

基于阻抗网络模型的多变流器直流微电网 小扰动稳定性分析

刘镇湘,赵晋斌,曾志伟,屈克庆,毛玲

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:大量新能源设备与负荷通过电力电子变流器接入直流微电网,导致多变流器直流微电网(MCDCM)的小扰动稳定性面临严峻挑战,且使用传统阻抗比与状态空间模型分析MCDCM时存在一定的局限性。基于变流器端口的阻抗特性,建立MCDCM的阻抗网络模型与具有开环稳定特性的负反馈系统,并将阻抗网络模型应用于直流微电网的稳定性判别与设计。一个包含6个变流器的MCDCM的时域仿真结果验证了该方法在MCDCM稳定性判别与设计中的优势。

关键词:阻抗网络模型;多变流器;小扰动稳定性;等价开环函数;广义Nyquist判据

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105036

0 引言

直流微电网以其可靠性高、变换环节少、损耗低且不需要对电压的相位和频率进行跟踪等优点,将成为未来家庭、直流建筑、数据中心、通信基站和现代电力电子负荷的主要供电架构^[1-2]。通常可以采用主从控制或对等控制策略来维持直流微电网母线电压恒定^[3]。但随着大规模变流器的接入,变流器间交互耦合以及恒功率负荷(CPL)的负电阻特性、功率的双向流动等,可能会导致多变流器直流微电网MCDCM(Multi-Converter DC Microgrid)出现稳定性问题或动态性能恶化等情况^[2,4]。合理有效地建立系统小信号阻抗网络模型INM(Impedance Network Model)以及进行稳定性预判,并进一步分析动态稳定性具有重要意义。

对于系统小信号稳定性问题,主要有基于状态空间数学模型的特征值分析法^[5-8]和基于阻抗特性的阻抗匹配法^[9-10]等。基于状态空间数学模型的特征值分析法利用系统理论建立的模型更精确,但在多变流器系统中模型十分复杂^[6]。与之相比,基于阻抗特性的阻抗匹配法是一种系统的外特性描述,其广泛应用于分析交直流微电网中子系统之间的耦合稳定性问题^[9]。

文献[10-14]论述基于小环增益的Nyquist曲线稳定性分析,如Middlebrook、GMPM(Gain Margin and Phase Margin)、OA(Opposing Argument)、MP(Maximum Peak)、ESACC(Energy Source Analysis Consortium Criterion)、RESC(Root Exponential Stability Criterion)、T-SI(Three-Step Impedance)等稳定性判

据。上述判据均是通过设定不同的稳定裕度和禁止区,基于阻抗比对直流微电网进行小信号稳定性分析,这类判据的缺点是规定了功率的流向(电源端输出功率,负荷端吸收功率),但在实际的直流微电网中,有些微源如储能(ES)变换器既可以作为电源运行也可以作为负荷运行,这导致传统阻抗比判据并不适用于多源与多负荷组成的系统^[15]。

为了获得较为合理的稳定性分析方法,文献[16]基于阻抗的分析方法对直流微电网的变换器进行分类,并考虑功率流向分析系统稳定性,但没有考虑线路阻抗网络的影响。文献[17]定义基于阻抗规范的分布式电源系统稳定性判据,但该判据仅适用于多源串联、多负荷、功率控制源组成的系统,本质上还是单源与多荷系统。文献[18]基于特征值分析法对少量换流器间的参数配合和源网荷间的交互作用进行研究,但其难以适用于大规模变流器接入的直流微电网系统。

为了克服上述局限性,本文在多变流器馈入的直流微电网系统中计及线路阻抗网络的影响,通过推导其等效负反馈模型,提出一种基于阻抗网络模型的开环传递函数分析方法来研究系统小扰动稳定性问题。本文首先将阻抗网络的概念推广到MCDCM,从而获得系统的阻抗网络模型;然后,为了将阻抗网络模型应用于系统的稳定性判别与设计,推导出对应的等价开环函数,并给出相应的稳定性一般设计流程;最后,通过频域和时域分析证明所提方法在进行MCDCM稳定性的判别与设计时具有较好的优势。

1 直流微电网的阻抗网络模型

1.1 直流微电网拓扑结构

本文主要讨论新能源多馈入条件下的直流微电网系统的小扰动稳定性问题,图1给出了适用于家庭或楼宇的低压直流微电网的典型结构。

收稿日期:2021-03-11;修回日期:2021-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777120)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777120)

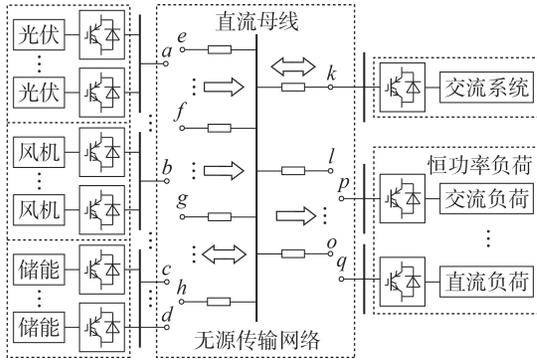


图1 MCDCM典型结构

Fig.1 Typical structure of MCDCM

本质上而言,直流微电网在实际应用场景中可以看作为等效源-输电网络-负荷系统,包括直流电压控制单元、输电线路网络和功率控制单元。借鉴文献[16]重塑每个源和负荷的端口特性的思路,将MCDCM归类为对应的广义电压源(GVS)、无源网络和广义电流源(GCS)。值得注意的是,GVS或GCS是直流微电网的一个子系统,可以是线性负荷、线性源、非线性负荷或变换器控制源等。本文考虑如图2所示的直流微电网系统,其包含 m 个GVS子系统、 n 个GCS子系统。图中, U_{si} 、 I_{si} ($i=1, 2, \dots, m$)分别为子系统GVS $_i$ 馈入端口电压、电流; U_{oj} 、 I_{oj} ($j=1, 2, \dots, n$)分别为子系统GCS $_j$ 馈入端口电压、电流; Z_{si} 、 Z_{oj} 为无源网络线路阻抗。该系统无源网络是由无源阻抗形成的,通过一定的网络拓扑连接系统中的所有源-荷节点,GVS子系统作为输入有源节点,GCS子系统作为输出有源节点。

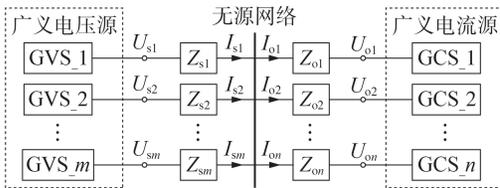


图2 MCDCM等效模型

Fig.2 Equivalent model of MCDCM

文献[18]指出:在线性化分析中,MCDCM的GVS子系统可采用电压源串联阻抗矩阵的Thevenin等效模型,该模型可用方程式(1)表示;GCS子系统可采用电流源并联导纳矩阵的Norton等效模型,该模型可用方程式(2)表示。

$$U_s = -Z_s I_s \quad (1)$$

$$I_o = Y_o U_o \quad (2)$$

其中, Z_s 为阻抗矩阵; U_s 、 I_s 分别为GVS子系统馈入端口电压和馈入电流(定义流入直流母线为电流参考正方向); Y_o 为导纳矩阵; U_o 、 I_o 分别为GCS子系统端口电压和端口电流(定义流出直流母线为电流参考正方向)。输电线路网络往往建成RL或RLC阻抗模型。

1.2 阻抗网络模型的推导

根据前文定义,GVS馈入端口与GCS端口的电压、电流可由矩阵方程线性表示:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* \\ i^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_s & \\ & Y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ U_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, u^* 、 i^* 分别为GVS(GCS)子系统的电压、电流扰动。

此外,通过对多端口无源网络的分析,系统所有有源节点都可以用式(4)所示的电路方程表示。

$$\begin{bmatrix} I_s \\ U_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* \\ i^* \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} U_s \\ I_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, G 为多端口无源网络的反混合参数矩阵,具体推导过程见附录A。

联立式(3)和式(4)可推导出:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ U_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* \\ i^* \end{bmatrix} - G \begin{bmatrix} Z_s & \\ & -Y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ U_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可建立MCDCM的阻抗网络负反馈模型,如图3所示。图中, $L = \begin{bmatrix} Z_s & \\ & -Y_o \end{bmatrix}$ 为GVS(GCS)子系统阻抗(负导纳)形成的对角矩阵。

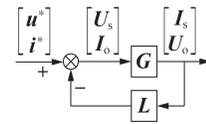


图3 MCDCM的阻抗网络负反馈模型

Fig.3 Negative feedback model based on INM for MCDCM

故以 LG 为开环函数的负反馈模型与图3所示的系统有相同的稳定性。本文定义MCDCM阻抗网络模型的开环函数 T 为:

$$T = LG \quad (6)$$

因此,可以通过研究特征方程 $\det(I_{m+n} + T)$ 来分析每个有源节点的稳定性,其中 I_{m+n} 为 $m+n$ 维的单位阵。但特征方程分析较为复杂,文献[19]指出可基于控制硬件,采用考虑频率耦合的阻抗测量方法进行频域扫描分析,该方法可解决阻抗理论建模中的“灰箱化”问题,且无需求得矩阵 T 的具体解析表达式,因此采用广义Nyquist判据(GNC)分析系统稳定性较为简便。

2 MCDCM的稳定性分析

2.1 阻抗网络模型开环函数的极点分布

阻抗网络模型开环函数 T 的极点表示GVS(GCS)子系统的开环极点,在进行频域设计时,通常要求开环函数不存在右半平面(RHP)极点。由式(6)可得:

$$\det(T) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \det(Z_{si}) \det(Y_{oj}) \det(G) \quad (7)$$

其中, Z_{si} 为GVS子系统中第 i 个端口的输出阻抗; Y_{oj} 为GCS子系统中第 j 个端口的输入导纳。

当GVS子系统由理想电流源加载时,其输出电压将被设计为稳定,当GCS子系统由理想电压源供电时,其输入电流将被设计为稳定,因此,在频域分析时, Z_{si} 和 Y_{oj} 可以被认为是稳定的,即不存在RHP极点。根据无源系统理论^[20]可知 G 中也不存在RHP极点。

通过上述讨论可知,阻抗网络模型的开环函数 T 不存在RHP极点。

2.2 基于阻抗网络模型的稳定性判据

根据2.1节中的分析可知,阻抗网络模型负反馈系统的开环函数是稳定的。根据多变量频域理论,采用特征值轨迹来分析负反馈模型的稳定性,具体表述如下。

广义Nyquist判据:如图3所示的负反馈系统是稳定的,当且仅当 T 的特征值轨迹包围临界点 $(-1,0)$ 的逆时针圈数 N_+ 等于其包围临界点 $(-1,0)$ 的顺时针圈数 N_- 时,MCDCM在小扰动下是稳定的。针对该判据,较理想的情形是 $N_+=N_-=0$,此时特征值轨迹在几何上不包围 $(-1,0)$ 。存在 T 中含有RHP零点时 $N_+=N_- \neq 0$ 的情形,但该情形在工程上较为少见,因此可认为 $N_+=N_-=0$ 时MCDCM是稳定的。

2.3 直流微电网系统级稳定性分析流程

式(6)表明,在MCDCM的稳定性分析中,相比于整个系统,显然设计GVS(GCS)子系统的稳定性更容易,因此本文利用阻抗网络模型,将MCDCM的稳定性设计总结为一程序化流程,如图4所示。

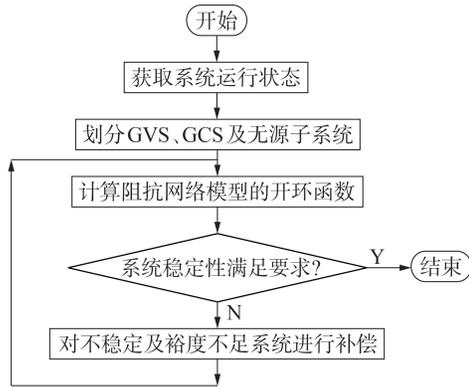


图4 MCDCM的稳定性设计流程

Fig.4 Flowchart of stability design of MCDCM

在设计流程中,首先将系统划分为GVS、GCS及无源子系统,进而计算本文所提阻抗网络模型的开环函数,并利用其判定结果指导各子系统的参数设计,确保MCDCM的稳定性。若需定量判断系统的稳定程度,可采用基于禁止域的广义Nyquist判据来研究系统的稳定性。

3 算例研究

建立由光伏(PV)、储能及CPL构成的MCDCM,如图5所示。图中,光伏模块通过Boost变换器接入

直流母线;储能模块通过DC/DC双向变换器接入直流母线;阻性负荷通过Buck变换器与直流母线相连;GVS子系统中4个微源端口变换器均采用电压电流双闭环控制,同时引入下垂控制策略;直流母线电压 $U_{bus} = 400\text{ V}$,各变换器开关频率为 10 kHz 。算例模型中的控制系统和控制参数参考文献[15]以及附录B。

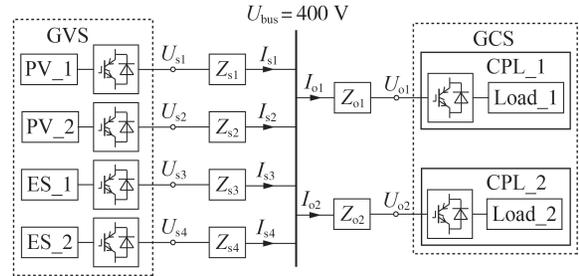


图5 MCDCM算例结构图

Fig.5 Structural diagram of MCDCM example

本节算例讨论GVS下垂系数及负荷功率变化^[3]对MCDCM稳定性的影响,以此验证本文所提稳定性判定方法的正确性。

3.1 下垂系数对MCDCM稳定性的影响

设置系统运行于不同工况,其对应的下垂系数如表1所示。

表1 不同工况下的下垂系数整定

Table 1 Droop coefficient setting under different working conditions

工况	下垂系数	
	光伏	储能
1	1.52	0.01
2	1.52	0.50
3	3.05	0.50

图6为下垂系数变化时,MCDCM的广义Nyquist轨迹和直流母线电压的瞬时值波形。初始运行于工况1下,系统稳定,通过改变下垂系数,在 $t_{11} = 0.4\text{ s}$ 时切换至工况2,在 $t_{12} = 0.6\text{ s}$ 时切换至工况3。根据广义Nyquist判据理论,广义Nyquist曲线不包围临界点 $(-1,0)$,这表明系统在3种工况下都处于稳定状态。

由图6(a)可知,当下垂系数减小时,特征根轨迹存在远离临界点 $(-1,0)$ 的趋势,因此,系统由工况1到工况3存在的失稳风险增大,整体稳定裕度下降。由图6(b)也可知,在工况1下系统能稳定运行,切换至工况2和工况3时,由于下垂系数在控制侧呈阻尼性质,增加下垂系数使母线电压振幅降低,但加剧了母线电压偏离额定值的程度,系统运行条件恶化,该结果与频域分析一致。

3.2 负荷功率变化对MCDCM稳定性的影响

3.2.1 负荷功率增加情形

图7为负荷功率增加时MCDCM的广义Nyquist

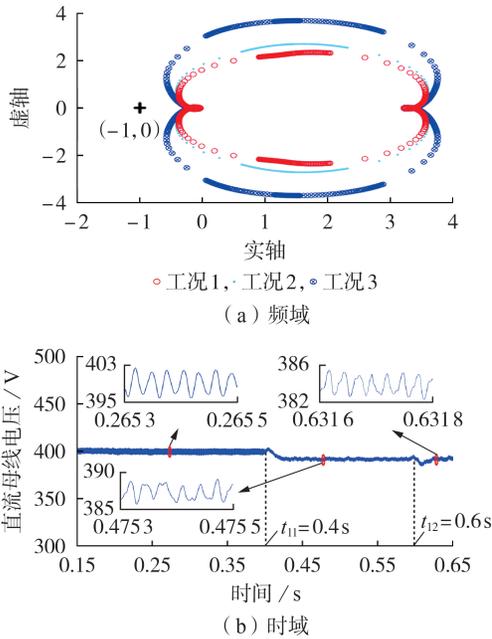


图6 不同工况下MCDM的稳定性分析结果
Fig.6 Analysis results of MCDM stability under different working conditions

轨迹和直流母线电压的瞬时值波形。初始状态下CPL的功率为 $P_{\text{CPL}}=24.0\text{ kW}$,系统稳定。

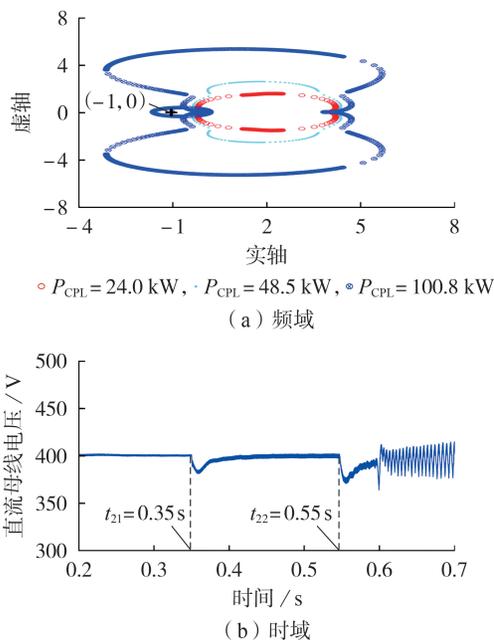


图7 负荷功率增加时MCDM的稳定性分析结果
Fig.7 Analysis results of MCDM stability when load power increases

由图7(a)可知,当负荷功率增加至 48.5 kW 时,MCDM的广义Nyquist曲线在复平面中存在左移趋势,这表明系统存在更高的失稳风险,稳定裕度降低。当负荷功率增加至 100.5 kW 时,广义Nyquist曲线包围临界点 $(-1,0)$,系统不稳定。因此,本文所提方法可对MCDM的失稳做出预判。

在时域内也存在相同的结论,由图7(b)可知,在 $t_{21}=0.35\text{ s}$ 时,负荷功率跃升至 48.5 kW ,直流母线电压经暂降后恢复至额定电压水平。分析 t_{21} 前后母线电压振幅知,系统的稳定裕度明显下降,母线电压波动更为剧烈,这表明系统失稳风险增加。在 $t_{22}=0.55\text{ s}$ 时,负荷功率跃升至 100.5 kW ,系统突破临界稳定点,母线电压始于周期性振荡,终止于非线性发散振荡。综上可知,时域与频域分析结果一致。

3.2.2 负荷功率减少情形

图8为负荷功率减少时MCDM的广义Nyquist轨迹和直流母线电压的瞬时值波形。初始状态下CPL的功率为 $P_{\text{CPL}}=48.5\text{ kW}$,系统稳定。 $t_{31}=0.3\text{ s}$ 时刻负荷功率减少至 $P_{\text{CPL}}=26.8\text{ kW}$ 。

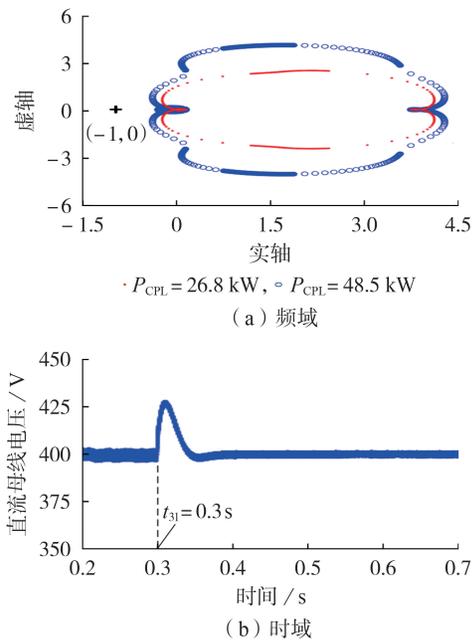


图8 负荷功率下降时MCDM的稳定性分析结果
Fig.8 Analysis results of MCDM stability when load power decreases

由图8(a)可知,当负荷功率减少时,系统广义Nyquist轨迹在复平面中存在右移趋势,这表明系统存在更低的失稳风险,稳定裕度增加。

对时域仿真进行分析,在 $t_{31}=0.3\text{ s}$ 时,系统负荷功率减少至 26.8 kW ,直流母线电压经暂升后恢复至额定电压水平,如图8(b)所示。通过电压波动程度可知,在负荷功率减少后系统稳定裕度上升,与频域分析结果相一致。

4 结论

本文针对MCDM拓扑结构,提出一种基于阻抗网络模型的开环传递函数分析方法来研究系统小扰动稳定性问题,得到如下结论。

(1)针对MCDM拓扑,首次将其划分为GVS子

系统、GCS子系统和无源子系统(线路阻抗网络)。基于此提出阻抗网络模型的概念,并推导出与其等效的负反馈模型,以便于分析复杂直流微电网系统稳定性问题。

(2)基于阻抗网络模型的概念,本文所提阻抗网络模型的开环传递函数可如同传统阻抗比一样表征系统的小扰动稳定性问题,该性质为系统的小扰动稳定性判定及设计方法提供了一种新思路。通过频域分析和时域仿真验证了所提方法可用于改善系统稳定性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] BYEON G, YOON T, OH S, et al. Energy management strategy of the DC distribution system in buildings using the EV service model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1544-1554.
- [2] 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 Xiaolin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [3] 郭力, 冯恽彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-936.
GUO Li, FENG Yibin, LI Xiaolin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-936.
- [4] 林刚, 李勇, 王姿雅, 等. 直流微网谐振模态分析及有源阻尼抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 119-125, 132.
LIN Gang, LI Yong, WANG Ziya, et al. Resonance modal analysis and active damping suppression method for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 119-125, 132.
- [5] 朱晓荣, 韩丹慧. 基于虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析及其改进方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 121-127.
ZHU Xiaorong, HAN Danhui. Stability analysis of DC microgrid based on virtual inertia control and its improved method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 121-127.
- [6] 朱晓荣, 孟凡奇. 含虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 208-218.
ZHU Xiaorong, MENG Fanqi. Stability analysis of DC microgrid with virtual inertia control[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 208-218.
- [7] 李云丰, 汤广福, 吴亚楠, 等. 直流电网建模分析与阻尼控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3372-3382, 3664.
LI Yunfeng, TANG Guangfu, WU Yanan, et al. Modeling, analysis and damping control of DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3372-3382, 3664.
- [8] 施婕, 郑漳华, 艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 86-90.
SHI Jie, ZHENG Zhanghua, AI Qian. Modeling of DC microgrid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 86-90.
- [9] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [10] MIDDLEBROOK R, CUK S. Input filter considerations in design and application of switching regulators[C]//IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting. Chicago, USA: IEEE, 1976: 366-382.
- [11] LIU J J, FENG X G, LEE F C, et al. Stability margin monitoring for DC distributed power systems via perturbation approaches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6): 1254-1261.
- [12] SUDHOFF S D, GLOVER S F, LAMM P T, et al. Admittance space stability analysis of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 965-973.
- [13] SUDHOFF S D, CRIDER J M. Advancements in generalized immittance based stability analysis of DC power electronics based distribution systems[C]//2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Alexandria, VA, USA: IEEE, 2011: 207-212.
- [14] VESTI S, SUNTIO T, OLIVER J A, et al. Impedance-based stability and transient-performance assessment applying maximum peak criteria[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2099-2104.
- [15] 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.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi, et al. System-level stability analysis of DC microgrid with distributed control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 368-378.
- [16] ZHANG X, RUAN X B, TSE C K. Impedance-based local stability criterion for DC distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015, 62(3): 916-925.
- [17] WANG X M, PENG Y G, ZHU J, et al. Decentralized impedance specifications for small-signal stability of DC distributed power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1578-1588.
- [18] 朱晓荣, 李铮. 多换流器直流微电网稳定性分析[J/OL]. 电网技术. [2021-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200706.0928.002.html>.
- [19] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于控制硬件在环的风电机组阻抗测量及影响因素分析[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1624-1631.
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Impedance measurement and influence factors analysis for wind turbines based on control-hardware-in-the-loop[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1624-1631.
- [20] 周庭阳, 张红岩. 电网络理论: 图论方程综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 125-170.

作者简介:



刘镇湘

刘镇湘(1998—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为交直流系统稳定性分析与控制(E-mail: l1z2x3@qq.com);

赵晋斌(1972—),男,山西太原人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为现代电力电子技术在电力系统中的应用、新能源发电技术(E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn);

曾志伟(1987—),男,江西抚州人,博士研究生,主要研究方向为交直流系统稳定性分析与控制(E-mail: zhiweizeng525@163.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第84页 continued on page 84)

Key issues of modeling and operation control of flexible DC distribution system under non-ideal conditions

LIU Ziwen¹, TANG Yuan², ZHANG Yongjun², CHEN Bing²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The modeling and operation control of flexible DC distribution system under non-ideal conditions face the dual challenges of both the steady-state operation demand of economy and high efficiency and the dynamic operation demand of safety and stability. The systematic analysis of operating characteristics for flexible DC distribution system under non-ideal conditions, and the discussion of reasonable modeling methods and analytical control techniques, have important theoretical and practical significance to guide the development of future distribution systems towards the direction of more economical, efficient and new energy friendly accessed. For that, along with the research status and development trends at home and abroad, the steady-state modeling and optimal control of flexible DC distribution system under non-ideal conditions, and the multi-time scale dynamic feature modeling and stability control under external stochastic disturbances are deeply analyzed, which points out the main issues of system modeling and operation control under non-ideal conditions. Furthermore, the technical development directions of flexible DC distribution system are explored from the aspects of system modeling and optimization with multiple uncertainties, system interactive feature modeling and collaborative control of unbalanced components under asymmetric conditions, and the multi-time scale dynamic characteristic mechanism modeling and stability control under external stochastic disturbances, which provides the research idea for the modeling and operation control of flexible DC distribution system.

Key words: flexible DC distribution system; distributed power generation; non-ideal conditions; system modeling; operation control; stochastic uncertainty

(上接第33页 continued from page 33)

Small disturbance stability analysis of multi-converter DC microgrid based on impedance network model

LIU Zhenxiang, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, QU Keqing, MAO Ling

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The integration of many renewable energy equipments and loads into DC microgrid through power electronic converters makes the small disturbance stability of MCDCM (Multi-Converter DC Microgrid) face severe challenges, and some limitations exist when using the traditional impedance ratio and state space model to analyze MCDCM. An impedance network model and a negative feedback system with open-loop stable characteristic of MCDCM are established based on the impedance characteristic of converter ports, and the impedance network model is applied to the stability judgment and design of DC microgrid. The time-domain simulative results of a MCDCM with six converters verify the advantages of the proposed method in stability judgment and design of MCDCM.

Key words: impedance network model; multi-converter; small disturbance stability; equivalent open-loop function; generalized Nyquist criterion

附录 A: 矩阵 \mathbf{G} 的推导。

考虑 m 个 GVS 子系统与 n 个 GCS 子系统馈入条件下的无源传输网络, 为简化推导, 构建直流无源传输系统如图 A1 所示。

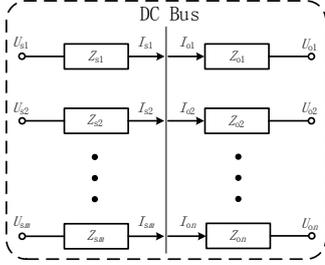


图 A1 无源子系统拓扑结构

Fig.A1 Topological structure of passive subsystem

对直流母线节点, 由基尔霍夫定律可得

$$\sum_{i=1}^m I_{si} = \sum_{j=1}^n I_{oj}, \text{即:}$$

$$I_{sk} = -\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^m I_{si} + \sum_{j=1}^n I_{oj} \quad (\text{A1})$$

GVS 子系统侧输出阻抗 $Z_s = -\frac{U_s}{I_s}$, 即:

$$I_s = -\frac{U_s}{Z_s} \quad (\text{A2})$$

联立式 (A1)、式 (A2), 可得 GVS 子系统电流, 同 GVS 子系统电压与 GCS 子系统电流的线性关系:

$$I_{sk} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^m \frac{U_{si}}{Z_{si}} + \sum_{j=1}^n I_{oj} \quad (\text{A3})$$

将式 (A3) 列写为矩阵形式, 可得矩阵 \mathbf{G} 分块矩阵:

$$\mathbf{G}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1/Z_{s2} & \cdots & 1/Z_{sm} \\ 1/Z_{s1} & 0 & \cdots & 1/Z_{sm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/Z_{s1} & 1/Z_{s2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{m \times m}$$

$$\mathbf{G}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{m \times n}$$

根据线性叠加定理, 考虑直流母线电压为:

$$U_{\text{bus}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (U_{si} - Z_{si} I_{si}) \quad (\text{A4})$$

将式(A4)中 GVS 子系统电流用式(A3)线性表出, 可得:

$$U_{\text{bus}} = \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m U_{si} \left(1 - \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq i}}^m \frac{Z_{st}}{Z_{si}} \right) - \sum_{i=1}^m Z_{si} \sum_{j=1}^n I_{oj} \right] \quad (\text{A5})$$

易知, GCS 子系统端口电压:

$$U_{oj} = U_{\text{bus}} - Z_{j0} I_{oj} \quad (\text{A6})$$

联立式 (A5)、式 (A6), 可得矩阵 \mathbf{G} 分块矩阵:

$$\mathbf{G}_{21} = \begin{bmatrix} g_1 & \cdots & g_m \\ \vdots & & \vdots \\ g_1 & \cdots & g_m \end{bmatrix}_{n \times m}$$

其中, $g_k = \frac{1}{m} \left(1 - \frac{1}{Z_{sk}} \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq k}}^m Z_{st} \right)$ 。

$$\mathbf{G}_{22} = \begin{bmatrix} P - Z_{o1} & P & \cdots & P \\ P & P - Z_{o2} & \cdots & P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P & P & \cdots & P - Z_{on} \end{bmatrix}_{n \times n}$$

其中, $P = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{si}$ 。

综上, 可求解出矩阵 \mathbf{G} :

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11} & \mathbf{G}_{12} \\ \mathbf{G}_{21} & \mathbf{G}_{22} \end{bmatrix}_{(m+n) \times (m+n)}$$

附录 B: 算例中各子系统控制结构及参数。

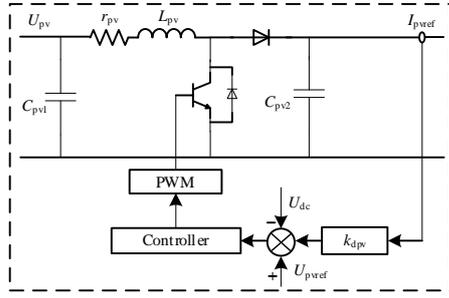


图 B1 Boost 变换器控制结构

Fig.B1 Structure of Boost converter control

Boost 变换器(单台 PV)输出阻抗:

$$Z_{PVc} = \frac{Z_{oPV} - k_{PV} P_{Plu} G_{icPV} G_{udPV} - G_{iiPV} G_{icPV} G_{udPV}}{1 + P_{Plu} G_{icPV} G_{udPV}}$$

母线电流到母线电压的传递函数:

$$Z_{oPV} = \frac{s^2 L_{PV} C_{PV1} + s r_{LPV} C_{PV1} + 1}{s^3 L_{PV} C_{PV1} C_{PV2} + s r_{LPV} C_{PV1} C_{PV2} + sA}$$

电流内环 PI 控制器传递函数:

$$P_{Pii} = \frac{s P_{pi} + P_{ii}}{s}$$

电压外环 PI 控制器传递函数:

$$P_{Piu} = \frac{s P_{pu} + P_{iu}}{s}$$

电流内环闭环传递函数:

$$G_{icPV} = \frac{P_{Pii}}{1 + G_{idPV} P_{Pii}}$$

占空比到母线电压传递函数:

$$G_{udPV} = \frac{-s^2 L_{PV} C_{PV1} I_{LPV} + sB - I_{LPV}}{s^3 L_{PV} C_{PV1} C_{PV2} + s^2 C_{PV1} C_{PV2} + sA}$$

占空比到电感电流传递函数:

$$G_{idPV} = \frac{s^2 C_{PV1} C_{PV2} U_{dcPV} + s C_{PV1} D_{PV} I_{LPV}}{s^3 L_{PV} C_{PV1} C_{PV2} + s^2 r_{LPV} C_{PV1} C_{PV2} + sA}$$

母线电流到电感电流传递函数:

$$G_{iiPV} = \frac{s C_{PV1} D_{PV}}{s^3 L_{PV} C_{PV1} C_{PV2} + s^2 r_{LPV} C_{PV1} C_{PV2} + sA}$$

$$A = C_{PV2} + C_{PV1} D_{PV}^2$$

$$B = C_{PV1} D_{PV} U_{dcPV} - r_{LPV} C_{PV1} I_{LPV}$$

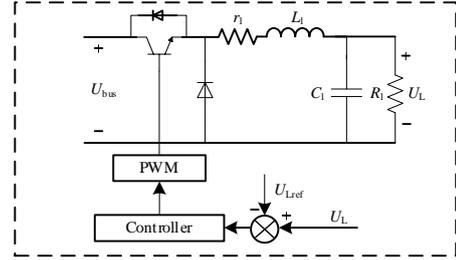


图 B2 Buck 变换器控制结构

Fig.B2 Structure of Buck converter control

Buck 变换器(单台 CPL)输入导纳:

$$Y_{Li} = Y_{inL} - \frac{G_{uuL} F_{PI} T_{idL}}{1 + G_{udL} F_{PI}}$$

电压环 PI 控制器传递函数:

$$F_{PI} = \frac{s F_{pu} + F_{iu}}{s}$$

输入电压到输入电流传递函数:

$$Y_{inL} = \frac{D_L^2 (s C_L R_L + 1)}{s^2 C_L L_L R_L + s (L_L + C_L r_{LL} R_L) + R_L + r_{LL}}$$

输入电压到输出电压传递函数:

$$G_{uuL} = \frac{D_L R_L}{s^2 C_L L_L R_L + s (L_L + C_L R_L r_{LL}) + R_L + r_{LL}}$$

占空比到输出电压传递函数:

$$G_{udL} = \frac{U_{dcL} R_L}{s^2 C_L L_L R_L + s (L_L + C_L R_L r_{LL}) + R_L + r_{LL}}$$

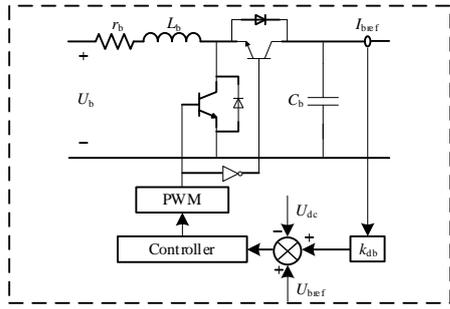


图 B3 DC/DC 变换器控制结构

Fig.B3 Structure of DC/DC converter control

DC/DC 变换器(单台 ES)输出阻抗:

$$Z_{Bc} = \frac{Z_{ob} - k_{db} B_{Piu} G_{icb} G_{udb} - G_{iib} G_{icb} G_{udb}}{1 + B_{Piu} G_{icb} G_{udb}}$$

母线电流到母线电压传递函数:

$$Z_{ob} = -\frac{sL_b + r_{Lb}}{s^2 C_b L_b + s C_b r_{Lb} + D_b^2}$$

电压外环 PI 控制器传递函数:

$$B_{Piu} = \frac{sB_{pu} + B_{iu}}{s}$$

电流内环 PI 控制器传递函数:

$$B_{Pii} = \frac{sB_{pi} + B_{ii}}{s}$$

电流内环闭环传递函数:

$$G_{icb} = \frac{B_{Pii}}{1 + G_{idb} B_{Pii}}$$

占空比到电感电流传递函数:

$$G_{idb} = -\frac{sC_b U_{dcb} + D_b I_{Lb}}{s^2 C_b L_b + s C_b r_{Lb} + D_b^2}$$

占空比到母线电压传递函数:

$$G_{udb} = \frac{(sL_b + r_{Lb}) I_{Lb} - D_b U_{dcb}}{s^2 C_b L_b + s C_b r_{Lb} + D_b^2}$$

母线电流到电感电流传递函数:

$$G_{iib} = \frac{D_b}{s^2 C_b L_b + s C_b r_{Lb} + D_b^2}$$

表 B1 Boost 变换器设计参数

Table B1 Designed parameters of Boost converter

参数	数值	参数	数值
P_{pu}	5	r_{pv}	0.2 Ω
P_{iu}	50	C_{pv1}	100 μF
P_{pi}	0.055	C_{pv2}	200 μF
P_{ii}	10	U_{pv}	98V
$L_{pv}()$	2 mH	k_{dpv}	1.52

表 B2 Buck 变换器设计参数

Table B2 Designed parameters of Buck converter

参数	数值	参数	数值
F_{pu}	0.5	r_l	0.1 Ω
F_{iu}	10	C_1	200 μF
L_1	3 mH		

表 B3 DC/DC 变换器设计参数

Table B3 Designed parameters of DC/DC converter

参数	数值	参数	数值
B_{pu}	0.295	r_b	0.1 Ω
B_{iu}	18.508	C_b	100 μF
B_{pi}	2.5	U_b	147 V
B_{ii}	20	k_{db}	0.01
L_b	1 mH		

表 B4 传输线路设计参数

Table B4 Designed parameters of Transmission line

参数	数值	参数	数值
r_{s1}	0.006 Ω	L_{s1}	1.675 μH
r_{s2}	0.006 Ω	L_{s2}	1.675 μH
r_{s3}	0.005 Ω	L_{s3}	1.25 μH
r_{s4}	0.005 Ω	L_{s4}	1.25 μH
r_{o1}	0.02 Ω	L_{o1}	5 μH
r_{o2}	0.02 Ω	L_{o2}	5 μH