

孤岛混合微电网电源故障后电压/频率无差控制

李军¹, 包那琴¹, 陈建华¹, 吕干云¹, 陈遗志²

(1. 南京工程学院电力工程学院, 南京 210000; 2. 国网电力科学研究院, 南京 210000)

摘要: 大多数孤岛混合微电网中的互联变换器为跟网型变换器, 在运行模式切换时需要远程通信改变其控制方式。当系统运行模式突然切换且遭遇通信故障或延迟, 跟网型变换器无法快速改变控制方式, 从而导致电压和频率崩溃。针对上述问题, 采用一种新型互联变换器(构网器), 该变换器由一对背靠背的 DC/DC 和 DC/AC 变换器构成。构网器只需本地通信, 通过测量和控制 DC-DC 侧直流电压、互联电容器电压以及 DC-AC 侧交流频率即可实现运行模式无缝切换, 提高混合微电网韧性。基于光伏电源支撑的构网器控制在模式切换后会导致系统电压/频率的小幅跌落, 为解决这一问题, 提出构网器与虚拟直流电机储能协调控制策略。仿真结果表明, 在构网器和虚拟直流电机储能协同作用下, 孤岛混合微电网中交直流任何一侧稳压电源突发故障后, 交流侧频率以及直流侧电压均能够快速稳定在额定值。

关键词: 混合微电网; 构网器; 模式无缝切换; 虚拟直流电机储能; 无差控制

Error-Free Control of Voltage/Frequency After Power Source Failure in Isolated Hybrid Microgrids

LI Jun¹, BAO Naqin¹, CHEN Jianhua¹, LÜ Ganyun¹, CHEN Yizhi²

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210000, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: Most of the interconnecting converters in island hybrid microgrids are grid-following converters, which change their control strategies to switch operation modes by means of remote communication order. When the system operation mode suddenly switches and communication failure or delay happens, the grid-following converters cannot quickly change the control strategies, resulting in voltage and frequency collapse. To solve the above problems, a new type of interconnected converter called grid-forming converter is introduced, which consists of a pair of back-to-back DC/DC and DC/AC converters. The grid-forming converter only needs local communication, and can complete seamless switching of operation modes by measuring and controlling the DC voltage on the DC-DC side, the voltage of interconnected capacitors and the AC frequency on the DC-AC side, and improves the resilience of hybrid microgrids operation. The small size magnitude drop of voltage or frequency will happen after microgrids operation modes switching due to the grid-forming converter control strategy supported by photovoltaic (PV) generations. So a coordinated control strategy between the grid-forming converter and the virtual DC motor energy storage is proposed. The simulation results show that the frequency of AC side and the voltage of DC side can be quickly stabilized at the rated value after the sudden failure of either side of AC/DC voltage sources in isolated island hybrid microgrids under the synergistic action of the grid-forming converter and virtual DC motor energy storage.

Key words: hybrid microgrids; grid-forming converter; seamless switching of modes; virtual DC motor energy storage; error-free control

0 引言

微电网正在从简单的直流或交流形式演变为交直流混合架构,以满足分布式发电和消费的多样性。在混合微电网中,互联变换器将直流和交流子电网连接起来,使它们能够共享功率和灵活性^[1-4]。

互联变换器控制方法可分为两大类:跟网型和构网型变换器。现有跟网型控制采用锁相环同步电网、调节输出电流的控制方式,呈现出电流源外特性,缺乏作为主电源支撑孤岛电网的能力。构网型控制通过模拟同步发电机的运动方程主动支撑电网。此外,相关研究表明,构网型控制有助于提高变换器与弱电网的交互稳定性,对于解决高比例可再生能源并网难题具有良好的前景^[5-7]。

目前混合微电网中的双向互联变换器(bidirectional interlinking converter, BIC)可运行于3种模式,分别为均衡模式、直流主导模式、交流主导模式,如图1所示。其中,从互联变换器流向直流子网、交流子网的功率分别用 P'_{dc} 、 P'_{ac} 表示。

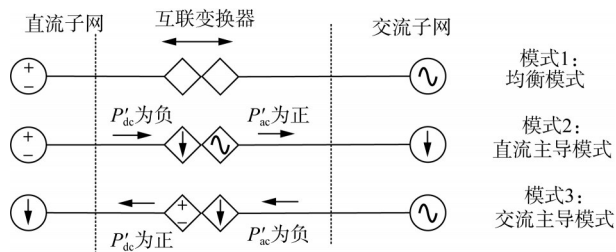


图1 交直流混合微电网中的运行模式

Fig. 1 Operation mode of AC-DC hybrid microgrid

现有的控制策略大多只关注混合微电网在某一运行模式下的功率共享^[8-11]。文献[12-15]中提出了用于混合交直流微电网的综合惯性控制。通过该方法可以改善混合微电网动态性能,可令电压/频率变化曲线平滑,但仍为有差调节且仅适用于均衡模式。文献[16]采用一种自适应下垂控制方法,能够减小下垂控制引起的电压和频率误差,但只适用于模式1。文献[17]提出一种抑制电压波动的双向AC/DC变换器改进内环控制策略来减小电压和频率的误差,可提高下垂控制微电网系统的鲁棒稳定性。文献[18]深入研究了孤岛微电网电压与频率关系,但没有指明无差调节方法。文献[19]利用虚拟同步电机技术实现无差控制,但需要直流侧电压恒定,否则控制将失效。

上述方法均为传统DC/AC互联变换器控制,大多只适用于均衡模式下的功率平衡和惯性支撑。当电压供应条件变化时,尤其对于交流或直流子网中稳压电源意外故障情况(BIC需要从电流控制模式转换为电压控制模式),要求BIC及时对模式变换做出反应,这需要快速准确的模式检测^[20]。否则,延迟或不准确的检测可能会导致系统不稳定甚至故障。因此,能够适应所有工作模式而不需要模式检测和模式转换的BIC控制策略将有效提高系统的稳定性和可靠性。

针对这种课题国内外研究较少,文献[21]通过BIC与稳压电源参数相耦合实现了模式的无缝切换,然而这种控制需要有通信线路与稳压电源作信息交换,通信故障时控制将失效,此外文章中功率参考值的获取并未给出说明。文献[22]提出归一化双下垂控制策略,通过控制互联变换器 f - P_{bic} 下垂控制曲线上平移实现模式无缝切换,但是所提控制方法需要实时检测两侧微电网负载功率变化,依此来更新控制方式,否则当负载功率变化时控制将失去准确性。

文献[23]受变压器可自主传递两侧电压的特性启发,采用DC-DC与DC-AC变换器背靠背连接方式,以直流电压、交流频率以及互联电容电压稳定为出发点,提出了一种双极式互联变换器——Transverter技术,实现了3种模式的无缝切换。然而文章中采用的混合微电网模型为理想模型,并未考虑直流子网中可能存在的波动性光伏电源对整个系统的影响,并且对交流频率和直流电压的控制仍为有差控制。

本文在Transverter技术基础上提出在直流子网线路首端设置虚拟直流电机储能^[24]并与构网器协调控制的策略。当直流子网中含波动性光伏时,利用该方法只需本地测量交流线路频率、直流线路电压以及互联电容器电压即可实现混合微电网3种模式无缝切换以及负载功率波动等工况下达到频率和电压的无差控制目标。

1 系统结构与构网器运行原理

1.1 交直流混合微电网系统结构

如图2所示,本文所分析的混合微电网系统是由交流微电网、直流微电网、构网器三大部分组成。恒压直流源与DC/DC变换器作为直流子网稳

压电源,其作用是维持直流母线电压恒定在 380 V;恒压变流源与 DC/AC 变换器作为交流子网稳压电源,其作用是维持交流母线电压恒定在 380 V,频率恒定在 50 Hz。 R_1+jX_1 为交流母线线路阻抗, R_2+jX_2 为直流母线线路阻抗,直流侧光伏电源通过 Boost 变换器实现最大功率跟踪,蓄电池储能通过双向 DC-DC 变换器实现虚拟直流电机储能控制,将其设置在直流线路首端-节点 3 处。构网器由一对 DC/DC、DC/AC 变换器组成,与交流线路在其首端——节点 2 处连接,与直流线路在其首端——节点 3 处连接。

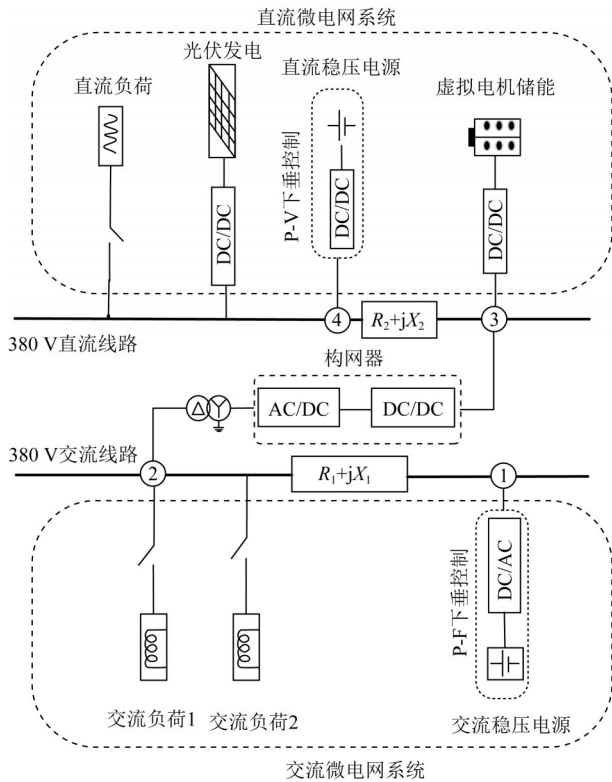


图2 混合微电网系统结构

Fig. 2 Hybrid microgrid system structure

1.2 交直流混合微电网系统结构

本文采用的构网器拓扑结构和控制方法如图3所示。一对变换器、一个 DC-DC 和一个 DC-AC 背靠背连接,由互联电容 C_{lk} 缓冲。两个变换器都有独立的快速内环电压控制,因此每个变换器都可以作为电压源,支持电压稳定。

需要指出的是,构网型控制而非传统跟网型控制使构网器具有电压源特性。电压源的设定值根据下垂曲线来控制,这样构网器就可以与每个子电网

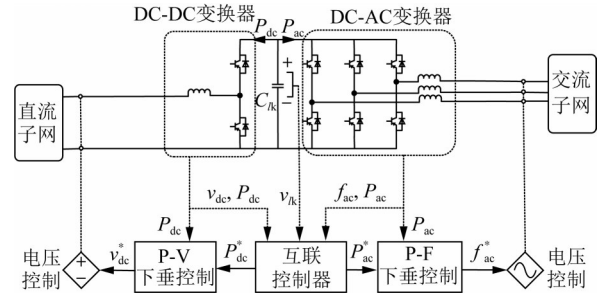


图3 构网器拓扑结构和控制方式

Fig. 3 Transverter topology and control method

中的其他电源共享功率。DC-DC 和 DC-AC 变换器分别采用有功功率-电压(P-V)和有功功率-频率(P-F)下垂控制,以控制直流电压和交流频率设定值(v_{dc}^* 和 f_{ac}^*),变换器控制框图如图4—5所示。

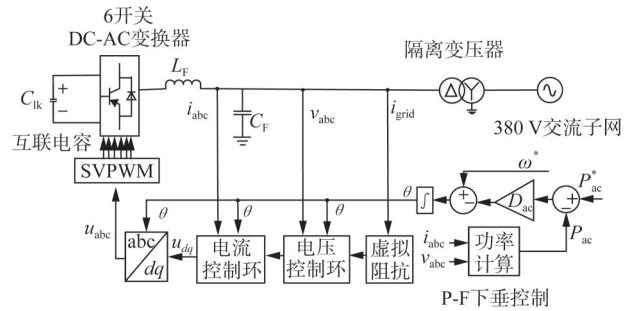


图4 DC-AC变换器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of DC-AC converter

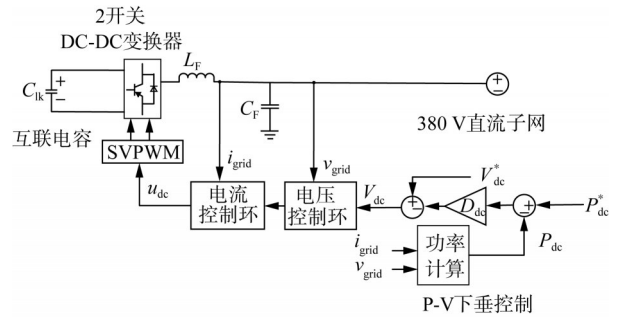


图5 DC-DC变换器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of DC-DC converter

DC-AC 变换器的 P-F 下垂控制式为:

$$\omega = \omega^* - D_{ac}(P_{ac}^* - P_{ac}) \quad (1)$$

式中: ω^* 为参考角频率; ω 为实际角频率; P_{ac}^* 为参考吸收功率; P_{ac} 为实际吸收功率; D_{ac} 为 P-F 下垂系数。

对于 DC-DC 变换器 P-V 下垂控制式为:

$$V_{dc} = V_{dc}^* - D_{dc}(P_{dc}^* - P_{dc}) \quad (2)$$

式中: V_{dc}^* 为参考电压; V_{dc} 为实际电压; P_{dc}^* 为参考吸

收功率; P_{dc} 为实际吸收功率; D_{dc} 为 P-V 下垂系数。

下垂控制中带有低通滤波器用来衰减噪声并提供虚拟惯性。交流侧内环电压控制中嵌入了虚拟电感, 以降低 P-V 耦合, 提高 P-F 下垂可控性。虚拟电感可以实现无功功率共享, 因此 Q-V 下垂控制是不必要的, 所以交流侧参考电压 v_{dc}^* 仅由频率 f_{ac}^* 决定。

构网器的功率平衡关系如下。

$$P_{ac} + P_{dc} + P_{lk} = 0 \quad (3)$$

$$P_{lk} = V_{lk} C_{lk} \frac{dV_{lk}}{dt} \quad (4)$$

式中: P_{ac} 为互联电容向 DC/AC 变换器提供的功率; P_{dc} 为互联电容向 DC/DC 变换器提供的功率; V_{lk} 为互联电容电压; C_{lk} 为互联电容大小; P_{lk} 为互联电容送出功率; t 为时间。

互联控制器的引入可以有效调整下垂控制偏差。互联控制器包括两个控制回路, 如图 6 所示。第一个回路分别利用 PI 控制匹配直流侧母线电压 v_{dc} 和初始电压 v_{dc0} 的偏差 ($v_{dc} - v_{dc0}$)、交流侧系统频率 f_{ac} 和初始频率 f_{ac0} 的偏差 ($f_{ac} - f_{ac0}$), 通过直流子网和交流子网获得净电力流 P_{Σ}^* , 令混合微电网作为一个整体能够保持功率平衡。根据 P-V 和 P-F 下垂控制, v_{dc} 和 f_{ac} 能够分别反映直流子网和交流子网的功率平衡, 上述匹配使得交流子网与直流子网的功率平衡实现联动, 即为混合下垂控制, 用来调节下垂功率设定点 P_{dc}^* 和 P_{ac}^* 。在此基础上, 加入第二个控制回路, 进一步减小偏差。第二个控制回路增加了一个功率偏移量 P_{Δ}^* , 利用 PI 控制器调节互联电容的电压。设置匹配系数 $\beta = D_{dc}/D_{ac}$ 来补偿下垂系数 D_{dc} 与 D_{ac} 的差异。

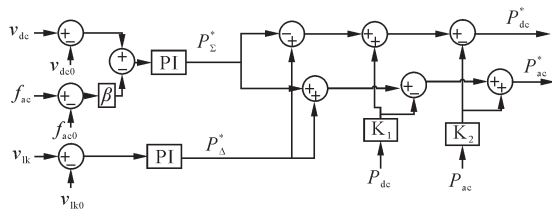


图 6 互联控制器框图

Fig. 6 Interconnection controller block diagram

2 混合微电网控制策略

2.1 光伏发电控制

光伏电源的引入在文中作为直流侧的功率扰动量和不稳定功率源。当直流稳压电源正常运行时光

伏功率的波动性会对直流侧电压稳定产生不利影响, 从而进一步影响整个混合系统的电压/频率稳定性, 需通过直流稳压电源和储能模块平抑其影响。若直流稳压电源故障, 光伏电源与储能配合, 确保直流侧电压的稳定性。光伏与储能模块的协同作用相当于是直流侧的备用电源, 可避免故障(极端情况下可能出现直流和交流稳压电源先后故障)时出现电压或频率崩溃现象, 保障混合微电网平稳运行。

光伏发电单元通过 Boost 变换器连接至直流母线, 其拓扑结构及控制策略如图 7 所示。

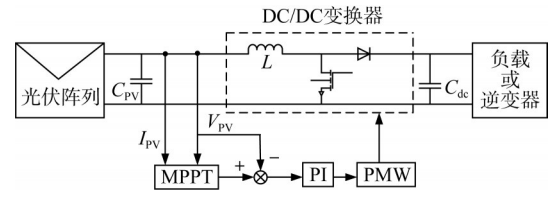


图 7 光伏控制策略

Fig 7 Control strategy of photovoltaic power supply

2.2 虚拟直流电机储能控制

本文在储能的双向 DC-DC 变换器中采用具有直流电机特性的 VDCM 控制策略, 以增加系统惯性来避免系统在运行模式切换后电压和频率的跌落以及光伏功率的波动引起混合微电网的电压及频率失稳现象。

模拟直流电机特性的 VDCM 模型如图 8 所示。图 8 中, 储能接口变换器采用双向 DC-DC 变换器, 可等效为一个二端口网络, 左端接储能装置, 右端接入直流母线。从图 8 可以看出, 直流电机的等效模型与储能接口变换器的等效模型具有对应关系, 故可在储能接口变换器中引入 VDCM 技术来提高系统的惯性并降低直流主导模式下混合微电网对外部功率扰动的敏感性。

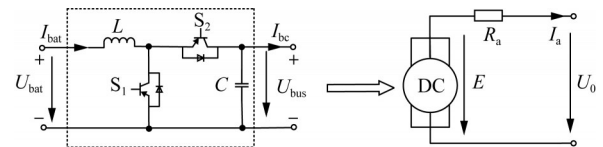


图 8 VDCM 模型

Fig. 8 VDCM model

VDCM 的模型采用直流电机的机械转动方程和电枢回路的电动势平衡方程, 具体如下。

机械转动方程为:

$$J \frac{d\omega_T}{dt} = T_m - T_e - D(\omega_T - \omega_{T0}) \quad (5)$$

$$T_e = P_e / \omega_T \quad (6)$$

式中: T_m 和 T_e 分别为直流电机的机械转矩和电磁转矩; ω_T 为直流电机的实际旋转角速度; ω_{T0} 为额定角速度; P_e 为电磁功率; D 为阻尼功率系数。

电动势平衡方程为:

$$U_0 = E - R_a I_a \quad (7)$$

$$E = C_T \phi n_T \quad (8)$$

式中: U_0 为空载电动势; E 为电枢旋转所产生的电动势; R_a 为电枢电路的电阻; I_a 为电枢电流; C_T 为转矩系数; ϕ 为每极磁通; n_T 为转子转速。

在传统电压电流双环控制基础上加入虚拟直流电机环节后的控制框图如图 9 所示。当外部功率波动时, 可根据直流电机的机械转动方程来调节实际角速度 ω , 进而通过电枢回路电动势平衡方程调节感应电动势 E , 响应功率波动造成的电压扰动, 维持直流母线电压 U_{bus} 的稳定。

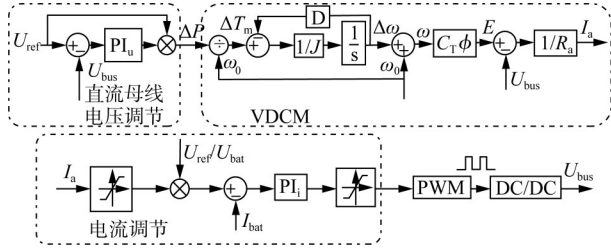


图 9 储能控制框图

Fig. 9 Control block diagram of energy storage

2.3 构网器与虚拟直流电机储能协调控制

对于含有波动性光伏电源的孤岛混合微电网, 当发生某一侧稳压电源突然故障而退出运行时, 整个系统直流电压和交流频率的稳定离不开远程通信、模式检测和切换的配合, 是目前大部分 BIC 控制方案都会遇到的难题。为解决这一问题, 本文提出构网器与线路首端虚拟直流电机储能协调控制策略, 其交流子网功率平衡关系为:

$$P_{ac,s} + P_{ac} = P_{load,ac} + P_{loss,ac} \quad (9)$$

直流子网功率平衡关系为:

$$P_{dc,s} + P_{ba,n} + P_{pv} = P_{dc} + P_{load,dc} + P_{loss,dc} \quad (10)$$

构网器功率平衡关系为:

$$P_{ac} + P_{dc} = 0 \quad (11)$$

式中: $P_{ac,s}$ 、 $P_{dc,s}$ 分别为交流、直流稳压电源输出功率, 当其他电源功率充足时 $P_{ac,s}$ 、 $P_{dc,s}$ 均为 0; P_{pv}

为光伏输出功率; $P_{ba,n}$ ($n=0, 1, 2$) 为虚拟直流电机储能输出功率 ($n=0$ 表示直流侧不计及储能, 即功率为 0; $n=1$ 表示直流侧储能放置在线路末端; $n=2$ 表示直流侧储能放置在线路首端); P_{ac} 、 P_{dc} 分别为构网器向交流、直流子网输送功率; $P_{load,ac}$ 、 $P_{load,dc}$ 分别为交流、直流子网负荷; $P_{loss,ac}$ 、 $P_{loss,dc}$ 分别为交流、直流子网线路损耗。

3 算例仿真

为验证所采用的控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 搭建如图 2 所示交直流混合微电网模型, 表 1 中给出了混合微电网详细参数。

表 1 微电网仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of microgrid

仿真参数	数值
交流线路电压 V_{ac}/V	380
交流微电网频率 f/Hz	50
直流线路电压 V_{dc}/V	380
互联电容器电压 V_{lk}/V	700
直流、交流稳压电源功率容量/W	3 000、3 000
构网器最大传输功率 P_{bic}/W	15 000
光伏输出电压 V_{pv} 、输出电流 I_{pv}	164 V、17.28 A
下垂系数 D_{ac} 、 D_{dc}	60、20
光伏电源最大功率/W	2 835
交流负荷 1、交流负荷 2、直流负荷	(600+j292) VA、(600+j292) VA、600 W
蓄电池容量/Ah	200
蓄电池额定电压、充放电电流	96 V、40 A
蓄电池初始 SOC 值/%	50
储能电压环控制参数 K_p 、 K_i	100、60
储能电流环控制参数 K_p 、 K_i	1.5、10
交流线路参数 R_1+jX_1/Ω	0.710+j0.000 450
直流线路参数 R_2+jX_2/Ω	0.268+j0.000 013

本文分别模拟了交流侧稳压电源故障、直流侧稳压电源故障两种工况, 且虚拟直流电机储能输出控制为直流电压。为了实现直流电压维持在 380 V 的控制目标, 若储能设置在直流线路末端(负载侧), 即维持末端电压稳定在 380 V, 因线路压降的影响, 互联变换器(本地通信型)侧直流电压会高于 380 V, 从而导致交流侧频率会大于 50 Hz (由于归一化下垂控制的耦合作用, 交流频率与直流电压直接相关), 无法达到无差调节的控制目标。储能若设置在线路首端(构网器侧)可以令互联变换器检测

电压维持在380 V,同时交流侧频率维持在50 Hz,从而实现任一工况下构网器传输至另一侧子网的功率总能使电压/频率维持在额定值的目标。

为验证上述构想,分别设计了以下3种方案进行比对研究。

方案1:只采用构网器,不计及储能控制策略。

方案2:采用构网器与线路末端的虚拟直流电机储能协调控制策略。

方案3:采用构网器与线路首端的虚拟直流电机储能协调控制策略。

仿真时长为10 s,1 s时交流子网稳压电源和直流子网稳压电源启动,2 s时构网器启动开始工作,4 s时交流侧或者直流侧稳压电源意外故障退出运行,8 s时交流侧负载从 $(600+j292)$ VA增加到 $(1\,200+j584)$ VA。光伏输出功率随时间变化(0—5 s: 1 700 W, 5—7 s: 2 835 W, 7—10 s: 1 134 W),直流子网负载功率始终为600 W。以下仿真图中 $P_{ac,i}$ 为第*i*个方案下构网器向交流子网输送的功率, $P_{dc,i}$ 为第*i*个方案下构网器向直流子网输送的功率。 $P_{ac,si}$ 为第*i*个方案下交流稳压电源输出功率, $P_{dc,si}$ 为第*i*个方案下直流稳压电源输出功率。 V_{lk} 额定值为700 V, f_{ac} 额定值为50 Hz, V_{dc} 额定值为380 V。

3.1 交流子网稳压电源故障情况分析

当混合微电网交流侧稳压电源在4 s时意外故障退出运行,混合微电网从均衡模式变为直流主导模式。此时互联电容器电压 V_{lk} 、交流子网频率 f_{ac} 、直流子网电压 V_{dc} 、构网器传输功率 P_{ac} 、 P_{dc} 以及电源功率变化如图10和表2所示。

从图10(a)可以看出,采用方案1与方案3时,当负载增加时,方案1的 V_{lk} 会先减少后增大到700 V,而方案3的 V_{lk} 是先增大后减小到700 V,这是因为方案3的直流稳压电源根据P-V下垂控制会增加输出功率且与首端储能功率相配合来满足构网器直流侧电压维持在380 V,从而维持交流频率保持在50 Hz,满足交流侧功率需求,做到无差调节。其他方案下只能维持线路末端电压在380 V,因直流线路压降的影响,此时构网器直流侧电压低于380 V,导致交流侧频率低于50 Hz,所以只能做到有差调节。

从表2的3种方案的偏差量对比中发现采用方案1虽然可在交流侧稳压电源故障后仍可保持系统

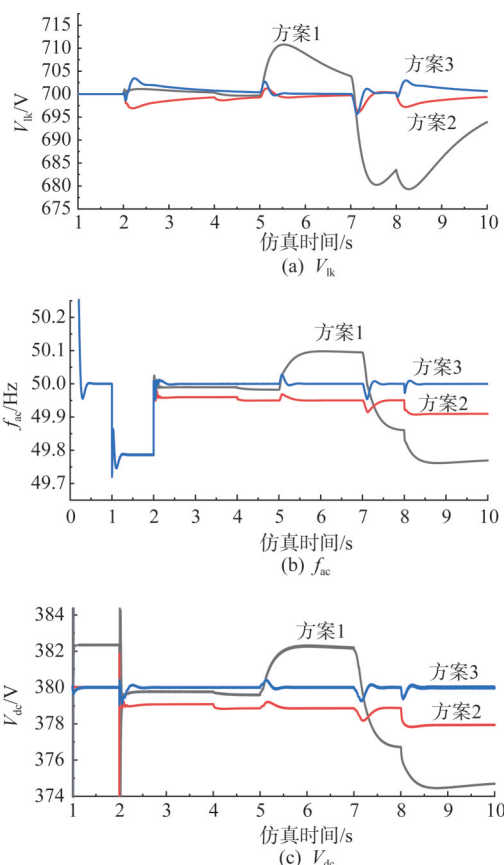


图10 V_{lk} 、 f_{ac} 、 V_{dc} 变化曲线

Fig. 10 Variation curves of V_{lk} , f_{ac} and V_{dc}

继续运行,但无法应对光伏功率波动对系统频率和电压的冲击,电压和频率偏差量较大。当采用方案2时,虽然可应对光伏功率波动,偏差量较小。但模式变换或负载增加时,电压/频率仍有跌落,为有差调节。而当采用方案3时偏差量为0,说明即使面对系统光伏功率波动或者模式变化,亦或者负载功率变化,采用方案3均可做到自主无差调节。

表2 模式1转为模式2时参数偏差量

Tab. 2 Parameter offsets when mode 1 is converted to mode 2

方案	V_{lk} 偏差范围/V	f_{ac} 偏差范围/Hz	V_{dc} 偏差范围/V
方案1	$[-13, 10]$	$[-0.25, 0.1]$	$[-5.5, 2]$
方案2	$[-4, 1]$	$[-0.1 \text{ Hz}, -0.05 \text{ Hz}]$	$[-2, -1]$
方案3	$[-4, 3]$	$[0, 0]$	$[0, 0]$

在图11中,在4 s前,即在均衡模式下,方案1传输功率为750 W,当交流稳压电源故障后,受到光伏功率波动影响,构网器从直流子网吸收的功率与向交流子网传输功率并不准确相等,5—7 s时交流子网需求功率为750 W,但其从直流子网吸收

功率为 600 W，7—10 s 需求功率为 1 350 W，但从直流子网吸收功率为 1 500 W，不再准确遵守式(11)且功率波动大于其他方案，最大波动值可达 800 W，其他方案最大波动值为 500 W。

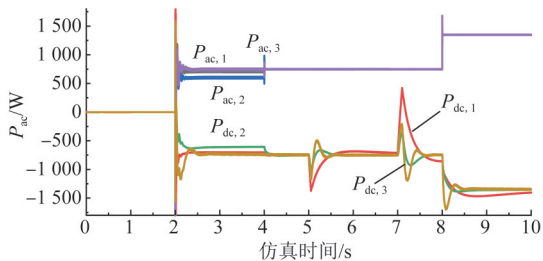


图 11 构网器传输功率变化曲线

Fig. 11 Transmission power variation curves of the transverter

方案 2 在 4 s 前从直流子网吸收功率为 600 W，在 4 s 时交流电源故障，吸收功率增加到 750 W，随后在 4—8 s 时维持在 750 W，8 s 时因负载增加，构网器从直流子网吸收 1 350 W，向交流子网输送 1 350 W，整个仿真过程构网器功率关系准确遵守式(11)。不同于方案 2，方案 3 在均衡模式下构网器向交流子网提供 750 W，从直流子网吸收 750 W，后续波形与方案 2 一致。图 11 充分说明构网器吸收功率与输送功率相等，满足式(11)，满足混合微电网功率平衡需求。

从图 12 可以看出，在方案 1 中，为保持端电压在 380 V，直流稳压电源受到 P-V 下垂控制影响，吸收光伏功率额外功率，根据式(10)变化(此时 $n=0$)，此时直流稳压电源单独平抑功率波动；在方案 2 中，为保持线路末端电压在 380 V，储能吸收光伏电源额外功率，根据式(11)变化(此时 $n=1$)。因虚拟电机储能良好的暂态响应，稳压电源端电压可维持在 380 V，根据 P-V 下垂控制曲线，此时 $P_{dc,s}=0$ 储能单独平抑功率波动；在方案 3 中，为保持线路首端电压维持 380 V，储能吸收光伏功率额外功率，因直流线路阻抗的影响，稳压电源端电压高于 380 V，根据 P-V 下垂曲线，直流稳压电源也将吸收光伏额外功率，根据式(11)(此时 $n=2$)变化，此时储能与稳压电源共同平抑功率波动。

3.2 直流子网稳压电源故障情况分析

当混合微电网直流子网稳压电源在 4 s 时意外故障退出运行，混合微电网从均衡模式变为交流主导模式。其他设定与情况 1 一样。此时电压、频率以及互联电容电压变化如表 3 和图 13 所示。

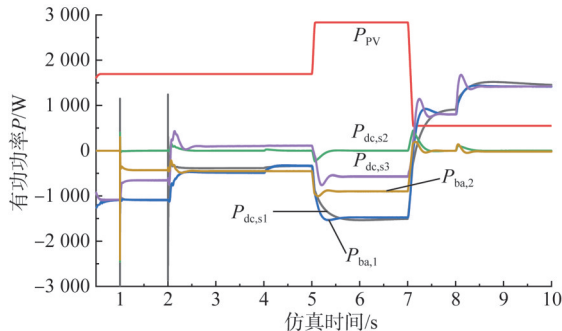


图 12 系统电源功率变化曲线

Fig. 12 Power variation curves of system power supply

表 3 模式 1 转为模式 3 时参数偏差量

Tab. 3 Parameter offset when mode 1 is converted to mode 3

方案	V_{lk} 偏差范围/V	f_{ac} 偏差范围/Hz	V_{dc} 偏差范围/V
方案 1	$[-60, 35]$	$[-0.4, 0.4]$	$[-10, 10]$
方案 2	$[-4, 1]$	$[-0.1 \text{ Hz}, -0.05 \text{ Hz}]$	$[-2, -1]$
方案 3	$[-4, 3]$	$[0, 0]$	$[0, 0]$

从表 3 的 3 种方案的偏差量对比中发现采用方案 1 虽然可在直流侧稳压电源故障后仍可保持系统继续运行，但无法应对光伏功率波动对系统频率和电压的冲击，电压和频率偏差量较大。当采用方案 2 时，可应对光伏功率波动，偏差量较小。但模式变换或负载增加时，电压/频率仍有跌落，为有差调节。而当采用方案 3 时偏差量为 0，说明即使面对系统光伏功率波动或者模式变化，亦或者负载功率变化，采用方案 3 可做到自主无差调节。

从图 13(a)可以看出，采用方案 1 与方案 3 时，8 s 负载增加时，方案 1 的 V_{lk} 会先减少后增大到 700 V，而方案 3 的 V_{lk} 是先增大后减小到 700 V，原因如情况 1 中所述。

由图 14 可知，当直流侧稳压电源故障后，方案 1 的 P_{ac} 与 P_{dc} 并不准确相等，说明当直流稳压电源故障后，受到光伏功率波动的影响，系统尝试将光伏功率扰动由交流侧稳压电源平抑，此时构网器无法按照要求快速准确的保持系统功率平衡，勉强维持系统继续运行；当采用方案 2 和方案 3 时，4 s 前 $P_{ac2}=-P_{dc2}=600 \text{ W}$ ， $P_{ac3}=-P_{dc3}=750 \text{ W}$ ，8 s 时交流负载增加， $P_{ac2}=-P_{dc2}=1\,200 \text{ W}$ ， $P_{ac3}=-P_{dc3}=1\,350 \text{ W}$ 系统功率可以正常平衡，满足式(11)。

从图 15 可以看出，在方案 1 中，为保持交流母线频率在 50 Hz，交流稳压电源受到 P-F 下垂控制影响，吸收光伏电源额外功率，根据式(9)变化。

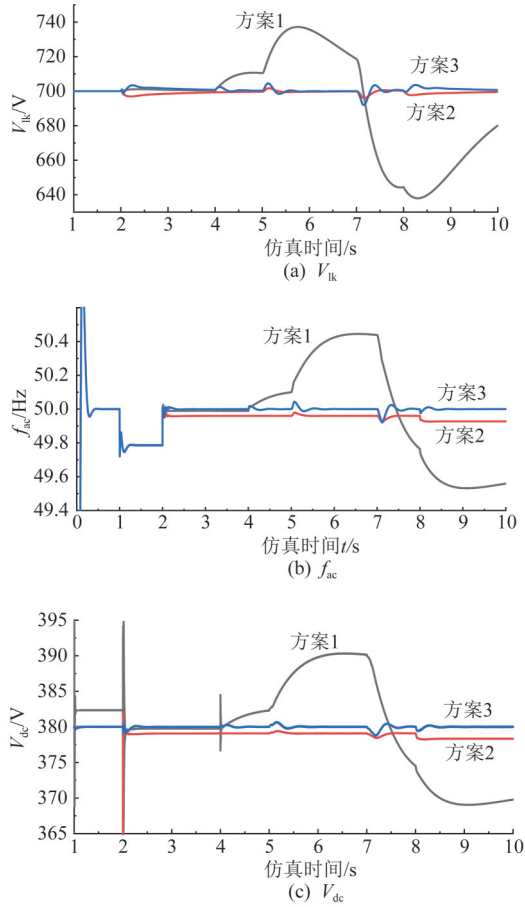
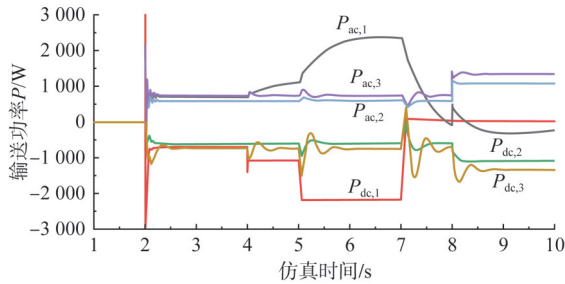
图 13 V_{lk} , f_{ac} , V_{dc} 变化曲线Fig. 13 Variation curves of V_{lk} , f_{ac} and V_{dc} 

图 14 构网器传输功率变化曲线

Fig. 14 Transmission power variation curves of the transverter

因 $P_{dc,s1}=0$, 光伏功率波动被传递到 P_{dc} , 此时交流稳压电源单独平抑功率波动。

在方案 2 中, 为保持线路末端电压维持在 380 V, 储能吸收光伏电源额外功率, 根据式 (10) ($n=1$) 变化。此时 $P_{dc,s}=0$, 储能单独平抑功率波动, 因线路阻抗的存在此时构网器侧的电压不是 380 V, 故交流母线频率不是 50 Hz, 因频率存在偏差使得 $P_{ac,s2}=P_{loss,ac}$, $P_{ac}=-P_{dc}=P_{load,ac}=600$ W; 方案 3 中为保

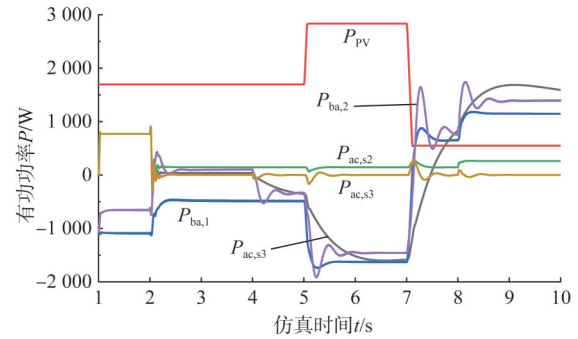


图 15 系统电源功率变化曲线

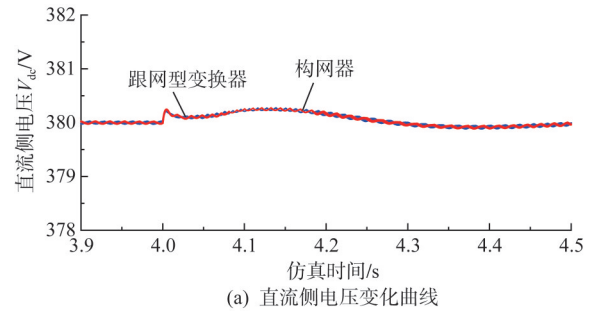
Fig. 15 Power variation curves of system power supply

持线路首端电压维持在 380 V, 储能吸收光伏电源额外功率, 该方案可维持构网器侧电压为 380 V, 即可维持交流频率为 50 Hz, 此时 $P_{ac,s3}=0$, P_{ac} 根据式 (11) 变化。方案 3 中, 虚拟直流电机储能不仅可以平抑功率波动, 还可以令交流侧频率和直流侧电压始终维持在额定值, 可做到无差调节。

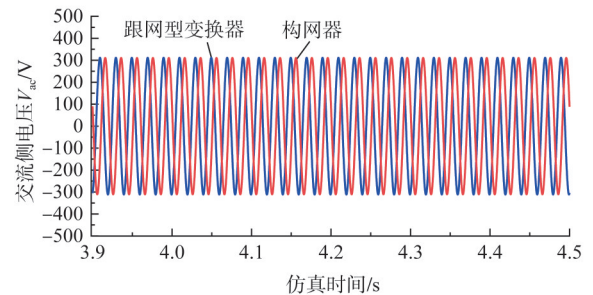
3.3 传统跟网型变换器与构网器的性能比较

在图 16—17 中, 分别仿真模拟了当 4 s 时直流稳压电源故障或交流稳压电源故障的两种情况下使用传统跟网型变换器与使用构网器时, 混合微电网直流侧电压及交流侧电压的变化情况。

由图 16 可以看出, 当混合微电网系统的直流



(a) 直流侧电压变化曲线



(b) 交流侧电压变化曲线

图 16 直流稳压电源故障时电压变化情况

Fig. 16 Voltage variations when the DC regulated power supply fails

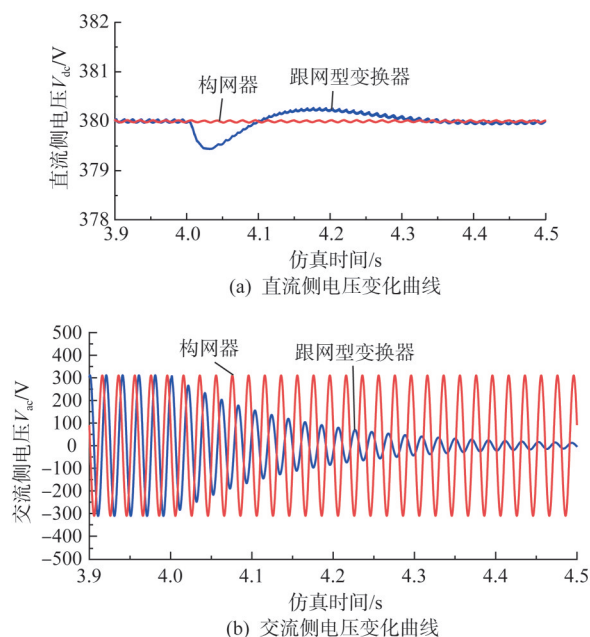


图 17 交流稳压电源故障时电压变化情况

Fig. 17 Voltage variation when AC regulated power supply fails

稳压电压在 4 s 时突然故障, 无论使用传统跟网型变换器或者使用本文所提及的构网器, 都能够满足直流侧/交流侧电压稳定运行, 不会出现电压崩溃现象。而当混合微电网系统的交流稳压电压在 4 s 时突然故障, 由图 17 可以看出, 若使用传统跟网型变换器会因其跟网特性, 当交流电源故障后此类变换器无法满足支撑交流电压的要求, 致使混合微电网交流侧电压出现崩溃现象。但使用本文所提构网器作为互联变换器时不会出现电压崩溃现象, 直流侧电压也更加平稳, 波动较少, 凸显了构网器在这类弱电网条件下的性能优越性。

4 结语

本文针对目前光伏等波动性新能源接入微电网的需求以及当任何一侧稳压电源意外故障退出运行时孤岛混合微电网仍能稳定运行在额定值的需求, 提出了一种构网器与虚拟直流电机储能协同控制策略。依靠二者协调控制提高系统鲁棒性, 既满足了孤岛微电网可运行于多种模式的需求又做到了电压/频率的无差控制。

对比了 3 种控制方案, 仿真结果表明对于含波动性光伏电源的混合微电网, 将虚拟直流电机储能接在直流线路首端再结合与构网器的协调控制不仅可自主形成任意侧子网特性, 即使在模式变化以及

负载功率变化时, 仍可以做到电压与频率无差控制。

本文的后续研究中可以进一步在储能控制中加入二次电压补偿控制, 以补偿直流线路阻抗引起的电压偏差。此外, 本文中所用混合系统模型只在直流侧引入波动性光伏, 后期研究可以在交流侧引入波动性风力发电, 且在并联的构网器中引入功率协调控制方法使得整个模型进一步贴近实际情况, 满足更多应用场景。

参考文献

- [1] HAMIDIEH M, GHASSEMI M. Microgrids and resilience: a review[J]. IEEE Access, 2022(10):106059 – 106080.
- [2] MOHAMMADI F. Robust control strategies for microgrids: a review[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2):2401 – 2412.
- [3] 张良, 范广胜, 黄南天. 交直流混合微电网母线接口参数自适应 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14):45 – 54.
- [4] ZHANG Liang, FAN Guangsheng, HUANG Nantian. Adaptive VSG control strategy for bus interface parameters of AC-DC hybrid microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14):45 – 54.
- [5] 田浩, 黄文焘, 余墨多. 交直流混合独立微网互联变换器自适应双向下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19):7063 – 7074.
- [6] TIAN Hao, HUANG Wentao, YU Moduo. Adaptive bidirectional droop control strategy for AC-DC hybrid independent microgrid interconnecting converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19):7063 – 7074.
- [7] 桑顺, 徐婷, 齐琛, 等. 惯性同步构网型变换器定量感知电网频率的机理及抗干扰控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(4):1395 – 1408.
- [8] SANG Shun, XU Ting, QI Chen, et al. Mechanism and anti-interference control strategy of inertial synchronous network converter for sensing frequency of power grid [J]. Power System Technology, 2023, 47(4):1395 – 1408.
- [9] 詹长江, 吴恒, 王雄飞. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6):2339 – 2359.
- [10] ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei. Review on the stability of grid converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6):2339 – 2359.
- [11] LI Y, GU Y, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6):4541 – 4554.
- [12] EGHTEHDARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3):1494 – 1505.
- [13] XIA Y, PENG Y, YANG P, et al. Distributed coordination control for multiple bidirectional power converters in a hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6):4949 – 4959.
- [14] XIAO H, LUO A, SHUAI Z, et al. An improved control method for multiple bidirectional power converters in hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,

- 7(1):340-347.
- [11] CHEN X, RUAN X, YANG D. Step-by-step controller design of voltage closed-loop control for virtual synchronous generator [C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 20-24, 2015, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE, 2015: 3760-3765.
- [12] 施静容,李勇,贺悝.一种提升交直流混合微电网动态特性的综合惯量控制方法[J].电工技术学报,2020,35(2):337-345.
- SHI Jingrong, LI Yong, HE Kui. A comprehensive inertia control method for improving dynamic characteristics of AC-DC hybrid microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 337-345.
- [13] 李占凯,邵绍洋,张福民,等.基于集成三端口的混合微电网场景自适应功率协同控制策略[J].南方电网技术,2023,17(11):41-50.
- LI Zhankai, BING Shaoyang, ZHANG Fumin, et al. Adaptive power cooperative control strategy of hybrid microgrid scenarios based on integrated three-port [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 41-50.
- [14] 方响,俞登科,王亿,等.基于模糊解耦线性自抗扰控制的混合微电网直流母线电压波动抑制策略[J].南方电网技术,2024,18(10):116-129.
- FANG Xiang, YU Dengke, WANG Yi, et al. Suppression strategy of dc bus voltage fluctuation in hybrid microgrid based on fuzzy decoupling linear auto disturbance rejection control [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 116-129.
- [15] 杜燕,言明明,王鑫,等.交直流子网双边惯量约束下互联变流器动态功率控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(4):172-179.
- DU Yan, YAN Mingming, WANG Xin, et al. Dynamic power control strategy for interlinking converter under bilateral inertia constraints in AC/DC subgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 172-179.
- [16] 张国荣,丁晓通,彭勃.交直流混合微电网互联变流器改进控制策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(14):50-58.
- ZHANG Guorong, DING Xiaotong, PENG Bo. Improved control strategy for interconnecting converters in AC-DC hybrid microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 50-58.
- [17] 刘子文,苗世洪,范志华.孤立交直流混合微电网双向AC/DC换流器功率控制与电压波动抑制策略[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6225-6238.
- LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua. Power control and voltage fluctuation suppression strategy of bidirectional AC/DC converter in isolated AC-DC hybrid microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6225-6238.
- [18] SHI H, SUN K, HOU X. Equilibrium mechanism between DC voltage and AC frequency for AC-DC interlinking converters [J]. iEnergy, 2022, 1(3): 279-284.
- [19] 谢卫才,李晓凤,王世豪.交直流混合微电网频率和电压的无差控制[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(7):110-116.
- XIE Weicai, LI Xiaofeng, WANG Shihao. Errorless control of frequency and voltage in AC-DC hybrid microgrid [J]. Proceedings of the CSU-EPSP, 2019, 31(7): 110-116.
- [20] 黄堃,付明,梁加本.基于融合专家知识DDPG的孤岛微电网频率调节策略[J].中国电力,2024,57(2):194-201.
- HUANG Kun, FU Ming, LIANG Jiaben. Frequency regulation strategy of isolated island microgrid based on fusion expert knowledge DDPG [J]. Electric Power, 2024, 57(2): 194-201.
- [21] LI Xialin, LI Guo, LI Yunwei. A unified control for the DC-AC interlinking converters in hybrid AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6540-6553.
- [22] WANG J, JIN C and WANG P. A uniform control strategy for the interlinking converter in hierarchical controlled hybrid AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6188-6197.
- [23] GU Y, LI Y, YOO H. Transfverter: imbuing transformer-like properties in an interlink converter for robust control of a hybrid AC-DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 11332-11341.
- [24] 张辉,谭树成,肖曦.具有直流电机特性的储能接口变换器控制策略[J].高电压技术,2018,44(1):119-125.
- ZHANG Hui, TAN Shucheng, XIAO Xi. Control strategy of energy storage interface converter with DC motor characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 119-125.

收稿日期:2023-07-09;网络首发日期:2024-04-22

作者简介:

李军(1979),男,通信作者,教授,博士,研究方向为主动配电网运行控制,77065131@qq.com;

包那琴(1996),男,硕士研究生,研究方向为微电网运行控制,1969645731@qq.com;

陈建华(1976),男,副教授,硕士,研究方向为配电网运行规划。