

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211351

基于功率补偿量及下垂系数衰减的直流微电网 并网转离网无缝切换控制策略

陈钦泽, 王文, 岳雨霏, 江洪伟, 唐欣, 范必双, 曾祥君

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 无缝切换控制策略是保证直流微电网稳定可靠运行的关键。针对传统并网转离网切换控制方法存在母线电压恢复慢、电能质量较差的问题, 提出一种基于功率补偿量及下垂系数衰减的直流微电网并网转离网无缝切换控制策略。孤岛检测期间, 并网变流器工作在电压控制模式, 储能变流器(Energy Storage Converter, ESC)工作在下垂控制模式。通过建模分析, 证明采用下垂控制时孤岛检测期间直流母线电压是可控的, 由此得到下垂系数选择方法。孤岛检测完成后, 以固定函数衰减 ESC 功率补偿量和下垂系数, 实现 ESC 下垂控制和定电压控制的无缝切换, 防止因 ESC 控制模式的突变而引起直流母线电压波动和 ESC 电流冲击。讨论了衰减函数的选择方法。仿真结果表明, 所提无缝切换控制策略能够有效解决孤岛检测期间直流母线电压不可控的问题, 抑制孤岛检测完成后因 ESC 模式切换时所产生的电流冲击。

关键词: 直流微电网; 无缝切换; 储能变流器; 母线电压; 冲击电流

Seamless switching control strategy of a DC microgrid from grid to off grid based on power compensation and droop coefficient attenuation

CHEN Qinze, WANG Wen, YUE Yufei, JIANG Hongwei, TANG Xin, FAN Bishuang, ZENG Xiangjun

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: A seamless switching control strategy is key to ensuring the stable and reliable operation of a DC microgrid. Such a control strategy for a DC microgrid from grid to off grid based on power compensation and droop coefficient attenuation is presented. This solves the problem of slow bus voltage recovery and poor power quality in traditional switching control methods. During island detection, the grid-connected converter works in the voltage control mode, and the energy storage converter (ESC) works in the droop control mode. Through modeling and analysis, it is proved that the DC bus voltage is controllable during island detection when droop control is used, and thus the selection method of the droop factor is obtained. After the islanding detection is completed, the ESC power compensation and droop coefficients are reduced by the fixed function to achieve a seamless switch of ESC droop control and voltage control. This prevents DC bus voltage fluctuations and ESC current impacts which may occur because of abrupt changes in ESC control mode. The selection method of the attenuation function is discussed. The simulation results show that the proposed seamless handover control strategy can effectively solve the problem of DC bus voltage being uncontrollable during islanding detection, and can suppress the current impact caused by ESC mode switching when islanding detection is completed.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52077010).

Key words: DC microgrid; seamless switching; energy storage converter; bus voltage; impulse current

0 引言

随着电网规模的不断扩大, 直流负载、分布式

可再生能源和电池储能的日益普及以及电力电子技术的逐渐成熟, 直流微电网逐渐成为研究热点^[1]。直流微电网是一种将光伏、风电等分布式电源、储能装置、电力电子设备、本地负荷以及监控保护装置融合而成的小型智能发配电系统, 既可以与外部大电网并列运行, 也可以孤岛运行, 单独为本地负

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52077010); 长沙市杰出创新青年培养计划项目资助(kq2106043)

荷供电, 同时没有无功功率、AC/DC 切换器损耗、频率和电压相位的问题, 具有更高的供电安全性和可靠性^[2-4]。

然而, 微电网在并网时应满足一定的条件和时机, 否则将会产生较大的电流冲击, 影响电网的安全稳定运行, 严重时可能导致配电网崩溃^[5-7]。为了减小自然或者其他因素对电网供电可靠性的影响, 减小系统备用机组建设投资成本, 发挥分布式发电在传统电网中的优势, 有专家和学者提出直流微电网在满足自身负荷供电的情况下, 同时承担电网一部分的功率调峰^[8]。当电网负荷处于低谷时, 直流微电网作为负荷吸收系统剩余的功率; 电网负荷处于高峰时, 微电网作为电源发出系统缺额的功率^[9]。为了更深入地研究微电网, 全世界已经建立了多个小型实验平台或大型示范项目, 使微电网系统能够像传统能源一样接入电网^[10]。迄今为止, 国内外专家学者对微电网的研究已经获得了一定的研究成果^[11-15]。微电网可以工作在并网状态, 实现能量的双向流动, 也可以在电网停电时工作在离网状态, 满足自身负荷的需求。为了充分发挥分布式的优势, 微电网需要具备在并网和离网状态之间无缝切换的能力^[16]。

针对微电网并网和离网两种工作状态的无缝切换, 已有一些专家学者针对不同的工况提出了不同的切换方法。文献[17]中并网变流器(Bidirectional Interlinking Converter, BIC)采用带扰动观测器的下垂控制策略, 根据并网模式和离网模式下垂控制的不同输电计算方法, 通过检测电网公共耦合点处的电流和频率来实现自适应投切, 但未考虑控制系统外部干扰量对检测信号的影响, 可能导致功率计算模式无法及时切换, 使系统功率紊乱。文献[18]提出了针对 BIC 的 3 种无缝切换控制策略, 可以实现并网转离网的无缝切换, 但未考虑 ESC 的控制策略在并网转离网时给系统带来的影响。文献[19]提出的控制方式为: 并网状态下 BIC 工作在电压控制模式, ESC 工作在下垂控制模式, 离网状态下 ESC 工作在下垂控制模式。该控制方式在并网转离网时可以实现系统平稳切换, 但未考虑孤岛检测期间母线电压波动给系统带来的影响和下垂控制导致电能质量较差的问题。文献[20]提出一种基于自主平滑控制策略的 ESC 控制方法, ESC 的工作模式可分为恒流模式、恒压模式、低直流母线调压模式和高直流母线调压模式。该方法在并网转离网时可以维持母线电压幅值和频率的稳定, 但在并离网切换时需要 ESC 进行工作模式的切换, 且运行时对通信依赖程度较高, 进行并网切换离网时易产生电流冲击。文献[21]中 ESC 控制模式根据 SRF-PLL 检测的交流

电压进行切换, 交流电压正常时, ESC 工作于除控制微电网母线电压之外的其他模式; 交流电压异常时, ESC 工作于控制母线电压模式, 这种控制策略切换过程具有良好的静态和动态特性, 然而电压检测至控制模式切换具有一定的延迟性, 可靠性不高。文献[22]提出的控制方式为: 并网状态下 ESC 工作于后台功率调度运行模式, 离网状态下 ESC 根据母线电压分别工作于低电压控制环、功率控制环、高电压控制环模式, 这种控制方式可以使得直流母线电压控制方式切换过程中的电压平滑稳定, 但未考虑孤岛检测期间电压不可控, 将会产生较大的电压波动。文献[23]提出了一种多松弛终端控制方法, 并网运行时 ESC 和 BIC 均工作在下垂控制模式, 离网运行时 ESC 工作在下垂控制模式, 该方法在并离网切换时 ESC 控制模式无需切换, 有效地抑制了电压电流冲击, 但该控制方法在并网、离网和并离网切换时电能质量都较差。文献[24]提出了基于功率下垂控制的直流微电网无缝切换策略, 包括内部电压电流回路、下垂回路和功率回路, 该方法可实现 ESC 两种工作模式间的无缝切换, 保证电压电流较小, 但未考虑孤岛检测期间母线电压波动和 ESC 电流冲击等问题。文献[25]提出了一种基于 V^2-P 下垂控制的 ESC 控制方法, 并网状态时 ESC 工作于恒定功率控制模式, 离网状态时 ESC 工作于电压控制模式, 该方法可以让直流微电网并网转离网时实现平滑过渡, 提高系统的稳定性, 但未考虑控制系统外部信号所含扰动量对 ESC 控制系统的影响。

本文分析了以多松弛终端为代表的传统无缝切换控制方法存在的问题, 指出传统方法存在母线电压质量差、切换过程电流过冲等问题。提出了一种基于功率补偿量及下垂系数衰减的并网转离网无缝切换控制方法。孤岛检测期间, BIC 工作在电压控制模式, ESC 工作在下垂控制模式, 通过建模分析, 证明 ESC 采用下垂控制时孤岛检测期间直流母线电压是可控的, 由此得到下垂系数选择方法; 孤岛检测完成后, 以固定函数衰减 ESC 功率补偿量和下垂系数, 实现 ESC 下垂控制和定电压控制的无缝切换, 防止因 ESC 控制模式的突变而引起直流母线电压波动和 ESC 电流冲击, 讨论了衰减函数的选择方法。最后通过仿真结果和对比分析, 验证了所提方法的有效性。

1 传统并网转离网无缝切换控制方法问题分析

直流微电网主要由分布式发电单元、分布式储

能单元、并网变流器和负载组成。其运行模式分为并网模式和孤岛模式。典型直流微电网结构如图 1 所示，其中开关 S 闭合时，系统处于并网模式；否则，处于孤岛模式。

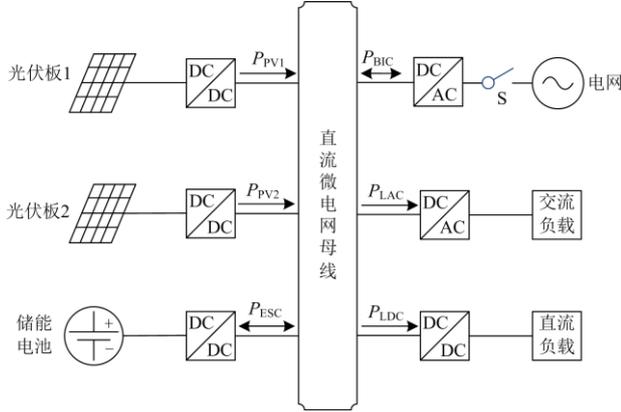


图 1 直流微电网结构

Fig. 1 DC microgrid structure

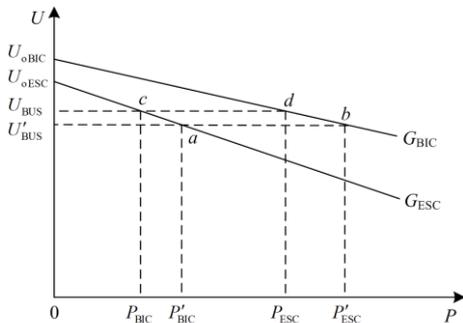
本文以多松弛终端无缝切换控制策略^[18]为例进行分析。在并网转离网期间，该策略要求 ESC 和 BIC 始终保持下垂控制模式。考虑线路电阻后，各松弛终端输出功率与母线电压之间的关系为

$$U_{BUS} = U_{oi} - (m_i + R_i)P_i \quad (1)$$

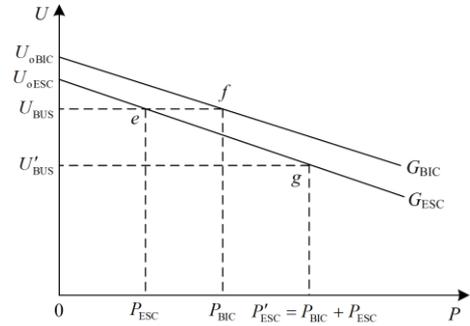
式中： U_{BUS} 为直流母线电压； U_{oi} 、 m_i 、 R_i 和 P_i 分别为各终端阈值电压、下垂系数、线路电阻和输出功率。

当直流微电网只有一个 ESC 时，由式(1)可以得到多松弛终端方法并网及并网转离网下垂曲线特性图，如图 2 所示。

并网状态时，系统源荷状态并不是恒定不变的，分布式发电单元输出功率或负载功率发生变化时，微电网系统会逐步调整至新的状态。如图 2(a) 所示，若负载功率增大，BIC 和 ESC 原工作于 c、d 两点，且直流母线电压稳定在标称电压，为补偿功率缺额 BIC 和 ESC 工作点分别转移至 a、b 两点，此时系统功率达到平衡，但母线电压偏离标称电压。



(a) 并网状态下下垂曲线特性图



(b) 并网转离网下垂曲线特性图

图 2 多松弛终端方法并网及并网转离网下垂曲线特性图

Fig. 2 Characteristic diagram of grid connected and grid to off grid droop curve of multi relaxation terminal method

并网转离网时，BIC 的输出功率会发生突变，将对系统安全稳定运行造成影响。如图 2(b)所示，并网转离网前 ESC 和 BIC 分别工作于 e、f 两点，假设此时母线电压为标称电压。当电网停电而导致 BIC 退出运行时，BIC 输出功率及输出电压皆降至 0，系统的功率不平衡由 ESC 迅速补充，ESC 工作点转移至 g 点，母线电压偏移标称电压。

由上述分析可知，直流母线电压波动是采用多松弛终端控制的直流微电网的主要缺点。并网源荷变化期间和并网转离网期间采用多松弛终端控制会使直流母线电压 U_{BUS} 偏离标称值，使系统电能质量下降，会影响电压敏感型负载的正常运行，甚至降低负载使用寿命。

2 考虑功率补偿量及下垂系数衰减的无缝切换控制策略

本文提出考虑功率补偿量及下垂系数衰减的无缝切换控制策略框图，如图 3 所示，白色框为上层控制部分，蓝色框为系统主电路部分，橙色框为变流器本地控制部分，绿色框为补偿控制部分。当检测到并网状态时孤岛检测装置输出 $Y=1$ ；当检测到离网状态时孤岛检测装置输出 $Y=0$ ， n 为衰减功率补偿量及下垂系数的调节参数。其中 Y 作为衰减函数的输入，当 Y 为 1~0 的跌落信号时， n 以固定函数在一定时间内衰减至 0。

当系统处于并网状态时，ESC 工作在下垂控制模式，BIC 工作在定电压控制模式。为了实现 ESC 功率跟踪的目的，阈值电压 U_{oESC} 在母线标称电压 V_n 的基础上，加上 ΔV_p 进行功率补偿，此时 ESC 的二次电压补偿量 ΔV_{VESC} 被置为 0。

当电网断电导致 BIC 退出运行时，系统处于孤岛检测期间，ESC 工作在下垂控制模式。功率调节

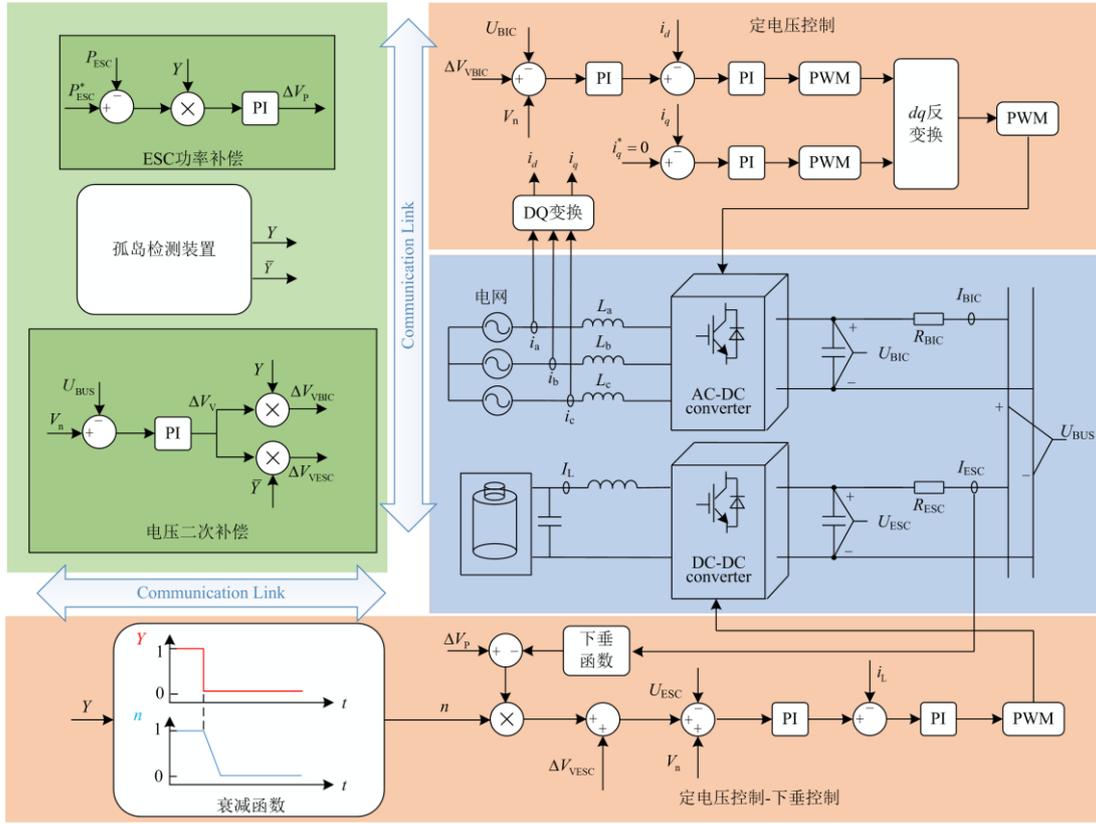


图 3 考虑功率补偿量及下垂系数衰减的无缝切换控制策略

Fig. 3 Seamless switching control strategy considering power compensation and droop coefficient attenuation

速度远小于孤岛检测, 此期间可认为 U_{oESC} 为一恒定值。

当孤岛检测完成时, 孤岛检测装置输出 Y 为 1~0 的跌落信号, ΔV_p 和 m_{ESC} 开始以固定衰减函数逐渐衰减至 0, ESC 的工作模式无缝切换为定电压控制模式。

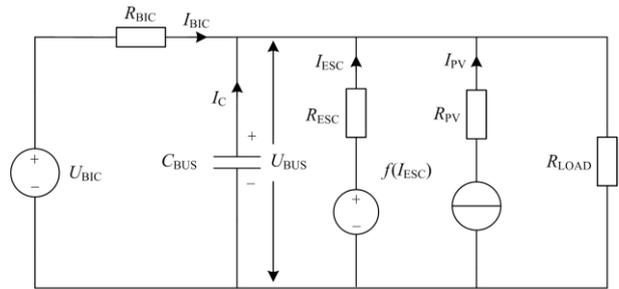
在并网及离网状态下, 为了解决因线路电阻导致的电压偏差问题, 各阈值电压在系统标称电压的基础上, 加上 ΔV_v 进行电压补偿。将母线标称电压 V_n 与测量值 U_{BUS} 进行比较, 差值经过 PI 控制器生成电压补偿量 ΔV_v 。并网状态下 ΔV_v 叠加至 BIC 阈值电压, 离网状态下 ΔV_v 叠加至 ESC 阈值电压。

3 孤岛检测期间下垂控制原理及参数设计

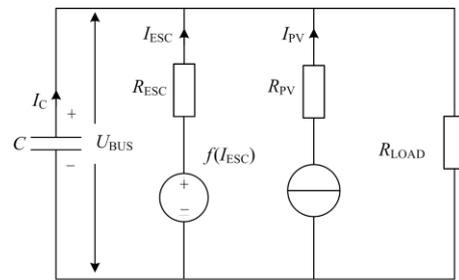
本文提出的无缝切换控制方法中 ESC 在并网状态和孤岛检测期间的工作模式均为下垂控制, 其端电压和电流之间的关系为

$$f(I_{ESC}) = U_{ESC} = U_{oESC} - m_{ESC} \times I_{ESC} \quad (2)$$

在并网状态下, 系统等效电路如图 4(a)所示, 其中 U_{BIC} 为 BIC 直流侧输出电压, C_{BUS} 为直流微电网等效电容, I_{BIC} 为 BIC 直流侧输出电流, I_{ESC}



(a) 并网状态直流微电网等效电路



(b) 孤岛检测期间直流微电网等效电路

图 4 ESC 采用下垂控制时系统等效电路图
Fig. 4 Equivalent circuit diagram of ESC when droop control is adopted

为 ESC 输出电流, I_{PV} 为光伏变流器输出电流, R_{LOAD} 为直流微电网等效负载, R_{BIC} 、 R_{ESC} 、 R_{PV} 分别为 BIC 线路电阻、ESC 线路电阻、光伏 DC/DC 变流器线路电阻。BIC 采用定电压控制方式, 可等效为电压源; ESC 工作在下垂控制模式, 可将其等效为电压受自身电流控制的受控电压源; 光伏变流器工作在 MPPT 模式, 等效为电流源; 负荷等效为不变电阻。

设并网转离网前直流母线初始电压为 U_{BUS0} , BIC 直流侧输出电流为 I_{BIC0} , 假定在并网转离网前系统已经达到稳定状态, 即 $U_{BUS0} = V_n$, 得到孤岛检测期间直流母线电压 U_{BUS} 随孤岛检测时间的变化函数为

$$U_{BUS} = I_{BIC0} \times R_{eq} \times \left(e^{-\frac{t}{R_{eq} \times C_{BUS}}} - 1 \right) + U_{BUS0} \quad (3)$$

其中,

$$R_{eq} = \frac{R_{LOAD}(m_{ESC} + R_{ESC})}{m_{ESC} + R_{ESC} + R_{LOAD}} \quad (4)$$

假定在并网转离网前直流微电网各项参数如表 1 所示, 得到孤岛检测期间直流母线电压与孤岛检测时间的关系曲线, 如图 5 所示。

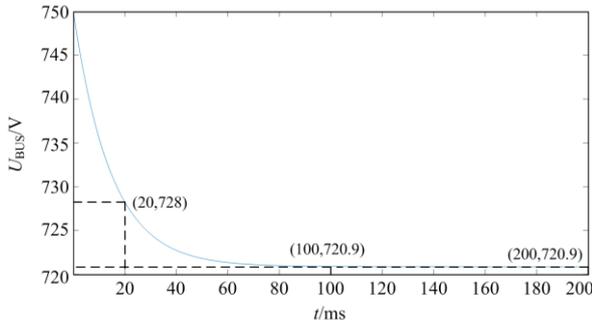


图 5 母线电压波动与孤岛检测时间的关系

Fig. 5 Relationship between bus voltage fluctuation and islanding detection time

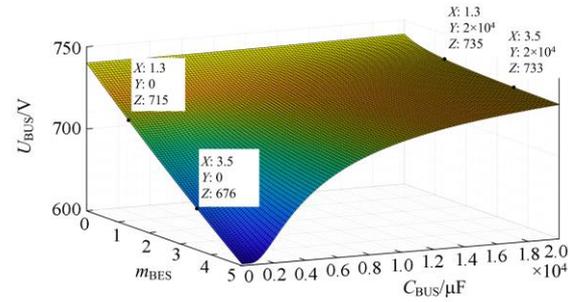
由图 5 可以看出, 当 ESC 采用下垂控制时, 孤岛检测期间直流母线电压的波动量明显小于传统控制方法。当孤岛检测时间为 20 ms 时, 直流母线电压跌落至 728.3 V; 当孤岛检测时间为 100 ms 时, 直流母线电压跌落至 720.9 V; 当孤岛检测时间大于 200 ms 时, 直流母线电压依然保持 720.9 V, 均在母线电压标称值 5% 的波动范围内。由此可见, 当 ESC 采用下垂控制时, 对孤岛检测速度的要求较低, 同时也可以维持直流母线电压在孤岛检测期间是可控的, 保证直流微电网的正常运行。

在表 1 参数设置的基础上, 取 $I_{ESCN} = 10$ A,

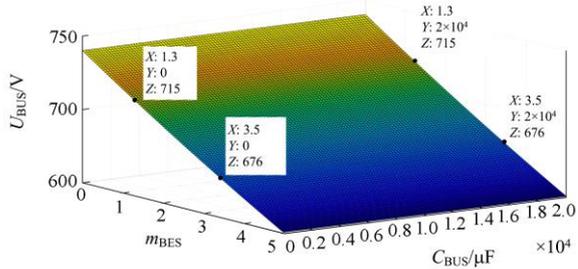
$\Delta I_{ESC} = 20$ A, 分别得到孤岛检测时间为 0.02 s 和 2.4 s 时直流母线电压与下垂系数、系统等效电容的三维图, 如图 6 所示。

表 1 系统参数设置

参数名称	参数数值
母线初始电压 U_{BUS0}/V	750
阈值电压 V_n/V	750
等效电容 $C_{BUS}/\mu F$	10 000
等效负载 R_{LOAD}/Ω	50
ESC 线路电阻 R_{ESC}/Ω	0.5
下垂系数 m_{ESC}	1



(a) $t=0.02$ s



(b) $t=2.4$ s

图 6 母线电压波动与下垂系数、系统等效电容的关系

Fig. 6 Relationship between bus voltage fluctuations, droop coefficient and system equivalent capacitance

孤岛检测时间为 0.02 s 时, 若 $m_{ESC} = 3.5$, $C_{BUS} = 0$ μF , 直流母线电压跌落至 676 V, 低于标称电压 10%; 当 $C_{BUS} = 20\ 000$ μF 时, 直流母线电压跌落至 733 V。若 $m_{ESC} = 1.3$, $C_{BUS} = 0$ μF , 直流母线电压跌落至 715 V; 当 $C_{BUS} = 20\ 000$ μF 时, 直流母线电压跌落至 735 V, 均在标称电压 5% 范围内。孤岛检测时间为 2.4 s 时, 直流母线电压跌落量受下垂系数影响较大, 受系统等效电容影响很小。若 $m_{ESC} = 3.5$ 时, 无论 $C_{BUS} = 0$ μF 还是 $C_{BUS} = 20\ 000$ μF , 直流母线电压均跌落至 676 V, 低于标

称电压的 10%， $m_{ESC} = 1.3$ ，直流母线电压跌落至 715 V，处于标称电压 5% 波动范围内。

由上述可以分析出：当 ESC 采用下垂控制且孤岛检测时间较短时，直流母线电压跌落量主要受系统等效电容影响，其次是下垂系数。波动量与系统等效电容成反比关系，与下垂系数成正比关系；当孤岛检测时间较长时，ESC 的输出已经进入稳定状态，直流母线电压波动量仅受下垂系数的影响，且成正比关系。

当孤岛检测时间较长时，为了保证直流母线电压在恒定范围内，根据式(3)，取 $t \rightarrow \infty$ ，得到

$$|I_{BIC0}| \times R_{eq} \leq \Delta U_{MAX} \quad (5)$$

式中， ΔU_{MAX} 为母线电压最大波动范围。

设 ESC 额定电流为 $\pm I_{ESCN}$ ，并网转离网时 ESC 输出电流变化量 ΔI_{ESC} 应满足 $2I_{ESCN} \geq \Delta I_{ESC} \geq \Delta I_{ESCN}$ ，得到 R_{eq} 的取值为

$$R_{eq} = \frac{\Delta U_{MAX}}{2I_{ESCN}} \quad (6)$$

将求出的 R_{eq} 值代入式(4)，即可求出 m_{ESC} 。

4 衰减功率补偿量与下垂系数方法

在传统直流微电网并网转离网无缝切换控制策略中，当系统检测到孤岛后，若将 ESC 直接从电流控制模式切换为电压控制模式，会产生较大的电流冲击。本文提出基于功率补偿量及下垂系数衰减的直流微电网并网转离网无缝切换控制方法，在检测到孤岛后逐渐减小功率补偿量和下垂系数，使 ESC 的控制模式由下垂控制无缝切换为定电压控制。 U_{ESC}^* 给定表达式为

$$U_{ESC}^* = V_n + n \times (\Delta V_P - m_{ESC} \times I_{ESC}) + \Delta V_V \quad (7)$$

为了分析在不同功率补偿量及下垂系数衰减函数下 ESC 运行模式切换引起的电流冲击，同时选取合适的衰减函数及控制参数，以下将针对指数函数和一次函数两种衰减函数进行对比分析。

当功率补偿量及下垂系数以指数函数衰减时，调节参数 n 的表达式为

$$n = e^{-\frac{t}{T}} \quad (8)$$

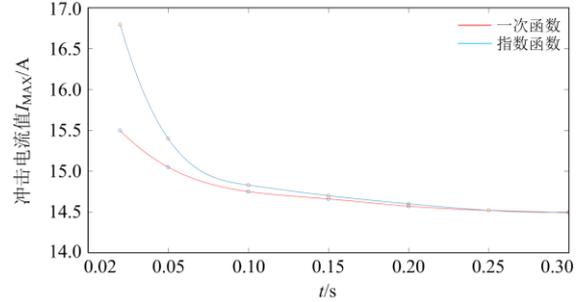
式中： t 为时间； T 为时间常数。设孤岛检测装置检测到孤岛的时刻 $t = 0$ 。

当功率补偿量及下垂系数以一次函数衰减时，调节参数 n 的表达式为

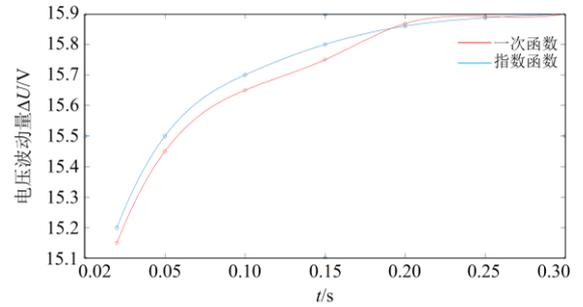
$$n = \max(1 - \frac{t}{T}, 0) \quad (9)$$

设定并网转离网前 $I_{ESC} = 6 \text{ A}$ ， $I_{BIC} = 7.6 \text{ A}$ ，

切换后 ESC 稳态电流为 13.6 A，不同时间常数下分别以两种衰减函数进行系统仿真，得到并网转离网时冲击电流值 I_{MAX} 和直流母线电压波动量 ΔU 的描点图，如图 7 所示。



(a) 冲击电流量



(b) 直流母线电压波动量

图 7 不同时间常数 T 时的仿真结果

Fig. 7 Simulation results at different time constants T

随着时间常数 T 的增加，直流母线电压跌落量 ΔU 逐渐增加，当 T 达到 0.2 s 后， ΔU 的变化速率基本不变；而随着 T 的增加，ESC 电流冲击逐渐减小，当 T 达到 0.25 s 后， T 的增加对 I_{MAX} 的影响逐渐减小。

根据上述两种变化曲线的仿真结果可知，采用指数函数和一次函数衰减时电压跌落大小几乎一致，在时间常数 T 较小时一次变化函数电流冲击稍小。在时间常数 T 相同情况下，调节参数 n 以一次函数衰减时，ESC 从下垂控制切换为定电压控制的速度更快。本文选取调节参数 n 一次函数衰减，令时间常数 $T = 0.25 \text{ s}$ ，既保证了并网转离网时电流冲击较小，又保证了切换速度较快。

5 仿真验证

为了验证所提出的并网转离网无缝切换控制方法的有效性，在 PSIM 12.0 仿真平台上搭建直流微电网仿真模型进行验证。相关仿真参数：直流微电网标称电压为 750 V，ESC 额定电流为 $\pm 10 \text{ A}$ ，光伏源最大功率为 15 kW。电压给定补偿中的电压二

次补偿和功率补偿由中央控制器统一给定，其更新频率设为 10 Hz。

仿真案例 1：并网转离网前 $I_{ESC} = 6.6 \text{ A}$ ， $I_{IBIC} = 3.4 \text{ A}$ 。

本文所提出的基于功率补偿量和下垂系数衰减的并网转离网无缝切换控制策略仿真结果，如图 8 所示。在 2.5 s 前系统已经进入到稳态。2.5 s 时电网发生故障导致 BIC 退出运行，2.52 s 时检测到孤岛，由中央控制器向 ESC 发送指令，在 0.25 s 内衰减功率补偿量及下垂系数的调节参数 n 逐渐衰减至 0，ESC 的控制模式无缝切换为电压控制模式。并网转离网切换期间直流母线电压最低跌落至 743 V，4 s 时母线电压恢复至 750 V，切换过程中 ESC 电流超调量为 0.5 A，微网系统无冲击进入离网状态。

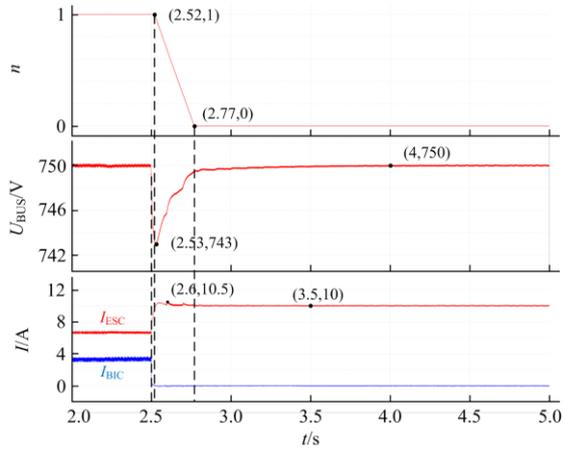


图 8 功率补偿量及下垂系数衰减的并网转离网仿真波形图
Fig. 8 Simulation waveform diagram of grid to off grid with power compensation and droop coefficient attenuation

基于多松弛终端的无缝切换控制策略仿真波形，如图 9 所示，切换过程中母线电压最低跌落至 740.6 V，由于 ESC 始终采用下垂控制模式，其母

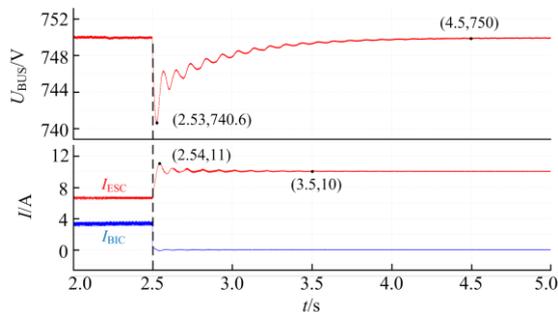


图 9 多松弛终端方法并网转离网仿真波形图
Fig. 9 Simulation waveform diagram of multi-slack terminal method grid to off grid

线电压恢复依赖调节速度较慢的电压二次补偿，5 s 时恢复至标称电压，切换过程中 ESC 电流超调量为 1 A。

仿真案例 2：并网转离网前 $I_{ESC} = -10 \text{ A}$ ， $I_{IBIC} = 20 \text{ A}$ 。

本文所提出的基于功率补偿量和下垂系数衰减的并网转离网无缝切换控制策略仿真结果，如图 10 所示。在 2.5 s 前系统已经进入到稳态。2.5 s 时电网发生故障导致 BIC 退出运行，2.52 s 系统检测到孤岛，母线电压降落至最低值 708 V，偏离标称电压 5.6%，满足直流微电网运行控制技术规范要求，系统能够平稳运行，在 4 s 后母线电压稳定于 750 V，切换过程中 ESC 电流超调量为 2.6 A。

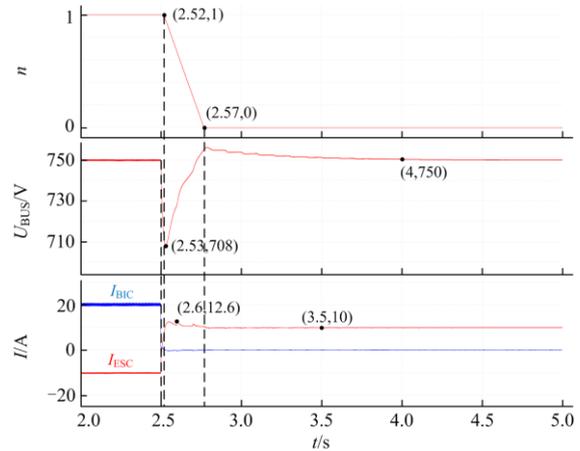


图 10 功率补偿量及下垂系数衰减的并网转离网仿真波形图
Fig. 10 Simulation waveform diagram of grid to off grid with power compensation and droop coefficient attenuation

基于多松弛终端的无缝切换控制方法仿真波形，如图 11 所示。2.53 s 母线电压最低跌落至 695 V，5 s 时母线电压恢复至 750 V。切换过程中 ESC 电流超调量为 3.3 A。

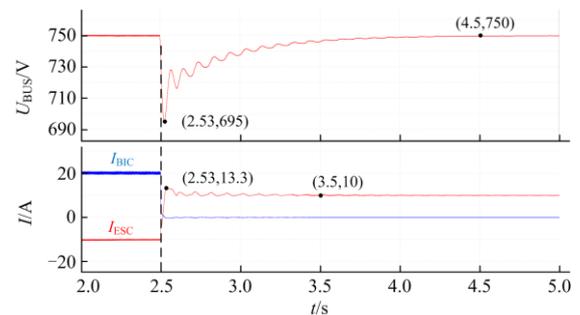


图 11 多松弛终端方法并网转离网仿真波形图
Fig. 11 Simulation waveform diagram of multi-slack terminal method grid to off grid

针对两种源荷状态下两种无缝切换控制方法的仿真结果, ESC 下垂控制模式可以抑制孤岛检测期间母线电压的波动, 母线电压超调量与并网转离网前 I_{BIC} 大小成正比, 并且通过上文分析, 并网转离网时母线电压的超调量还与孤岛检测时间成反比, 与下垂系数成正比。基于多松弛终端的无缝切换控制方法虽然更容易实现控制, 但切换过程中 ESC 上的电流冲击较大, 由于并网转离网前后 ESC 都处于下垂控制, 母线电压恢复需依赖调节速度较慢的母线电压的二次调节, 调节期间电压质量较差。本文提出无缝切换方法在检测到孤岛后, 下垂系数和功率补偿在一定时间内逐渐减小, 电压跌落和电流冲击都小于多松弛终端控制方法。由于功率补偿和下垂系数减小至 0 后, ESC 控制方式无缝切换为定电压控制, 对电压二次调节依赖较小, 母线电压可较快地恢复至标称电压。

6 总结

针对传统并网转离网无缝切换控制方法母线电压恢复较慢、电能质量较差的问题, 本文提出了一种考虑功率补偿量及下垂系数衰减的直流微电网并网转离网无缝切换控制方法。并网时, 对 ESC 进行功率补偿实现功率均衡分配, 在孤岛检测期间可认为功率补偿基本不变, 从而有效地稳定孤岛检测期间的母线电压; 并网转离网时, 将下垂系数和功率补偿量按照固定函数进行衰减, ESC 工作模式无缝切换为定电压控制模式, 实现快速、有效地稳定母线电压的效果, 并能够抑制控制模式切换时产生的电流冲击。仿真结果表明, 所提出的控制策略能够抑制孤岛检测期间的母线电压波动, 并可以准确分配系统功率。

参考文献

- [1] CHENG Z, DUAN J, CHOW M. To centralize or to distribute: that is the question: a comparison of advanced microgrid management systems[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2018, 12(1): 6-24.
- [2] 宋春宁, 付栋, 李欣. 双向全桥 DC/DC 变换器在直流微电网中的应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 128-132.
SONG Chunning, FU Dong, LI Xin. Application of bi-directional full-bridge DC/DC converter in DC micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 128-132.
- [3] 王建建, 孙媛媛, 马钊, 等. 孤岛直流微电网接地运行方式及接地故障特性研究[J]. 供用电, 2021, 38(1): 3-10, 24.
WANG Jianjian, SUN Yuanyuan, MA Zhao, et al. Study on grounding method and grounding fault characteristics of islanded DC microgrid[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(1): 3-10, 24.
- [4] HUANG Kun, LI Yanman, ZHANG Xiaoyan, et al. Research on power control strategy of household-level electric power router based on hybrid energy storage droop control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 178-190.
- [5] 王子豪, 牟龙华, 方重凯. 基于下垂控制的低压微电网故障控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 84-89.
WANG Zihao, MU Longhua, FANG Zhongkai. Fault control strategy of a low-voltage microgrid based on droop control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 84-89.
- [6] YANG Q, JIANG L, ZHAO H, et al. Autonomous voltage regulation and current sharing in islanded multi-inverter DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6429-6437.
- [7] 邱麟, 许烈, 郑泽东, 等. 微电网运行模式平滑切换的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 171-176.
QIU Lin, XU Lie, ZHENG Zedong, et al. Control method of microgrid seamless switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 171-176.
- [8] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-183.
ZHANG Yuhan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospects of control strategies for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-183.
- [9] 杨晋升, 唐芬, 吴学智, 等. 直流微网双向 DC/AC 变频器的协调控制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 113-116.
YANG Jinsheng, TANG Fen, WU Xuezhi, et al. Coordinated control of bidirectional DC/AC converters in DC microgrid[J]. Power Electronics, 2021, 55(5): 113-116.
- [10] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [11] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System

- Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [12] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [13] 张志友, 陈德富. 基于级联分布式架构的直流微电网协调控制方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 157-164.
ZHANG Zhiyou, CHEN Defu. A coordinated control method for DC microgrids based on cascaded distributed framework[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 157-164.
- [14] 季宇, 苏剑, 丁保迪, 等. 直流微电网储能系统的无源-滑模复合控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 63-70.
JI Yu, SU Jian, DING Baodi, et al. Research on passive based control combined SMC control of DC micro-grid energy storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 63-70.
- [15] 杨茂, 王金鑫. 需求侧管理参与的孤岛型微电网多目标优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 1-12.
YANG Mao, WANG Jinxin. Multi-objective optimization scheduling of islanded microgrid participated by demand management[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 1-12.
- [16] 张黎明, 侯梅毅, 朱国防, 等. 基于电压电流协同控制的微网运行模式无缝切换策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 129-135.
ZHANG Liming, HOU Meiyi, ZHU Guofang, et al. The seamless switching strategy of microgrid operation mode based on voltage and current cooperative control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 129-135.
- [17] WANG G, WANG X, GAO X. Improved seamless switching control strategy for AC/DC hybrid microgrid[J]. IEEE Access, 2021, 9: 55790-55801.
- [18] LO K, CHEN Y. Design of a seamless grid-connected inverter for microgrid application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 194-202.
- [19] 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.
- [20] MINHO K, SEWAN C. Control scheme for autonomous and smooth mode switching of bidirectional DC-DC converters in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7094-7104.
- [21] 薛慧杰, 朱天璋, 田启川. 直流微电网独立与并网模式无缝切换控制策略[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 77-85.
XUE Huijie, ZHU Tianzhang, TIAN Qichuan. Control strategy of seamless switching between stand-alone and grid-connected modes of DC microgrid[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 77-85.
- [22] 毋炳鑫, 陈世永, 李献伟. 直流微电网并离网切换母线电压平滑控制技术研究[J]. 电气应用, 2017, 36(24): 36-41.
WU Bingxin, CHEN Shiyong, LI Xianwei. Research on bus voltage smoothing control technology for DC micro-grid's on-off and off-grid switching[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(24): 36-41.
- [23] XIAO J, WANG P, SETYAWAN L. Implementation of multiple-slack-terminal DC microgrids for smooth transitions between grid-tied and islanded states[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 273-281.
- [24] LIU G, TOMMASO C, PAOLO M, et al. Power-based droop control in DC microgrids enabling seamless disconnection from upstream grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2039-2051.
- [25] LI X, JIANG W, WANG J, et al. An autonomous control scheme of global smooth transitions for bidirectional DC-DC converter in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 950-960.
- [26] 中国电工技术学会. 直流微电网运行控制技术规范: T/CES 2003—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
China Electrotechnical Society. Operation and control specification for DC microgrids: T/CES 2003—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018.

收稿日期: 2021-10-07; 修回日期: 2022-01-24

作者简介:

陈钦泽(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网系统控制技术; E-mail: 1187168175@qq.com

王文(1987—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为配电网柔性接地技术、新能源并网逆变器电能质量; E-mail: wew@csust.edu.cn

岳雨霏(1991—), 女, 通信作者, 博士, 主要研究方向为电力电子化电力系统电能质量治理、大功率模块化高压电源装备研制。E-mail: yueyufei2019@csust.edu.cn

(编辑 许威)