

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.011

# 交直流微电网柔性多状态开关统一下垂控制策略

杨新华<sup>1</sup>, 王彤<sup>1</sup>, 谢兴峰<sup>1</sup>, 张宇航<sup>1</sup>, 全相军<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**为解决孤岛模式下交直流混合微电网稳定运行的问题,文中提出一种孤岛交直流混合微电网柔性多状态开关(soft normally open point, SNOP)统一下垂控制策略。该策略基于系统功率平衡关系,通过归一化方法将2条馈线的频率下垂特性和直流电压下垂特性相结合,根据交流频率和直流电压的变化情况,判断系统的运行状态,并通过SNOP统一调节交流子网频率和直流子网电压,使交、直流微电网能够均衡承担系统总功率变化量,从而确保交流频率和直流电压稳定在系统允许范围内。同时,为了优先确保分布式电源的就近消纳,避免SNOP的非必要动作,设计了SNOP的调节死区,使得交、直流微电网能够优先利用各子网内分布式电源,从而减少SNOP交、直流侧功率的频繁交互。最后,通过MATLAB/Simulink仿真验证了所提统一下垂控制策略的有效性。

**关键词:**交直流混合微电网;柔性互联;柔性多状态开关(SNOP);统一下垂控制;交流频率调节;直流电压调节

**中图分类号:**TM721.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2025)04-0100-10

## 0 引言

随着分布式新能源和电动汽车的快速发展,传统交流微电网已经难以满足实际需求<sup>[1-2]</sup>。因此,构建“柔性可控、绿色安全”的新型交直流混合微电网成为未来柔性互联智能电网发展的必然趋势<sup>[3-7]</sup>。柔性多状态开关(soft normally open point, SNOP)可以替代传统联络开关,能够灵活控制功率流动、实现能量互济、负荷快速转供以及节点电压改善等<sup>[8-12]</sup>。然而,孤岛交直流混合微电网缺乏大电网支撑,频率和电压稳定性差。在这种情况下,SNOP作为平衡系统功率的核心设备,对于稳定频率和直流电压至关重要。因此,研究基于SNOP的孤岛交直流微电网控制策略具有重要意义。

目前,国内外学者已经针对含有SNOP的交直流微电网控制策略展开研究<sup>[13-16]</sup>。文献<sup>[17-18]</sup>基于SNOP构建双层负荷模型,改善了馈线负荷均衡程度以及电压分布;文献<sup>[19]</sup>提出一种馈线故障下SNOP运行模式平滑切换控制策略;文献<sup>[20]</sup>提出一种基于SNOP的电压自适应控制策略;文献<sup>[21]</sup>提出一种自适应非线性下垂控制策略,改善了有功功率的分配精度和直流电压的动态性能。上述文献均对直流电压的动态性能有所改善,但未考虑系统孤岛模式下交流频率的稳定性<sup>[22-23]</sup>。

在交直流混合微电网孤岛运行场景下,柔性互

联设备不仅需要维持直流电压稳定,还需要具备频率支撑能力<sup>[24-27]</sup>。文献<sup>[28]</sup>提出一种状态跟踪控制方法,实现了并网和孤岛模式之间的平滑切换。然而在孤岛模式下的恒压恒频控制方法忽略了直流电压的稳定性。当SNOP中AC/DC双向变换器采用构网型控制(grid-forming control, GFM)时,可将其等效为电压源串联阻抗,通过控制输出电压幅值和相位间接控制功率的双向流动,具有频率支撑能力。

目前,相关研究仍处于起步阶段。文献<sup>[29]</sup>提出一种改进型下垂控制方法,可以自适应调整下垂系数,在实现功率分配的同时为交流频率提供惯性,但其下垂系数易受到电网波动影响。文献<sup>[30]</sup>提出一种新型双向虚拟惯量控制策略,通过互联变换器主动转移惯性功率,平衡微电网两侧的瞬态性能,从而增强系统在面对负载变化时的瞬态稳定性。文献<sup>[31]</sup>提出一种基于指数下垂的控制策略,减小了稳态运行时的电压偏差。文献<sup>[32]</sup>根据能量守恒原理,推出交流频率和直流电压平方的下垂关系式,并利用这一关系对交流频率和直流电压进行了有效控制。文献<sup>[33]</sup>提出一种自适应双下垂控制,采用归一化方法控制交流频率和直流电压,根据权重系数大小决定功率流动方向以及大小。上述文献均考虑了单个交流端口的频率稳定性,而基于SNOP的交直流微电网存在2个交流端口,兼顾多端孤岛交直流微电网的频率和直流电压性能的协调控制有待进一步研究。

文中针对基于SNOP的孤岛交直流混合微电

收稿日期:2024-03-30;修回日期:2024-05-28

基金项目:甘肃省青年科技基金资助项目“直流配电系统小信号建模与有源阻尼技术研究”(22JR5RA290)

网, 依据系统的功率平衡关系, 提出一种统一下垂控制策略。通过分析交流频率和直流电压的下垂特性, 结合归一化方法设计统一下垂控制策略, 实现交、直流微电网之间的能量互补。该策略不仅兼顾了交流频率和直流电压的稳定性, 还实现了对系统运行状态的综合判断和控制。此外, 为避免 SNOP 的非必要动作, 考虑了微电网自身的功率波动消纳能力, 设计了调节死区, 确保系统运行的可靠性。最后, 基于 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建孤岛交直流混合微电网系统, 验证所提控制策略的有效性。

## 1 交直流微电网及 SNOP

图 1 为基于 SNOP 的孤岛交直流微电网系统示意, 其包含三部分: 交流微电网、直流微电网以及 SNOP。交流微电网内的光伏、储能和风电分别通过 DC/AC 变换器、DC/AC 变换器和 AC/AC 变换器接入交流母线; 直流微电网内的光伏和储能均经过 DC/DC 变换器接入直流母线; SNOP 的选择上, 采用双端口型 SNOP。

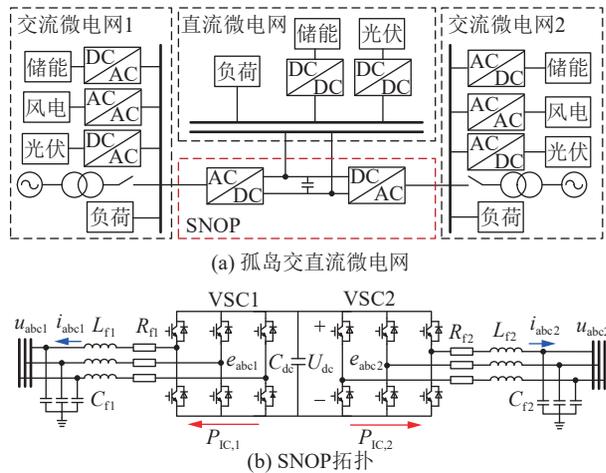


图 1 交直流微电网典型结构

Fig.1 Typical structure of AC/DC microgrid

SNOP 由 2 个电压源型换流器 (voltage source converter, VSC) 构成, 且 2 个 VSC 左右对称, 具体结构如图 1(b) 所示。其中,  $C_{dc}$  为直流侧电容;  $U_{dc}$  为直流侧电压;  $L_{fi}$  为 VSC $i$  滤波电感,  $i=1, 2$ ;  $R_{fi}$  为 VSC $i$  滤波电阻;  $C_{fi}$  为 VSC $i$  滤波电容;  $u_{abc i}$  为 VSC $i$  母线三相电压;  $i_{abc i}$  为 VSC $i$  电感电流;  $e_{abc i}$  为 VSC $i$  输出电压;  $P_{IC i}$  为 VSC $i$  传输的有功功率, 定义由直流侧流向交流侧为正方向。

SNOP 的运行模式有 3 种: 馈线柔性互联模式、负荷转供模式和孤岛模式。其中孤岛模式的运行情况相对而言更加复杂, 因此本文中仅研究孤岛模式

下交直流微电网的功率平衡问题。在孤岛模式下, 由于系统缺乏大电网支撑, 当交/直流侧功率发生变化时, 可能会导致交流频率/直流电压越限。为了确保交流频率和直流母线电压稳定在最优范围内, SNOP 在其容量范围内控制功率的双向流动, 以提高交直流微电网的稳定性和可靠性。

## 2 基于 SNOP 的统一下垂控制策略

不仅需要对交、直流微电网内的分布式电源 (distributed generation, DG) 进行有效的功率控制, 维持微电网内部的功率平衡, 还需要 SNOP 控制交、直流微电网之间的功率交换与平衡。

### 2.1 交、直流子网控制

下垂控制模拟传统同步发电机的特性, 能够根据交流频率和直流电压的变化自动调节有功功率和无功功率, 无须通信, 可在孤岛模式下运行, 满足“即插即用”。该控制策略避免了通信延迟问题, 是常用的一种功率分配控制策略。

交流微电网内的可调 DG 采用下垂控制共同维持交流母线电压和频率。具体控制方式见式(1)。

$$\begin{cases} f = f_0 + K_{mk}(P_{ac,k} - P_{acref,k}) \\ U_{ac} = U_{ac0} + K_{nk}(Q_{ac,k} - Q_{acref,k}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f$ 、 $f_0$  分别为交流频率实际值和额定值;  $K_{mk}$  为第  $k$  个 DG 有功-频率下垂系数;  $P_{ac,k}$ 、 $P_{acref,k}$  分别为交流微电网中第  $k$  个 DG 输出的有功功率实际值和参考值;  $U_{ac}$ 、 $U_{ac0}$  分别为交流母线电压实际值和额定值;  $K_{nk}$  为第  $k$  个 DG 无功-交流电压下垂系数;  $Q_{ac,k}$ 、 $Q_{acref,k}$  分别为第  $k$  个 DG 输出的无功功率实际值和参考值。为能够实现负荷均分, 下垂系数应满足式(2)。

$$\begin{cases} K_{m1}S_{ac,1} = K_{m2}S_{ac,2} = \dots = K_{mk}S_{ac,k} \\ K_{n1}S_{ac,1} = K_{n2}S_{ac,2} = \dots = K_{nk}S_{ac,k} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $S_{ac,k}$  为交流微电网中第  $k$  个 DG 的容量。

直流微电网内的 DG 采用下垂控制共同维持直流母线电压, 具体控制方式见式(3)。

$$U_{dc} = U_{dc0} + K_j(P_{dc,j} - P_{dcref,j}) \quad (3)$$

式中:  $U_{dc}$ 、 $U_{dc0}$  分别为直流母线电压实际值和额定值;  $K_j$  为第  $j$  个 DG 有功-直流电压下垂系数;  $P_{dc,j}$ 、 $P_{dcref,j}$  分别为直流微电网第  $j$  个 DG 输出的有功功率实际值和参考值。同样, 为能够实现负荷均分, 下垂系数应满足式(4)。

$$K_1S_{dc,1} = K_2S_{dc,2} = \dots = K_jS_{dc,j} \quad (4)$$

式中:  $S_{dc,j}$  为直流微电网中第  $j$  个 DG 的容量。

### 2.2 基于 SNOP 的统一下垂控制策略设计

在交直流微电网中, 由于直流侧不涉及无功功

率的平衡问题,因此文中研究重点为系统有功功率的控制策略。

在孤岛运行模式下,交流频率和直流电压的稳定性不仅受到自身微电网功率波动的影响,而且彼此之间互相影响。根据瞬时功率平衡原理,在孤岛交直流微电网场景下,无论是交流侧还是直流侧的有功功率发生变化时,通过 SNOP 灵活控制后,交、直流微电网能够均衡承担混合微电网总的有功功率变化量,从而减小交流频率和直流电压越限的可能性,促进交直流微电网的稳定运行。根据图 2 所示的混合微电网间的功率关系,可以得到交直流微电网的功率变化关系,如式(5)所示。

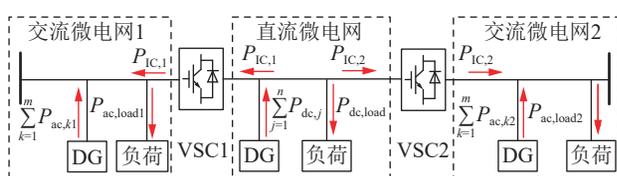


图 2 混合微电网功率分析  
Fig.2 Hybrid microgrid power analysis

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^m P_{ac,k1} = \sum_{k=1}^m P_{acref,k1} + \Delta P_{ac,load1} - P_{IC,1} \\ \sum_{j=1}^n P_{dc,j} = \sum_{j=1}^n P_{dcref,j} + \Delta P_{dc,load} + P_{IC,1} + P_{IC,2} \\ \sum_{k=1}^m P_{ac,k2} = \sum_{k=1}^m P_{acref,k2} + \Delta P_{ac,load2} - P_{IC,2} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{ac,k1}$ 、 $P_{ac,k2}$ 、 $P_{acref,k1}$ 、 $P_{acref,k2}$  分别为交流侧 1 和交流侧 2 第  $k$  个 DG 输出的有功功率实际值和参考值;  $\Delta P_{ac,load1}$ 、 $\Delta P_{ac,load2}$  分别为交流侧 1 和交流侧 2 负荷变化量;  $\Delta P_{dc,load}$  为直流侧负荷变化量。

由式(1)、式(3)和式(5)可以推出交流频率和直流电压的偏差表达式,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta f_i = f_i - f_{i,0} = -\frac{\Delta P_{ac,load1} - P_{IC,1}}{\sum_{k=1}^m 1/K_{1,mk}} \\ \Delta U_{dc} = U_{dc} - U_{dc0} = -\frac{\Delta P_{dc,load} + P_{IC,1} + P_{IC,2}}{\sum_{j=1}^n 1/K_j} \\ \Delta f_2 = f_2 - f_{2,0} = -\frac{\Delta P_{ac,load2} - P_{IC,2}}{\sum_{k=1}^m 1/K_{2,mk}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Delta f_i$  为第  $i$  条馈线频率偏差,  $i=1, 2$ ;  $\Delta U_{dc}$  为直流电压偏差;  $f_i$ 、 $f_{i,0}$  分别为第  $i$  条馈线频率实际值和参考值;  $K_{i,mk}$  为第  $i$  条馈线上第  $k$  个 DG 的有功-频率下垂系数。

由式(6)可知,交流频率偏差和直流电压偏差

与自身负荷变化量、SNOP 传输的功率大小以及下垂系数有关,而下垂系数与 DG 容量有关。当 SNOP 不工作时,交流频率偏差和直流电压偏差仅受自身负荷变化量的影响,只能依靠交/直流微电网内的 DG 来维持交流频率/直流电压的稳定性,然而当负荷的功率变化较大时,微电网内 DG 无法支撑交流频率或者直流电压稳定在系统允许范围内,会影响交直流微电网的稳定运行。当 SNOP 动作时,可以使系统内功率富裕的一侧向功率缺额的一侧进行功率补偿,以确保交流频率和直流电压均不越限。

为了同时控制交流频率  $f$  和直流电压  $U_{dc}$ , 需要解决两者量纲不同而无法直接比较的问题。为此,采用归一化方法将 2 个参数的数值调整到  $[-1, 1]$  内,确保其可以在相同的尺度上进行比较和控制。归一化方程<sup>[34]</sup>如式(7)所示。

$$\begin{cases} f_{pu} = \frac{f - 0.5(f_{max} + f_{min})}{0.5(f_{max} - f_{min})} \\ U_{dc,pu} = \frac{U_{dc} - 0.5(U_{dcmax} + U_{dcmin})}{0.5(U_{dcmax} - U_{dcmin})} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $f_{pu}$  为交流频率的归一化值;  $f_{max}$ 、 $f_{min}$  分别为交流频率允许运行的最大值和最小值;  $U_{dc,pu}$  为直流电压的归一化值;  $U_{dcmax}$ 、 $U_{dcmin}$  分别为直流电压允许运行的最大值和最小值。当  $f_{pu}=0$  时,表示交流侧功率无变化,交流频率稳定在额定值;当  $f_{pu}>0$  时,表示交流侧轻载,该侧功率盈余,交流频率增大;当  $f_{pu}<0$  时,表示交流侧重载,该侧功率缺额,交流频率减小。同理,  $U_{dc,pu}$  的大小也表示直流侧负荷重载或者轻载情况。

交直流微电网仅含一个交流微电网和直流微电网时,通常通过消除归一化交流频率  $f_{pu}$  和归一化直流电压  $U_{dc,pu}$  的偏差,平衡整个系统功率。其核心原理为系统的总功率波动由交、直流微电网均衡承担。控制方程见式(8)。

$$P = K(f_{pu} - U_{dc,pu}) \quad (8)$$

式中:  $P$  为交流微网和直流微网之间的传输功率;  $K$  为 VSC 的下垂系数。

由图 1 可知,在孤岛交直流微电网场景下,交、直流微电网通过 SNOP 进行柔性互联,系统的总有功功率变化需要交流微电网 1、交流微电网 2 以及直流微电网均衡承担,所以需要同时对 2 条馈线频率和直流电压进行统一控制。

VSC1 的输出功率  $P_{IC,1}$  的大小不仅和该侧功率变化量有关,同时也受直流微电网和交流馈线 2 侧功率变化的影响。所以,分别对交流微电网 2 侧不

存在和直流微电网不存在的情况采用归一化方法进行分析。

$$P_{IC,11} = K_1(f_{pu,1} - U_{dc,pu}) \quad (9)$$

$$P_{IC,12} = K_1(f_{pu,1} - f_{pu,2}) \quad (10)$$

式中:  $P_{IC,11}$  为仅含交流微电网 1 和直流微电网时 VSC1 平衡系统功率所需要传输的功率;  $P_{IC,12}$  为仅含交流微电网 1 和交流微电网 2 时 VSC1 平衡系统功率所需要传输的功率;  $K_1$  为 VSC1 的下垂系数;  $f_{pu,1}$ 、 $f_{pu,2}$  分别为交流微电网 1 和交流微电网 2 的归一化频率。

由式(9)、式(10)可得,当交流微电网 2 和直流微电网同时存在时, VSC1 传输的功率值为:

$$P_{IC,1} = P_{IC,11} + P_{IC,12} = K_1(2f_{pu,1} - f_{pu,2} - U_{dc,pu}) \quad (11)$$

同理,得到 VSC2 传输的功率值为:

$$P_{IC,2} = K_2(2f_{pu,2} - f_{pu,1} - U_{dc,pu}) \quad (12)$$

式中:  $K_2$  为 VSC2 的下垂系数。

从式(11)、式(12)可以看出,该控制方法将馈线 1、2 侧频率和直流电压进行了统一控制,通过控制 SNOP 的功率流动,兼顾了两侧交流频率和直流电压的控制。

传统的负荷均衡控制策略依赖通信技术获取功率变化信息,可靠性低、耗时长,而文中所提基于 SNOP 的统一下垂控制策略无须通信,即可使交、直流微电网均衡承担系统总功率变化量。

### 2.3 动作死区设计

根据式(11)、式(12)可以得出 SNOP 的统一下垂控制曲线,如图 3 所示。

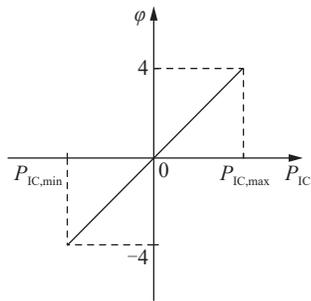


图 3 SNOP 的统一下垂控制曲线

Fig.3 The unified droop control curve of SNOP

图 3 中,  $\varphi = 2f_{pu,1} - f_{pu,2} - U_{dc,pu}$ ;  $P_{IC,max}$ 、 $P_{IC,min}$  分别为 SNOP 传输功率的上、下限。从图中可以看出,  $U_{dc,pu}$  和  $f_{pu}$  之间稍有偏差, SNOP 便会开始工作, 导致 SNOP 频繁启停。而交流微电网和直流微电网中都存在 DG, 其自身能够解决一部分功率变化问题, 无须依赖 SNOP 进行功率交换。当功率变化较大且超出自身负荷承受能力时, SNOP 开始发挥作用, 由其他微电网共同承担功率变化。文中综合考

虑交、直流微电网自身承担功率变化的能力, 设计了动作死区  $[-D, D]$ , 含死区的统一下垂控制曲线见图 4。

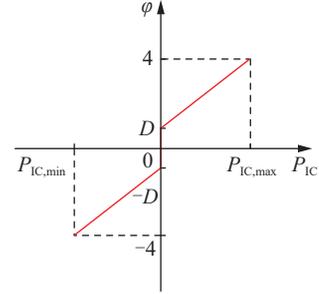


图 4 含死区的统一下垂控制曲线

Fig.4 The unified droop control curve with dead zones

根据图 4 可知,在交、直流微电网的自身能力范围内, SNOP 无须动作; 当功率变化量超出其承担范围时, SNOP 将采用上述统一下垂控制策略来进行功率传输。引入死区后, 统一下垂方程得到了改进, 如式(13)所示。

$$P_{IC,1} = \begin{cases} K_1 \frac{2f_{pu,1} - f_{pu,2} - U_{dc,pu} - D}{4 - D} & 2f_{pu,1} - f_{pu,2} - U_{dc,pu} > D \\ 0 & -D \leq 2f_{pu,1} - f_{pu,2} - U_{dc,pu} \leq D \\ K_1 \frac{2f_{pu,1} - f_{pu,2} - U_{dc,pu} + D}{4 - D} & 2f_{pu,1} - f_{pu,2} - U_{dc,pu} < -D \end{cases} \quad (13)$$

根据交直流微电网运行要求, 当式(11)中交流频率和直流电压归一化差值小于 5% 时, SNOP 处于待机模式, 所以文中取  $D=0.05$ 。

综上, 文中所提统一下垂控制策略整体控制框图, 如图 5 所示, 其中  $u_d$ 、 $i_d$  分别为  $d$  轴电压、电流。

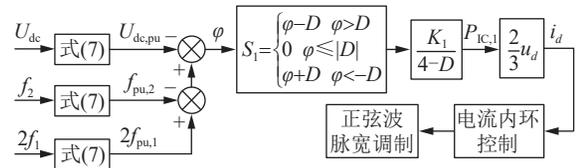


图 5 统一下垂控制策略控制框图

Fig.5 Control block diagram of the unified droop control strategy

### 3 仿真分析

为了验证所提控制策略的有效性和正确性, 在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建如图 1 所示的含 SNOP 的孤岛交直流微电网仿真模型。构建单侧负荷变化、双侧负荷变化以及三侧负荷变化场景, 并与文献 [19] 采用的恒压恒频控制策略进行对比。仿真主要参数见表 1。

表 1 系统参数  
Table 1 System parameters

参数	数值
直流电压额定值 $U_{dc0}/V$	750
交流电压额定值 $U_{ac0}/V$	380
直流电容 $C_{dc}/\mu F$	4 000
交流滤波电容 $C_f/\mu F$	220
滤波电感 $L_f/mH$	2.7
交流频率额定值 $f_0/Hz$	50
下垂系数 $K/W$	60 000
交流频率最大值 $f_{max}/Hz$	50.5
交流频率最小值 $f_{min}/Hz$	49.5
直流电压最大值 $U_{dcmax}/V$	787.5
直流电压最小值 $U_{dcmin}/V$	712.5
VSC额定容量/(kV·A)	20

### 3.1 单侧负荷变化

仿真开始时, SNOP 装置启动, 导致仿真波形有较大的阶跃和波动, 一段时间后, 交流频率和直流电压均稳定在额定值附近。

设定  $t=1\text{ s}$  时, 交流侧发生小扰动;  $t=2\text{ s}$  时, 直流侧发生小扰动。SNOP 的功率传输波形变化情况如图 6 所示。由图可知, 未加入死区控制时, 负荷发生小扰动就会触发 SNOP 动作, 加入死区控制后, 小扰动下 SNOP 不动作。结果表明, 引入死区控制后, 系统内的 DG 和负荷实时小波动将不会触发 SNOP, 减少了 SNOP 的非必要动作。

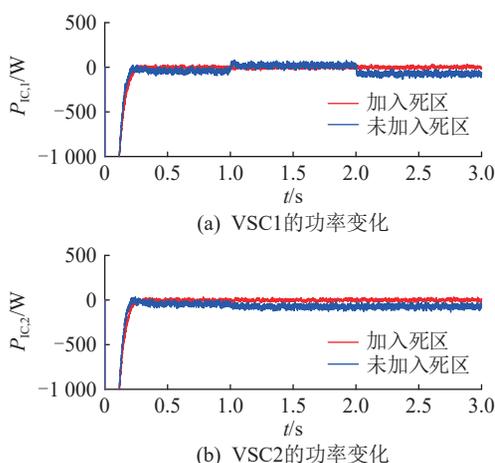


图 6 不同控制下的功率变化波形对比  
Fig.6 Comparison of power variation waveforms under different control strategies

#### 3.1.1 直流侧负荷变化

设定  $t=1\text{ s}$  时, 直流负荷突增  $9\text{ kW}$ ;  $t=2\text{ s}$  时, 直流负荷减少  $9\text{ kW}$ 。采用统一下垂控制策略时, 频率仿真结果如图 7 所示,  $f_1=f_2$ , 即该方法可以实现馈线负荷均衡。后文其他工况采用统一下垂控制时, 默

认 2 条馈线频率相等, 不再特别注释。

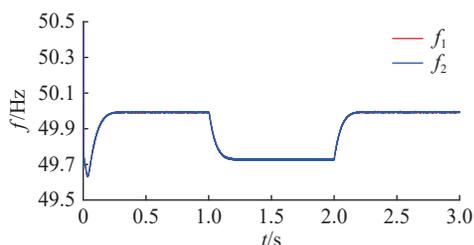


图 7 统一下垂控制下频率仿真结果  
Fig.7 Frequency simulation results under the unified droop control

图 8 为 2 种不同控制策略下的仿真波形。

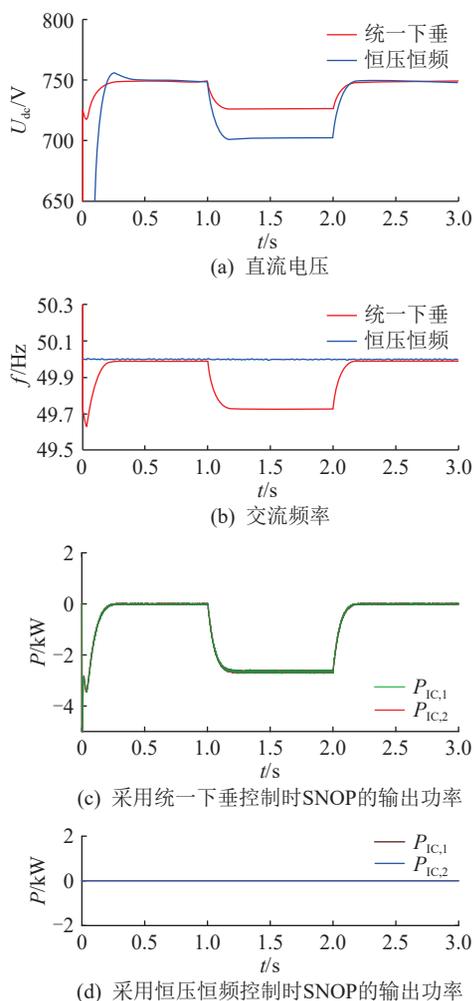


图 8 直流负荷变化时的仿真波形  
Fig.8 Simulated waveforms when DC load changes

图 8(a)为负荷变化时的直流电压波形, 采用恒压恒频控制时, 结合图 8(d)可知, 交流微电网能够稳定运行, SNOP 不进行功率传输, 但直流电压发生越限(降低了 6.36%)。相比之下, 采用文中所提统一下垂控制策略, 结合图 8(c)可知, 当直流负荷发生突增时, SNOP 开始进行功率传输, VSC1 和 VSC2 都工作在整流模式下, 此时馈线 1 和馈线 2 对直流电压进行功率补偿。结果显示, 直流电压

仅下降了 3.29%。因此,与恒压恒频控制相比,文中所提统一下垂控制策略能够有效避免直流电压的越限问题。

图 8(b)为 2 种不同控制策略的频率波形,采用统一下垂控制时频率存在波动,但符合稳定运行标准。因此,统一下垂控制能够实现交、直流微电网之间的能量互补,确保交流频率和直流电压均不越限。

### 3.1.2 单侧交流侧负荷变化

设定  $t=1$  s 时,交流馈线 1 负荷突增 9 kW;  $t=2$  s 时,交流负荷减少 9 kW。2 种不同控制策略下的仿真波形如图 9 所示。

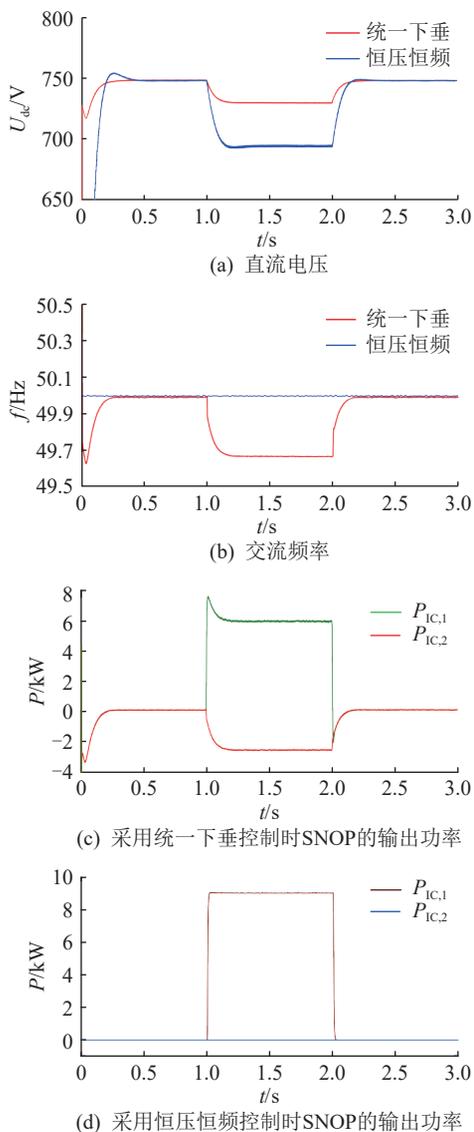


图 9 单侧交流侧负荷变化时的仿真波形  
Fig.9 Simulated waveforms when unilateral side AC load changes

图 9(a)为单侧交流侧负荷变化时的直流电压波形,采用恒压恒频控制时,结合图 9(d)可知, VSC1 向交流馈线 1 侧传输 9 kW 功率进行功率补

偿,从而使得交流侧频率稳定在额定值附近。然而,这种方法仅能利用相邻的直流微电网的能量来补偿交流侧的功率缺额,虽然实现了交流频率的稳定,却未充分利用馈线 2 侧的能量,同时也导致直流电压越限(降低了 7.34%)。而采用统一下垂控制策略时,结合图 9(c)可知,馈线 1 侧交流负荷突增时,SNOP 开始进行功率传输, VSC1 工作在逆变模式,传输功率 6 kW, VSC2 工作在整流模式,传输功率 3 kW,此时直流侧和馈线 2 侧均对馈线 1 侧进行功率补偿,直流电压降低了 2.62%。图 9(b)为 2 种不同控制策略的频率波形,采用统一下垂控制策略时,频率稳定在系统允许范围内。

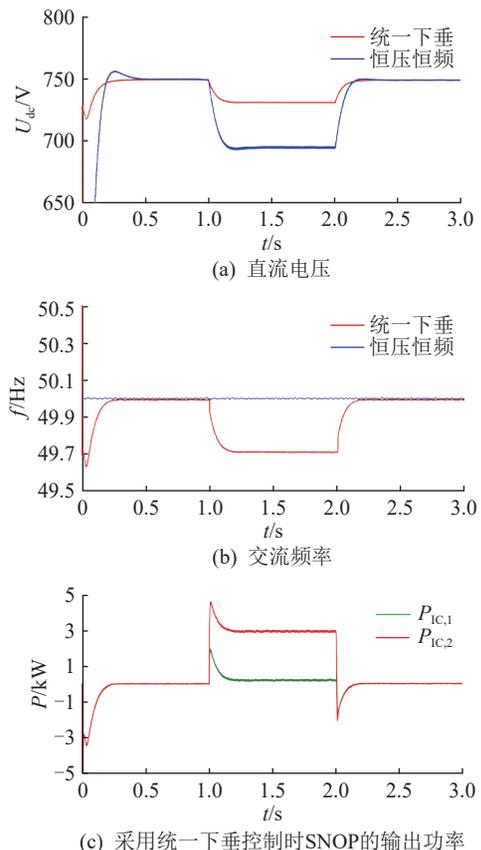
因此,统一下垂控制策略能实现交、直流微电网之间的能量互济,在确保交流频率不越限的同时,将直流电压稳定在允许的范围。

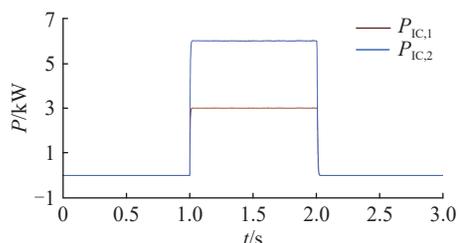
## 3.2 双侧负荷变化

### 3.2.1 双侧交流侧负荷变化

设定  $t=1$  s 时,馈线 1 侧负荷突增 3 kW, 馈线 2 侧负荷突增 6 kW;  $t=2$  s 时,突增负荷切除。2 种不同控制策略下的仿真波形如图 10 所示。

图 10(a)为直流电压波形,采用恒压恒频控制时,结合图 10(d)可知,该方法为了维持交流频率稳定在额定值,由直流微电网支撑两侧交流微电网。但是未考虑直流电压的稳定性,导致直流电压越限





(d) 采用恒压恒频控制时SNOP的输出功率

图 10 双侧交流侧负荷变化时的仿真波形  
Fig.10 Simulated waveforms when bilateral side AC load changes

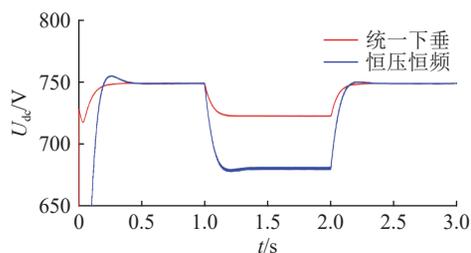
(降低了 7.31%)。而采用统一下垂控制时,结合图 10(c)可知, VSC1 不工作, VSC2 工作在逆变模式, 传输功率 3 kW, 直流微电网优先对频率偏差大的一侧进行功率补偿。结果显示, 直流电压仅降低了 2.62%。从图 10(b)可以看出, 采用统一下垂控制策略时, 频率稳定在系统允许范围内。

因此, 文中所提统一下垂控制策略不仅可以避免交流频率发生越限, 同时也能够确保直流电压的稳定性。

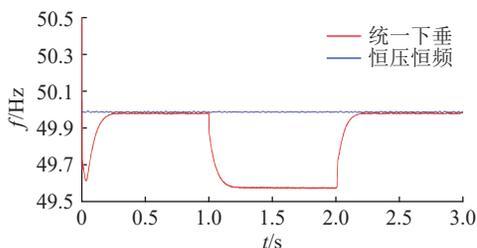
### 3.2.2 直流侧和馈线 1 侧负荷变化

设定  $t=1$  s 时, 馈线 1 侧负荷突增 8 kW, 直流侧负荷突增 4 kW;  $t=2$  s 时, 突增负荷切除。2 种不同控制策略下的仿真波形如图 11 所示。

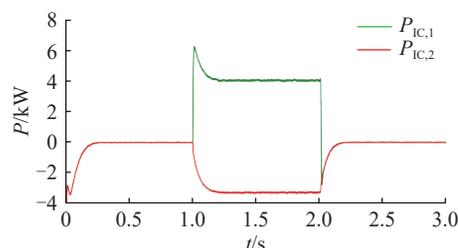
图 11(a)为直流电压波形, 采用恒压恒频控制时, 结合图 11(d)可知, 当交、直流微电网同时发生



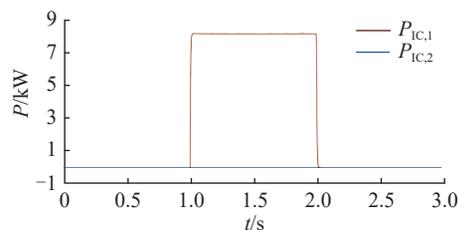
(a) 直流电压



(b) 交流频率



(c) 采用统一下垂控制时SNOP的输出功率



(d) 采用恒压恒频控制时SNOP的输出功率

图 11 直流侧和馈线 1 侧负荷变化时的仿真波形

Fig.11 Simulated waveforms when the DC load and feeder side 1 load changes

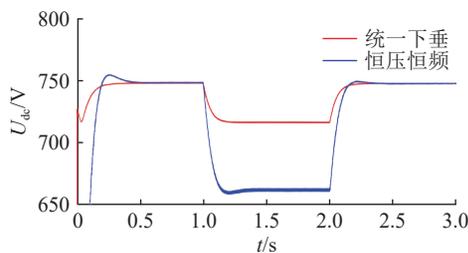
功率缺额时, 该方法未充分利用馈线 2 侧的能量, 仅由直流微电网支撑交流频率稳定, 虽然保证了交流侧稳定, 但是直流电压波动更大(降低了 9.12%)。而采用统一下垂控制时, 结合图 11(c)可知, 1 s 时, VSC1 工作在逆变模式, 传输功率 4 kW, VSC2 工作在整流模式, 传输功率 4 kW, 直流电压降低了 3.62%。从图 11(b)可以看出, 采用统一下垂控制策略时, 频率稳定在系统允许范围内。

因此, 统一下垂控制策略实现了交、直流微电网之间能量互补, 既控制交流频率的稳定, 又保证直流电压不发生越限。

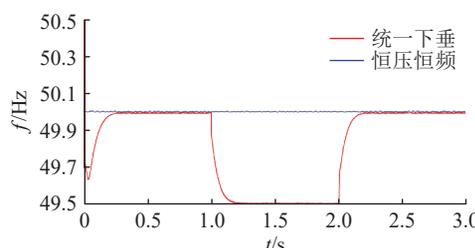
### 3.3 三侧负荷变化

设定  $t=1$  s 时, 直流负荷突增 3 kW, 馈线 1 侧交流负荷突增 9 kW, 馈线 2 侧交流负荷突增 3 kW;  $t=2$  s 时, 突增的负荷全部切除。2 种不同控制策略下的仿真波形如图 12 所示。

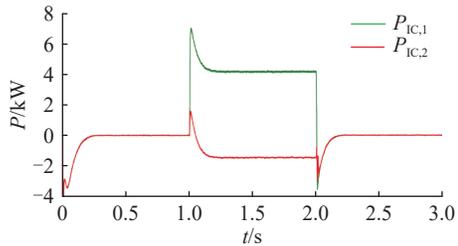
图 12(a)为直流电压波形, 采用恒压恒频控制时, 结合图 12(d)可知, 该控制方法仅考虑交流侧负荷供电问题, 未考虑直流电压是否稳定, 从而导致直流电压发生越限(降低了 11.61%), 严重影响系统的稳定。而采用统一下垂控制时, 结合图 12(c)可知, VSC1 工作于逆变模式, 传输功率 4 kW, VSC2



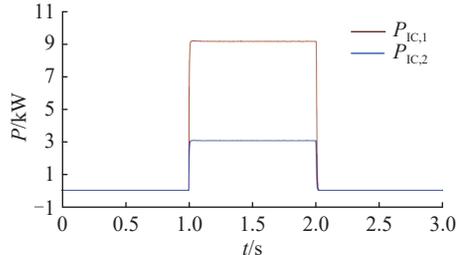
(a) 直流电压



(b) 交流频率



(c) 采用统一下垂控制时SNOP的输出功率



(d) 采用恒压恒频控制时SNOP的输出功率

图 12 三侧负荷均变化时的仿真波形

Fig. 12 Simulated waveforms when load changes on all three sides

运行在整流模式, 传输功率 2 kW, 直流电压降低了 4.36%。从图 12(b)可以看出, 采用统一下垂控制策略时, 频率稳定在系统允许范围内。

上述场景对比表明文中所提统一下垂控制能够响应交直流负荷变化, 实现交、直流微电网之间的功率互济, 同时避免直流电压和两侧交流频率偏差过大, 超出运行范围内, 影响系统稳定运行。此外, 当系统发生小扰动时, 不会触发 SNOP 动作, 表明动作死区的有效性。

## 4 结论

针对孤岛模式下基于 SNOP 的交直流微电网的交流频率和直流电压控制不能兼顾的问题, 文中提出一种 SNOP 统一下垂控制策略。该控制策略采用归一化方法将交流频率下垂特性和直流电压下垂特性相结合, 充分利用交、直流微电网内 DG 的吞吐特性, 实现交、直流子网的功率均衡分配, 以应对孤岛混合微电网总功率变化。同时, 考虑交、直流微电网自身消纳功率波动的能力, 设计动作死区, 以减少系统对小功率波动的敏感性, 从而提高整体系统的稳定性和运行效率。通过 MATLAB/Simulink 对所提控制策略进行仿真验证, 并与传统的恒压恒频控制进行对比分析, 研究结果表明:

(1) 在孤岛模式下, 采用统一下垂控制策略相较于传统的恒压恒频控制能够更加灵活地调节功率的双向流动, 从而保证交流频率和直流电压均能够稳定运行在系统允许范围内。

(2) 设置 SNOP 的动作死区, 能成功避免 SNOP 交、直流侧功率频繁交互的问题。

## 致谢

本文得到甘肃省高校教师创新基金项目(2024A-025)资助, 谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 樊晓伟, 王瑞妙, 杨海峰, 等. 计及源荷不确定的综合能源微电网集群优化运行[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 128-139.  
FAN Xiaowei, WANG Ruimiao, YANG Haifeng, et al. Optimization operation of integrated energy microgrid cluster considering source-load uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8): 128-139.
- [2] 范培潇, 胡文平, 温裕鑫, 等. 基于可进化 PID 的含电动汽车孤岛微电网负荷频率控制策略[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(3): 258-265.  
FAN Peixiao, HU Wenping, WEN Yuxin, et al. A load frequency control strategy of island microgrid with V2G based on evolutionary-PID[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 258-265.
- [3] 胡鹏飞, 朱乃璇, 江道灼, 等. 柔性互联智能微电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 2-12.  
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Progress and prospect of key technology research on flexible interconnected smart distribution grid[J]. Power System Automation, 2021, 45(8): 2-12.
- [4] 徐旖旎, 刘海涛, 熊雄, 等. 低压配电网台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3986-4000.  
XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3986-4000.
- [5] LI Z, HE Y, LI Y Z, et al. Hybrid control strategy for AC voltage stabilization in bipolar VSC-MTDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 129-139.
- [6] WEI W, ZHOU Y T, ZHU J, et al. Reliability assessment for AC/DC hybrid distribution network with high penetration of renewable energy[J]. IEEE Access, 2019, 7: 153141-153150.
- [7] 王浩, 聂晶莹, 李斌, 等. 电网电压不平衡下交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 94-103.  
WANG Hao, NIE Jingying, LI Bin, et al. Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 94-103.
- [8] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.  
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Intelligent soft-switching technology and application in power distribution systems[J]. Power System Automation, 2022, 46(4): 1-14.
- [9] 沙广林, 刘斌, 郭玮晗, 等. 多端柔性互联的交直流配电系统分层控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3509-3520.  
SHA Guanglin, LIU Bin, WU Weihang, et al. Hierarchical

- control strategy for multi-terminal flexible interconnected AC/DC power distribution systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(10): 3509-3520.
- [10] 贾善翔, 彭克, 李喜东, 等. 基于智能软开关的柔性互联交直流配电系统分布式优化[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 95-103.
- JIA Shanxiang, PENG Ke, LI Xidong, et al. Distributed optimization of flexible interconnected AC/DC distribution system based on intelligent soft switch[J]. *Power System Automation*, 2021, 45(8): 95-103.
- [11] 张国荣, 王泰文, 侯立凯, 等. 柔性多状态开关参数辨识无差拍控制[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(10): 129-135.
- ZHANG Guorong, WANG Taiwen, HOU Likai, et al. Dead-beat control with parameter identification for soft open point[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(10): 129-135.
- [12] 任洁, 刘桂英, 粟时平, 等. 基于RBFNN稳态逆模型的多端柔性多状态开关平滑切换策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(10): 167-174.
- REN Jie, LIU Guiying, SU Shiping, et al. Smooth switching strategy of multi-terminal flexible multi-state switch based on RBFNN steady-state inverse model[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(10): 167-174.
- [13] CHEN Y W, SUN J J, ZHA X M, et al. A novel node flexibility evaluation method of active distribution network for SNOP integration[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2021, 11(1): 188-198.
- [14] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1899-1910.
- [15] 李岩, 陈夏, 李巍巍, 等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性微电网互联结构与控制技术研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4749-4760.
- LI Yan, CHEN Xia, LI Weiwei, et al. Study on interconnection structure and control technology of flexible distribution network based on parallel connection of intelligent soft switch and contact switch[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2022, 42(13): 4749-4760.
- [16] 王瀚樟, 赵倩宇, 王守相, 等. 考虑分时电价和 SOP 协同的交直流配电网光伏消纳能力提升[J]. *供用电*, 2023, 40(7): 1-9.
- WANG Hanzhang, ZHAO Qianyu, WANG Shouxiang, et al. Improvement method of photovoltaic consumption capacity of AC/DC hybrid distribution network considering the time-of-use electricity price and SOP collaboration[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(7): 1-9.
- [17] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能微电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4664-4676.
- QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development trend of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. *Grid Technology*, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [18] 王灿, 吴耀文, 孙建军, 等. 基于柔性多状态开关的主动微电网双层负荷均衡方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 77-85.
- WANG Can, WU Yaowen, SUN Jianjun, et al. An active distribution network two-tier load balancing method based on flexible multi-state switching[J]. *Power System Automation*, 2021, 45(8): 77-85.
- [19] 张国荣, 沈聪, 彭勃, 等. 馈线故障下柔性多状态开关的平滑切换策略[J]. *高电压技术*, 2019, 45(10): 3050-3058.
- ZHANG Guorong, SHEN Cong, PENG Bo, et al. Smooth switching strategy of flexible multi-state switch in the case of feeder fault[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10): 3050-3058.
- [20] 窦晓波, 皇甫霄文, 全相军, 等. 交直流配电网柔性多状态开关电压自适应控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 68-76.
- DOU Xiaobo, HUANGFU Xiaowen, QUAN Xiangjun, et al. Adaptive voltage control strategy for soft normally open point in AC/DC distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 68-76.
- [21] XIE X F, QUAN X J, WU Z J, et al. Adaptive master-slave control strategy for medium voltage DC distribution systems based on a novel nonlinear droop controller[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 4765-4777.
- [22] 许洁翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. *电网技术*, 2022, 46(9): 3586-3594.
- XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3586-3594.
- [23] ROSSO R, ANDRESEN M, ENGELKEN S, et al. Analysis of the interaction among power converters through their synchronization mechanism[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(12): 12321-12332.
- [24] 张国驹, 裴玮, 杨鹏, 等. 中压微电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 18-29.
- ZHANG Guoju, PEI Wei, YANG Peng, et al. A review of circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium voltage distribution networks[J]. *Power System Automation*, 2023, 47(6): 18-29.
- [25] NAVARRO-RODRÍGUEZ Á, GARCÍA P, GÓMEZ-ALEIXANDRE C, et al. Cooperative primary control of a hybrid AC/DC microgrid based on AC/DC virtual generators[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(4): 2837-2850.
- [26] 赵晶晶, 李梓博, 刘帅, 等. 考虑智能软开关电压支撑的城市配电网弹性提升方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 77-86.
- ZHAO Jingjing, LI Zibo, LIU Shuai, et al. Resilience lifting method of urban distribution network considering soft open point voltage support[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 77-86.
- [27] 李书亚, 解绍锋, 马智泉. 孤岛运行方式下柔性直流配电网高次

- 谐波谐振及抑制措施研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5): 81-88.
- LI Shuya, XIE Shaofeng, MA Zhiqian. Research on high order harmonic resonance and suppression measures of flexible DC distribution network under isolated operation mode[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 81-88.
- [28] QU Z W, CHONG Z X, WANG Y J, et al. Control method for grid-connected/islanding switching of hybrid AC/DC microgrid[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(1): 15-25.
- [29] 蔡云旖, 屈子森, 杨欢, 等. 柔性多状态开关改进型下垂控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2488-2497.
- CAI Yunyi, QU Zisen, YANG Huan, et al. Research on improved droop control strategy for soft open point[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2488-2497.
- [30] WANG J, HUANG W T, TAIN L, et al. A bidirectional virtual inertia control strategy for the interconnected converter of standalone AC/DC hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 745-754.
- [31] LU W B, XIAO Q, JIA H J, et al. An improved energy management for MVDC distribution system based on exponential droop control[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 995968.
- [32] EGHTEGARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [33] 田浩, 黄文焘, 余墨多, 等. 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): 7063-7073.
- TIAN Hao, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. Adaptive bidirectional droop control strategy for the interlinking converter in the islanding hybrid AC/DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7063-7073.
- [34] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.

作者简介:



杨新华

杨新华 (1966), 男, 学士, 教授, 研究方向为电力电子及电力传动、微电网及控制等;  
王彤 (1999), 女, 硕士, 研究方向为分布式新能源发电及交直流混合配电系统运行控制;  
谢兴峰 (1987), 男, 博士, 讲师, 通信作者, 研究方向为交直流混合配电系统运行控制及电力电子技术 (E-mail: xxfeng@lut.edu.cn)。

## Unified droop control strategy of soft normally open points in AC/DC microgrids

YANG Xinhua<sup>1</sup>, WANG Tong<sup>1</sup>, XIE Xingfeng<sup>1</sup>, ZHANG Yuhang<sup>1</sup>, QUAN Xiangjun<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** To address the stable operation issue of AC/DC hybrid microgrids in islanded mode, a unified droop control strategy based on soft normally open point (SNOP) is proposed. This strategy utilizes a normalization method to combine the frequency droop characteristics of the two feeders with the DC voltage droop characteristics, based on the power balance relationship of the system. The system's operating state is determined by the AC frequency and DC voltage, and SNOP uniformly adjusts the frequency of the AC subgrid and the voltage of the DC subgrid. This ensures that the AC and DC microgrids can evenly share the total power change of the hybrid microgrid, maintaining the AC frequency and DC voltage within the permissible range of the system. Additionally, to prioritize the nearby integration of distributed energy resources and avoid unnecessary actions of SNOP, a deadband adjustment is designed. Then, the AC and DC microgrids can utilize distributed energy resources within each subgrid, thereby reducing the frequent interaction of SNOP on both the AC and DC sides. Finally, the effectiveness of the proposed unified droop control strategy is verified by MATLAB/Simulink simulations.

**Keywords:** AC/DC hybrid microgrids; flexible interconnection; soft normally open point (SNOP); unified droop control; AC frequency regulation; DC voltage regulation

(编辑 方晶)