

含多直流微网的多电压等级直流配电系统 稳定性分析方法

刘英培, 杨博超, 石金鹏, 朱宇琦
(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 多直流微网将成为接纳分布式能源和直流负荷的有效手段。文章提出了一种适用于含多直流微网的多电压等级直流配电系统的稳定性分析方法。首先,依据互联变换器的控制方式推导得各微网子系统的等效导纳,并利用各微网单独运行时的等效开环增益判断其等效导纳是否存在右半平面极点;其次,将多电压等级直流配电系统简化为只包含中压母线的单电压等级直流系统,并利用等效阻抗比判断中压侧子系统的稳定性,当且仅当各微网的等效开环增益以及系统中压侧等效阻抗比均满足奈奎斯特判据时,系统可稳定运行;最后,基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建包含两个直流微网的多电压等级直流配电系统进行验证。仿真结果表明,所提稳定性分析方法可以对含多直流微网的多电压等级直流配电系统的稳定性进行准确判定。

关键词: 多直流微网; 多电压等级直流配电系统; 阻抗模型; 稳定性分析

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)05-0663-10

0 引言

随着分布式可再生能源(如光伏、风电等)以及直流负荷(电动汽车、充电桩等)的发展^[1,2],直流配电网以其可控性强、供电可靠性高、电能质量高、供电容量大等优点,已成为接纳分布式可再生能源有效手段^[3-5]。

由于可再生能源装机容量高速增长^[6],导致单个直流微电网内新能源消纳的平衡状态被打破,使得多个直流微网共存于直流配电网成为可能^[7]。虽然多个直流微网可以在最大程度上解决各微网内可再生能源就地消纳问题,但系统中高比例的电力电子设备和可再生能源,使得直流配电网的稳定性问题日益突出。目前,直流配电网稳定性研究主要集中于小信号稳定性^[8]。对于单一母线直流系统,通过建立系统内各单元的小信号模型,利用Middlebrook阻抗比判据对系统进行稳定性分析。文献[9]通过构建中压直流配电网的等效阻抗模型,分析了储能单元与直流母线间的双向交互对系统稳定性的影响。文献[10]从阻抗角度分析了Boost变换器与并网换流器(Voltage Source Converter, VSC)变换器之间的交互特性,发现LC滤波器会引起系统直流电压在输出阻抗

谐振频率点附近振荡。文献[11]针对含DAB的多端直流配电系统,分析传输线长度、直流电容大小等参数变化对系统稳定性的影响。而对于多电压等级直流配电系统,传统方法已无法直接分析多母线系统的稳定性。为此,文献[12,13]利用整个双母线直流系统的等效开环增益来判断系统的稳定性,但须要推导出系统内各单元输入变量与其他单元输出变量之间的传递函数,才能确定系统的等效开环增益,但该方法很难推广到含多直流微网的直流配电系统中。文献[14]利用互联变换器(Interlinking Converter, IC)的二端口网络矩阵,分别将中、低压直流系统等效至中压侧和低压侧,并以IC输入或输出端口作为分界点将等效的单电压等级直流系统划分为两部分,并利用两侧等效阻抗比的奈奎斯特曲线是否包围(-1,0)点来判断系统的稳定性。若系统失稳仅由一侧阻抗不匹配引起,即使系统内所有单元均能单独稳定运行,也会向另一侧等效阻抗比引入右半平面极点,因此仅通过观察一侧阻抗比的奈奎斯特曲线并无法准确判断系统的稳定性。文献[15]提出了一种不受系统中各单元零极点限制的稳定性分析方法,虽然可以直观地判断两侧阻抗比是否满足奈

收稿日期: 2024-03-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51607069)。

作者简介: 刘英培(1982-),女,博士,副教授,研究方向为新能源发电与并网技术、微电网技术。E-mail: liuyingpei_123@126.com

奎斯特判据,但对于含多直流微网的直流配电系统或者多微网集群的情景则须要推导出整个系统在各母线侧的阻抗比,以及各阻抗比的 Bode 图和零极点分布图。因此,该方法仍存在计算量大、流程复杂等缺点。

针对现有多直流微网的多电压等级直流配电系统稳定性方法具有一定的局限性,本文首先依据互联变换器的具体控制方式,并利用各微网独立运行时的等效开环增益,确保各微网子系统的等效导纳无右半平面极点;其次,依据互联变换器二端口网络矩阵将多电压等级直流配电系统简化为只包含中压母线的单一母线直流系统,并利用等效阻抗比判断中压侧子系统的稳定性,在系统内各单元均能单独稳定运行的前提下,仅有各微网独立运行时的等效开环增益和中压侧等效阻抗比均满足奈奎斯特判据时,可保证整个系统稳定;最后,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台,搭建包含两个直流微网的多电压等级直流配电系统进行验证。仿真结果验证了所提稳定性分析方法的有效性以及合理性。

1 含多直流微网的多电压等级直流配电系统运行方式分析

多直流微网的多电压等级直流配电系统拓扑结构如图 1 所示。

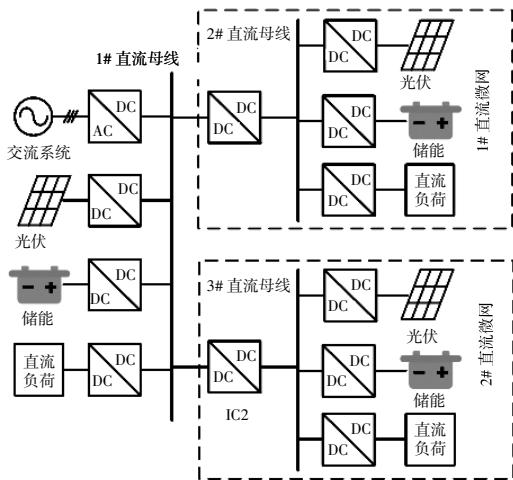


图 1 含多直流微网的多电压等级直流配电系统拓扑结构

Fig.1 Topology of multi-voltage level DC distribution system with multi DC microgrids

图 1 中,两个直流微网通过 IC 并联于同一直流母线,各直流母线均集成了储能、光伏以及直流负荷,各微网既可并网运行实现功率互济,也可以

相互完全解耦独立运行^[16]。各微网内发电单元以及 IC 的运行方式可分为如下情况:①当微网中光伏输出功率 P_{PV} 大于负载功率 P_L 时,多余功率将会通过双向 DC/DC 变换器向中压系统及储能单元馈送能量,此时,储能单元作为微网母线电压控制单元调节微网电压,IC 采用定功率控制向中压系统输送功率;②当 $P_{PV} < P_L$,并且储能单元具有充足的功率裕度时,缺额功率将由储能单元提供,此时,储能依旧作为电压控制单元维持微网电压稳定,IC 采用定功率控制;③当 P_L 增大至储能和光伏单元均无法承担时,IC 将作为电压控制单元控制微网母线电压,储能采用定功率控制。而对于系统中压母线侧,可由其上层控制系统或者中压侧各单元的分布式协调控制根据各微网的运行状态实现功率分配及稳定运行^[16,17]。

2 直流配电系统中各单元阻抗模型

2.1 互联变换器

由前文分析可知,通常情况下,各微网中 IC 的控制方式可分为定功率控制以及定微网电压控制两种。为统一建模,将微网 1 中 IC1 设定为定电压控制,微网 2 中 IC2 设为定功率控制。此时,IC1,IC2 的闭环二端口小信号网络矩阵分别为

$$\begin{vmatrix} \Delta i_{inv1} \\ \Delta u_{ov1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{Mv1} & G_{Mv1} \\ G_{Lv1} & -Z_{Lv1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta u_{inv1} \\ \Delta i_{ov1} \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{vmatrix} \Delta i_{inc2} \\ \Delta i_{oc2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{Mc2} & G_{Mc2} \\ G_{Lc2} & -Y_{Lc2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta u_{inc2} \\ \Delta u_{oc2} \end{vmatrix} \quad (2)$$

式中: Δ 为对应变量的小信号分量; i_{inv1}, u_{inv1} 分别为 IC1 中压侧输入电流和电压; i_{ov1}, u_{ov1} 分别为 IC1 低压侧输入电流和电压; Y_{Mv1} 为中压侧闭环输入导纳; Z_{Lv1} 为低压侧闭环输出阻抗; G_{Mv1} 为闭环反向电流增益; G_{Lv1} 为闭环电压增益; i_{inc2}, u_{inc2} 分别为 IC2 中压侧输入电流和电压; i_{oc2}, u_{oc2} 分别为 IC2 低压侧输入电流和电压; Y_{Mc2} 为中压侧闭环输入导纳; Y_{Lc2} 为低压侧闭环输入导纳; G_{Mc2} 为中压侧至低压侧闭环转移导纳; G_{Lc2} 为低压侧至中压侧闭环转移导纳。

互联变换器 DC/DC 采用双向 Buck 结构,IC1 及 IC2 的主电路结构及控制框图如图 2 所示。

图 2 中: $R_{IC1}, L_{IC1}, C_{IC1}$ 分别为 IC1 滤波电阻、滤波电感以及输出电容; $R_{IC2}, L_{IC2}, C_{IC2}$ 分别为 IC2 滤波电阻、滤波电感以及输出电容; i_{iIC1}, i_{iIC2} 分别

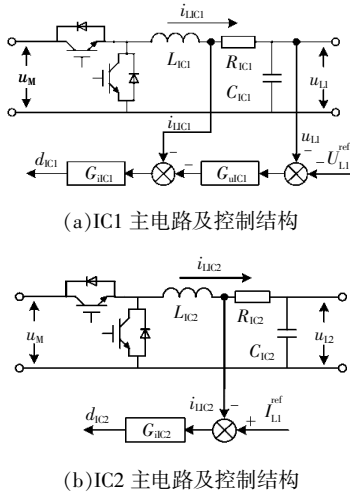


图2 IC1,IC2主电路及控制框图
Fig.2 Main circuit and control block diagram of IC1 and IC2

为IC1,IC2电感电流; U_{refL1} 为1#微网直流母线电压参考值; I_{refL2} 为IC2电感电流参考值; G_{uIC1}, G_{iIC1} 为IC1电压、电流PI控制器的传递函数; G_{uIC2} 为IC2电流PI控制器的传递函数; d_{IC1}, d_{IC2} 分别为IC1,IC2控制器输出占空比。

由图2可得式(1),(2)中的元素分别^[18]为

$$Y_{Mv1} = \frac{C_1 D_{IC1}}{B_1}; G_{Mv1} = D_{IC1} - I_{L1C1} G_{iIC1} - \frac{A_1 C_1}{B_1}; G_{Lv1} = \frac{D_{IC1}}{B_1}; Z_{Lv1} = \frac{A_1}{B_1}; Y_{Mc2} = \frac{D_{IC2} (D_{IC2} - I_{L2C2} G_{iIC2})}{A_2}; G_{Lv2} = \frac{D_{IC2}}{A_2}; Y_{Lc2} = \frac{B_2}{A_2}; A_1 = R_{IC1} + sL_{IC1} + U_M G_{uIC1}; B_1 = 1 + U_M G_{uIC1} G_{iIC1} + sC_{IC1} A_1; C_1 = sC_{IC1} (D_{IC1} + I_{L1C1} G_{iIC1}) - I_{L1C1} G_{uIC1} \cdot G_{iIC1}; A_2 = R_{IC2} + sL_{IC2} + U_M G_{uIC2}; B_2 = 1 + sC_{IC2} A_2。其中变量字母大写表示对应变量的稳态值。$$

2.2 储能单元

储能DC/DC均为双向Boost结构,以中压侧储能单元为例,其主电路及采用定电压控制或定功率控制时的控制框图如图3所示。

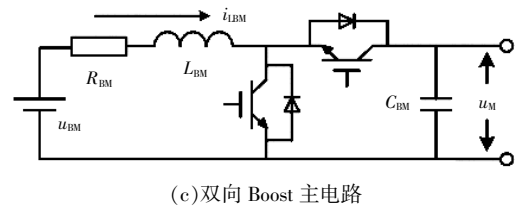
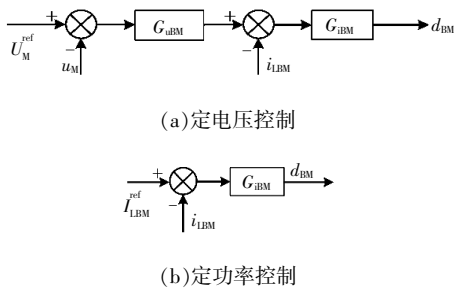


图3 储能DC/DC主电路及控制框图

Fig.3 Main circuit and control block diagram of energy storage DC/DC converter

图3中: u_{BM} 为中压侧储能电池输出电压; R_{BM}, L_{BM}, C_{BM} 分别为中压侧储能DC/DC滤波电阻、滤波电感以及输出电容; i_{LBM} 为其电感电流; U_M^{ref} 为中压母线直流电压参考值; I_{LBM}^{ref} 为储能DC/DC电感电流参考值; G_{uBM}, G_{iBM} 分别为电压、电流PI控制器的传递函数; d_{BM} 为控制器输出占空比。

由图3可知,采用电压控制时,储能DC/DC输出阻抗 Z_{BM} ,功率控制时输入导纳 Y_{BM} 分别为^[18]

$$Z_{BM} = \frac{C_3}{(1-D_{BM})A_3 - B_3 + sC_{BM}C_3} \quad (3)$$

$$Y_{BM} = sC_{BM} + \frac{(1-D_{BM})(1-D_{BM} + I_{LBM}G_{iBM})}{C_3} \quad (4)$$

其中: $A_3 = 1 - D_{BM} + I_{LBM}G_{iBM} + U_M G_{uBM} G_{iBM}; B_3 = (R_{LBM} + sL_{BM})I_{LBM}G_{uBM}G_{iBM}; C_3 = R_{LBM} + sL_{BM} + U_M G_{uBM}。$

2.3 恒功率负载单元

恒功率负载DC/DC采用Buck变换器,以中压侧负载单元为例,其主电路及控制框图如图4所示。

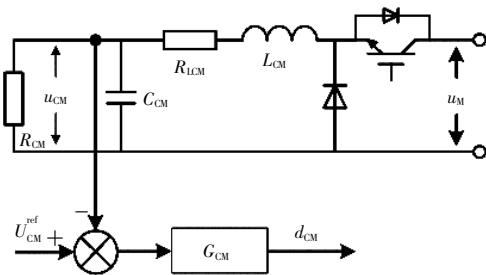


图4 恒功率负载DC/DC主电路及控制框图

Fig.4 Main circuit and control block diagram of constant power load DC/DC converter

图4中: R_{LCM}, L_{CM}, C_{CM} 分别为中压侧恒功率负载DC/DC电感电阻、电感、输出电容; u_{CM} 为负载两端电压; R_{CM} 为负载电阻; U_{CM}^{ref} 为负载电压参考值; G_{CM} 为PI控制器传递函数; d_{CM} 为控制器输出占空比。

由图 4 可得恒功率负载 DC/DC 输入导纳 Y_{CM} 为

$$\begin{cases} Y_{CM} = \frac{D_{CM}A_4}{1+U_M G_{CM} + B_4} \\ A_4 = (D_{CM} - U_{CM} G_{CM}) \left(\frac{1}{R_{CM}} + s C_{CM} \right) \\ B_4 = \left(\frac{1}{R_{CM}} + s C_{CM} \right) (R_{LCM} + s l_{CM}) \end{cases} \quad (5)$$

3 含多直流微网的多电压等级直流配电系统稳定性分析方法

对于直流配电系统中的多种不同类型的发电

单元以及负荷单元,可以根据其接口变换器在直流母线侧的输出特性将各单元划分为电压控制型和功率控制型两类。其中,电压控制型单元主要包括维持母线电压恒定的发电单元以及 AC/DC 交流系统,可以将其等效为理想电压源串联输出阻抗的戴维南等效电路;功率控制型单元主要包括运行于功率模式下的发电单元以及各种负荷单元,可以将其等效为理想电流源并联输入导纳的诺顿等效电路。

1#, 2# 直流微网等效阻抗模型如图 5 所示。

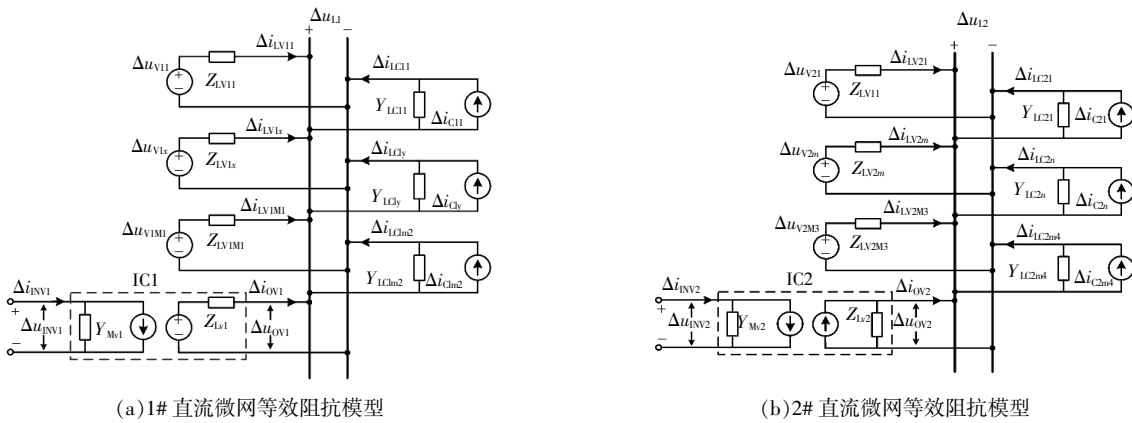


图 5 各直流微网等效阻抗模型

Fig.5 Equivalent impedance model of each DC microgrid

图 5 中: u_{L1}, u_{L2} 分别为 1#, 2# 微网直流母线电压; M_1, M_2 分别为 #1 微网中电压控制型和功率控制型单元总数; M_3, M_4 分别为 2# 微网中电压控制型和功率控制型单元总个数; $u_{v1x}, i_{c1y}, Z_{Lv1x}$ 分别为 1# 微网中第 x 个电压控制单元的等效电压源、输出电流及输出阻抗; $i_{c1y}, i_{Lc1y}, Y_{Lc1y}$ 分别为 1# 微网中第 y 个功率控制单元的等效电流源、输出电流及输入导纳; $u_{v2m}, i_{L2m}, Z_{Lv2m}$ 分别为 2# 微网中第 m 个电压控制单元的等效电压源、输出电流及输出阻抗; $i_{c2n}, i_{Lc2n}, Y_{Lc2n}$ 分别为 2# 微网中第 n 个功率控制单元的等效电流源、输出电流及输入导纳。

由图 5 及式(1)可得 1# 微网子系统在中压母线侧的等效输入导纳为

$$Y_{Mv1} = Y_{MGv1} = \frac{\Delta i_{inv1}}{\Delta u_{inv1}} = Y_{Mv1} + \frac{G_{Mv1} + G_{Lv1} + G_{Lvs}}{Z_{Lv1} + Z_{Lv1s} + Z_{Lv1} Z_{Lv1s} Y_{LC1s}} \quad (6)$$

式中: $Z_{Lv1} = \left(\sum_{x=1}^{M_1} Z_{Lv1x}^{-1} \right)^{-1}$; $Y_{LC1s} = \sum_{y=1}^{M_2} Y_{Lc1y}$; $G_{Lvs} = 1 + Z_{Lv1s} \times Y_{LC1s}$ 。

根据图 5, 并结合基尔霍夫定律可得 1# 微网单独运行时母线电压小信号分量为

$$\Delta u_{L1} = \left(\sum_{x=1}^{M_1} \frac{\Delta u_{v1x}}{Z_{Lv1x}} + \frac{G_{Lv1}}{Z_{Lv1}} \Delta u_{inv1} - \sum_{y=1}^{M_2} \Delta i_{C1y} \right) \times \frac{G_{Mv1} + G_{Lv1} + G_{Lvs}}{Z_{Lv1} + Z_{Lv1s} + Z_{Lv1} Z_{Lv1s} Y_{LC1s}} \quad (7)$$

令 $\frac{G_{Mv1} + G_{Lv1} + G_{Lvs}}{Z_{Lv1} + Z_{Lv1s} + Z_{Lv1} Z_{Lv1s} Y_{LC1s}} = T_{dv}$, 式(6), (7)均

包含 T_{dv} 。因此, 在 1# 微网内各单元及 IC1 可单独稳定运行的前提下, 即 $Y_{Mv1}, G_{Mv1}, G_{Lv1}, Z_{Lv1}, Z_{Lv1x}, Y_{Lc1y}$ 无右半平面极点, 为保证 Y_{MGv1} 无右半平面极点, 只须保证 1# 微网可单独稳定运行, 即 T_{dv} 无右半平面极点。

对式(7)进行化简:

$$\Delta u_{L1} = \left(\sum_{x=1}^{M_1} \frac{\Delta u_{v1x}}{Z_{Lv1x}} + \frac{G_{Lv1}}{Z_{Lv1}} \Delta u_{inv1} - \sum_{y=1}^{M_2} \Delta i_{C1y} \right) \times \frac{(Z_{Lv1}^{-1} + Z_{Lv1s}^{-1})^{-1}}{1 + (Z_{Lv1}^{-1} + Z_{Lv1s}^{-1})^{-1} + Y_{LC1s}} \quad (8)$$

令 $(Z_{Lv1}^{-1} + Z_{Lv1s}^{-1})^{-1} + Y_{LC1s} = T_{Lv1}$, 由式(8)可知, 假设 1# 微网子系统内各单元及 IC1 均可单独稳定运行, 若等效开环增益 T_{Lv1} 满足奈奎斯特判据, 即 T_{Lv1} 的奈奎斯特曲线不包围 $(-1, 0)$ 点, 1# 直流微网子系统可单独稳定运行, 便可保证 Y_{MGv1} 无右半平面极点。2# 微网子系统同 1# 微网子系统原理相同, 不再赘述。

综上所述, 含多直流微网的多电压等级直流配电系统在中压侧的等效阻抗模型如图 6 所示。

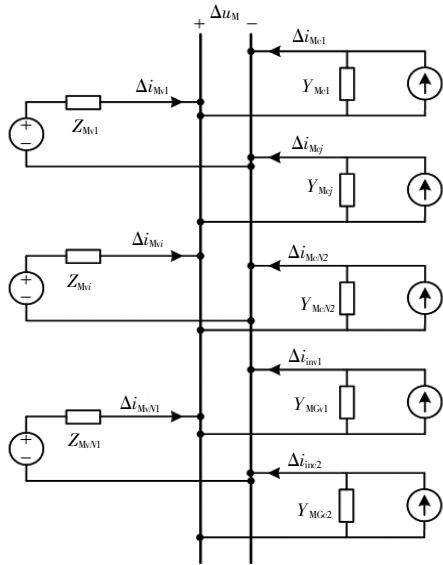


图 6 含多直流微网的多电压等级直流配电系统中压侧等效阻抗模型

Fig.6 Equivalent impedance model of multi-voltage level DC distribution system with multi DC microgrids

图 6 中: u_M 为中压直流母线电压; N_1, N_2 分别为中压母线侧电压控制型和功率控制型单元总数量; i_{Mvi}, Z_{Mvi} 分别为中压母线侧第 i 个电压控制单元的输出电流及输出阻抗; i_{Mcj}, Y_{Mcj} 分别为中压母线侧第 j 个功率控制单元的输出电流及输入导纳。

根据图 6 并利用阻抗匹配准则, 可得含多直流微网的多电压等级直流配电系统在中压侧的等效阻抗比为

$$T_{in} = \left(\sum_{i=1}^{N_1} Z_{Mvi}^{-1} \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^{N_2} Y_{Mcj} + Y_{MGv1} + Y_{MG-2} \right) \quad (9)$$

由式(9)可知, 在中压母线侧各单元均可单独稳定运行前提下, 若 1#, 2# 直流微网也可单独稳定运行, 当 T_M 满足奈奎斯特判据时, 即 T_{Lv2} 的奈奎斯特曲线不包围 $(-1, 0)$ 点, 整个直流系统可稳定运行。

综上所述, 在整个直流配电系统中各单元均可单独稳定运行的前提下, 若 T_M, T_{Lv1}, T_{Lv2} 的奈奎斯特曲线均不包围 $(-1, 0)$ 点, 直流配电系统可稳定运行。

4 仿真实验

为验证所提阻抗分析方法在含多直流微网的多电压等级直流配电系统中的适用性和有效性, 本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建含两个直流微网的多电压等级直流配电系统, 其拓扑结构如图 7 所示。

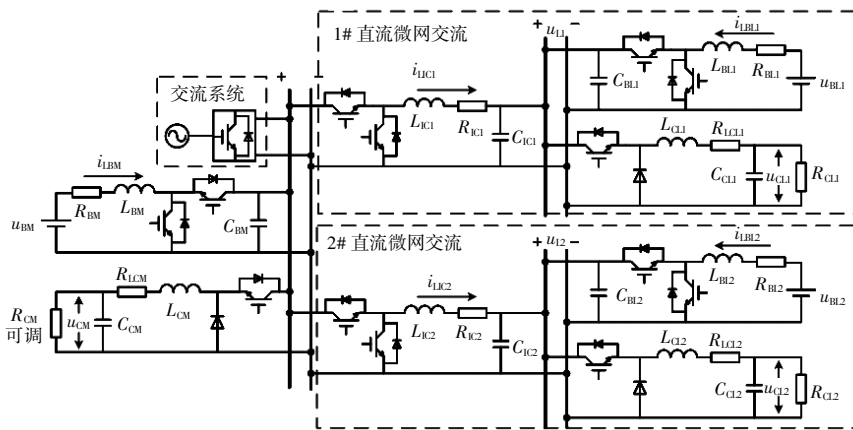


图 7 含多直流微网的多电压等级直流配电系统仿真模型

Fig.7 Simulation model of multi-voltage level DC distribution system with multi DC microgrids

由图 7 可知, 系统由两个直流微网、储能 DC/DC 变换器、恒功率负载以及交流系统组成, 中压

侧母线电压 u_M 为 800 V, 各微网直流母线电压 u_{M1}, u_{M2} 均为 400 V。其中, 直流微网子系统包含储

能单元以及恒功率负载单元, 并通过 IC 连接至中压直流母线。直流配电系统中压侧及 1# 直流微网各 DC/DC 变换器详细参数如表 1, 2 所示。2# 微网中各 DC/DC 变换器参数均与 1# 微网相同。

表 1 中压侧各变换器参数

Table 1 Parameters of each converter at medium voltage side

变换器	参数	数值
双向 Boost 变换器	u_{BM}/V	400
	L_{BM}/mH	5
	R_{BM}/Ω	0.02
	$C_{BM}/\mu F$	1 500
	电压外环 k_{pi}, k_{ii} 电流内环 k_{pi}, k_{ii}	0.15, 50 2, 100
Buck 变换器	u_{CM}/V	400
	L_{CM}/mH	2
	R_{LCM}/Ω	0.01
	$C_{CM}/\mu F$	200
	电压控制环 k_{pi}, k_{ii}	1, 100

表 2 1# 直流微网各变换器主参数及控制参数

Table 2 Main parameters and control parameters of 1# DC microgrid converters

变换器	参数	数值
IC1	L_{IC1}/mH	4
	R_{IC1}/Ω	0.01
	$C_{IC1}/\mu F$	400
	电压外环 k_{pi}, k_{ii} 电流内环 k_{pi}, k_{ii}	0.07, 100 2, 100
	双向 Boost 变换器	u_{BL1}/V
L_{BL1}/mH		2
R_{BL1}/Ω		0.01
$C_{BL1}/\mu F$		200
电压外环 k_{pi}, k_{ii} 电流内环 k_{pi}, k_{ii}		0.15, 200 1, 1 000
Buck 变换器	u_{CL1}/V	200
	L_{CL1}/mH	1
	R_{LC1}/Ω	0.01
	$C_{CL1}/\mu F$	100
	电压控制环 k_{pi}, k_{ii}	0.2, 100

为验证本文所提稳定性分析方法的有效性, 设置以下 2 种工况。工况 1: IC1 采用定电压控制, 1# 微网内储能单元采用定功率控制, IC2 采用定功率控制, 2# 微网内储能单元采用定电压控制。设置 1# 微网内储能单元输出功率为 2 kW, IC2 输出功率为 5 kW。 T_{M1}, T_{L11}, T_{L21} 分别为

$$T_{M1} = Z_{BM}(Y_{CM} + Y_{MG1} + Y_{MG2}) \quad (10)$$

$$T_{L11} = Z_{L1}(Y_{BL1} + Y_{CL1}) \quad (11)$$

$$T_{L21} = Z_{BL2}(Y_{Lc2} + Y_{CL2}) \quad (12)$$

$$Y_{MG1} = Y_{M1} + \frac{G_{M1} G_{L1}(Y_{BL1} + Y_{CL1})}{1 + Z_{L1}(Y_{BL1} + Y_{CL1})} \quad (13)$$

$$Y_{MG2} = Y_{M2} + \frac{G_{M2} G_{L2} Z_{BL2}}{1 + Z_{BL2}(Y_{Lc2} + Y_{CL2})} \quad (14)$$

式中: Y_{BL1}, Y_{CL1} 分别为 1# 直流微网中储能单元及负载单元输入导纳; Z_{BL2}, Y_{CL2} 分别为 2# 直流微网中储能单元输出阻抗及负载单元输入导纳。

因此, 在系统中各单元均能单独稳定运行的前提下, 当且仅当 T_{M1}, T_{L11}, T_{L21} 的奈奎斯特曲线均不包围 $(-1, 0)$ 点时, 整个直流配电系统稳定。在工况 1 下设置以下 4 种情况:

- ① $R_{CM}=4 \Omega, R_{CL1}=4 \Omega, R_{CL2}=5 \Omega$; ② $R_{CM}=1.5 \Omega, R_{CL1}=4 \Omega, R_{CL2}=5 \Omega$; ③ $R_{CM}=4 \Omega, R_{CL1}=1.5 \Omega, R_{CL2}=5 \Omega$; ④ $R_{CM}=4 \Omega, R_{CL1}=4 \Omega, R_{CL2}=1.5 \Omega$ 。

图 8 为 4 种情况下 T_{M1}, T_{L11}, T_{L21} 的奈奎斯特曲线。

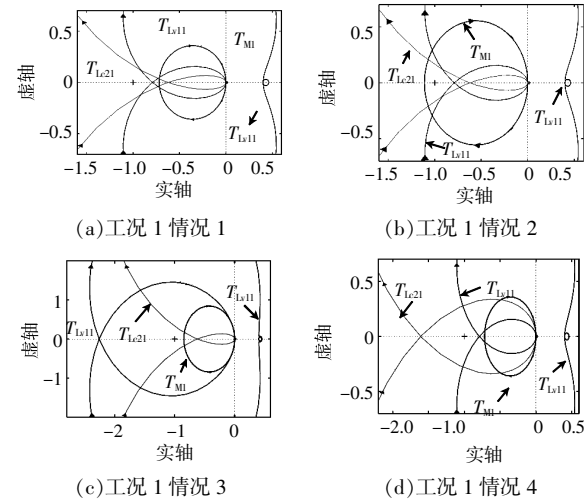


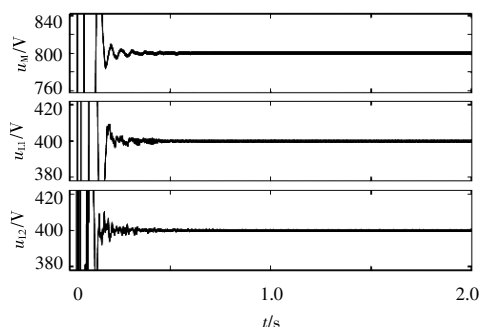
图 8 不同情况下 T_{M1}, T_{L11} 及 T_{L21} 奈奎斯特曲线

Fig.8 T_{M1}, T_{L11}, T_{L21} Nyquist curves under different conditions

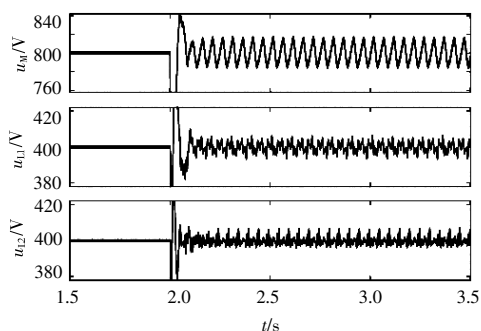
由图 8 可知: 当 $R_{CM}=4 \Omega, R_{CL1}=4 \Omega, R_{CL2}=5 \Omega$ 时, T_{M1}, T_{L11} 以及 T_{L21} 均满足奈奎斯特判据, 整个直流配电系统是稳定的; 当 $R_{CM}=1.5 \Omega, R_{CL1}=4 \Omega, R_{CL2}=5 \Omega$ 时, T_{L11} 以及 T_{L21} 的奈奎斯特曲线均未包围 $(-1, 0)$ 点, 而 T_{M1} 包围 $(-1, 0)$ 点, 整个系统失稳是由中压侧母线电压失稳导致的; 当 $R_{CM}=4 \Omega, R_{CL1}=1.5 \Omega, R_{CL2}=5 \Omega$ 时, T_{M1} 和 T_{L21} 均未包围 $(-1, 0)$ 点, 而 T_{L11} 的奈奎斯特曲线包围 $(-1, 0)$ 点。因此, 1# 直流微网各单元阻抗不匹配引起整个系统失稳; 当 $R_{CM}=4 \Omega, R_{CL1}=4 \Omega, R_{CL2}=1.5 \Omega$ 时, T_{M1} 和 T_{L11} 均未包围 $(-1, 0)$ 点, 而 T_{L21} 的奈奎斯特曲线

包围(-1,0)点。因此,整个系统失稳是由2#直流微网各单元阻抗不匹配引起的。

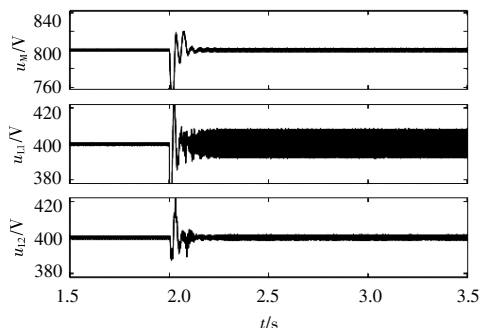
4种情况下各直流母线电压波形如图9所示。



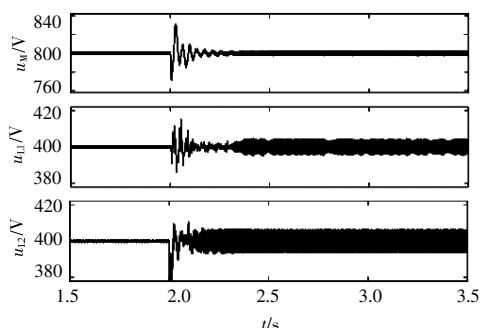
(a)工况1情况1



(b)工况1情况2



(c)工况1情况3



(d)工况1情况4

图9 不同情况下各直流母线电压波形

Fig.9 Voltage waveform of each DC bus under different conditions

由图9可知:当 $R_{CM}=4\Omega, R_{CL1}=4\Omega, R_{CL2}=5\Omega$ 时,系统可稳定运行;当 $R_{CM}=1.5\Omega, R_{CL1}=4\Omega, R_{CL2}=5\Omega$ 时,系统失稳,且中压侧直流母线电压 u_M 振荡幅度最大;当 $R_{CM}=4\Omega, R_{CL1}=1.5\Omega, R_{CL2}=5\Omega$ 时,系统各母线电压均产生不同幅度的振荡,且1#微网直流母线电压振荡幅度最大;当 $R_{CM}=4\Omega, R_{CL1}=4\Omega, R_{CL2}=1.5\Omega$ 时,直流配电系统失稳,并且2#微网直流母线电压产生较大幅度的振荡。

由上述分析可知,系统稳定情况与理论分析一致,并且可以依据各母线侧阻抗比的奈奎斯特曲线初步判断引起系统失稳的原因。

工况2:IC1,IC2均采用定电压控制,1#,2#微网内储能单元均采用定功率控制。设置1#微网内储能单元输出功率为3kW,2#微网内储能单元输出功率为2kW。工况2条件下 T_{M2}, T_{L12}, T_{L22} 分别为

$$T_{M2}=Z_{BM}(Y_{CM}+Y_{MGV1}+Y_{MG2}) \quad (15)$$

$$T_{L12}=Z_{L1}(Y_{BL1}+Y_{CL1}) \quad (16)$$

$$T_{L22}=Z_{BL2}(Y_{L2}+Y_{CL2}) \quad (17)$$

$$Y_{MG2}=Y_{M2}+\frac{G_{M2}G_{L2}(Y_{BL2}+Y_{CL2})}{1+Z_{L2}(Y_{BL2}+Y_{CL2})} \quad (18)$$

式中: Y_{BL2} 为2#直流微网中储能单元输入导纳; Y_{M2} 为IC2采用电压控制时中压侧闭环输入导纳; Z_{L2} 为低压侧闭环输出阻抗; G_{M2} 为闭环反向电流增益; G_{L2} 为闭环电压增益。

在系统中各单元均能单独稳定运行的前提下,当且仅当 T_{M2}, T_{L12}, T_{L22} 的奈奎斯特曲线均不包围(-1,0)点时,整个直流配电系统稳定。

在工况2下设置以下4种情况:① R_{CM}, R_{CL1}, R_{CL2} 分别为4,6,5 Ω ;② R_{CM}, R_{CL1}, R_{CL2} 分别为1.5,6,5 Ω ;③ R_{CM}, R_{CL1}, R_{CL2} 分别为4,2,5 Ω ;④ R_{CM}, R_{CL1}, R_{CL2} 分别为4,6,2 Ω 。

在工况2条件下,4种情况下 T_{M2}, T_{L12}, T_{L22} 的奈奎斯特曲线如图10所示。由图10可知:当 $R_{CM}=4\Omega, R_{CL1}=6\Omega, R_{CL2}=5\Omega$ 时, T_{M2}, T_{L12} 以及 T_{L22} 均满足奈奎斯特判据,整个直流配电系统是稳定的;当 $R_{CM}=1.5\Omega, R_{CL1}=6\Omega, R_{CL2}=5\Omega$ 时, T_{L12} 以及 T_{L22} 的奈奎斯特曲线均未包围(-1,0)点,而 T_M 包围(-1,0)点,整个系统失稳是由中压侧母线电压失稳导致的;当 $R_{CM}=4\Omega, R_{CL1}=2\Omega, R_{CL2}=5\Omega$ 时, T_{M2} 和 T_{L22} 均未包围(-1,0)点,而 T_{L12} 的奈奎斯特曲线包围(-1,0)点。因此,1#直流微网各单元

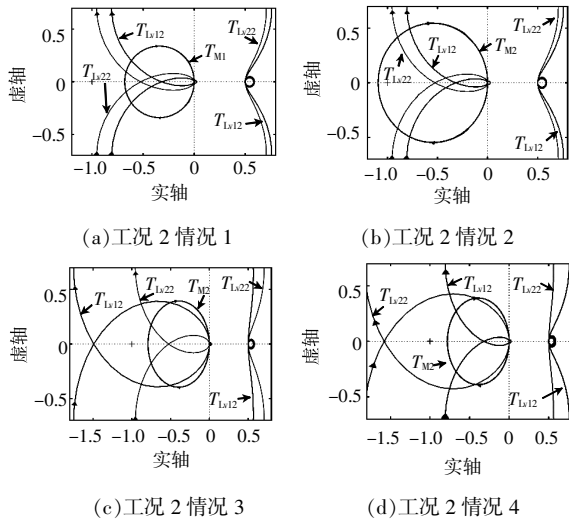


图 10 不同情况下 T_{M2} , $T_{L_{v21}}$ 及 $T_{L_{v22}}$ 奈奎斯特曲线
 Fig.10 T_{M2} , $T_{L_{v21}}$, $T_{L_{v22}}$ Nyquist curves under different conditions

阻抗不匹配引起整个系统失稳;当 $R_{CM}=4 \Omega$, $R_{CL1}=6 \Omega$, $R_{CL2}=2 \Omega$ 时, T_{M2} , $T_{L_{v21}}$ 均未包围 $(-1, 0)$ 点, 而 $T_{L_{v22}}$ 的奈奎斯特曲线包围 $(-1, 0)$ 点。因此, 整个系统失稳是由 2# 直流微网各单元阻抗不匹配引起的。

以上 4 种情况下各直流母线电压波形如图 11 所示。

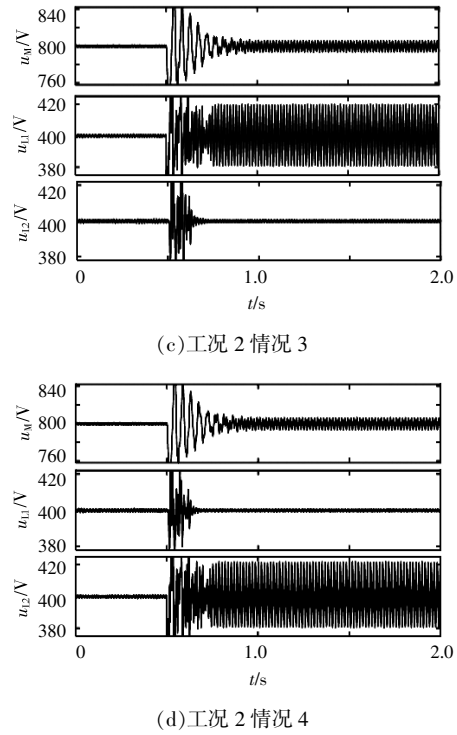
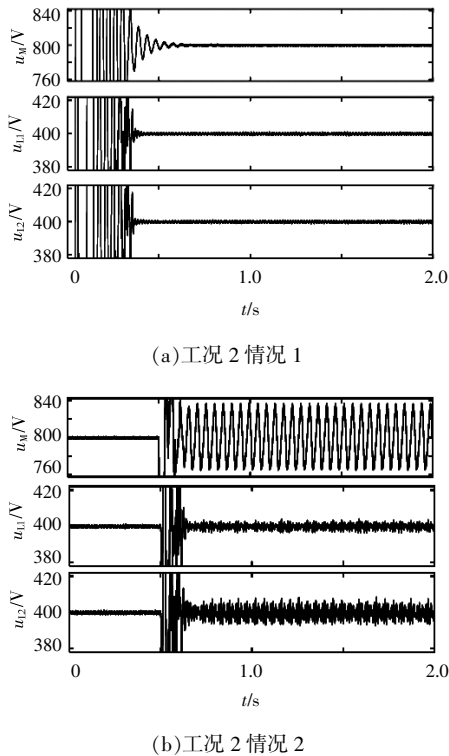


图 11 不同情况下各直流母线电压波形
 Fig.11 Voltage waveform of each DC bus under different conditions

由图 11 可以看出: 当 $R_{CM}=4 \Omega$, $R_{CL1}=6 \Omega$, $R_{CL2}=5 \Omega$ 时, 系统可稳定运行; 当 $R_{CM}=1.5 \Omega$, $R_{CL1}=6 \Omega$, $R_{CL2}=5 \Omega$ 时, 系统失稳, 且中压侧直流母线电压 u_M 振荡幅度最大; 当 $R_{CM}=4 \Omega$, $R_{CL1}=2 \Omega$, $R_{CL2}=5 \Omega$ 时, 系统中压侧及 1# 微网侧母线电压均产生不同幅度的振荡, 且 1# 微网直流母线电压振荡幅度最大, 但 2# 微网侧母线电压几乎未受到振荡影响; 当 $R_{CM}=4 \Omega$, $R_{CL1}=6 \Omega$, $R_{CL2}=2 \Omega$ 时, 直流配电系统失稳, 并且 2# 微网直流母线电压产生较大幅度的振荡, 但 1# 微网仍可保持稳定运行。

5 结论

本文针对含多直流微网的多电压等级直流配电系统提出了一种基于阻抗模型的稳定性分析方法, 利用各微网子系统单独运行时的等效开环增益确保其等效导纳无右半平面极点, 再利用整个系统中压侧的等效阻抗比判断中压侧子系统的稳定性, 当且仅当各微网子系统的等效开环增益及中压侧等效阻抗比满足奈奎斯特判据时, 系统可稳定运行。最后在 PSCAD/EMTDC 平台中验证了所提稳定性分析方法的准确性, 得到以下结论。

①含多直流微网的多电压等级直流配电系统中任意一条母线电压失稳均会对其他母线电压产生不同程度的影响。

②本文所提稳定性分析方法能够初步确定引起整个系统失稳的原因,并可推广至直流配电下多个直流微网以串联或并联形式组网等更复杂的场景中。

③本文所提稳定性分析方法无需推导出多电压等级直流配电系统在各个母线侧的等效阻抗比即可分析整个系统的稳定性,减小了复杂系统中稳定性分析工作的计算量。

参考文献:

- [1] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4720-4732.
- [2] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报,2021,21(3):1-15.
- [3] 熊雄,季宇,李蕊,等.直流配用电系统关键技术及应用示范综述 [J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6802-6813,7115.
- [4] 姜淞瀚,彭克,徐丙垠,等.直流配电系统示范工程现状与展望[J].电力自动化设备,2021,41(5):219-231.
- [5] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
- [6] 刘世宇,陈俊杰.“十四五”新能源消纳形势分析与建议[J].新能源科技,2021(10):35-37.
- [7] 吴鸣,熊雄,季宇,等.微网群技术综述[J].储能科学与技术,2019,8(4):621-628.
- [8] 张辉,杜明桥,孙凯,等.双母线直流微电网的级联稳定性分析[J].电力自动化设备,2021,41(5):34-42.
- [9] Ye Q, Mo R, Li H. Impedance modeling and DC bus voltage stability assessment of a solid-state transformer-enabled hybrid AC-DC grid considering bidirectional power flow [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(8): 6531-6540.
- [10] 黄旭程,何志兴,伍文华,等.交直流微电网中变换器级联系统稳定性分析与协同控制[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1432-1443.
- [11] 刘垚,孔力,邓卫,等.含双有源桥式 DC-DC 变换器的多端直流系统稳定性分析[J].电工电能新技术,2020,39(10):10-19.
- [12] Pan P, Chen W, Shu L, et al. An impedance-based stability assessment methodology for DC distribution power system with multivoltage levels [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(4): 4033-4047.
- [13] 叶杰,汤广福,赵成勇.多电压等级柔性直流电网建模与稳定性分析 [J]. 高电压技术,2022,48(4):1433-1441.
- [14] Mu H, Zhang Y, Tong X, et al. Impedance-based stability analysis methods for DC distribution power system with multi-voltage levels [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9193-9208.
- [15] Leng M, Zhou G, Li H, et al. Impedance-based stability evaluation for multibus DC microgrid without constraints on subsystems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(1): 932-943.
- [16] 刘海涛,熊雄,季宇,等.直流配电下多微网系统集群控制研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7159-7167.
- [17] 刘海涛,熊雄,季宇,等.直流配电系统不同运行模式下扁平化管理与协调控制策略研究[J].中国电机工程学报,2020,40(S1):37-46.
- [18] Lu X, Sun K, Guerrero J M, et al. Stability enhancement based on virtual impedance for DC microgrids with constant power loads [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2770-2783.

Stability analysis method of multi-voltage levels DC distribution system with multi DC microgrids

Liu Yingpei, Yang Bochao, Shi Jinpeng, Zhu Yuqi

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The networking of multiple DC microgrids under DC distribution network will become an effective means to accept large-scale distributed energy and load with DC characteristics. The stability research of multi-voltage levels DC distribution system is an important issue in its design and operation. Therefore, a stability analysis method suitable for multi-voltage levels DC distribution system with multi DC microgrids was proposed. Firstly, the equivalent admittance of each microgrid subsystem is derived according to the control mode of the interconnected converter, and the equivalent open-loop gain when each microgrid operates alone is used to judge whether there are right half plane poles in its equivalent admittance; Secondly, the multi voltage level DC distribution system is further simplified into a single voltage level DC system containing only medium voltage bus, and the stability of the medium voltage side subsystem is judged by the equivalent impedance ratio. When and only when the equivalent open-loop gain of each microgrid and the equivalent impedance ratio of the medium voltage side of the system meet the Nyquist criterion, the system can operate stably; Finally, based on PSCAD / EMTDC simulation platform, a multi voltage level DC distribution system including two DC microgrids is built for verification. The simulation results show that the proposed stability analysis method can accurately determine the stability of multi voltage DC distribution system with multi DC microgrid.

Keywords: multi DC microgrids; multi-voltage levels DC distribution system; impedance model; stability analysis