

基于改进下垂控制的直流微电网稳定性判据

李秋良, 汤赐, 杨杰, 王振中, 周诗卉, 罗敏, 王佳怡

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

摘要: 针对传统下垂控制中储能单元变换器输出电流分配不均及电压跌落问题, 提出了一种改进方案。首先在传统下垂控制基础上引入交流小信号扰动, 构建频率-电流复合下垂控制策略, 实现直流微电网中分布式电源变换器的精确比例电流分配; 其次, 基于混合势函数理论推导改进下垂控制下微电网的大扰动稳定性判据; 最后, 通过 MATLAB/Simulink 仿真验证表明, 所提出的频率下垂控制策略能有效实现变换器电流的精确分配, 同时稳定性判据正确有效, 并确定了特定直流微电网结构参数下的恒功率负载突增临界范围及电压控制器参数可行域。

关键词: 直流微电网; 叠加频率; 下垂控制; 混合势函数; 稳定性判据

Stability Criterion of DC Microgrid Based on Improved Droop Control

LI Qiuliang, TANG Ci, YANG Jie, WANG Zhenzhong, ZHOU Shihui, LUO Min, WANG Jiayi

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

Abstract: To address the issues of uneven output current distribution and voltage drop in energy storage unit converters under traditional droop control, an improved scheme is proposed. Firstly, an AC small-signal disturbance is introduced on the basis of traditional droop control to formulate a frequency-current composite droop control strategy, achieving precise proportional current distribution among distributed power converters in DC microgrids. Secondly, the large-signal stability criterion for microgrids under the improved droop control is derived based on mixed potential function theory. Finally, MATLAB/Simulink simulations demonstrate that the proposed frequency droop control strategy effectively achieves accurate current distribution in converters while validating the correctness and effectiveness of the stability criterion. Additionally, the critical range for sudden increases in constant power loads and the feasible domain for voltage controller parameters are determined for specific DC microgrid structural parameters.

Key words: DC microgrid; superimposed frequency; droop control; mixed potential function; stability criterion

0 引言

随着新能源发电技术的迅猛发展, 包含有光伏、风机、储能单元的直流微电网因其具有良好的经济性与灵活性被提了出来^[1-2]。分布式微源构成的直流微电网存在负荷电流的分配问题, 如何实现各分布式微源间精确的电流分配是急需解决的问题^[5-6]。目前, 研究较多的电流分配控制方法是下垂控制^[7], 传统的下垂控制存在一些固有的缺陷^[8], 比如在多变换器并联运行时, 由于各变换器

的线路电阻不同而造成变换器输出电流不能按照微源容量成比例分配, 同时下垂控制还会引起电压跌落的问题^[9-10]。针对这些问题, 文献[11]提出了改变下垂系数的方法, 根据微电网运行情况设置下垂系数以达到均流目的, 但是该方法在微源数目较多时, 各微源的下垂系数难以合理的设置, 并且仍然存在电压跌落问题。文献[12]提出一种考虑时变线阻的荷电状态(state of charge, SOC)均衡改进下垂控制策略, 通过线路阻抗和SOC幂指数构造的平衡因子来修正下垂系数以保证电流精确分配, 但是该策略需要测量阻抗, 增加了控制的复杂性。因此急需一种能够根据微电网系统运行情况自行达到微源电流精确分配目标的改进下垂控制策略。

目前, 少有文章针对改进下垂控制策略进行稳定性方面的研究, 改进后的下垂控制策略究竟能否

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977013); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2265)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977013); the National Natural Science Foundation of Hunan Province(2017JJ2265)。

让微电网稳定运行是一个值得研究的问题。目前针对下垂控制的直流微电网稳定性研究多是围绕小干扰展开的^[13]，例如文献[14]针对2种同步机制下的双馈风电系统，基于数学方程分别得出相应的小扰动模型，进而利用 Lyapunov 特征值分析法对系统小干扰稳定性进行研究；文献[15]研究混联多微电网系统低频范围小信号稳定性，分析由于多个微电网接入导致的动态交互作用及对系统稳定性的影响。然而在遇到恒功率负载(constant power load, CPL)突增等大扰动时，小干扰分析法就不再适用^[16]，而需要大信号稳定性分析的方法。

直流微电网呈现出高阶非线性和强耦合的特点，如果对其进行详细的建模将会使的计算过程变得非常复杂，很难得到理想结果^[17-18]，故现在大多采用降阶模型来分析其大信号稳定性^[19]，常用的大稳定性分析方法有 Lyapunov 直接法^[20-21]、混合势函数分析法^[22-27]。应用 Lyapunov 直接法的难点在于难以建立各电力电子器件的 Lyapunov 函数，文献[20]通过扇区非线性方法建立了模糊模型，构建了系统能量函数并采用 Lyapunov 直接法计算了稳定吸引域；文献[21]在传统下垂控制基础上，建立了有功功率分配、有功功率-频率和无功功率-电压的二阶动态模型，通过 Lyapunov 直接法验证了系统的渐进稳定性。Lyapunov 直接法将原系统建立为由电压源、虚拟电阻等构成的二阶模型，难以进一步分析控制器参数的影响，并且均未给出解析形式的稳定性判据，对于系统的参数设计指导意义较弱。应用混合势函数理论分析可以得到包括控制器参数、电路参数的大信号稳定性判据。文献[22-23]基于混合势函数法计算得到了具有阻尼滤波器的 CPL 系统的稳定性判据，虽然该方法具有一定的保守性，但是更加简便易行，其只是针对单个电源系统进行分析研究。文献[24]对于含有多个电源直流微电网进行稳定性分析，提出了一种基于混合势函数理论的稳定性判据推导方法，并得出了直流微电网的稳定性判据。文献[25]提出直流电压下垂控制换流器的具备完整状态变量集的改进等效电路模型，并基于混合势函数理论推导了直流微电网大信号稳定判据及其稳定域。文献[26]建立双向直流变流器的混合势函数，推导包含有控制器限幅大信号稳定性判据并研究其对稳定性的影响。文献[27]在运用混合势函数进行大信号稳定性分析时，重点考

虑了下垂控制器参数的影响。混合势函数理论应用在直流微电网进行稳定性分析的研究已经取得了一些成果，对于采用改进下垂控制的微网，可用此法对下垂系数、电压控制器参数等进行合理设计以确保直流微电网的稳定运行。

综上所述，本文采用了一种改进下垂控制的方法，并在此基础上应用混合势函数理论进行稳定性分析。首先在传统下垂控制的基础上叠加一个交流小信号，构建了一个频率/电流的下垂控制方法，达到直流微电网中分布式电源的变换器输出电流按比例分配的目的，并采用 PI 控制进行母线电压补偿，在此基础上运用混合势函数理论推导出本文所提微电网大扰动稳定性判据，最后通过仿真验证本文所提出的稳定性判据的有效性。

1 直流微电网下垂控制

1.1 传统下垂控制

典型孤岛直流微电网的拓扑结构如图 1 所示，主要包含光伏、风力发电机单元和储能单元以及负荷，其中储能单元以 DC/DC 变换器连接至直流母线。本文主要针对 DC/DC 变换器展开研究，以两台变换器为例。传统的下垂控制中，由于各个线路的阻抗不一致，各个线路所流过的电流大小会有差异，存在环流，对微电网的稳定运行产生不利影响。

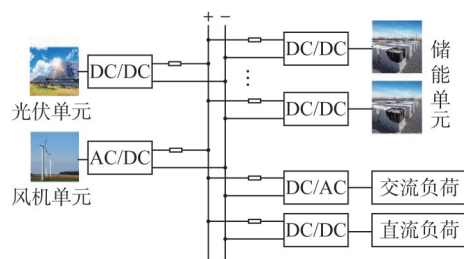


图 1 直流微电网拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of the DC microgrid

传统的下垂控制等效电路如图 2 所示。

图 2 中 u_{o1} 、 u_{o2} 分别为 DC/DC 变换器两个支路的输出电压， i_{o1} 、 i_{o2} 分别为 DC/DC 变换器两个支路的输出电流， k_1 、 k_2 为下垂控制的下垂系数， R_1 、 R_2 分别为两个支路的线路阻抗， R_L 为负载， u_{bus} 为直流母线电压。

传统的下垂控制表达式为：

$$u_{ref,i} = u_N - k_i i_{oi} \quad (1)$$

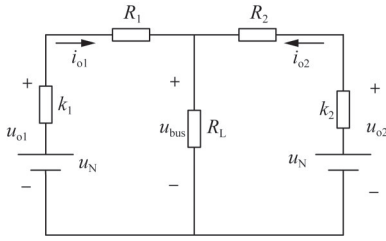


图2 下垂控制等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of droop control

式中: u_N 为额定电压; $u_{ref,i}$ 为控制器电压给定值; k_i 为下垂控制的下垂系数; i 为支路编号, $i=1, 2$ 。

直流母线电压 u_{bus} 的表达式为:

$$u_{bus} = u_{ref,i} - R_i i_{oi} \quad (2)$$

把式(1)代入式(2)中可得:

$$u_{bus} = u_N - (R_i + k_i) i_{oi} \quad (3)$$

可以得到两变换器输出电流 i_{o1} 、 i_{o2} 的比值为:

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{k_2 + R_2}{k_1 + R_1} \quad (4)$$

由式(4)可知,下垂控制中变换器的输出电流的分配精度会受到下垂系数和线路阻抗的共同影响,固定下垂系数的下垂控制不能使变换器的输出电流按比例精准分配,应该对下垂系数加以改进并满足式(5),提高变换器间的输出电流分配精度。

$$k_1 + R_1 = k_2 + R_2 \quad (5)$$

对于传统的下垂控制,下垂系数 k_i 一般取变换器最大允许输出电压变化量 ΔU_{max} 与变换器的额定输出电流 I_N 的比值,其表达式为:

$$k_i = \frac{\Delta U_{max}}{I_N} \quad (6)$$

1.2 叠加频率下垂控制

针对传统的下垂控制导致的变换器间电流分配精度不足问题,本文采用一种基于叠加交流信号的频率下垂控制以提高电流分配精度。

叠加频率下垂控制借鉴交流系统中的下垂控制,在控制器中施加一个小的交流电压控制信号,借鉴交流功率的分配方法构建频率/电流下垂控制,实现变换器间合理的电流分配。所施加的交流电压的小信号为:

$$\tilde{v} = A \sin(2\pi f_i t) \quad (7)$$

式中: A 为交流电压信号的幅值, A 的大小选取应合适, A 若过大会使得变换器输出端电压存在较大的电压纹波, A 选取过小则会导致检测不到交流电压信号; f_i 为频率; t 为时间。

所构建的交流频率 f_i 与输出直流电流 i_{oi} 的下垂表达式为:

$$f_i = f^* - d_{fi} i_{oi} \quad (8)$$

式中: d_{fi} 为频率下垂系数; f^* 为额定频率。

变换器的交流电压信号的相位角 φ_i 为:

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{s} (f^* - d_{fi} i_{oi}) \quad (9)$$

式中 s 为积分算子。

根据所构建的频率电流下垂特性可知,当变换器间的输出电流不一致时变换器所叠加的交流信号的频率必然会不一致,从而使两交流信号会存在相位差,由于线路阻抗会远小于负载阻抗,两交流信号的幅值相同,在频率较小的情况下由于相位差而产生的环流可近似认为其只会在变换器间流动,两变换器叠加信号的相位差 φ 为:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{s} (d_{f2} i_{o2} - d_{f1} i_{o1}) \quad (10)$$

式中 d_{f1} 和 d_{f2} 为频率下垂系数。

两交流信号所产生的无功功率为:

$$Q_1 = \frac{A^2}{2(R_1 + R_2)} \sin \varphi = -Q_2 \quad (11)$$

式中 Q_1 、 Q_2 分别为变换器1和变换器2的无功功率。

变换器间所流动的无功功率与交流信号的幅值和相位差有关,可以利用无功功率来调整变换器所输出的电压,从而达到利用交流信号的输出功率对变换器输出直流电流进行调整的目的,变换器的输出电压参考值 $u_{ref,i}$ 为:

$$u_{ref,i} = u_N - d_q G(s) Q_i \quad (12)$$

式中: d_q 为电压功率耦合增益; $G(s)$ 为一个消除计算所得无功功率中高频分量的一阶低通滤波器; Q_i 为第 i 个变换器的无功功率。式(12)可等效为:

$$\begin{cases} u_{ref,i} = u_N - \frac{d_q G(s) Q_i}{i_{oi}} i_{oi} \\ \hat{k}_i = \frac{d_q G(s) Q_i}{i_{oi}} \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\hat{k}_i$ 为等效下垂系数。

由式(13)可知,两交流信号所产生的无功功率存在最大值 Q_{max} , 该最大值在 $\varphi = 90^\circ$ 时取得,也即是叠加频率下垂控制的等效下垂系数 $\hat{k}_i$ 存在一个最大值。

$$Q_{max} = \frac{A^2}{2(R_1 + R_2)} \sin 90^\circ = \frac{A^2}{2(R_1 + R_2)} \quad (14)$$

变化后的下垂控制表达式为:

$$\begin{cases} u_{\text{ref},i} = u_N - k_i^* i_{oi} \\ k_i^* = k_i + \hat{k}_i \end{cases} \quad (15)$$

式中 k_i^* 为变化后的下垂系数。

由于 $Q_1 = -Q_2$, 所以 $|\hat{k}_1| = |\hat{k}_2|$, 当系统最终稳定运行时满足式(5), 在直流微电网自适应等效下垂系数的调节过程中 $\hat{k}_1$ 、 $\hat{k}_2$ 会不断变化, 最终有:

$$|\hat{k}_1| = |\hat{k}_2| = \frac{|R_1 - R_2|}{2} \quad (16)$$

1.3 直流母线电压二次补偿

由于下垂控制的引入和线路阻抗的存在, 如若不对直流母线电压进行二次补偿, 会使得直流母线电压偏离额定值。本文通过 PI 控制器对母线电压实现精确地恢复到额定值, 不会存在补偿不足或者过度补偿的问题。母线电压二次补偿值 Δu 的表达式为:

$$\Delta u = \left(k_{p\Delta} + \frac{k_{i\Delta}}{s} \right) (u_N - u_{\text{bus}}) \quad (17)$$

式中: $k_{p\Delta}$ 为 PI 控制器的比例系数; $k_{i\Delta}$ 为 PI 控制器的积分系数。

补偿后的变换器输出电压参考值为:

$$u_{\text{ref},i} = u_N - k_i^* i_{oi} + \Delta u \quad (18)$$

式中 Δu 为母线电压二次补偿值。

1.4 变换器双环控制

本文采用电压电流双环控制的方法来控制变换器的输出电压, 其控制结构如图 3 所示, 图 3 中 k_{vp} 、 k_{vi} 为电压控制器的比例积分系数, k_{ip} 、 k_{ii} 为电流控制器的比例积分系数, d_i 为变换器的占空比。

综上所述, 本文针对传统下垂控制中变换器输出电流分配精度不足的问题, 采用一种基于叠加交流信

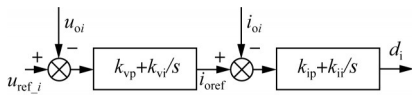


图 3 电压电流双环控制结构

Fig. 3 Voltage and current double-loop control structure

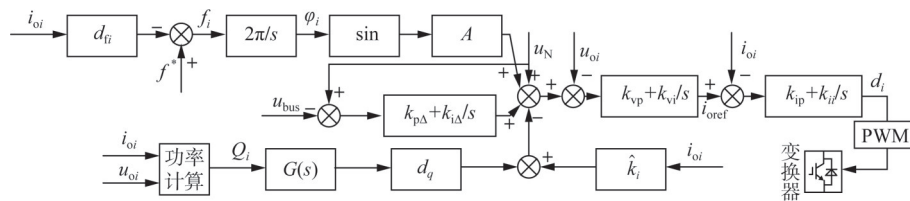


图 4 变换器控制结构

Fig. 4 Control structure of the converter

号频率的下垂控制, 提高了电流分配精度; 采用 PI 控制对母线电压进行二次补偿, 使得母线电压实际值能够跟踪额定值。变换器的控制结构如图 4 所示。

本文采用叠加交流信号的方式来实现变换器的电流精确分配, 在实际应用时由于线路电阻和负载的存在会产生测量偏差, 而本文中将叠加交流信号频率作为采样控制信号是, 这是一个全局变量, 从而可以将测量偏差带来的影响消除。

2 基于叠加频率下垂控制策略的运行稳定性研究

本文所采用的基于叠加频率的改进下垂控制运行的稳定性与等效下垂控制系数以及所带的 CPL 的大小有关系, 运用混合势函数理论对所提出的策略进行稳定性分析。

2.1 混合势函数理论

混合势函数理论是一种关于电容电压和电感电流的标量函数, 可以用来描述大部分的两端口非线性 RLC 动态网络平衡点的稳定性。Brayton and Moser 证明了混合势函数的存在并且给出了一种构造混合势函数的算法。一般来说混合势函数 $P(i, v)$ 可以表达为:

$$P(i, v) = -A(i) + B(v) + (i, \gamma v - \alpha) \quad (19)$$

式中: $A(i)$ 为电路中非储能元件的电流势函数; $B(v)$ 为非储能元件的电压势函数; $(i, \gamma v - \alpha)$ 为能量函数; i 、 v 分别为电路中非储能元件的电流与电压。得到混合势函数后可通过式(20)验证其是否正确。

$$\begin{cases} L \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{\partial P(i, v)}{\partial i} \\ C \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial P(i, v)}{\partial v} \end{cases} \quad (20)$$

本文运用混合势函数理论的第三条稳定性定理, $A_{ii}(i) = \frac{\partial^2 A(i)}{\partial i^2}$, $B_{vv}(v) = \frac{\partial^2 B(v)}{\partial v^2}$, 令 μ_1 为矩

阵 $L^{-1/2}A_{ii}(i)L^{-1/2}$ 的最小特征值, μ_2 为矩阵 $C^{-1/2}B_{vv}(v)C^{-1/2}$ 的最小特征值, L 为电路中所有电感组成的对角矩阵, C 为电路中所有电容组成的对角矩阵。若电路中所有的 i 和 v 均满足:

$$\mu_1 + \mu_2 > 0 \quad (21)$$

且当 $|i| + |v| \rightarrow \infty$ 时, 有:

$$P^*(i, v) = \left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \right) P(i, v) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial P(i, v)}{\partial i}, \frac{1}{L} \frac{\partial P(i, v)}{\partial i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial P(i, v)}{\partial v}, \frac{1}{C} \frac{\partial P(i, v)}{\partial v} \right) \rightarrow \infty \quad (22)$$

式中: $P(i, v)$ 为系统的混合势函数; $P^*(i, v)$ 为该系统的重构混合势函数。

则不论该电路中的电压电流怎样变化, 系统最终都会趋于稳定。

2.2 微电网的混合势函数稳定性判据推导

对于一个孤岛直流微电网来说, 通常包含有风机和光伏等分布式微电源、负载、储能单元、以及大量的电力电子变换器等, 其中分布式微电源一般以最大功率点跟踪 (maximum power point track, MPPT) 模式运行, 可以将其与 CPL 合并为一个 CPL, 每个储能单元各连接有一个双向 DC/DC 变换器, 使其既能充电又能放电, 经过上述假设的等效孤岛直流微电网的混合势函数分析模型如图 5 所示, 图中 i_c 为电容电流, i_{cpl} 为恒功率负载电流。图 5 中对变换器侧的稳压电容做近似处理, 把电容直接等效到母线处, 结果产生的误差很小, 但是更利于分析, $C = C_1 + C_2 + C_{bus}$, C_1 、 C_2 分别为两变换器的出口电容, C_{bus} 为母线电容。

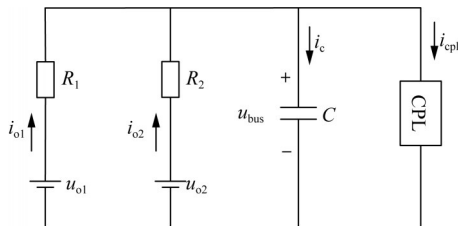


图 5 混合势函数分析模型

Fig. 5 Analysis model of mixed potential function

电源和线路电阻元件的电流势函数为:

$$\begin{aligned} \int \sum_{\gamma_1} v_{\gamma_1} di_{\gamma_1} &= \int_0^{i_{o1}} (u_{o1} - R_1 i) di + \int_0^{i_{o2}} (u_{o2} - R_2 i) di \\ &= u_{bus} (i_{o1} + i_{o2}) - \int_0^{u_{bus}} i_{o1} dv - \int_0^{u_{bus}} i_{o2} dv \end{aligned} \quad (23)$$

式中: γ_1 为电源支路的数量; u_{bus} 为母线电压。

CPL 的电流势函数为:

$$\int \sum_{\gamma_2} v_{\gamma_2} di_{\gamma_2} = - \int_0^{i_{cpl}} \frac{P_{cpl}}{i_{cpl}} di_{cpl} = -P_{cpl} + \int_0^{u_{bus}} \frac{P_{cpl}}{v} dv \quad (24)$$

式中: P_{cpl} 为 CPL 的功率; γ_2 为 CPL 的数量; i_{cpl} 为 CPL 的电流。

电容支路的电流、电压乘积为:

$$\begin{aligned} \sum_{\sigma} i_{\sigma} v_{\sigma} &= -u_{bus} (i_{o1} + i_{o2} - \frac{P_{cpl}}{u_{bus}}) \\ &= -u_{bus} (i_{o1} + i_{o2}) + P_{cpl} \end{aligned} \quad (25)$$

式中 σ 为电容支路的数量。

式(23)—(25)之和即为图 5 所示模型的混合势函数, 如式(26)所示。

$$P(i, v) = - \int_0^{u_{bus}} i_{o1} dv - \int_0^{u_{bus}} i_{o2} dv + \int_0^{u_{bus}} \frac{P_{cpl}}{v} dv \quad (26)$$

根据式(19)可知:

$$\begin{cases} A(i) = 0 \\ B(v) = - \int_0^{u_{bus}} i_{o1} dv - \int_0^{u_{bus}} i_{o2} dv + \int_0^{u_{bus}} \frac{P_{cpl}}{v} dv \end{cases} \quad (27)$$

式中 $A(i)$ 、 $B(v)$ 分别为系统的电流势函数和电压势函数。

对式(27)分别求导, 有:

$$\begin{cases} A_{ii}(i) = 0 \\ B_{vv}(v) = \frac{\partial^2 B(v)}{\partial v^2} = - \frac{\partial i_{o1}}{\partial u_{bus}} - \frac{\partial i_{o2}}{\partial u_{bus}} - \frac{P_{cpl}}{u_{bus}^2} \end{cases} \quad (28)$$

式中 $A_{ii}(i)$ 、 $B_{vv}(v)$ 分别为电流势函数和电压势函数的二阶偏导数。

求得 μ_1 和 μ_2 的表达式如式(29)所示。

$$\begin{cases} \mu_1 = 0 \\ \mu_2 = \frac{1}{C^{-1/2}} B_{vv}(v) \frac{1}{C^{-1/2}} \\ = \frac{1}{C} \left(- \frac{\partial i_{o1}}{\partial u_{bus}} - \frac{\partial i_{o2}}{\partial u_{bus}} - \frac{P_{cpl}}{u_{bus}^2} \right) \end{cases} \quad (29)$$

根据混合势函数理论的稳定性判据, 微电网能够稳定运行的条件为:

$$\mu_1 + \mu_2 = \frac{1}{C} \left(- \frac{\partial i_{o1}}{\partial u_{bus}} - \frac{\partial i_{o2}}{\partial u_{bus}} - \frac{P_{cpl}}{u_{bus}^2} \right) > 0 \quad (30)$$

即:

$$-\frac{\partial i_{o1}}{\partial u_{bus}} - \frac{\partial i_{o2}}{\partial u_{bus}} - \frac{P_{cpl}}{u_{bus}^2} > 0 \quad (31)$$

电压电流双环控制器中的电流环控制器的响应速度远大于外环电压控制器,使得输出电流能够快速跟踪给定值,在进行分析时可以忽略电流内环,根据上文所述,可以得到变换器输出电流的表达式为:

$$i_{oi} = k_{vp}(u_N - k_i^* i_{oi} + \Delta u - u_{oi}) + k_{vi} \int_0^t (u_N - k_i^* i_{oi} + \Delta u - u_{oi}) dt \quad (32)$$

将 $u_{oi} = u_{bus} + r_i i_{oi}$ 代入式(32)有:

$$i_{oi} = k_{vp}[u_N - (k_i^* + R_i) i_{oi} + \Delta u - u_{bus}] + k_{vi} \int_0^t [u_N - (k_i^* + R_i) i_{oi} + \Delta u - u_{bus}] dt \quad (33)$$

结合式(17)和式(33),可求得:

$$\begin{cases} \frac{\partial i_{oi}}{\partial u_{bus}} = \frac{-k_{vp}(1 + k_{p\Delta}) + A}{1 + k_{vp}(k_i^* + R_i)} + \frac{k_{vi} B}{1 + k_{vp}(k_i^* + R_i)} \\ A = \frac{\partial [k_{i\Delta} \int_0^t (u_N - u_{bus}) dt]}{\partial u_{bus}} \\ B = \frac{\partial [k_{vi} \int_0^t ([u_N - (k_i^* + R_i) i_{oi} + \Delta u - u_{bus}]) dt]}{\partial u_{bus}} \end{cases} \quad (34)$$

式中 $k_{i\Delta}$ 和 $k_{p\Delta}$ 分别为母线电压二次补偿 PI 控制器的比例系数和积分系数。

对式(34)中的第一积分项 A 进行处理可以得到:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial [k_{i\Delta} \int_0^t (u_N - u_{bus}) dt]}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial u_{bus}} \\ &= k_{i\Delta} (u_N - u_{bus}) \frac{\partial t}{\partial u_{bus}} \end{aligned} \quad (35)$$

根据系统模型,有:

$$\frac{\partial t}{\partial u_{bus}} = \frac{1}{\frac{\partial u_{bus}}{\partial t}} = \frac{C}{i_c} \quad (36)$$

代入式(35)得到:

$$\frac{\partial [k_{i\Delta} \int_0^t (u_N - u_{bus}) dt]}{\partial u_{bus}} = k_{i\Delta} (u_N - u_{bus}) \frac{C}{i_c} \quad (37)$$

当电容 C 放电时,母线电压 u_{bus} 减小,电容电流 $i_c < 0$; 当电容 C 充电时,母线电压 u_{bus} 增大,电容

电流 $i_c > 0$, 所以始终会有:

$$\frac{\partial [k_{i\Delta} \int_0^t (u_N - u_{bus}) dt]}{\partial u_{bus}} < 0 \quad (38)$$

同理,式(34)的第二积分项 B 也会小于 0。考虑到式(34)中存在较多实时参数,不利于微电网系统的稳定性分析,可以忽略掉其中的积分项,这样处理会使:得计算结果与实际结果相比偏于保守,求得的稳定边界会比实际的稳定边界范围小,虽然趋于保守,但是留足了稳定裕度,更利于微电网系统的稳定运行,同时也分析起来也会更加简便。

把式(34)代入到式(31),可以得到微电网系统的稳定判据为:

$$\frac{k_{vp}(1 + k_{p\Delta})}{1 + k_{vp}(k_i^* + R_i)} + \frac{k_{vp}(1 + k_{p\Delta})}{1 + k_{vp}(k_i^* + R_i)} - \frac{P_{cpl}}{u_{bus}^2} > 0 \quad (39)$$

3 仿真分析与验证

为了验证上述稳定判据的准确性,在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 1 所示的电路拓扑结构,该孤岛直流微电网包括两个储能单元、一个 CPL、分布式发电单元,其中 CPL 已经和分布式发电单元统一合并为一个 CPL。两个储能单元的额定容量均为 60 kW,分布式发电单元额定容量总和为 250 kW。

电路主要参数如表 1 所示。

本文主要研究基于叠加频率下垂控制的直流微电网的变换器输出电流的精确分配特性、在微电网

表 1 电路主要参数

Tab. 1 Main parameters of the circuit

参数	数值
母线额定电压 V_N/V	700
线路电阻 R_f/Ω	0.5/0.8
交流信号电压幅值/V	4
交流信号额定频率 f^*/Hz	50
交流信号频率下垂系数 d_{fi}	0.06
电压功率耦合增益 d_q	15
下垂系数 k_i	1
变换器电感 L_f/mH	1.2
变换器电容 C_f/mF	1
母线电容 C_{bus}/mF	1.2
电流控制器参数	$k_{ip} = 0.05, k_{ii} = 1$
电压补偿控制器参数	$k_{p\Delta} = 1, k_{i\Delta} = 10$

遭受 CPL 突增后稳定运行的能力以及微电网中控制器参数 k_{vp} 对微电网稳定性的影响。

3.1 改进下垂控制的变换器输出电流精确分配特性

在某一工况下, 分布式发电单元保持最大出力为 40 kW, CPL 的初始功率为 80 kW, 可以将其统一等效为 40 kW 的 CPL, 后文所指的 CPL 均是指的分布式发电单元与 CPL 统一等效后的 CPL, 设置电压控制器的控制参数为 $k_{vp} = 0.05$, $k_{vi} = 1$, 微电网初始运行时采用传统的下垂控制, 运行至 3 s 时采用改进后的叠加频率下垂控制, 运行至 6 s 时 CPL 由原来的 40 kW 增加到 80 kW, 验证其是否能保持电流精确分配以及母线电压是否能保持在额定电压附近。最终得到的仿真结果如图 6 所示。

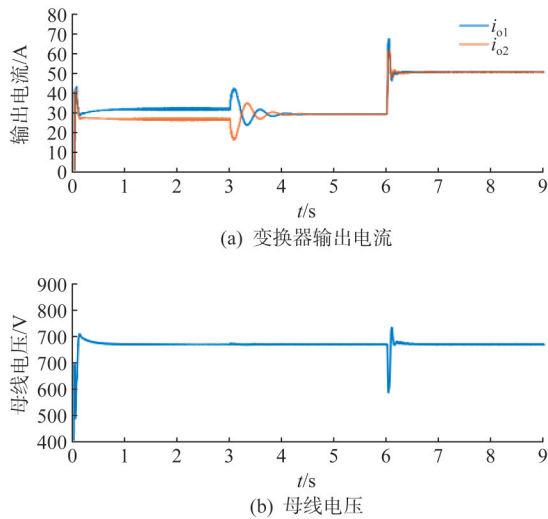


图 6 在某一工况下仿真结果

Fig. 6 Simulation results under a certain operating condition

根据仿真结果, 当采用传统下垂控制运行至 3 s 这段时间内母线电压能够稳定的运行在 700 V, 但是由于变换器到母线的线路电阻的差异, 导致两变换器的输出电流不一致; 运行至 3 s 时采用本文所述的叠加频率下垂控制, 两变换器的输出电流会在 4 s 时达到一致, 并且母线电压仍然能保持在 700 V; 运行至 6 s 时, 由于 CPL 的突增电压会在很短时间内下降, 但又会在 0.3 s 内恢复至 700 V, 说明了本文的控制策略的有效性, 同时两变换器输出电流在稳定运行后仍然能够保持一致, 进一步说明了本文所采用的叠加频率下垂控制的有效性。

3.2 大信号稳定性判据验证

根据前文所述, 本文所提出的大信号稳定判据为式(39), 为验证其正确性, 经过仿真搭建图, 分析电压控制器参数 k_{vp} 和 CPL 的功率 P_{cpl} 对微电网运行稳定性的影响。

1) P_{cpl} 的影响

设置电压控制器的参数为 $k_{vp} = 0.05$, $k_{vi} = 1$, 根据表 1 参数计算 P_{cpl} 最大值, 整理式(39), 可得:

$$P_{cpl} < 90.53 \text{ kW} \quad (40)$$

为了进一步验证运用混合势函数理论进行大信号稳定性分析的有效性, 在仿真中使用常用的 Lyapunov 特征值分析法来对直流微电网进行稳定性分析, 从而与本文所采用方法进行对比。代入电路及控制参数, 当雅可比矩阵中所有的特征根实部均小于 0 时, P_{cpl} 满足的条件为:

$$P_{cpl} < 110 \text{ kW} \quad (41)$$

设定 CPL 的初始功率为 70 kW, 微电网稳定运行至 3 s 时, CPL 设定为表 2 所示 3 种工况, 分别增加到 80 kW、92 kW 以及 100 kW, 根据其是否满足式(40)—(41), 判定其运行情况, 观察母线电压以及变换器的输出电流, 仿真结果如图 7—9 所示。

表 2 3 种扰动情况对应计算结果

Tab. 2 Three kinds of disturbance conditions correspond to the calculation results			
序号	CPL 扰动负荷情况	是否满足式(40)	是否满足式(41)
1	70~80	是	是
2	70~92	否	是
3	70~100	否	是

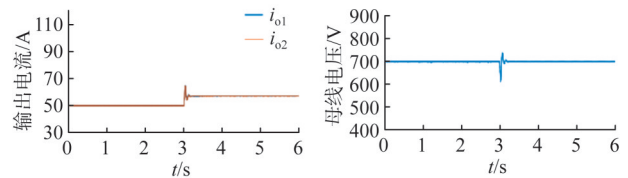
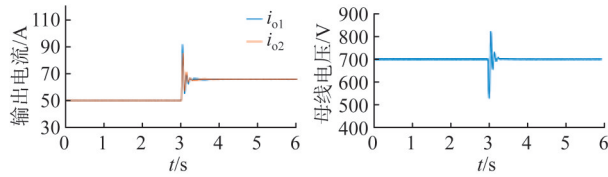
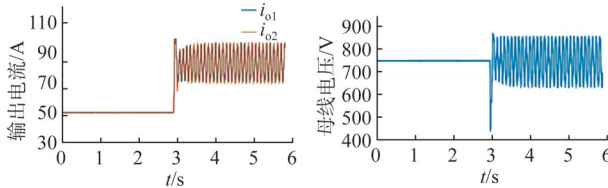


图 7 P_{cpl} 从 70 kW 突增到 80 kW 仿真结果

Fig. 7 Simulation results of P_{cpl} suddenly increased from 70 kW to 80 kW

从仿真结果可以看到, 当负载从 70 kW 突增到 80 kW 时, 满足式和式(41), 母线电压经过 0.4 s 后能够稳定在 700 V, 变换器输出电流能够稳定运行在 58 A; 当负载从 70 kW 突增到 92 kW 时, 显然不满足式(40), 能够满足式(41), 微电网仍然能够保持稳定运行, 这正如前文所述的混合势函数稳定

图 8 P_{cpl} 从 70 kW 突增到 92 kW 仿真结果Fig. 8 Simulation results of P_{cpl} suddenly increased from 70 kW to 92 kW图 9 P_{cpl} 从 70 kW 突增到 100 kW 仿真结果Fig. 9 Simulation results of P_{cpl} suddenly increased from 70 kW to 100 kW

性判据趋于保守；当负载从 70 kW 突增到 100 kW 时不满足式(40)，仍然满足式(41)，此时微电网不能稳定运行，母线电压和变换器输出电流会有振荡。说明了 Lyapunov 特征值分析法在微电网遭受大扰动时的稳定性分析失效，通过对比证明了本文所提混合势函数稳定性判据是合理且有效的。

2) 电压控制器参数的影响

设置微电网系统的扰动信号为负载从 60 kW 突增到 80 kW，根据表参数计算的最小值，整理式(39)，可得：

$$k_{vp} > 0.043\ 76 \quad (42)$$

代入电路及控制参数，根据 Lyapunov 特征值分析法，微电网能够稳定运行时， k_{vp} 满足的条件为：

$$k_{vp} > 0.032 \quad (43)$$

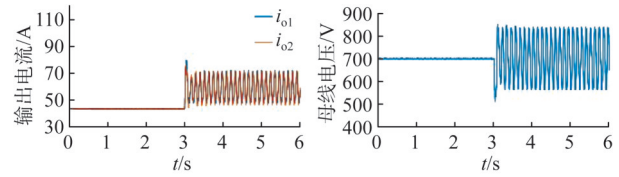
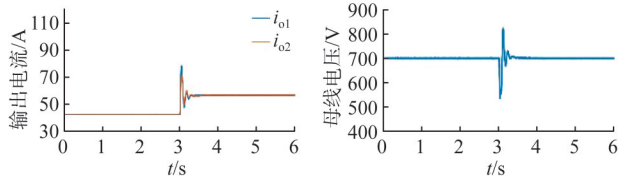
设定表 3 所示 k_{vp} 取值为 0.035、0.045 两组控制器参数，所得实验结果如图 10—11 所示。

表 3 两种电压控制器参数对应计算结果

Tab. 3 Corresponding calculation results of two kinds of voltage controller parameters

序号	k_{vp}	是否满足式(42)	是否满足式(43)
1	0.035	否	是
2	0.045	是	是

根据实验结果可知，当电压控制器参数 $k_{vp} = 0.045$ 时，满足式(42)和式(43)，微电网发生大扰动时母线电压能够稳定在 700 V，变换器输出电流能够合理分配且稳定在某一数值，微电网能够稳定

图 10 $k_{vp} = 0.035$ 的仿真结果Fig. 10 Simulation result of $k_{vp} = 0.035$ 图 11 $k_{vp} = 0.045$ 的仿真结果Fig. 11 Simulation result of $k_{vp} = 0.045$

运行；当 $k_{vp} = 0.035$ 时，不满足式(42)，仍然满足式(43)，微电网发生大扰动时母线电压和变换器输出电流会产生振荡，微电网不能稳定运行。Lyapunov 特征值分析法在此运行条件下的稳定性分析失效，进一步验证了本文所提的微电网混合势函数稳定性判据的有效性。

4 结论

本文针对传统下垂控制中储能单元变换器输出电流分配不均和电压跌落的问题，在传统下垂控制基础上提出了一种改进下垂控制的方法，通过在变流器输出测叠加一个交流小信号，构建了一个频率/电流的下垂控制方法，达到了变换器输出电流精确分配的目的，并且运用 PI 控制器对母线电压进行补偿。此外，运用混合势函数理论推导出了本文所提控制策略的大信号稳定性判据。仿真结果表明：

1) 本文提出的叠加频率下垂控制的方法可以保证变换器输出电流按比例分配，运用 PI 控制器能够保证母线电压稳定在额定值。

2) 本文运用混合势函数理论推导出的稳定性判据相对 Lyapunov 特征值分析法是合理且有效的。

3) 可以运用混合势函数理论对电路参数和控制参数进行合理设计，当 CPL 功率过大或者电压控制器参数不合理时直流微电网不能稳定运行。

参考文献

- [1] 别朝红, 任彦哲, 李更丰, 等. “双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 3-15.

- BIE Zhaohong, REN Yanzhe, LI Gengfeng, et al. Morphological structure and development path of urban energy system for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17):3-15.
- [2] 王盼宝, 徐殿国, 谭岭玲, 等. 基于改进MOPSO的多能互补型微电网多元优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10):130-140.
- WANG Panbao, XU Dianguo, TAN Lingling, et al. Multivariate optimal operation strategy of multi-energy complementary microgrid based on improved MOPSO[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10):130-140.
- [3] 张建新, 蔡镗涵, 李诗畅, 等. 利用网络等值进行图降维的图注意力暂态功角稳定评估模型[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4):30-40.
- ZHANG Jianxin, CAI Zihan, LI Shiyang, et al. Transient power angle stability evaluation model for graph attention using network equivalence for graph dimensionality reduction[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4):30-40.
- [4] 王畅, 姜宇, 傅守强, 等. 含虚拟储能直流微电网的源储荷优化控制技术[J]. 电测与仪表, 2025, 62(4):26-33.
- WANG Chang, JIANG Yu, FU Shouqiang, et al. Source-storage-load optimization control technology of DC microgrid with virtual energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(4):26-33.
- [5] 吴科成, 高志华, 刘瑞宽, 等. 考虑分布式储能功率四象限输出的主动配电网鲁棒优化调度模型[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11):75-84.
- WU Kecheng, GAO Zhihua, LIU Ruikuan, et al. Robust optimal scheduling model of active distribution network considering four-quadrant output of distributed energy storage power[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11):75-84.
- [6] 王逸超, 罗安, 金国彬, 等. 大连线阻抗环境下的微网逆变器并联运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4):858-865.
- WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin, et al. Microgrid inverter parallel operation strategy in large feeder impedance environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4):858-865.
- [7] 肖波涛, 阳国燕, 曾健, 等. 模块化组合式直流变压器的反下垂控制及其级联系统稳定性分析[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1):73-83.
- XIAO Botao, YANG Guoyan, ZENG Jian, et al. Inverse droop control and cascade system stability analysis of modular combined DC transformer[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1):73-83.
- [8] 白小丹, 苗虹, 曾成碧, 等. 适用于低压微网中逆变器无功均分的改进下垂控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4):1310-1318.
- BAI Xiaodan, MIAO Hong, ZENG Chengbi, et al. Improved droop control strategy for reactive power sharing of inverters in low-voltage microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4):1310-1318.
- [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] HAN Yang, LI Hong, SHEN Pan, et al. Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3):2427-2451.
- [11] XIAO J F, SETYAWAN L, WANG P, et al. Power-capacity-based bus-voltage region partition and online droop coefficient tuning for real-time operation of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4):1338-1347.
- [12] 卢志刚, 苗泽裕, 蔡瑶. 考虑时变线阻的多储能SOC稳定均衡控制策略. 高电压技术, 2024, 50(1):127-137.
- LU Zhigang, MIAO Zeyu, CAI Yao. Stable equilibrium control strategy for multi-energy storage soc considering time-varying linear resistance[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1):127-137.
- [13] SU M, LIU Z J, SUN Y, et al. Stability analysis and stabilization methods of DC microgrid with multiple parallel-connected DC-DC converters loaded by CPLs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1):132-142.
- [14] 韩平平, 汪宗强, 南国君, 等. 考虑同步机制的双馈风电系统小扰动建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9):47-54.
- HAN Pingping, WANG Zongqiang, NAN Guojun, et al. Small disturbance modeling and stability analysis of doubly-fed wind power system considering synchronization mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9):47-54.
- [15] 郑凯元, 杜文娟, 王海凤. 混联多微电网系统动态交互作用及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16):5552-5568.
- ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on dynamic interactions and stability of hybrid multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16):5552-5568.
- [16] GUI Yonghao, HAN Renke, GUERRERO M J, et al. Large-signal stability improvement of DC-DC converters in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3):2534-2544.
- [17] CHANG F, CUI X, WANG M, et al. Large-signal stability criteria in DC power grids with distributed-controlled converters and constant power loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6):5273-5287.
- [18] LIU S, LI X, XIA M, et al. Takagi-sugeno multimodeling-based large signal stability analysis of DC microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11):12670-12684.
- [19] 郑家柱. 直流微电网的切换系统大信号稳定性研究[D]. 合肥:安徽工业大学, 2022.
- [20] 段子越, 孟永庆, 宋博阳, 等. 基于模块化多电平矩阵换流器的柔性低频输电系统大信号稳定性分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(9):3741-3751.
- DUAN Ziyue, MENG Yongqing, SONG Boyang, et al. Large signal stability analysis of flexible low frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9):3741-3751.
- [21] 余志文, 艾芊. 基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12):150-156.
- YU Zhiwen, AI Qian. Adaptive droop control strategy for microgrid based on consensus of multi-agent system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):150-156.

(下转第130页 Continued on Page 130)