

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211404

基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制

曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 韩杨, 杨平, 王丛岭

(电子科技大学机械与电气工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 在直流微电网中, 传统下垂控制存在功率均分和母线电压控制不能同时兼顾的矛盾。针对这一问题, 研究了带阻性负载直流微网系统, 提出基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制策略。该策略包括一次、二次和电流一致性控制。引入输出电容电压反馈构成一次控制, 参考电压补偿和下垂系数修正构成二次控制。各分布式电源间仅相邻变换器交换电流信息, 通过电流一致性迭代控制和一次、二次控制结合, 在保障输出功率均分的同时, 消除了直流母线电压偏差。为验证该策略的控制有效性, 对系统进行小信号建模理论分析, 分析控制参数变化对系统稳定性的影响, 最后进行了仿真验证。理论分析与仿真结果表明, 该控制策略在微网结构改变时, 也能保证系统稳定, 自适应完成直流微网功率均分和母线电压控制目标。

关键词: 直流微网; 电流一致性; 自适应下垂控制; 母线电压控制; 功率均分

Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency

ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, HAN Yang, YANG Ping, WANG Congling

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In a DC microgrid, conventional droop control has the contradiction that power sharing and bus voltage control cannot be considered at the same time. To solve this problem, a system with resistive load is studied, and adaptive droop control of the DC microgrid based on current consistency strategy is proposed. The strategy includes primary, secondary and current consistency control. The introduction of output capacitor voltage feedback constitutes the primary control, and reference voltage compensation and droop coefficient correction constitute the secondary control. Each distributed power supply only exchanges current information between adjacent converters. Through the iterative control of current consistency and the combination of primary and secondary control, the bus voltage deviation is eliminated while ensuring the output power is evenly divided. In order to verify the control effectiveness of the strategy, small-signal modeling theory of the system is analyzed, and the influence of the change of control parameters on the stability of the system is analyzed. Finally, simulation verification is carried out. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed control strategy can also ensure the stability of the system when the structure of DC microgrid changes, and achieve the goal of power sharing and bus voltage control adaptively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977026).

Key words: DC microgrid; current consistency; adaptive droop control; bus voltage control; power sharing

0 引言

近年来, 直流微电网因其可靠性、可扩展性和高效性等特点而受到广泛关注。相比交流微电网, 直流微电网具有诸多优点, 能够有效地接入光伏、

储能和燃料电池等本质上具有直流特性的分布式电源, 且不需要考虑相位、频率和无功等问题, 控制相对简单, 具有广泛的应用前景^[1-7]。

在直流微电网的控制中, 传统下垂控制存在母线电压稳态误差^[8], 可以采用补偿法进行改进^[9]。文献[10]在传统下垂控制的基础上, 设计了具有下垂系数自适应调节补偿的控制器, 在一定程度上改善了下垂控制的固有矛盾。文献[11]提出一种带母

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977026); 四川省科技计划资助(2021YFG0255)

线电压多级前馈补偿的直流微网分段线性下垂控制策略,通过设置下垂系数和进行母线电压多级前馈补偿,解决了均流与母线电压跌落问题。文献[12]针对传统下垂控制存在的随着电荷状态(State of Charge, SOC)减小,母线电压跌落的问题,提出一种基于SOC的改进下垂控制策略。文献[13]提出一种限流下垂控制方法,改善了功率均分效果。这些研究针对下垂控制的固有矛盾从不同方面提出了改进策略,在一定程度上改善了母线电压控制和功率均分控制。但是,这些控制方法多以集中式控制器为主,对通信依赖度高,系统稳定性难以保证。

除了采用补偿法改进下垂控制外,一致性控制因具有高效率、高容错性、内在的并行性^[14-17]和降低通信成本^[18]等优点,已受到较多学者关注,一致性控制在通信结构变化的情况下仍能实现相应控制目的^[19]。文献[20]提出一种基于一致性算法的改进下垂控制策略,该策略利用相邻变换器信息,减少了通信量,实现了无功功率的精确分配,但是该方法适用于交流系统,并且未考虑控制参数对系统稳定性的影响。文献[21]提出一种基于多代理一致性的能量动态协调与功率精确控制策略,可以有效地协调功率的精确控制与底层的自治运行。文献[22]在混合多端直流每个端子设置一个代理构成多代理系统,用一致性算法实现自律分散控制,进行系统的损耗优化,显著降低了混合多端直流损耗。文献[23]提出一种受通信故障和通信延迟影响较小的分布式多光伏功率协调控制策略,保证功率均衡,且均衡了光伏间负荷分配。文献[24]提出一种基于离散一致性的自适应下垂控制策略,实现了变虚拟电阻的自适应下垂控制,增加了控制的鲁棒性及灵活性。这些有关直流微网系统控制策略的研究,虽然采用了以分布式控制器为主的一致性算法,但是缺乏控制参数对系统稳定性影响的讨论。

本文在现有下垂控制和一致性控制研究的基础上,提出了基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制。所提出的控制策略适用于低压直流微电网,比如某些数据和电信设备直流系统^[25]。控制策略包含一次控制、二次控制和电流一致性控制,利用输出电容电压和电感电流反馈得到的参考电压补偿和下垂系数修正构成二次控制,二次控制的输出作为一次控制的输入。各变换器仅交换相邻电流信息,通过电流一致性迭代控制和一次、二次控制结合,在保障功率均分的前提下,消除了直流母线电压偏差。此外,当微网结构改变时,系统还能保持稳定,

自适应地维持母线电压和均分输出功率。最后,通过理论分析和PLECS仿真验证了所提控制策略的有效性。

1 传统下垂控制

因线路阻抗差异的存在,传统下垂控制具有明显的局限性。图1所示为两个变换器并联组成的直流微电网等效电路。其中: K 、 r_1 和 r_2 分别表示下垂系数、#1变换器和#2变换器线路阻抗; i_1 和 i_2 表示#1变换器和#2变换器的输出电流; u_1 和 u_2 表示#1变换器和#2变换器的输出电容电压; u_{ref} 表示参考电压; u_{bus} 和 R 表示母线电压和阻性负载。

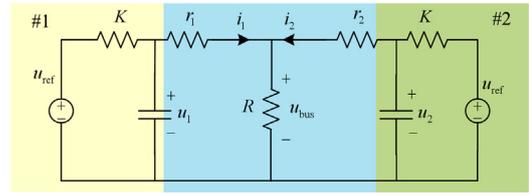


图1 双BOOST变换器并联等效电路

Fig. 1 Parallel equivalent circuit of double BOOST converter

由图1的等效电路,根据回路电压方程得到直流微电网等效电路的电压电流下垂特性表达式为

$$\begin{cases} u_{ref} = u_{bus} + (K + r_1)i_1 \\ u_{ref} = u_{bus} + (K + r_2)i_2 \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1),在保障母线电压控制精度的同时,想要达到功率均分(满足 $i_1 = i_2$),必须满足条件:

$$K + r_1 = K + r_2 \quad (2)$$

由于线路阻抗 r_1 和 r_2 会存在一定的差异,公式(2)不成立,公式(1)不满足 $i_1 = i_2$,并且 $u_{ref} > u_{bus}$ 。由此说明,传统下垂控制不能完全满足各变换器输出功率均分要求,不能满足母线电压无差控制。

图2所示为电压-电流下垂特性曲线,可以进一步说明传统下垂控制的局限性。图中: e_1 、 u_{bus} 、 i_1 、 i_2 分别表示在下垂系数为 K 时的直流母线电压偏差、母线电压、#1变换器输出电流、#2变换器输出电流;当增大下垂系数到 K' 时,直流母线电压偏差为 e_1' ,母线电压为 u_{bus}' ,#1变换器输出电流为 i_1' ,#2变换器输出电流为 i_2' , r_1 和 r_2 表示#1变换器和#2变换器输出线路阻抗; Δi 和 $\Delta i'$ 表示下垂系数增大前后两个变换器的输出电流差值,用其表示功率均分效果。据图2得:

$$\begin{cases} \Delta i' < \Delta i \\ e_1' > e_1 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 增大下垂系数 K , 变换器输出电流差值会减小, 功率均分效果改善, 但是母线电压偏差更大。由此说明, 传统下垂控制可以在一定程度上提高功率均分效果, 但是也会降低母线电压控制精度, 这种控制并不能同时兼顾母线电压控制和功率均分控制。

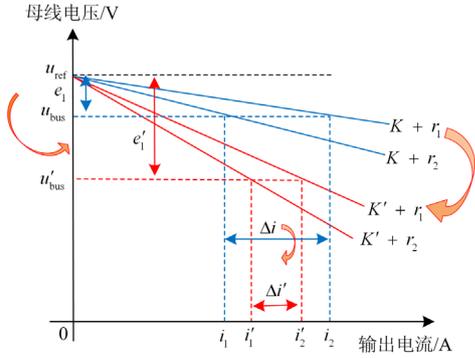


图2 电压-电流下垂特性曲线

Fig. 2 Voltage-current droop characteristic curve

2 基于电流一致性自适应下垂控制

2.1 电流一致性迭代

传统离散一致性控制公式描述为^[26]

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \varepsilon \cdot \sum_{j \in N_i} a_{ij} \cdot (x_j(k) - x_i(k)) \quad (4)$$

式中: x_i 表示第 i 个变换器的状态变量, 下标 i 表示变换器序号; ε 表示一个与通信拓扑有关的常数权重; a_{ij} 表示第 i 个变换器和第 j 个变换器之间的连接状态, $a_{ij} = 1$ 表示相邻直流变换器相互连接, $a_{ij} = 0$ 表示直流变换器不相互连接; N_i 表示所有与第 i 个变换器通信的变换器数目。

本文采用的电流一致性迭代算法在上述式(4)的基础上进行改进, 确保了在动态环境改变下的一致性收敛^[27]。

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(0) + \varepsilon \cdot \sum_{j \in N_i} \delta_{ij} \cdot (k+1) \\ \delta_{ij} \cdot (k+1) = \delta_{ij} \cdot (k) + a_{ij} \cdot (x_j(k) - x_i(k)) \end{cases} \quad (5)$$

式中: δ_{ij} 表示累计误差; $x_i(0)$ 表示第 i 个变换器的初始状态变量。

微网采用图3所示的通信拓扑, 拓扑结构采用交叉结构, 能够在交换较小的信息情况下达到较好的收敛效果。在图3的通信拓扑结构下, 各分布式电源(DG)仅交换相邻电流信息, 在每一个采样周期进行一致性算法迭代, 迭代结果用 i_x 表示, 其满足:

$$i_{x1} = i_{x2} = \dots = i_{x6} \quad (6)$$

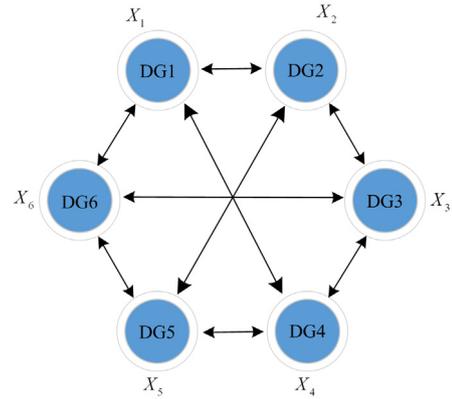


图3 系统通信拓扑结构

Fig. 3 System communication topology

2.2 电流一致性自适应下垂控制

在传统下垂控制的基础上改进, 把双变换器推广到多变换器控制结构, 在一次控制和二次控制的基础上, 引入电流一致性算法, 构成基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制策略。

图4为微网结构和控制策略框图, 其中, V_{dc} 表示各变换器输入直流电压, L 表示电感, i_L 表示电感电流, u 表示电容电压, r 表示变换器输出线路阻抗, i 表示输出电流, u_{ref} 表示参考电压, u_{bus} 表示母线电压, K 表示下垂系数, i_x 表示电流一致性迭代结果, $1/Z$ 表示延迟环节。开关 Switch 控制变换器投切, 改变微网结构。阻性负载 R_0 和 R_1 由开关 SwitchR 进行切换, 不同的开关组合构成不同微网工况。各变量数字下标表示变换器序号。

控制策略包含一次控制、二次控制和电流一致性控制。如图4, 二次控制引入输出电容电压和电感电流反馈, 二次控制的输出作为一次控制的输入。二次控制的实现依赖参考电压补偿控制和下垂系数修正控制。参考电压补偿量由原参考电压 u_{ref} 与母线电压 u_{bus} 求取的偏差经过 PI 控制器得到。下垂系数修正量由电流一致性迭代结果 i_x 与各变换器输出电流 i 求取的偏差经过 PI 控制器得到。

由于线路阻抗 r_1 和 r_2 的差异性, 等式(2)不成立。如果在等式两边各添加一个合适的下垂系数修正量 ΔK_1 和 ΔK_2 , 使得条件(2)等号成立, 此时功率均分。

在两个变换器时, 添加两个下垂系数修正量, 可以使条件(2)成立, 推广到多变换器组成的微电网, 需要分别增加下垂系数修正量 ΔK_i , 下标 i 表示第 i 个直流变换器的参数, i 在图3的通信拓扑结构下取到6。

此时微网下垂特性表达式为

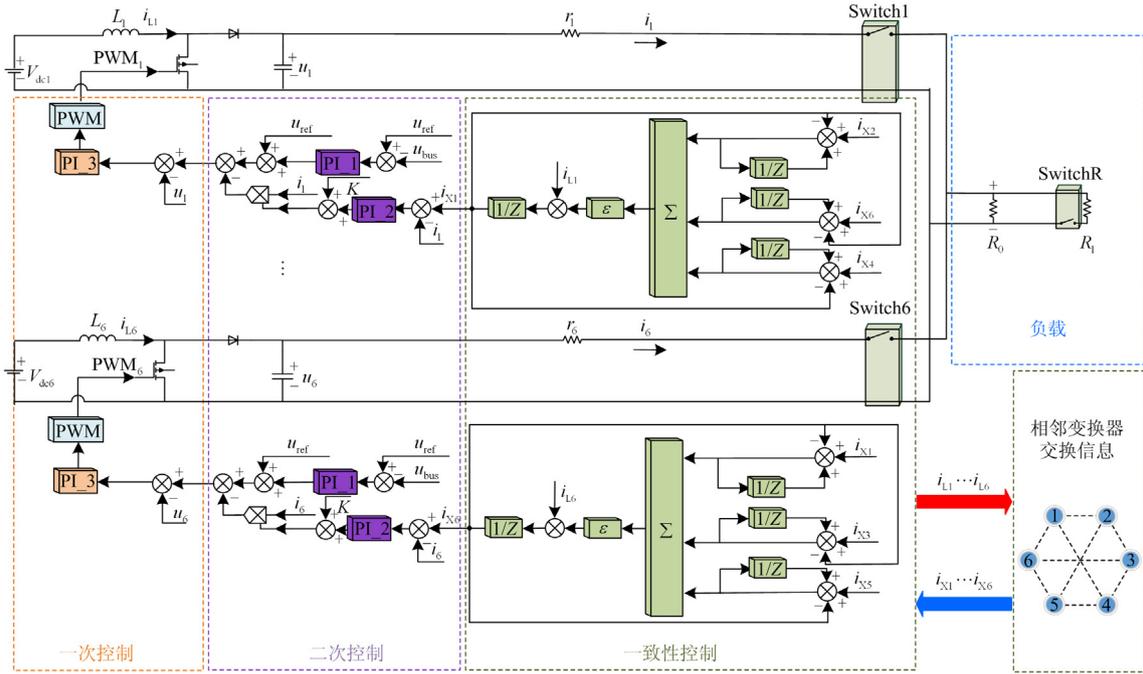


图 4 直流微网电流一致性自适应控制结构

Fig. 4 Current consistency adaptive control structure of DC microgrid

$$u_{ref} = u_{bus} + (K + \Delta K_i + r_i) i_i \quad (7)$$

调节各变换器下垂系数修正量 ΔK_i 的大小，让式(7)中电流项前系数相等，就能使电流均分。但是，由于下垂系数和线路阻抗的存在，会导致 $u_{ref} > u_{bus}$ ，即会存在母线电压稳态误差。

为了消除母线电压稳态误差，需要一个参考电压补偿量 Δu_i 。下垂系数修正量和参考电压补偿量获取方式为

$$\begin{cases} \Delta K_i = (i_{Xi} - i_i) \cdot G_{PI_2}(s) \\ \Delta u_i = (u_{ref} - u_{bus}) \cdot G_{PI_1}(s) \end{cases} \quad (8)$$

式中， $G_{PI_1}(s)$ 、 $G_{PI_2}(s)$ 分别表示第一、第二 PI 控制器传递函数。电感电流反馈经过一致性算法迭代得到 i_{Xi} ，然后与输出电流比较，得到下垂系数修正控制误差。下垂系数修正控制误差经过第二 PI 控制器，得到下垂系数修正量。参考电压补偿量通过原参考电压与母线电压反馈的误差经过第一 PI 控制器得到。

此时参考电压补偿量的大小满足：

$$\Delta u_i = (K + \Delta K_i + r_i) i_i \quad (9)$$

上述补偿量 Δu_i 使式(7)中的原参考电压提升，提高部分的电压用来补偿图4和公式(9)中的虚拟阻抗(二次控制产生的 ΔK_i 和下垂系数 K 之和)、输出线路阻抗 r_i 的损耗，使实际母线电压提高，等于参考值。

图 5 所示为所提出控制策略的电压-电流下垂特性曲线，以此来说明所提控制方法在功率均分及母线电压控制上相较传统下垂控制的优越性。图中 e 表示传统下垂控制下母线电压与参考电压之间的误差，添加下垂系数修正后的母线电压为 u'_{bus} ，变量下角标 i 表示第 i 号变换器的参数，其余变量含义同上文。

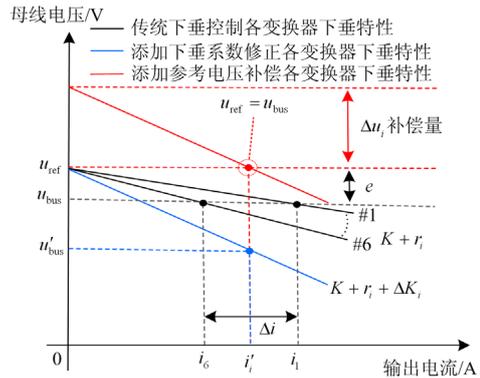


图 5 自适应下垂特性曲线

Fig. 5 Droop characteristic curve of adaptive droop control

从图中可以看到，在传统下垂控制下，由于各变换器输出线路阻抗存在差异，且没有下垂系数修正量 ΔK_i 的存在。所以 $K + r_i$ 均不相同，下垂特性呈现 6 组曲线(#1 至#6)。此时，母线电压与参考电压的分析同图 2 的分析一致，存在电压控制误差 e 和输出电流差值 Δi ，控制具有一定的局限性，不能同

时满足母线电压控制和输出功率均分。

在本文所提出控制方法的控制下, 分别增加了下垂系数修正量 ΔK_i 和参考电压补偿量 Δu_i 。下垂系数修正量让六个变换器的下垂特性曲线重合, 即满足 $\Delta K_i + K + r_i$ 为同一值。此时 $\Delta i = 0$, 同公式(7)分析保持一致, 实现了输出功率的均分, 但此时母线电压低于参考值, 还存在母线电压控制误差。由公式(9), 6个变换器 Δu_i 相同, Δu_i 让变换器的下垂特性曲线向上平移 Δu_i 大小, 此时 $u_{\text{ref}} = u_{\text{bus}}$, 系统在输出功率均分的同时恢复了母线电压。

由此说明, 相比传统下垂控制, 所提出的控制方法经过一次控制、二次控制和一致性算法结合得

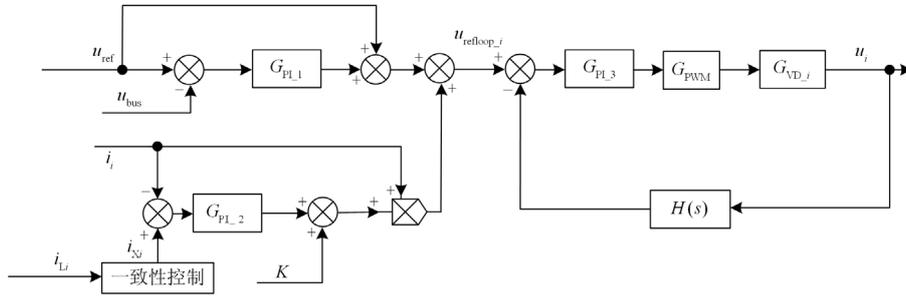


图6 电流一致性自适应控制框图

Fig. 6 Block diagram of current consistency adaptive control

根据图6, 得到经过下垂修正、电压补偿的电容电压参考值 u_{refloop_i} 。

$$u_{\text{refloop}_i} = u_{\text{ref}} + (u_{\text{ref}} - u_{\text{bus}}) \cdot G_{\text{PI}_1}(s) - (K + (i_{X_i} - i_i) \cdot G_{\text{PI}_2}(s)) \cdot i_i \quad (10)$$

$$\frac{u_i(s)}{u_{\text{refloop}_i}(s)} = \frac{G_k(s)}{1 + G_k(s)} \quad (11)$$

式中, $G_k(s)$ 为电压内环开环传递函数, 具体为

$$G_k(s) = G_{\text{PI}_3}(s) \cdot G_{\text{PWM}}(s) \cdot G_{\text{VD}_i}(s) \cdot H(s) \quad (12)$$

式中: 下标 i 表示变换器序号; $G_{\text{PI}_3}(s)$ 为电压环第三PI传递函数; $G_{\text{PWM}}(s)$ 为脉冲宽度调制传递函数; $G_{\text{VD}_i}(s)$ 为变换器输出电容电压对占空比的传递函数; $H(s)$ 为反馈网络的传递函数, 取单位负反馈。 $G_{\text{PWM}}(s)$ 可表示为

$$G_{\text{PWM}}(s) = \frac{1}{V_m} \quad (13)$$

式中, V_m 为脉冲宽度调制载波幅值。

为了得到变换器输出电容电压对占空比的传递函数 $G_{\text{VD}_i}(s)$, 引入小扰动进行小信号分析, 输入小信号为 $G_{\text{PWM}}(s)$ 传递函数输出量(占空比), 输出小信号为电容电压控制量, 得到小扰动下 BOOST 变换器传递函数为^[28]

到下垂系数修正量和参考电压补偿量后, 能在保障功率均分的同时保障母线电压控制, 恢复母线电压。

3 稳定性分析

为了研究所提出控制策略对系统稳定性的影响及其参数选择依据, 对图4所示的直流系统在稳态工作点附近进行局部线性化小信号建模分析。

由图4的控制结构可知, 一致性算法提供各变换器参考电流值, 然后经过二次控制得到下垂系数修正量和参考电压补偿量, 最后经过一次控制得以实现控制目标。图4的控制结构可以表示为图6所示传递函数框图。

$$G_{\text{VD}_i}(s) = \frac{[Ls - R'D_i'^2]V_{\text{dc}_i}}{[R'LCs^2 + Ls + D_i'^2R'](-D_i')} \quad (14)$$

式中: L 为电感值; C 为输出电容; R 为阻性负载; V_{dc_i} 表示各变换器输入电压; D_i 表示占空比。

其中, R' 、 D_i' 表示为

$$\begin{cases} R'_i = 6R + r_i \\ D'_i = 1 - D_i \end{cases} \quad (15)$$

在图1的电路结构中, 有如下关系:

$$\begin{cases} u_i = i_i \cdot r_i + i \cdot R \\ u_{\text{bus}} = i \cdot R \\ i = \sum i_i \end{cases} \quad (16)$$

对系统进行小信号分析, 加入小扰动, 求解母线电压扰动与电压参考值小扰动之间的关系。大写字母表示稳态值, 上小三角标表示小扰动, 得到:

$$\begin{cases} u_{\text{ref}} = U_{\text{REF}} + \hat{u}_{\text{ref}} \\ u_{\text{bus}} = U_{\text{BUS}} + \hat{u}_{\text{bus}} \\ u_i = U_i + \hat{u}_i \\ i_i = I_i + \hat{i}_i \\ i = I + \hat{i} \end{cases} \quad (17)$$

其中, 稳态关系有

$$\begin{cases} I_i = \frac{U_{REF}}{6R} \\ U_i = U_{REF} \left(1 + \frac{r_i}{6R} \right) \\ D_i = 1 - \frac{V_{dc_i}}{U_{REF}} \cdot \frac{6R}{6R + r_i} \\ U_{REF} = U_{BUS} \end{cases} \quad (18)$$

由式(16)、式(17)得到小信号表示:

$$\begin{cases} \hat{u}_i = \hat{i}_i \cdot r_i + \hat{i} \cdot R \\ \hat{u}_{bus} = \hat{i} \cdot R \end{cases} \quad (19)$$

令式(11)满足下式:

$$\frac{u_i(s)}{u_{refloop_i}(s)} = A_i(s) \quad (20)$$

由式(6)、式(10)一式(20)可得到:

$$\hat{i}_i M_i(s) + \hat{i} N_i(s) = O_i(s) \hat{u}_{ref} \quad (21)$$

其中:

$$\begin{cases} M_i(s) = \frac{r_i}{A_i(s)} - G_{PI_2}(s) \cdot I_i + K \\ N_i(s) = \frac{R}{A_i(s)} + R \cdot G_{PI_1}(s) + \frac{I_i \cdot G_{PI_2}(s)}{6} \\ O_i(s) = 1 + G_{PI_1}(s) \end{cases} \quad (22)$$

由式(10)一式(22)得到:

$$\frac{\hat{u}_{bus}}{\hat{u}_{ref}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^6 \frac{O_i(s)}{M_i(s)} \right) \cdot R}{1 + \sum_{i=1}^6 \frac{O_i(s)}{M_i(s)}} \quad (23)$$

式(23)表示了母线电压扰动与电压参考值小扰动的传递函数关系。根据式(23), 按照表 1 系统参数设置传递函数, 得到的系统闭环传递函数零极点分布, 如图 7 所示。

图 7 中, 系统的零极点分布划分为两部分, 第一部分对系统性能的影响较小, 离原点较远。第二部分靠近原点, 对系统性能影响较大, 称为主导极点。图 7 表示系统所有零极点分布于 S 平面左半平面, 所以系统稳定。由此说明所提出的控制策略能保证系统稳定。

图 7 表明系统在表 1 所选取的参数下具有稳定性, 但是各 PI 控制器参数变化对系统的影响还不能明确。在表 1 的基础上, 选择合适的参数范围, 分析三个 PI 控制器参数和系统负载参数对系统稳定性的影响。

表 1 系统参数

Table 1 Parameters of system	
参数	数值
直流电源 V_{dc_i}/V	220
电压参考 u_{ref}/V	400
下垂系数参考 K	15
电容 $C_i/\mu F$	500
阻性负载 R/Ω	10
电感 L_i/mH	2
线路阻抗 r_i/Ω	1/1.2/1.4/1.6/1.8/2
载波幅值 V_m/V	1
第一 PI 控制器(PI_1)参数	$K_{p1} = 0.9, K_{i1} = 2.1$
第二 PI 控制器(PI_2)参数	$K_{p2} = 0.12, K_{i2} = 0$
第三 PI 控制器(PI_3)参数	$K_{p3} = 0.03, K_{i3} = 0.22$

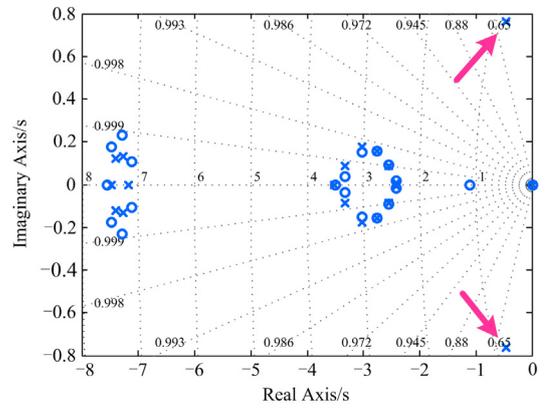
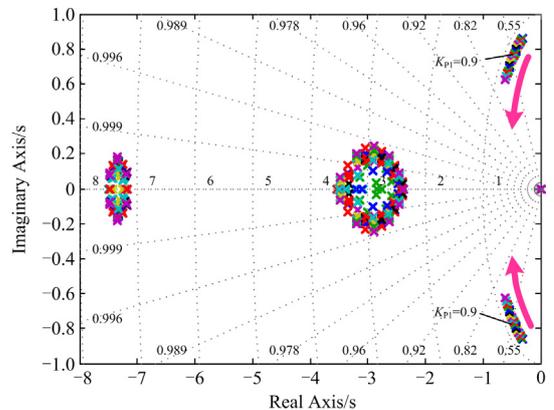


图 7 系统零极点分布

Fig. 7 Zero and pole distribution of the system

图 8 表示系统在保持其余参数不变的情况下, 只改变 1 号 PI 控制器的比例、积分项参数时的主导极点分布变化趋势图。图 8(a)中, 当比例系数从 0 增大到 1.8, 每次递增 0.1 时, 主导极点向实轴靠近, 系统阻尼逐渐增大, 调节时间变小, 超调量也逐渐减小。



(a) 比例系数变化

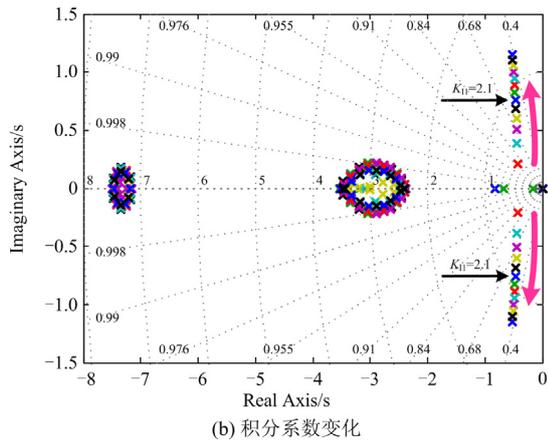
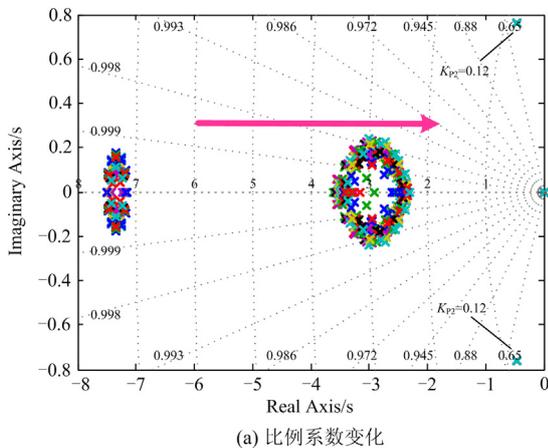


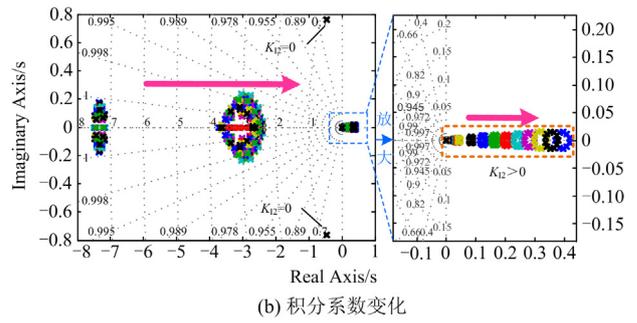
图 8 第一 PI 控制器参数变化主导极点变化趋势
Fig. 8 The first PI controller parameter changes dominate the pole change trend

图 8(b)中, 积分系数从 0 增大到 4.2, 每次递增 0.3, 一对共轭主导极点逐渐远离实轴, 系统阻尼逐渐减小, 调节时间变大, 超调量逐渐增大。第一 PI 控制器比例积分系数变化过程中, 极点分布始终保持在 S 平面左半平面, 系统保持稳定。

图 9 为系统在保持其余参数不变的情况下, 改变 2 号 PI 控制器比例系数和积分系数的主导极点分布变化趋势图。图 9(a)中, 比例系数从 0 增大到 0.24, 每次递增 0.01, 图中一对靠近虚轴的共轭主导极点位置基本保持不变, 原先分布于实轴的极点缓慢向原点靠近。在比例系数的增加过程中, 系统传递函数零极点始终保持在 S 平面左半平面, 系统保持稳定。图 9(b)中, 积分系数从 0 增大到 1, 每次递增 0.1, 一对共轭主导极点位置基本保持不变, 原先分布于实轴的零极点向原点靠近, 随着第二 PI 控制器积分系数的增加, 系统极点分布扩散到 S 平面右半平面, 并且向着远离虚轴的方向移动, 系统变得不稳定。



(a) 比例系数变化

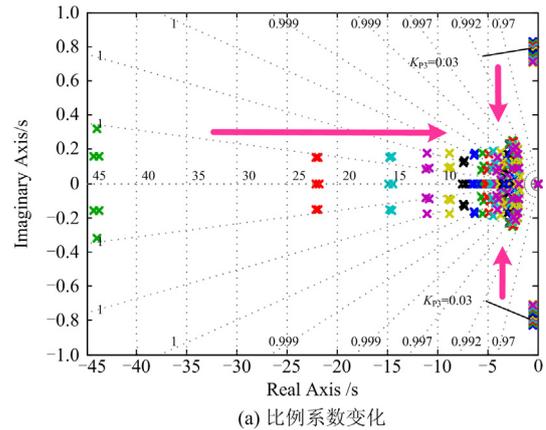


(b) 积分系数变化

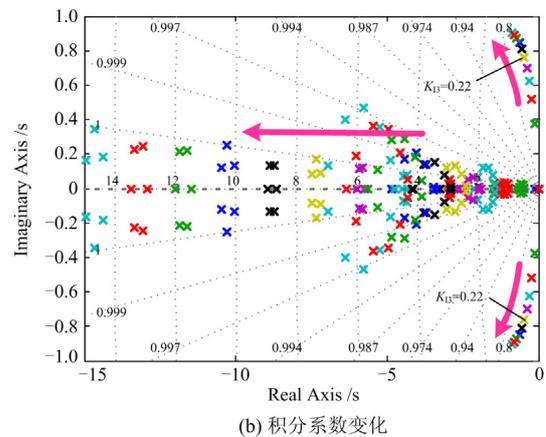
图 9 第二 PI 控制器参数变化主导极点变化趋势
Fig. 9 The second PI controller parameter changes dominate the pole change trend

对于整个系统, 2 号 PI 控制器在比例系数的变化下能保持稳定, 但积分系数的增大会导致系统稳定性下降。

图 10 为系统在保持其余参数不变的情况下, 改变 3 号 PI 控制器比例系数和积分系数的主导极点分布变化趋势图。图 10(a)中, 比例系数从 0 增大到



(a) 比例系数变化



(b) 积分系数变化

图 10 第三 PI 控制器参数变化主导极点变化趋势
Fig. 10 The third PI controller parameter changes dominate the pole change trend

0.06, 每次递增 0.005, 图中靠近虚轴的一对主导极点逐渐下移靠近实轴, 原先分布于实轴的零极点逐渐靠近原点, 系统阻尼逐渐增大, 调节时间变小, 超调量也逐渐减小。

图 10(b)中, 积分系数从 0 增大到 0.44, 每次递增 0.044。图中一对主导极点逐渐远离实轴, 原先分布于实轴附近的零极点逐渐远离原点, 系统阻尼减小, 调节时间变大, 超调量也逐渐增大。在第三 PI 参数变化的整个过程中, 零极点始终保持在 S 平面左半平面, 系统保持稳定。

图 11 为系统在保持其余参数不变的情况下, 改变阻性负载的大小时的极点分布变化趋势图。阻性负载逐渐加重, 阻值从 $10\ \Omega$ 减小到 $5\ \Omega$, 每次递减 $1\ \Omega$, 负载功率由 $16\ \text{kW}$ 逐渐加重到 $32\ \text{kW}$ 。图 11 中一对共轭主导极点逐渐靠近实轴, 系统阻尼逐渐增大, 调节时间变小, 超调量也逐渐减小, 系统极点分布始终保持在 S 平面左半平面, 系统保持稳定。

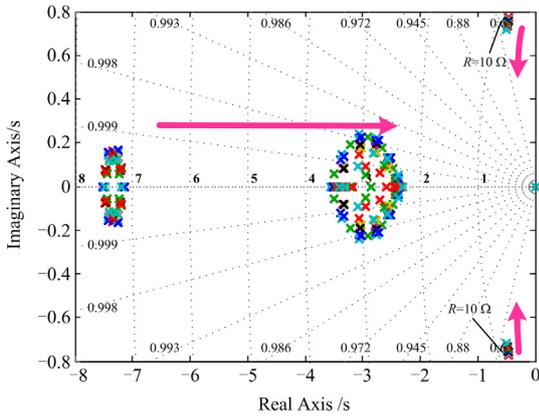


图 11 阻性负载变化主导极点变化趋势
Fig. 11 Change of resistive load dominates the trend of pole change

4 仿真分析

为了验证所提出控制策略有效性, 在 PLECS 软件仿真平台搭建图 4 所示结构的直流微网进行多工况仿真测试。仿真模型中的通信拓扑采用图 3 所示交叉通信拓扑。

在 PLECS 仿真中, 6 个 BOOST 直流变换器的电路参数选取与表 1 系统参数一致, 常数权重 ε 取 $2/9$, 得到仿真结果:

考虑负载跳变情况, 如图 12 所示。直流母线上阻性负载在 $10\ \Omega$ 和 $5\ \Omega$ 之间跳变, 负载功率由 $16\ \text{kW}$ 变为 $32\ \text{kW}$, 最后变回 $16\ \text{kW}$ 。图 4 中开关 SwitchR 闭合负载加重时, 母线电压电压降约 7.5%, 超调量 2.5%, 经过约 0.4 s 调整回参考电压值 $400\ \text{V}$, 稳态误差为 0。负载减轻时, 母线电压电压上升

8.25%, 经过约 0.4 s 调节时间, 稳态误差为 0。如图 13 所示, 负载跳变后, 输出电流变得不一致, 经过约 0.36 s 调整后, 各变换器输出电流重新收敛。

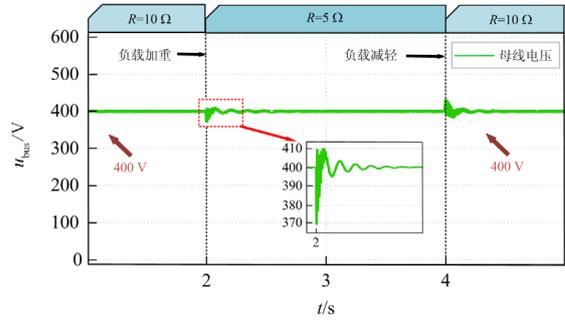


图 12 负载跳变母线电压波形

Fig. 12 Bus voltage waveform under load jump

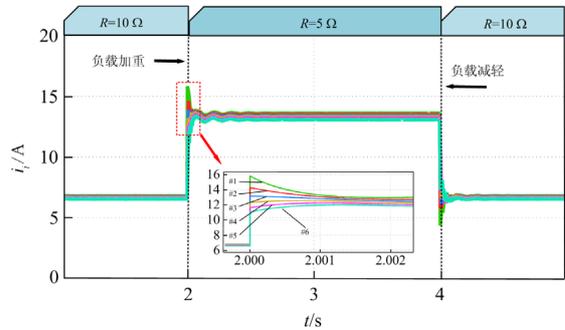


图 13 负载跳变输出电流波形

Fig. 13 Output current waveform under load jump

图 14 表示在图 12 和图 13 的负载工况下, 6 个变换器各自的参考电压补偿量及下垂系数修正量波

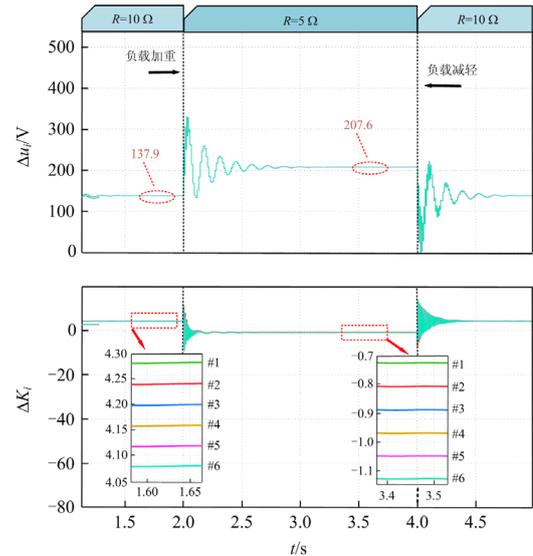


图 14 负载跳变时电压补偿量及下垂系数修正量波形

Fig. 14 Reference voltage compensation and droop coefficient correction waveform under load jump

形。图 14 证明了公式(9)的正确性, 以负载加重后 #1 变换器为例。从图 14 中得到数据, 下垂系数修正量-0.73, 表 1 中#1 变换器输出线路阻抗取 $1\ \Omega$ 、下垂系数取 15, 输出电流从图 13 得到约为 13.6 A, 按照公式(9)计算得到参考电压补偿量 207.67。在排除读数误差后, 仿真结果符合理论分析。

当变换器故障时, 微网结构改变。图 15 和图 16 表示 4 号变换器脱机后直流母线电压和各变换器输出电流。在 $t=2\text{ s}$ 时, #4 变换器脱机。在图 15 中, 在#4 变换器脱离以后, 通信拓扑改变, 由原来六变换器结构改变为五变换器结构。直流母线电压经过一定的调节时间重新恢复到参考电压, 说明控制策略的抗干扰能力。母线电压电压降约 1.58%, 经过约 0.4 s 调整回参考电压 400 V, 稳态误差为零。在图 16 中, 通信拓扑改变后, 4 号变换器输出电流为 0, 其余变换器输出电流经过约 0.1 s 重新收敛一致。

图 17 表示在#4 变换器脱机工况下, 6 个变换器

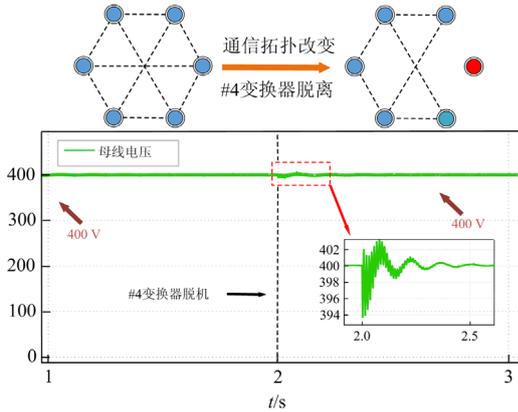


图 15 #4 变换器脱离母线电压波形

Fig. 15 Bus voltage waveform when the #4 converter is disconnected

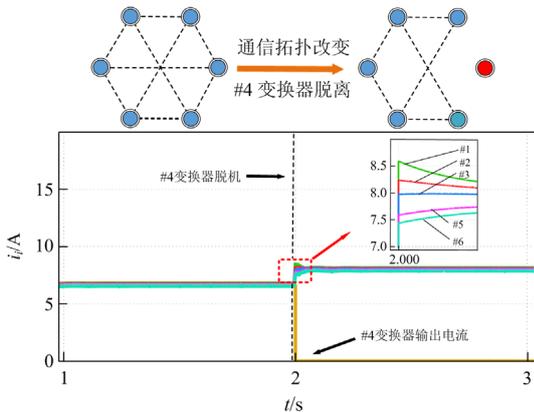


图 16 #4 变换器脱离时输出电流波形

Fig. 16 Output current waveform when the #4 converter is disconnected

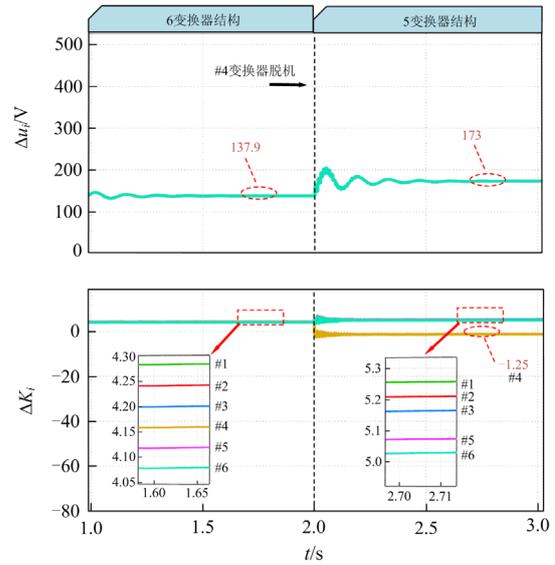


图 17 #4 变换器脱离时电压补偿及下垂系数修正波形

Fig. 17 Reference voltage compensation and droop coefficient correction waveform when the #4 converter is disconnected

各自的参考电压补偿量及下垂系数修正量波形。与图 14 分析同理, 在排除读数误差后, 仿真结果符合理论分析, 满足公式(9)。

仿真结果表明所提出的控制策略能够很好地适应负载突变和变换器脱机复杂工况。当微网结构改变时, 控制策略无需改变, 母线电压经过一定的调节时间能很快达到零稳态误差。各变换器输出电流也能很快重新达到一致, 实现功率均分。

5 结论

本文针对传统下垂控制和集中式控制局限性, 提出了基于电流一致性的直流微电网自适应下垂控制策略。

1) 分析了传统下垂控制的局限性, 传统下垂控制能在一定程度上提高功率均分效果, 但这种控制并不能同时兼顾母线电压控制和功率均分控制。

2) 通过提出的自适应控制策略进行参考电压补偿、下垂系数修正, 在微网结构改变等工况下也能达到准确的功率均分和母线电压控制。

3) 分析了各控制参数变化对系统的影响。最后通过仿真证明所提控制策略具有良好控制效果, 系统能保持稳定, 适应复杂工况, 经过一定的调节时间, 母线电压能达到稳态误差为零且功率重新均衡。

参考文献

[1] 孟欣, 王丹, 张子阳, 等. 面向电能交易的用户级直流微网母线电压分层控制策略研究[J]. 电力系统保护与

- 控制, 2021, 49(4): 54-63.
- MENG Xin, WANG Dan, ZHANG Ziyang, et al. Research on hierarchical control strategy of a user level DC microgrid bus voltage for electricity trading[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 54-63.
- [2] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
- WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [3] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
- LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [4] 杜祥伟, 沈艳霞, 李静. 基于模型预测控制的直流微电网混合储能能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 69-75.
- DU Xiangwei, SHEN Yanxia, LI Jing. Energy management strategy of DC microgrid hybrid energy storage based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 69-75.
- [5] MENG Xin, ZHU Yanbin, LIU Lei, 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.
- [6] 张天翼, 郑凯元, 王海风. 聚合相同分布式电源对直流微电网高频振荡稳定性的影响[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 103-108.
- ZHANG Tianyi, ZHENG Kaiyuan, WANG Haifeng. Impact of large number of same aggregated distributed generators on the high-frequency oscillatory stability of a DC microgrids[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 103-108.
- [7] 余雪莹, 李华强, 杨龙杰, 等. 兼顾企业综合成本与用户用电体验的微电网双层优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 38-45.
- YU Xueying, LI Huaqiang, YANG Longjie, et al. Bi-level programming method for optimal sizing of grid-connected DC microgrid system based on economic efficiency of enterprises and customer electricity experience[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 38-45.
- [8] 孙石涛, 王久和. 直流微网混合无源控制及系统分层控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(6): 35-41.
- SUN Shitao, WANG Jiuhe. Hybrid passivity-based control of DC microgrid and hierarchical control strategy for system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(6): 35-41.
- [9] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [10] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-11.
- ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A microgrid control strategy based on adaptive drooping coefficient adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-11.
- [11] 刘宿城, 吴亚伟, 李中鹏, 等. 带母线电压多级补偿的直流微网下垂控制策略[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(2): 248-254.
- LIU Sucheng, WU Yawei, LI Zhongpeng, et al. Droop control strategy with bus multi-level compensation for DC microgrid[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(2): 248-254.
- [12] 袁娜娜, 王允建, 张君, 等. 直流微网中基于 SOC 的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 17-23.
- YUAN Nana, WANG Yunjian, ZHANG Jun, et al. Improved droop control based on SOC in DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 17-23.
- [13] BRAITOR A C, KONSTANTOPOULOS G C, KADIRKAMANATHAN V. Current-limiting droop control design and stability analysis for paralleled boost converters in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(1): 385-394.
- [14] 周焯, 汪可友, 李国杰, 等. 基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 142-149.
- ZHOU Ye, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Distributed hierarchical control for microgrid based on multi-agent consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 142-149.
- [15] 王岳, 杨国华, 董晓宁, 等. 基于多智能体一致性的微电网无功功率分配方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 54-60.
- WANG Yue, YANG Guohua, DONG Xiaoning, et al. Study on reactive power distribution method of microgrid based on multi-agent consistency[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 54-60.
- [16] 梁海峰, 丁锦睿, 边吉. 考虑通信延时的直流微网分组一致性控制策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学

- 学版), 2021, 48(2): 20-29, 39.
- LIANG Haifeng, DING Jinrui, BIAN Ji. Research on control strategy of DC microgrids based on group consensus algorithm considering communication delay[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(2): 20-29, 39.
- [17] SAMENDE C, BHAGAVATHY S M, MCCULLOCH M. Power loss minimisation of off-grid solar DC nano-grids—part II: a quasi-consensus-based distributed control algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 38-46.
- [18] CHEN Z, YU X, XU W, et al. Modeling and control of islanded DC microgrid clusters with hierarchical event-triggered consensus algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(1): 376-386.
- [19] 李一琳, 董萍, 刘明波, 等. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协调控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 96-103.
- LI Yilin, DONG Ping, LIU Mingbo, et al. Distributed coordinated control of DC microgrid based on finite-time consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 96-103.
- [20] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
- ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [21] 郝然, 艾芊, 朱宇超. 基于多智能体一致性的能源互联网协同优化控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 10-17, 57.
- HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao. Cooperation optimal control of energy internet based on multi-agent consistency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 10-17, 57.
- [22] 韩民晓, 许冬, 万磊. 基于一致性算法的混合多端直流自律分散控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 130-136.
- HAN Minxiao, XU Dong, WAN Lei. Consensus algorithm based decentralized autonomous control of hybrid multi-terminal direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 130-136.
- [23] 汤茂东, 曲小慧, 姚若玉, 等. 基于离散一致性算法的直流配电网多光伏协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 89-95.
- TANG Maodong, QU Xiaohui, YAO Ruoyu, et al. Multi-photovoltaic coordinated control strategy in DC distribution network based on discrete consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 89-95.
- [24] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4397-4407.
- LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4397-4407.
- [25] 刘彦呈, 庄绪州, 张勤进, 等. 基于虚拟频率的直流微电网下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1693-1702.
- LIU Yancheng, ZHUANG Xuzhou, ZHANG Qinjin, et al. A virtual current-frequency droop control in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1693-1702.
- [26] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [27] MENG L, DRAGICEVIC T, ROLDAN-PEREZ J, et al. Modeling and sensitivity study of consensus algorithm-based distributed hierarchical control for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1504-1515.
- [28] 林成嘉. 直流微电网协调控制策略及实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- LIN Chengjia. Coordinated control strategy and experimental research of DC micro grid[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2022-02-07

作者简介:

曾浩(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网控制稳定性、电能质量; E-mail:HaoZeng2020@163.com

赵恩盛(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网稳定性分析及其协调控制技术; E-mail:zhaoens@163.com

韩杨(1982—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电能质量。E-mail: hanyang@uestc.edu.cn

(编辑 葛艳娜)