基于下垂控制的直流微电网群大信号稳定性分析

赵冠皓，肖烈禧，周　辉

（桂林理工大学机械与控制工程学院，广西 桂林 541006）

摘要：在直流微电网群中，恒功率负载会因其自身特性导致母线电压波动。以直流微电网群的母线电压为研究对象，在下垂控制的基础上对含恒功率负载的直流微电网群进行大信号稳定性分析，采用混合势函数方法分析了系统的大信号稳定性，并推导出直流微电网群的大信号稳定性判据。在 MATLAB/Simulink 中进行验证，通过直流微电网群在某个瞬间接入恒功率负载来模拟直流微电网群发生大扰动的情况，仿真结果表明，若直流微电网群的恒功率负载满足稳定性判据，则直流微电网群可保持稳定运行；若不满足稳定性判据，则系统崩溃。根据稳定性判据，通过增大电容值或减小电感值来提高系统大信号稳定性，并通过仿真实验验证了该方法的可行性。

关键词：恒功率负载；微电网群；下垂控制；稳定性判据；混合势函数理论

Large signal stability analysis of DC microgrid group based on droop control

ZHAO Guanhao, XIAO Liexi, ZHOU Hui

（College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China）

Abstract: In DC microgrid group, constant power load will lead to bus voltage fluctuation due to its own characteristics. This paper takes the bus voltage of DC microgrid group as the research object, analyzes the large signal stability of DC microgrid group with constant power load on the basis of drooping control, analyzes the large signal stability of the system by using mixed potential function method, and derives the large signal stability criterion of DC microgrid group. In MATLAB/Simulink, the DC microgrid group was connected to constant power load at a certain moment to simulate the large disturbance of DC microgrid group. The simulation results show that the DC microgrid group can maintain stable operation if the constant power load of dc microgrid group meets the stability criterion. If the stability criterion is not met, the system crashes. According to the stability criterion, the stability of large signal can be improved by increasing capacitance value or decreasing inductance value, and the feasibility of this method is verified by simulation.

Key words: constant power load; microgrid group; droop control; stability criterion; mixed potential theor

0　引言

随着电力系统的迅速发展，微电网之间互联成群已成为必然趋势[1]。微电网群的结构可以分为直流微电网群结构、交流微电网群结构和虚拟微电网群结构[2]。直流微电网群能够灵活地接纳各种直流电源和直流负荷，在电力系统中应用广泛[3]。母线电压的稳定是系统稳定运行的必要条件，由于下垂控制具有即插即用的优势，在直流

微电网群中被广泛应用[4]。直流微电网群中的恒功率负载（Constant Power Load，CPL）本身具有负阻抗特性，容易导致母线电压波动甚至崩溃，影响直流微电网群的稳定运行，因此稳定性分析是系统设计中的重要环节[5-6]。

大信号稳定性分析和小信号稳定性分析是分析电力系统扰动最常用的两种方法。目前，小信号稳定性分析方法已经发展得比较成熟[7]，而对于系统发生大扰动时的大信号稳定性分析的研究尚处于起步阶段，还没有相对成熟的方法[8]。相平面法[9]、李雅普诺夫法[10]和混合势函数法[11]是目前常用的大信号稳定性分析方法。文献[12]采用相平面法对锁相同步电压源变流器进行了大信号稳定性分析，提出了一种在大扰动发生的暂态期间能够在一阶和二阶之间切换的自适应锁相环，但未考虑控制时延的影响。文献[13]采用李雅普诺夫法得到负载功率与母线电容间的稳定区域。文献[14]采用李雅普诺夫特征值法估计了直流微电网的功率界限。但是该方法可能会因为系统复杂而导致无法建模。混合势函数法能够定量计算并且推导出系统的稳定域，具有较大的研究价值。文献[15]采用混合势函数法推导出直流微电网的大信号稳定性判据。文献[16]采用混合势函数法，对带有滤波器和CPL的支流微电网进行稳定性分析，并推导出系统大信号稳定性判据。

本文对直流微电网群进行了简化分析，应用混合势函数法对带有恒功率负载的直流微电网群在下垂控制基础上进行了稳定性分析。建立了直流微电网群的混合势函数模型，通过计算推导得到每个子微电网的大信号稳定性判据。通过仿真模拟系统负载突然增大扰动时的稳定性情况，验证了该稳定性判据的正确性，并验证了根据判据得到的改进系统大信号稳定性方法的可行性。

1 系统结构和控制方法

1.1 直流微电网群结构

直流微电网群由多个子微电网组成，本文通过隔离型双向DC/DC换流器将两个子微电网互联，实现子微电网之间的能量流动。具体结构如图1所示。

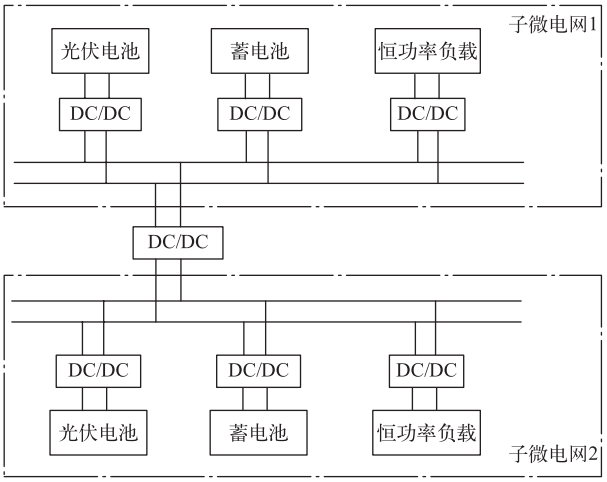


图 1 直流微电网群结构图

Fig. 1 DC microgrid group structure diagram

由图1可知，每个子微电网由分布式电源（光伏电池）、储能装置（蓄电池）和恒功率负载（CPL）组成，每个单元都通过相应的DC/DC换流器连接到直流母线上。

1.2 下垂控制

在电力系统中，母线电压的稳定是系统稳定运行的必要条件，主要通过储能装置的充放电来维持直流母线电压的稳定。下垂控制由于其分布式特性以及即插即用的性能而被广泛应用于微电网的控制，是目前储能装置主要的控制策略。

下垂控制环在电压电流控制环之前，输出直流电压的给定值，并输入到电压电流控制环，如图2所示。

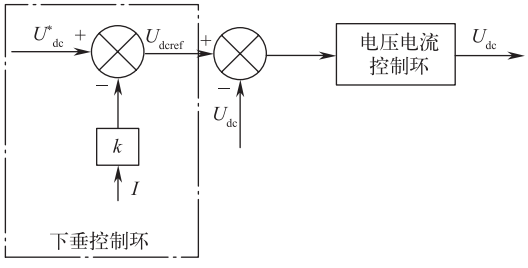


图 2 下垂控制原理图

Fig. 2 Droop control schematic diagram

图2中，U^*_{dc}为母线电压参考值；U_{dcref}为经过下垂控制环后的外环电压给定值；I为双向DC/DC换流器的输出电流；U_{dc}为双向DC/DC换流器的输出电压；k表示下垂系数。

下垂控制有如下关系式

$$U_{dcref}=U^*_{dc}-kI \tag{1}$$

由式（1）可知，换流器的输出电流和输出电压在同一条下垂曲线上，k也是下垂曲线的斜率，下垂控制曲线如图3所示。

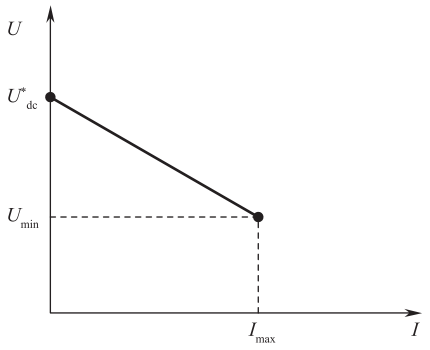


图 3 下垂控制曲线图

Fig. 3 Droop control curve

图3中，U_{min}为母线电压正常工作的最低值；I_{max}为换流器的最大输出电流。根据下垂特性，当母线电压过高时，说明系统功率过高，各微电源工作于充电状态；相反，当母线电压过低时，说明系统功率不足，各微电源工作于放电状态。

2 基于混合势函数的大信号稳定性判据

2.1 混合势函数理论

混合势函数理论是在李雅普诺夫函数的基础上提出的，适用于分析含有非线性电子元件的电路。混合势函数理论认为，对于含有非线性电子元件的电路，系统的表达式为

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_\rho}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\partial P(i,v)}{\partial i_\rho} \\ -C\dfrac{\mathrm{d}v_\sigma}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\partial P(i,v)}{\partial v_\sigma} \end{cases} \tag{2}$$

式中，i_ρ为流经电感的电流；v_σ为电容两端的电压；$P(i,v)$为电路系统的混合势函数，由系统中各独立元件的电压势函数和电流势函数累加得到。式（2）可用于检验混合势函数的正确性。

混合势函数的统一表达形式为

$$P(i,v)=-A(i)+B(v)+(i,\boldsymbol{\gamma}v-\boldsymbol{\alpha}) \tag{3}$$

式中，$-A(i)$为电路中所有非储能元件的电流势函数；$B(v)$为电路中所有非储能元件的电压势函数；$\boldsymbol{\gamma}$为一个常数矩阵；$\boldsymbol{\alpha}$为一个常数矢量；$(i,\boldsymbol{\gamma}v-\boldsymbol{\alpha})$为电路中所有电容的能量。

所以混合势函数的表达式可以描述为电路中所有非储能元件的势函数与所有电容能量的和。

根据混合势函数理论稳定性定理，现定义如下变量

$$\begin{cases} P_i=\dfrac{\partial P(i,v)}{\partial i} \\ P_v=\dfrac{\partial P(i,v)}{\partial v} \\ A_{ii}(i)=\dfrac{\partial^2 A(i)}{\partial i^2} \\ B_{vv}(v)=\dfrac{\partial^2 B(v)}{\partial v^2} \end{cases} \tag{4}$$

假设μ_1为矩阵$\boldsymbol{L}^{-1/2}A_{ii}(i)\boldsymbol{L}^{-1/2}$的最小特征值；$\mu_2$为矩阵$\boldsymbol{C}^{-1/2}B_{ii}(v)\boldsymbol{C}^{-1/2}$的最小特征值；$\boldsymbol{L}$、$\boldsymbol{C}$分别为电感矩阵和电容矩阵。

若系统满足

$$\mu_1+\mu_2>0 \tag{5}$$

并且当$|v|+|i|\to\infty$时，有

$$P^*(i,v)=\frac{\mu_1-\mu_2}{2}P(i,v)+\frac{1}{2}P_i^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{L}^{\dashv}P_i\right)+\frac{1}{2}P_v^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{C}^{\dashv}P_v\right)\to\infty \tag{6}$$

当$t\to\infty$时，系统将趋近于稳定点，保证系统的大信号稳定性。

2.2 基于混合势函数理论的大信号稳定性判据

本文研究的直流微电网群包括光伏电池、蓄电池、CPL和其他电子元件，光伏电池工作于MPPT模式，蓄电池工作于电压电流双闭环控制模式，CPL直接连接到直流母线上。将光伏电池和蓄电池等效为两个微电源，直流微电网群的结构图如图4所示。

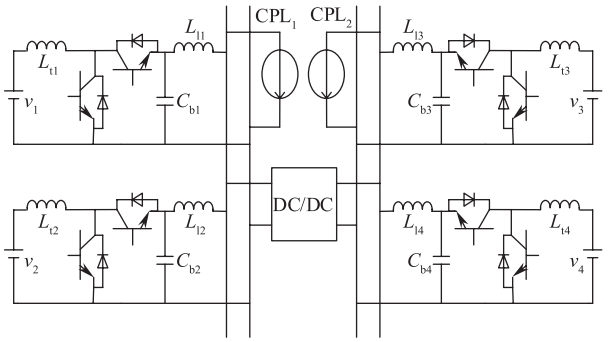


图 4　直流微电网群结构图

Fig. 4 DC microgrid group structure diagram

图4中，L_{ti}、C_{bi}、L_{li}（i=1,2）分别为换流器的电感、电容和线路电感，CPL$_i$（i=1,2）为恒功率负载。由于线路电感很小，故可以忽略，将每个子微电网的换流器的电容合并为一个等效电容C_i（i=1,2），设R_{di}为第i个微电源的下垂系数，采用外环电压控制和内环电流控制的结构，假设电流内环响应足够快，则简化后的等效电路图如图5所示。

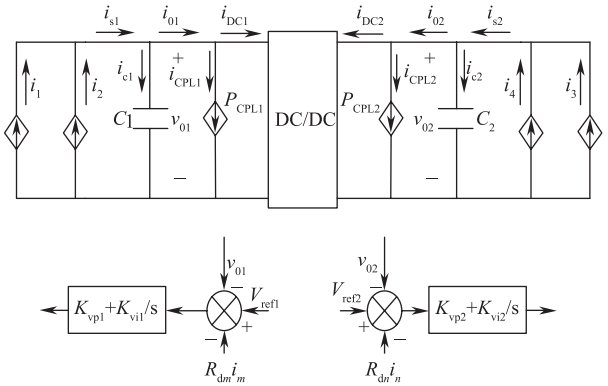


图 5　直流微电网群简化等效电路图

Fig. 5 DC microgrid group simplified equivalent circuit diagram

图5中，V_{refi}（i=1，2）为子微电网的母线电压设定值；v_{0i}（i=1，2）为子微电网的母线电压值；i_{si}（i=1，2）为各微电源输出电流之和；i_{0i}（i=1，2）为恒功率负载电流；i_{ci}（i=1，2）为电容电流；P_{CPLi}（i=1，2）为恒功率负载的功率；K_{vpi}（i=1，2）、K_{vii}（i=1，2）分别为电压外环的比例系数和积分系数；R_{dm}（m=1，2）、i_m（m=1，2）分别表示第m个微电源的下垂系数和输出电流；R_{dn}（n=3，4）、i_n（n=3，4）分别表示第n个微电源的下垂系数和输出电流。

现对子微电网1进行分析，各微电源的输出电流表达式为

$$i_m = K_{vpl}(v_m - v_{01} - R_{dm}i_m) + K_{vil}\int_0^t (v_m - v_{01} - R_{dm}i_m)\mathrm{d}t \quad (7)$$

系统中非储能元件的势函数表达式为

$$\begin{aligned}\int\sum_{\mu} v_\mu \mathrm{d}i_\mu &= \sum_{m=1}^{2}\int_0^{i_m} v_{01}\mathrm{d}i - \int_0^{i_{CPL1}} \frac{P_{CPL1}}{i_{CPL1}}\mathrm{d}i - \int_0^{i_{DC1}} \frac{P_{DC1}}{i_{DC1}}\mathrm{d}i \\ &= \sum_{m=1}^{2} v_{01}i_m - \sum_{m=1}^{2}\int_0^{v_{01}} i_m \mathrm{d}v - \int_0^{i_{CPL1}} \frac{P_{CPL1}}{i_{CPL1}}\mathrm{d}i - \int_0^{i_{DC1}} \frac{P_{DC1}}{i_{DC1}}\mathrm{d}i\end{aligned} \quad (8)$$

电容支路的能量表达式为

$$\sum_{\sigma} v_\sigma i_\sigma = -v_{01}\left(i_{s1} - \frac{P_{CPL1}}{v_{01}} - i_{DC1}\right) = -\sum_{m=1}^{2} v_{01}i_m + P_{CPL1} + P_{DC1} \quad (9)$$

将式（8）与式（9）相加即可得到系统的混合势函数为

$$\begin{aligned}P(i,v) &= \int\sum_{\mu} v_\mu \mathrm{d}i_\mu + \sum_{\sigma} v_\sigma i_\sigma = \\ &P_{CPL1} + P_{DC1} - \int_0^{i_{CPL1}} \frac{P_{CPL1}}{i_{CPL1}}\mathrm{d}i - \int_0^{i_{DC1}} \frac{P_{DC1}}{i_{DC1}}\mathrm{d}i - \sum_{m=1}^{2}\int_0^{v_{01}} i_m \mathrm{d}v\end{aligned} \quad (10)$$

根据式（2）对混合势函数表达式进行校验，得

$$\begin{cases}\dfrac{\partial P(i,v)}{\partial v_{01}} = \dfrac{P_{CPL1}}{v_{01}} + \dfrac{P_{DC1}}{v_{01}} - \sum_{m=1}^{2} i_m = -C\dfrac{\mathrm{d}v_{01}}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\partial P(i,v)}{\partial i_m} = L\dfrac{\mathrm{d}i_m}{\mathrm{d}t}\end{cases} \quad (11)$$

显然，式（11）与式（2）相吻合，证明了混合势函数的合理性，根据式（3）可知

$$\begin{cases}A(i) = -\int_0^{i_{CPL1}} \dfrac{P_{CPL1}}{i_{CPL1}}\mathrm{d}i - \int_0^{i_{DC1}} \dfrac{P_{DC1}}{i_{DC1}}\mathrm{d}i \\ B(v) = \sum_{m=1}^{2}\int_0^{v_{01}} i_m \mathrm{d}v \\ (i,\gamma v - \alpha) = P_{CPL1} + P_{DC1}\end{cases} \quad (12)$$

则有

$$\frac{\partial A(i)}{\partial i_{CPL1}} = -\frac{P_{CPL1}}{i_{CPL1}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 A(i)}{\partial i_{CPL1}^2} = \frac{P_{CPL1}}{i_{CPL1}^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial B(v)}{\partial v_{01}} = \sum_{m=1}^{2} i_m \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 B(v)}{\partial {v_{01}}^2}=\sum_{m=1}^{2}\frac{\partial i_m}{\partial v_{01}} \tag{16}$$

针对式（7），忽略$K_{vi1}\int_0^t(v_m-v_0-R_{dm}i_m)\mathrm{d}t$项，且等式两边对$v_{01}$进行求导得到

$$\frac{\partial i_m}{\partial v_{01}}=K_{vp1}(-1-R_{dm}\frac{\partial i_m}{\partial v_{01}}) \tag{17}$$

整理后得到

$$\frac{\partial i_m}{\partial v_{01}}=\frac{-K_{vp1}}{1+K_{vp1}R_{dm}} \tag{18}$$

将式（18）代入式（16）可以得到

$$\frac{\partial^2 B(v)}{\partial {v_{01}}^2}=-\sum_{m=1}^{2}\frac{K_{vp1}}{1+K_{vp1}R_{dm}} \tag{19}$$

可以得到矩阵$\boldsymbol{L}^{-1}A_{ii}(i)\boldsymbol{L}^{-1/2}$的最小特征值$\mu_1$和矩阵$\boldsymbol{C}^{-1/2}B_{vv}(v)\boldsymbol{C}^{-1/2}$的最小特征值$\mu_2$的值为

$$\begin{cases}\mu_1=\dfrac{R_{e1}}{L_{max1}}\\ \mu_2=-\dfrac{1}{C_1}\displaystyle\sum_{m=1}^{2}\dfrac{K_{vp1}}{1+K_{vp1}R_{dm}}\end{cases} \tag{20}$$

根据混合势函数的稳定性定理$\mu_1+\mu_2>0$可得

$$\mu_1+\mu_2=\frac{R_{e1}}{L_{max1}}-\sum_{m=1}^{2}\frac{K_{vp1}}{C_1(1+K_{vp1}R_{dm})}>0 \tag{21}$$

式中，R_{e1}为恒功率负载CPL$_1$的等效电阻。

将式（21）整理得

$$R_{e1}>\sum_{m=1}^{2}\frac{L_{max1}K_{vp1}}{C_1(1+K_{vp1}R_{dm})} \tag{22}$$

式（22）就是子微电网1的大信号稳定性判据，当系统满足该公式时，系统是大信号稳定的。由${v_{01}}^2=P_{CPL1}R_{e1}$可知，当母线电压稳定时，恒功率负载的功率$P_{CPL1}$和等效电阻$R_{e1}$成反比；当恒功率负载功率$P_{CPL1}$增大时，其等效电阻$R_{e1}$减小，因此，要提高系统的大信号稳定裕度，可减小不等式右边的值，通过减小电感值L、增大电容值C来实现。

同理，根据以上分析方法可以得到子微电网2的大信号稳定性判据为

$$R_{e2}>\sum_{n=1}^{2}\frac{L_{max2}K_{vp2}}{C_2(1+K_{vp2}R_{dn})} \tag{23}$$

3 大信号稳定性判据仿真验证

为了验证大信号稳定性判据式（22）、式（23）的正确性，本文在MATLAB/Simulink中建立了图4所示的直流微电网群模型，系统的参数见表1。在验证过程中，CPL通过DC/DC换流器连接到直流母线上，CPL等效值为R_e，通过在1.5 s接入CPL来模拟大信号扰动情况，验证大信号稳定性判据的正确性。

表1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
电感L_{t1}/mH	2	下垂系数R_{d1}	0.7
电感L_{t2}/mH	2	下垂系数R_{d2}	0.5
电感L_{t3}/mH	2	下垂系数R_{d3}	0.7
电感L_{t4}/mH	2	下垂系数R_{d4}	0.5
电容C_{b1}/μF	1 000	比例系数K_{vp1}	1
电容C_{b2}/F	0.1	比例系数K_{vp2}	1
电容C_{b3}/μF	1 000	电容C_{b4}/F	0.1

根据表1中的参数，代入式（22）、式（23），计算出两个子微电网CPL值R_{e1}和R_{e2}的最小值限制为7 Ω。在实验仿真中模拟四种直流微电网群大信号扰动情况，见表2。

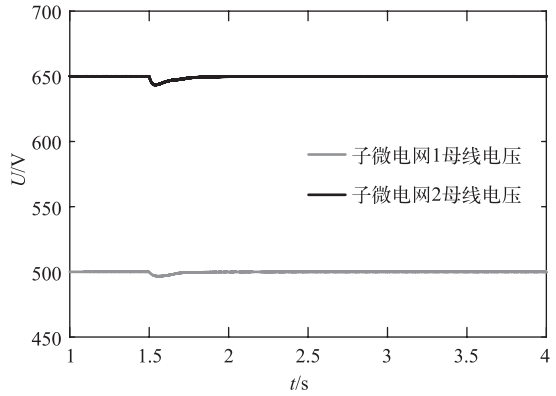
表2 四种扰动情况

Tab. 1 Four perturbations

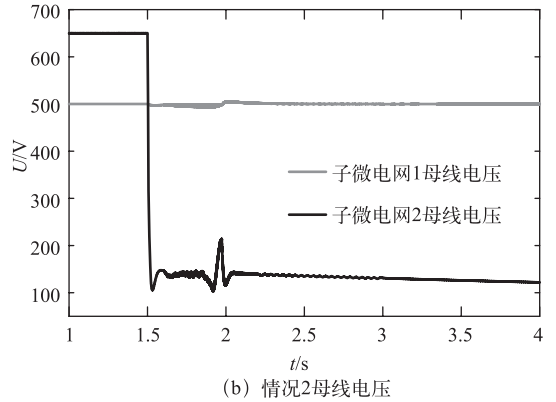
	R_{e1}/Ω	R_{e2}/Ω	判据式（22）	判据式（23）
情况1	15	10	满足	满足
情况2	15	0.1	满足	不满足
情况3	0.1	15	不满足	满足
情况4	0.1	0.1	不满足	不满足

在实验时，1.5 s时接入恒功率负载CPL$_1$和CPL$_2$并观察两个子微电网母线电压的情况，是否能在扰动之后回到平衡点。图6为情况1～情况4的母线电压情况。

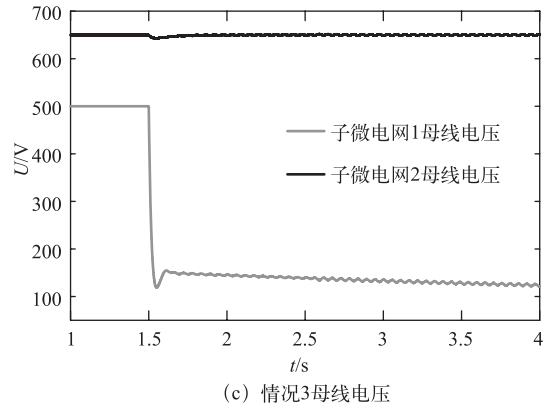
根据图6可知，当子微电网中的等效负载满足该子微电网的大信号稳定性判据时，该子微电网的母线电压经过波动后回到平衡点，系统稳定；当子微电网中的等效负载小于最小允许值时，该子微电网的母线电压经过波动后不会回到平衡点，系统处于崩溃状态。所以，根据判据式（22）、式（23）计算得到的等效负载最小允许值R_e是正确的，从而验证了该稳定性判据的正确性。



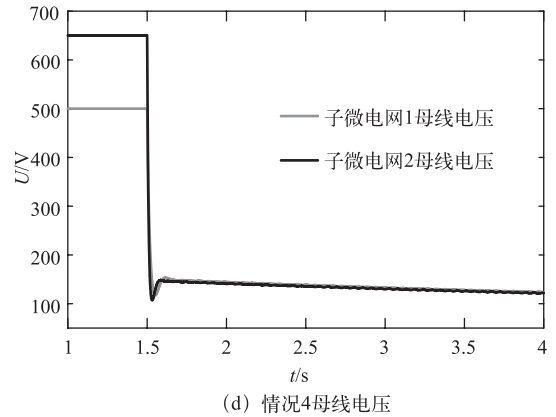
（a）情况1母线电压



（b）情况2母线电压



（c）情况3母线电压

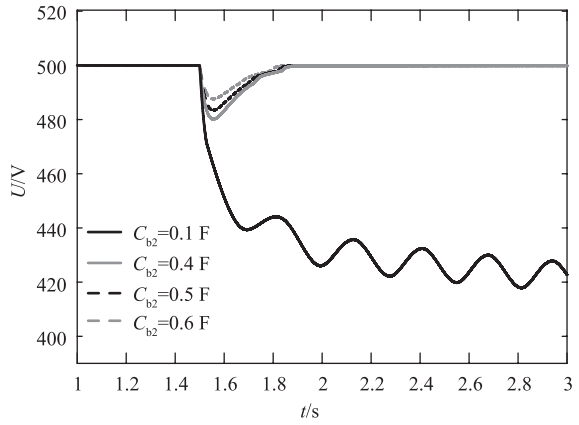


（d）情况4母线电压

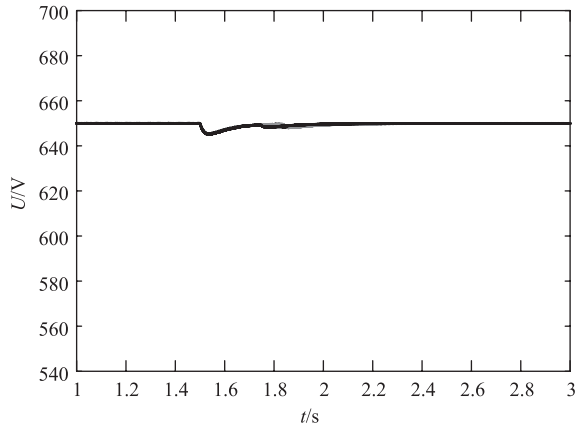
图 6　四种情况的母线电压

Fig. 6 Bus voltage in four cases circuit diagram

根据所得判据式可知，提高系统大信号稳定性可通过增大电容值或减小电感值来实现，接下来验证这一结论。首先验证电容值对系统大信号稳定性的影响，设置系统恒功率负载R_{e1}=6 Ω，R_{e2}=20 Ω，在表1的基础上将电容C_{b2}的值依次设置为0.1F、0.4 F、0.5 F和0.6 F，其他参数不变，四种情况下对应的子微电网1母线电压情况和子微电网2母线电压情况如图7所示。



（a）子微电网1母线电压



（b）子微电网2母线电压

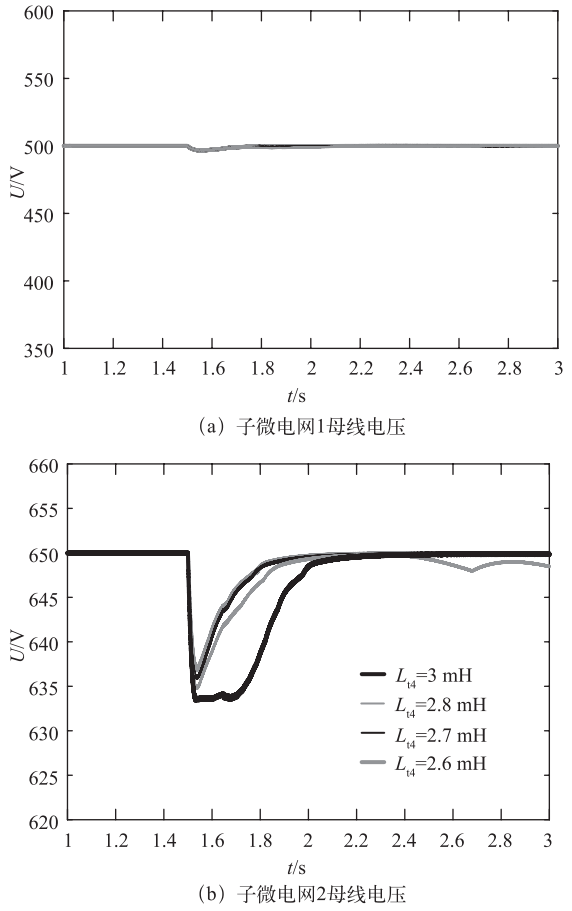
图 7　电容变化时系统母线电压情况

Fig. 7 The busbar voltage of the system when capacitance changes

在图7b中，四种情况下的子微电网2母线电压均是稳定的，这是因为子微电网2的CPL值为20Ω，满足稳定性判据。在图7a中，C_{b2}=0.1 F时，母线电压未能回到平衡点，是崩溃状态；C_{b2}=0.4 F时，母线电压最多下降到480 V，然后回到平衡点；C_{b2}=0.5 F时，母线电压最多下降到483 V，然后回到平衡点；C_{b2}=0.6 F时，母线电

压最多下降到487 V，然后回到平衡点。由此可知，随着系统电容值的增加，系统的大信号稳定性增加。

然后验证电感值对系统大信号稳定性的影响，设置系统恒功率负载R_{e1}=15 Ω，R_{e2}=8 Ω，在表1的基础上，将电感L_{t4}的值依次设置为3 mH、2.8 mH、2.7 mH和2.6 mH，其他参数不变，四种情况下对应的子微电网1母线电压和子微电网2母线电压情况如图8所示。



（a）子微电网1母线电压

（b）子微电网2母线电压

图 8　电感变化时系统母线电压情况

Fig. 8 The busbar voltage of the system when inductance changes

在图8a中，四种情况下的子微电网1母线电压都是稳定的，这是因为子微电网1的CPL值为15 Ω，满足稳定性判据。在图8b中，L_{t4}=3 mH时，母线电压最多下降到633 V，然后回到平衡点；L_{t4}=2.8 mH时，母线电压最多下降到635 V，然后回到平衡点；L_{t4}=2.7 mH时，母线电压最多下降到636 V，然后回到平衡点；L_{t4}=2.6 mH时，母线电压最多下降到637 V，然后回到平衡点。由此可知，减小系统的电感值，可以使系统大信号稳定性增强。这说明了根据所得判据来改进系统大信号稳定性是有效的，也间接证明了该判据的正确性。

4　结束语

本文在下垂控制的基础上搭建了含有恒功率负载的直流微电网群模型。介绍了混合势函数的方法原理，并用混合势函数的方法对直流微电网群进行大信号稳定行分析，经过建模、推导和计算后得到系统的大信号稳定性判据，以及提高系统稳定性的方法。最后，通过仿真验证，模拟了系统大信号扰动的情况，对含有两个子微电网的直流微电网群进行了四种不同情况的模拟，并根据判据式得出改进系统大信号稳定性的方法，仿真结果验证了大信号稳定性判据的正确性，系统可通过增大电容值、减小电感值来提高大信号稳定性。

参考文献

[1] 顾后生，李霞林，郭力，等．多直流微电网群柔性互联与控制[J]．电力系统及其自动化学报，2020，32(4)：1-8．

[2] 支娜，肖曦，田培根，等．微网群控制技术研究现状与展望[J]．电力自动化设备，2016，36(4)：107-115．

[3] LOTFI H，KHODAEI A．AC versus DC microgrid planning[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2017，8(1)：296-304．

[4] 米阳，吴彦伟，朱银珠，等 含负荷功率自动分配的独立直流微电网协调控制[J]．电网技术，2017，41(2)：440-447．

[5] SONG Xinda，ZHENG Shiqiang，HAN Bangcheng，et al．Active damping stabilization for high-speed BLDCM drive system based on band-pass filter[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2017，32(7)：5438-5449．

[6] CHANG Xiaoyong，LI Yongli，LI Xuan，et al．An active damping method based on a supercapacitor energy storage system to overcome the destabilizing effect of instantaneous constant power loads in DC microgrids[J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，2017，32(1)：36-47．

[7] KIM H J，KANG S W，SEO G S，et al．Large-signal stability analysis of DC power system with shunt active damper[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2016，63(10)：6270-6280．

[8] JIANG Jianbo，LIU Fei，PAN Shangzhi，et al．A conservatism-free large signal stability analysis method for DC microgrid based on mixed potential theory[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2019，34(11)：11342-11351．

[9] 高琴，刘清晨，陈亦平，等．不同调速器死区特性对系统频率稳定的影响分析[J]．电网技术，2020，44(9)：3575-3581．

[10] 孔力，裴玮，叶华，等．交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究[J]．电工电能新技术，2017，36(9)：1-10．

[11] MOSADDIQUE NAWAZ HUSSAIN，RAHUL MISHRA，VIVEK AGARWAL．A frequency-dependent virtual impedance for voltage-regulating converters feeding constant power loads in a DC microgrid[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2018，54(6)：5630-5639．

[12] WU Heng，WANG Xiongfei．Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(4)：3573-3589．

[13] 支娜，张辉，肖曦，等．分布式控制的直流微电网系统级稳定性分析[J]．中国电机工程学报，2016，36(2)：368-378．

[14] 滕昌鹏，王玉斌，周博恺，等．含恒功率负载的直流微网大信号稳定性分析[J]．电工技术学报，2019，34(5)：973-982．

[15] 厉泽坤，孔力，裴玮，等．基于混合势函数的下垂控制直流微电网大扰动稳定性分析[J]．电网技术，2018，42(11)：3725-3734．

[16] PATROBERS SIMIYU，AI XIN，NIASSE MOUHAMMED，et al．Multi-terminal medium voltage DC distribution network large-signal stability analysis[J]．Journal of Electrical Engineering & Technology，2020，15(5)：2099-2110．

作者简介

赵冠皓（1997—），男，硕士研究生，研究方向为微电网的控制与稳定性分析。

（收稿日期：2022-07-20）