P_{micro} 呈随机波动状态。

2.2 模块化微电网孤岛运行控制策略

电网侧变流器交流侧并网断路器断开时, 模块化微电网转入孤岛状态。在孤岛状态下, 双向斩波器采用电压外环、电流内环双闭环控制算法(如图 9 所示), 将直流母线处的功率变化快速传递到蓄电池侧, 维持直流母线电压的稳定, 为交直流微电网单元的的稳定运行提供保障。

在孤岛状态下, 微网侧变流器采用图 6 控制策略, 旨在保持交流分布式电源及负荷稳定运行。

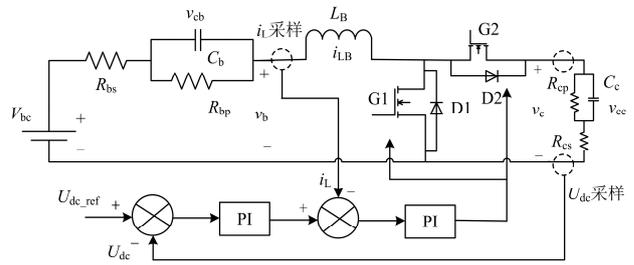


图 9 双向斩波器出口电压控制算法
Fig. 9 Control algorithm for output voltage of bidirectional chopper

孤岛状态下, 混合储能系统实时补偿直流微电网单元接口有功功率 P_{dc_micro} 与交流微电网单元接口有功功率 P_{ac_micro} 之间的差额, 此时模块化微电网内部功率流向如图 10 所示。

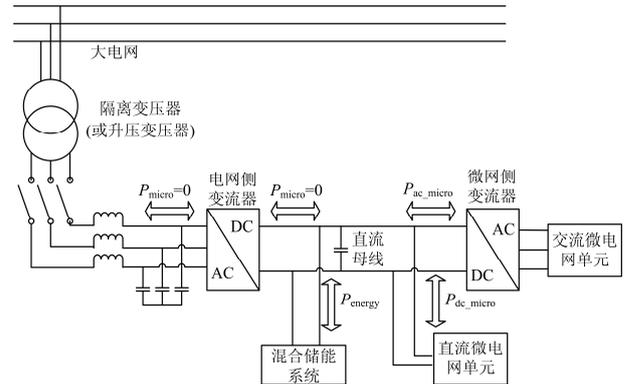


图 10 模块化微电网孤岛状态内部功率流向

Fig. 10 Power flow of modular microgrid under isolated state

2.3 模块化微电网并网/孤岛双模式切换控制方法

模块化微电网由并网转入孤岛的暂态过程中, 电网侧变流器停止运行, 超级电容器自主提供暂态功率/能量支撑, 双向斩波器快速转入维持直流母线电压稳定的状态, 为超级电容器提供能量支撑, 控制算法同图 9, 微电网转入孤岛状态。

超级电容器并联接入直流母线, 为直流母线提供暂态功率/能量支撑为其自然属性, 无需额外控制。通过合理设计微电网拓扑, 极大地简化了微电网并网/孤岛切换控制逻辑, 无需背靠背变流器以及分布式电源并网变流器参与控制, 实现了并网/孤岛双模式无缝切换, 达到了微电网模块化即插即用的设计目的。

2.4 模块化微电网整体有功/无功功率独立可调度控制方法

电网侧变流器为模块化微电网对外唯一接口, 其交流侧有功/无功功率即为微电网整体有功/无功功率。

为精确控制模块化微电网整体有功/无功功率, 双向斩波器采用图 9 所示算法, 维持直流母线电压稳定; 微网侧变流器运行于 V/F 模式(如图 6), 保障交流微电网单元正常运行; 电网侧变流器采用(d, q)同步旋转坐标系下有功、无功电流解耦控制算法, 如图 11 所示。

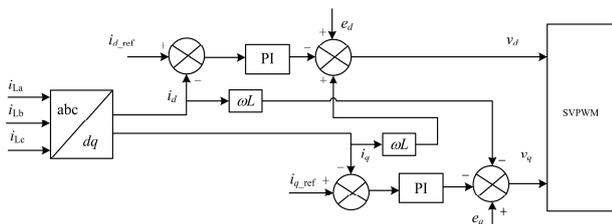


图 11 电网侧变流器功率调度控制算法

Fig. 11 Control algorithm for power dispatch of grid-side converter

有功、无功功率控制目标值 i_{d_ref} 、 i_{q_ref} 由调度人员根据大电网的运行控制需求下达。

该运行模式下, 混合储能系统实施补偿直流微电网单元接口有功功率 P_{dc_micro} 、交流微电网单元接口有功功率 P_{ac_micro} 以及模块化微电网整体有功功率 P_{micro} 之间的差额, 保障微电网内部的功率能量平衡, 从而维持直流母线电压稳定。

该运行模式使得模块化微电网相对于大电网成为独立可调度的多特性电源/负荷单元, 主动参与电网电压、频率调节, 必要时可为大电网提供紧急有功/无功功率支撑, 最终实现微电网与大电网间的功率“友好”互动。

3 模块化微电网运行控制仿真研究

构搭建仿真平台, 对模块化微电网的多状态、多目标运行能力进行仿真验证。

仿真参数: 电网线电压有效值 380 V; 直流母线电压控制目标 $U_{dc_ref}=550$ V; 超级电容器组容量为 0.5C, 耐压 900 V, 初始电压 550 V; 蓄电池组端电压为 300 V, 容量为 1000 Ah, 额定充放电电流为 500 A; 直流微电网单元中, 分布式电源及负荷引起的波动功率以受控电流源的方式表示, 设定其接口有功功率 P_{dc_micro} 在 $-60\sim 60$ kW 范围内随机波动, 波动周期为 0.8 s; 交流微电网单元中, 分布式电源及负荷引起的波动功率以受控三相交流源的方式表示, 有功功率 P_{ac_micro} 在 $-10\sim 10$ kW 范围内随机波动, 功率波动周期为 0.5 s。

3.1 模块化微电网并网、孤岛双模式运行及模式切换仿真分析

设定模块化微电网初始处于并网状态。0~6 s 时间段内, 微电网运行于并网状态, 并设定蓄电池

组以恒流 $I_{bat_ref}=100$ A 放电。6 s 时控制电网侧变流器交流侧断路器断开, 微电网转入孤岛状态。6~10 s 时间段内, 微电网始终运行于孤岛状态。整个过程仿真波形如图 12—图 16 所示。

图 12—图 16 所示的分别为 0~10 s 的仿真过程中直流母线电压曲线、蓄电池组充放电电流曲线、微网侧变流器三相交流电压曲线、交流微电网单元接口有功功率曲线以及模块化微电网出口有功/无功功率曲线。

由图 12 可知, 并网模式下(0~6 s 时), 电网侧变流器采用图 5 所示控制算法可以控制直流母线电压平稳跟踪目标值 $U_{dc_ref}=550$ V(波动约为 $\pm 2\%$), 保障了交、直流微电网单元稳定运行。

在并网模式下(0~6 s), 双向斩波器采用图 7 所示算法可以控制蓄电池组充放电电流精确跟踪目标值 $I_{bat}=100$ A, 如图 13 所示。

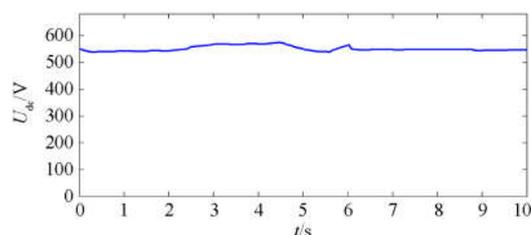


图 12 直流母线电压曲线

Fig. 12 Curve of DC bus voltage

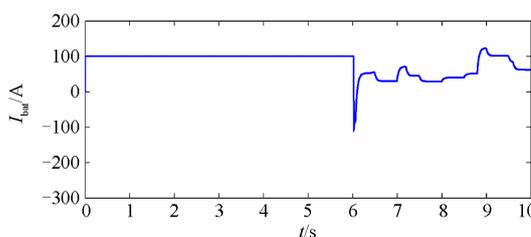


图 13 蓄电池充放电电流曲线

Fig. 13 Curve of charging-discharging current of battery

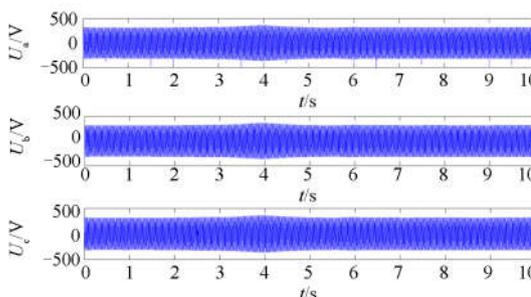


图 14 微网侧变流器三相交流电压曲线

Fig. 14 Curve of three phase AC voltage of microgrid-side converter

由图 14 可知,微网侧变流器采用图 6 所示控制算法可以输出幅值、频率稳定的三相电压,保障交流微电网单元稳定运行。由于设定交流微电网单元内部总有功功率在 $-10\sim 10\text{ kW}$ 范围内随机波动,微网侧变流器为控制交流侧电压稳定会将交流侧功率实时传递到直流侧,其与直流母线间的有功交换 P_{ac_micro} 也在 $-10\sim 10\text{ kW}$ 范围内随机波动,如图 15 所示。

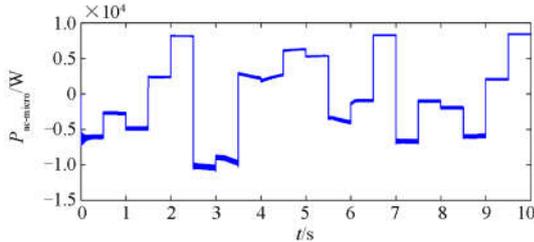


图 15 交流微电网单元接口有功功率曲线

Fig. 15 Curve of active interface power of AC microgrid unit

由于交流微电网单元接口有功功率 P_{ac_micro} 以及直流微电网单元接口有功功率 P_{dc_micro} 呈随机波动状态,据式(7)微电网整体出口有功功率 P_{micro} 成随机波动状态。并网模式下,电网侧变流器为维持直流母线电压稳定,将随机波动功率 P_{micro} 传递到电网侧,如图 16 所示。在图 5 所示电网侧变流器控制算法中,无功控制回路目标设定为零,避免微电网并网运行对大电网无功冲击,电网侧变流器无功功率控制效果如图 16 所示。

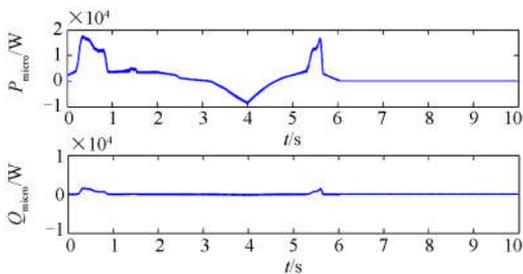


图 16 模块化微电网出口有功/无功功率曲线

Fig. 16 Curve of active and reactive power of modular microgrid

6 s 时,电网侧变流器交流并网断路器断开,微电网进入孤岛模式。由图 12 所示,并网/孤岛切换暂态过程中,由于超级电容器提供暂态功率/能量支撑,直流母线电压仅跌落 15 V,不影响直流及交流微电网单元稳定运行。如图 14 所示,并网/孤岛切换的暂态过程中,由于直流母线电压没有发生骤变,微网侧变流器能够始终输出稳定的交流电压,保障了交流微电网单元稳定运行。上述暂态转换过程中无需任何变流器参与控制。

6~10 s 内,微电网进入孤岛运行模式。此时,电网侧变流器停止运行,其与电网功率交换为零,如图 16 所示。如图 12 可知,孤岛状态下,双向斩波器采用图 9 所示控制算法,可控制直流母线电压稳定(波动约 $\pm 1\%$),保障了模块化微电网稳定运行。如图 14、图 15 可知,在孤岛模式下,微网侧变流器可以输出稳定的三相交流电压,并将交流微电网单元内部功率传递到直流母线侧。

孤岛状态下,混合储能系统为维持直流母线电压的稳定,实时补偿 P_{ac_micro} 以及 P_{dc_micro} 之间的差额。由于 P_{ac_micro} , P_{dc_micro} 随机波动,因此蓄电池充放电电流 I_{bat} 在 6~10 s 内呈不规则波动状态,如图 13 所示。

由上述分析可见,本文所设计的模块化微电网拓扑及其控制方法可以实现微电网在并网、孤岛状态下的稳定运行以及并网/孤岛双模式无缝切换。双模式无缝切换能力已成为其自然属性,无需任何变流器参与控制。

3.2 模块化微电网整体有功/无功功率调度仿真分析

设定模块化微电网在 0~10 s 的仿真过程中始终处于并网状态。0~2.8 s 时,电网侧变流器控制直流母线电压的稳定,蓄电池以恒流 $I_{bat}=100\text{ A}$ 放电。2.8 s 后微电网转入有功/无功功率调度模式。2.8 s 时,设定微电网以 44 kW 向大电网输出有功,无功功率调度指令目标为 22 kvar; 6 s 时,设定微电网以 131 kW 从大电网吸收有功,无功功率调度指令跳变为 60 kvar。

图 17—图 20 所示分别为直流母线电压曲线、模块化微电网出口有功/无功功率曲线、微网侧变流器三相交流电压曲线及蓄电池充放电电流曲线。

2.8 s 时模块化微电网由正常并网状态转入整体有功/无功功率独立调度状态,直流母线电压由电网侧变流器控制转为由混合储能系统控制。由于超级电容器的快速功率、能量支撑作用,在状态转换的暂态过程中,直流母线电压未发生骤变(如图 17 所示,2.8 s 时直流母线电压仅有约 38 V 跌落),保障了微电网运行状态的平稳过渡。

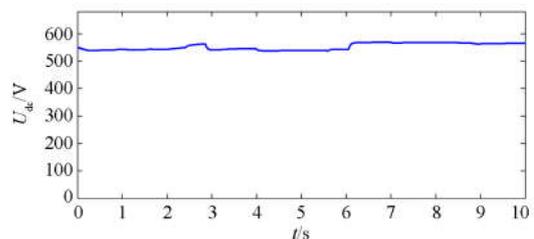


图 17 直流母线电压曲线

Fig. 17 Curve of DC bus voltage

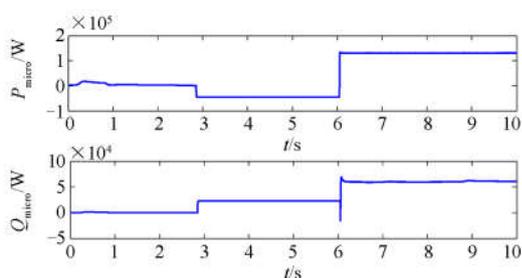


图 18 模块化微电网出口有功/无功功率曲线
Fig. 18 Curve of active and reactive power of modular microgrid

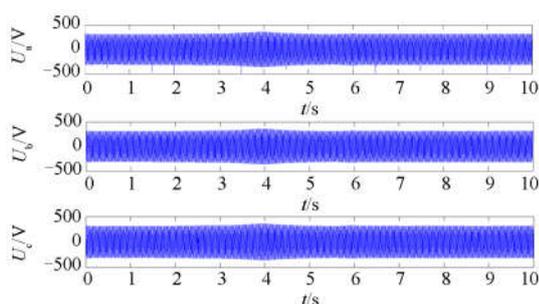


图 19 微网侧变流器三相交流电压曲线
Fig. 19 Curve of three phase AC voltage of microgrid-side converter

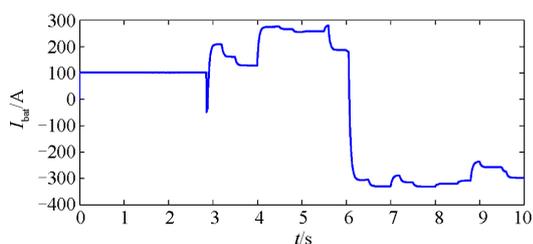


图 20 蓄电池充放电电流曲线
Fig. 20 Curve of charging-discharging current of battery

如图 18 所示, 0~2.8 s 内, 微电网正常并网运行模式下, 电网侧变流器控制直流母线电压稳定, 从而将微电网内部功率的矢量和传递到交流并网侧, 同时控制并网侧无功功率为零; 2.8~10 s 的时间段内, 电网侧变流器采用图 11 所示控制算法, 可以控制模块化微电网出口有功/无功功率快速、精确跟踪指令目标值, 指令跳变时的过渡响应时间约为 20 ms。

模块化微电网在两个状态之间进行切换的过程中, 由于直流母线电压相对稳定, 微网侧变流器能够始终输出幅值、频率稳定的三相交流电压(如图 19 所示), 保障交流微电网单元稳定运行。

2.8 s 后, 直流母线电压稳定由双向斩波器控制

稳定, 混合储能系统实时补偿 P_{ac_micro} , P_{dc_micro} 及 P_{micro} 之间差额。由于 P_{ac_micro} , P_{dc_micro} 呈随机波动性, 因此混合储能系统实时吞吐功率随机波动。由图 20 所示, 0~2.8 s 时, 蓄电池充放电电流 I_{bat} 稳定跟随目标值 100 A, 2.8~10 s 时, I_{bat} 呈随机波动状态。

由上述分析可见, 通过采用本文所提出的模块化微电网组网拓扑及其运行控制方法, 可以对模块化微电网整体有功/无功功率精确调度, 且不影响微电网内部交、直流微电网单元稳定运行。

4 结论

本文提出了一种模块化微电网组网拓扑, 该拓扑通过背靠背变流器将交流微电网单元、直流微电网单元以及混合储能系统进行了有机整合和模块化封装, 并对其多目标、多状态运行控制方式进行了优化设计。仿真研究表明, 本文所设计的模块化微电网拓扑及其运行控制策略不仅可以实现微电网模块化接入及并网/孤岛双模式无缝切换, 避免常规微电网拓扑并网/孤岛双模式无缝切换对变流器复杂控制逻辑和控制算法的依赖; 同时, 还使得微电网具备了整体有功/无功出力精确可控能力, 可与大电网进行“友好”功率交互, 并在必要时给大电网提供紧急功率支撑。通过本文的研究成果, 微电网具备了快速组网、即插即用、无缝切换、平稳可调度等功能, 使得微电网自治、稳定、兼容、灵活的特性得到了充分体现。

该拓扑结构与传统的交流微电网的系统相比, 交流负荷和交流分布式电源经两级全功率变流器接入外部电网, 在一定程度上增大了系统的组网成本及运行成本。但所设计拓扑及其运行算法具有比一般交直流微网更加优越的控制性能, 天然具备并网/孤岛双模式无缝切换及整体运行调度能力, 更加有利于微电网主动参与大电网的运行调度, 减少分布式电源对大电网的冲击, 从而显著提升大电网对各类可再生分布式能源的消纳能力。未来, 随着电力电子变流器技术的不断发展及成本的持续下降, 本文所提出的组网拓扑可以成为分布式电源及微电网运行设计的一种有益探索。

参考文献

- [1] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.

[2] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
ZHENG Zhanghua, AI Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31.

[3] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.

[4] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 174-193.

[5] CONTI S, NICOLOSI R, RIZZO S A, et al. Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV islanded micro-grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1243-1251.

[6] 张新昌. 微电网运行控制解决方案及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 141-146.
ZHANG Xinchang. Solution and application of micro-grid operation control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 141-146.

[7] 丁明, 田龙刚, 潘浩. 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.

[8] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.

[9] 刘志文, 夏文波, 刘明波. 基于复合储能的微电网运行模式平滑切换控制[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 906-913.
LIU Zhiwen, XIA Wenbo, LIU Mingbo. Control method and strategy for smooth switching of microgrid operation modes based on complex energy storage[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 906-913.

[10] ISE T. Advantages and circuit configuration of a DC micro-grid[C] // Proceedings of the Montreal 2006 Symposium on Microgrids, Montreal, Canada, 2006.

[11] PAPATHANASSIOU S, HATZI ARGYRIOU N, STRUNZ K. A benchmark LV microgrid for steady state and transient analysis[C] // Proceedings of the CIGRE Symposium Power Systems with Dispersed Generation, Greece, Athens, 2005.

[12] HIROSE K. An update on Sendai demonstration of multiplepower quality supply system[C] // Proceedings of the Kythnos 2008 Symposium on Microgrids, Kythnos Island, Greece, 2008.

[13] 王兴贵, 杨维满. 一种微源逆变器串联连接型微网特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 130-134.
WANG Xingguai, YANG Weiman. Study on characteristics of a microgrid with micro source inverters connected in series[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 130-134.

[14] 廖扬帆, 王家华, 许健, 等. 微电网的自适应组网技术[J]. 电子测试, 2014(2): 140-141.
LIAO Yangfan, WANG Jiahua, XU Jian, et al. Adaptive network technology of the micro grid[J]. Electronic Test, 2014(2): 140-141.

[15] 吴志锋, 舒杰, 崔琼. 多能互补微电网系统组网及控制策略研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(1): 44-47.
WU Zhifeng, SHU Jie, CUI Qiong. Research on pluripotent complementary microgrid system establishing and its control strategy[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(1): 44-47.

[16] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 148-151.
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 148-151.

[17] 杨家强, 尹溶森. 一种基于储能的微电网拓扑结构: 中国, CN103219726A[P]. 2013-03-29.

[18] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 194-208.

收稿日期: 2016-05-13; 修回日期: 2016-08-02

作者简介:

于 芑(1982-), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电控制技术、微电网运行设计技术以及储能系统运行控制; E-mail: 167274738@qq.com

张 用(1983-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源发电及其运行控制技术; E-mail: wanzhangyong@163.com

孙 辉(1962-), 女, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电力系统运行分析与控制、新能源发电控制技术、DFACTS 技术及其在电力系统中的应用研究等。E-mail: 365181515@qq.com

(编辑 周金梅)