

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.151

中图分类号: TM76

文献标志码: A

# 多母线级联的海底直流供电系统阻抗建模 与稳定性分析

陈浩杰, 李 杨, 帅智康, 吴向阳  
(湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

**摘要:** 随着海底观测网规模的扩大, 其大功率供电系统的稳定性问题受到关注。基于此, 建立了海底供电系统关键部件的阻抗模型, 针对海底直流供电系统高电力电子渗透率、多母线级联且邻级母线交互耦合的特点, 采用逐级分析法探究海底直流供电系统稳定性及其影响因素。分析结果表明: 控制器积分参数是 Buck 变换器失稳的主导参数, 控制器比例参数是接驳盒子系统失稳的主导参数, 光电复合海缆电阻参数的增大及电感参数的减小均可有效提升系统的稳定性。基于 PLECS 仿真软件的仿真结果验证了稳定性分析结果的正确性。

**关键词:** 海底观测网; 直流供电系统; 阻抗建模; 小信号稳定性

## Impedance Modeling and Stability Analysis of Multi-bus Cascaded Subsea DC Power Supply System

CHEN Haojie, LI Yang, SHUAI Zhikang, WU Xiangyang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** With the scale expansion of a subsea observation network, the stability of its high-power power supply system has attracted attention. First, the impedance models of key parts in the subsea power supply system are established. Considering the characteristics of high power electronic penetration rate, multi-bus cascading and adjacent bus interactive coupling of the subsea DC power supply system, the stability and influencing factors of the system are explored by using the step-by-step analysis method. The analysis result shows that the integral parameter of the controller is the dominant parameter that leads to the instability of the Buck converter, and the proportional parameter of the controller is the dominant parameter that results in the instability of the junction box subsystem. Both an increase in the impedance parameter of the optoelectronic composite cable and a decrease in the inductance parameter are beneficial to improving the system stability. The simulation results based on the PLECS simulation software verify the stability analysis results.

**Keywords:** Subsea observation network; DC power supply system; impedance modeling; small-signal stability

海底科学观测网是人类观测地球的第三个平台<sup>[1]</sup>, 其建设可以为国家海洋安全、资源与能源开

发、环境监测和灾害预警预报等研究提供支撑。近年来, 国际上多个国家都在加紧建设其海底观测网, 抢占海上先机。我国在“十四五”规划中将海底科学观测网列为六个战略导向型国家重大科技基础设施之一<sup>[2]</sup>。

海底供电系统为海底观测网的运行提供电能, 是海底观测网稳定运行的重要保障。海底供电系统呈现高电力电子渗透率、多母线级联且邻级母线之间经中间变换器强交互耦合的特点, 而系统中大量变换器与系统之间交互耦合易导致系统发生振荡

收稿日期: 2023-02-06; 录用日期: 2023-04-01; 网络首发日期: 2023-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52125705); 中国博士后科学基金面上资助项目(2021M701137); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40066)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52125705; China Postdoctoral Science Foundation under the grant 2021M701137; Natural Science Foundation of Hunan Province under the grant 2022JJ40066

失稳<sup>[3]</sup>, 威胁海底供电系统安全、稳定运行。

针对级联系统的小扰动稳定性, 现有文献主要采用阻抗比判据进行分析, 仅需要计算两侧变换器的输入、输出阻抗, 不要求取系统整体的传递函数, 计算量小, 但适用的前提是各变换器的阻抗模型不包含右半平面极点<sup>[4]</sup>, 因此存在一定局限性; 文献[5]提出 1 种母线等效阻抗判据来分析具有两级母线的直流系统稳定性, 该方法利用其中一级母线等效阻抗来判定系统整体稳定性, 难以辨识系统整体稳定性的薄弱环节; 文献[6]通过分级式方法研究多母线级联系统的稳定性, 即通过逐级分析系统稳定性及影响因素, 可以有效辨识系统整体稳定性的薄弱环节, 但未考虑线路阻抗对系统稳定性的影响; 文献[7]提出了 1 种基于母线节点阻抗判据, 研究包含线路阻抗的配电系统稳定性, 但未给出有效分析系统稳定性主导影响参数的分析思路。

针对海底供电系统呈现高电力电子渗透率、多母线级联的结构特点, 本文采用逐级分析法进行系统稳定性分析, 并针对不同变换器的阻抗特性和系统特征选择合理的判据进行稳定性判定; 同时, 为有效影响系统稳定性的主导参数, 利用参数灵敏度定量分析不同级变换器参数或线路参数对稳定性的影响, 识别系统失稳主导参数; 最后在 PLECS 仿真平台搭建仿真模型, 验证理论分析的准确性。

## 1 海底双端直流供电系统拓扑

随着海底观测网规模的不断扩大和大量科学仪器的不断接入, 海底观测网供电系统的功率等级也随之增大。为了保证供电的高可靠性, 如图 1 所示的双端直流供电系统成为常见的供电拓扑, 本文以此为研究对象。

供电系统主要由岸站、光电复合海缆和接驳盒构成。岸站作为海底观测网的电能中心和数据中心, 将交流电转换为-10 kV 直流电, 采用模块化多电平变换器实现电能转换; 光电复合海缆承担着

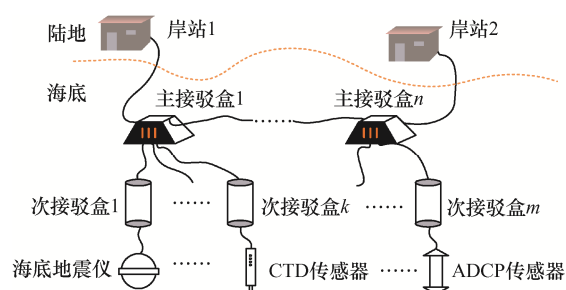


图 1 海底双端直流供电系统的典型拓扑

Fig. 1 Typical topology of subsea double-ended DC power supply system

系统电能和数据的输送任务, 负责将-10 kV 直流电输送至位于海底的主接驳盒; 主接驳盒变换器则将岸站供给的-10 kV 直流电转换为 375 V 低压直流电, 采用输入串联输出并联 ISOP(input-series output-parallel)结构的 LLC 谐振变换器实现; 次接驳盒变换器再将 375 V 转换为低压 48 V/12 V, 为海底科学仪器供电。本文选取 Buck 变换器作为次接驳盒变换器的示例。

## 2 系统关键变换器阻抗模型

开展系统阻抗稳定性分析的前提是建立系统各模块的准确阻抗模型。本节针对模块化多电平变换器、LLC 谐振变换器、Buck 变换器进行阻抗建模, 作为后续稳定性分析的必要基础。

### 2.1 LLC 谐振变换器阻抗建模

LLC 谐振变换器的电路拓扑如图 2 所示, 由于 LLC 谐振变换器谐振腔中的有效成分为正弦量, 故无法使用平均法对其进行小信号建模, 而现有文献通常采用扩展描述函数法<sup>[8]</sup>对其进行建模。

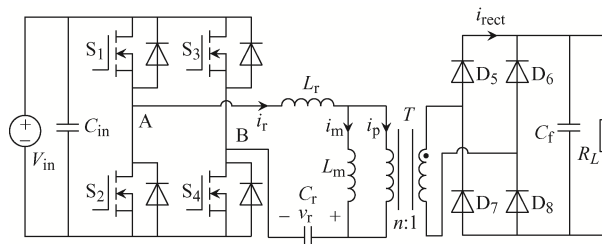


图 2 LLC 谐振变换器拓扑

Fig. 2 Topology of LLC resonant converter

采用扩展描述函数法建立 LLC 谐振变换器的

闭环小信号模型<sup>[9]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}=[\hat{i}_{rs} \ \hat{i}_{rc} \ \hat{v}_{rs} \ \hat{v}_{rc} \ \hat{i}_{ms} \ \hat{i}_{mc} \ \hat{v}_o]^T$ ;  $\mathbf{u}=[\hat{v}_{in} \ \hat{i}_o]^T$ ;  $\mathbf{y}=[\hat{v}_o \ \hat{i}_{in}]^T$ ;  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$  分别为系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵。

LLC 谐振变换器的输入导纳为

$$Y_{inLLC} = \mathbf{C}_2(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}_1 \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{C}_2$  为矩阵  $\mathbf{C}$  的第 2 列;  $\mathbf{B}_1$  为矩阵  $\mathbf{B}$  的第 1 行;  $s$  为复变量;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

### 2.2 模块化多电平变换器等效建模

模块化多电平变换器 MMC(modular multi-level converter)的小信号建模方法主要有详细建模法<sup>[10]</sup>、平均值建模法<sup>[11]</sup>和谐波状态空间法<sup>[12]</sup>: 详细建模法和谐波状态空间法得到的复杂模型适用于 MMC 多控制环交互失稳分析; 平均值建模法得到的简化模型则适用于多变换器系统级稳定性分析<sup>[13]</sup>。故本文采用如图 3 所示的平均值模型进行分析, 其等效电阻、等效电感、等效电容的计算式<sup>[12]</sup>分别为

$$\begin{cases} R_{eq} = \frac{1}{3}R_{arm} \\ L_{eq} = \frac{1}{3}L_{arm} \\ C_{eq} = \frac{6C_{SM}}{N} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $R_{arm}$ 、 $L_{arm}$ 、 $C_{SM}$  和  $N$  分别为模块化多电平变换器的桥臂电阻、桥臂电感、子模块电容和桥臂子模块数量。则模块化多电平变换器的输出阻抗为

$$Z_{oMMC} = 2(R_{eq} + sL_{eq}) + \frac{1}{sC_{eq}} \quad (4)$$

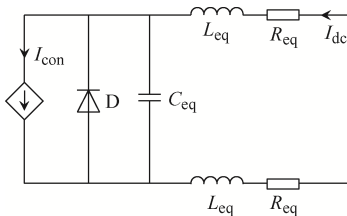


图 3 MMC 直流侧平均值模型

Fig. 3 DC-side average-value model of MMC

### 2.3 Buck 变换器阻抗建模

目前, Buck 变换器小信号建模的方法有开关周期平均法、状态空间平均法和统一电路模型建模法<sup>[14]</sup>。本文采用开关周期平均法<sup>[15]</sup>建立其闭环二端口小信号模型, 可表示为

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{inBuck} & G_{iiBuck} \\ G_{vvBuck} & -Z_{oBuck} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{in} \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

Buck 变换器的输入导纳为

$$Y_{inBuck} = \frac{\hat{i}_{in}}{\hat{v}_{in}} = G_{vi} - \frac{G_{vv}G_{di}G_c}{1 + G_{vd}G_c} \quad (6)$$

式中:  $\hat{i}_{in}$ 、 $\hat{i}_o$  分别为输入电流小扰动和输出电流小扰动;  $\hat{v}_{in}$ 、 $\hat{v}_o$  分别为输入电压小扰动和输出电压小扰动;  $G_{iiBuck}$ 、 $G_{vvBuck}$  分别为输出电流小扰动到输入电流小扰动的闭环传递函数、输入电压小扰动到输出电压小扰动的闭环传递函数;  $Z_{oBuck}$  为 Buck 变换器输出阻抗;  $G_{vi}$ 、 $G_{vv}$ 、 $G_{di}$ 、 $G_c$ 、 $G_{vd}$  分别为输入电压小扰动到输入电流小扰动的开环传递函数、输入电压小扰动到输出电压小扰动的开环传递函数、占空比小扰动到输入电流小扰动的开环传递函数、控制器传递函数、占空比小扰动到输出电压小扰动开环传递函数。

## 3 海底供电系统稳定性分析

在第 2 节建立的供电系统关键变换器阻抗模型基础上, 可以得到如图 4 所示的海底双端直流供电系统的频域阻抗等效电路, 用以进行系统稳定性分析, 系统参数见表 1。

### 3.1 系统稳定性分析方法

海底双端直流供电系统为多母线系统, 光电复合海缆的分布式电感、电容等参数较大, 其对于稳定性的影响不可忽略。针对海底供电系统高电力电子渗透率、多母线级联的特点, 本文采用逐级分析法进行系统稳定性分析。根据海底双端直流供电系统结构(图 4)对其进行分级: 第 1 级为 Buck 变换器, 第 2 级为 LLC 谐振变换器和后级 Buck 变换器的交互, 第 3 级为模块化多电平变换器、光电复合海缆和接驳盒子系统的交互。

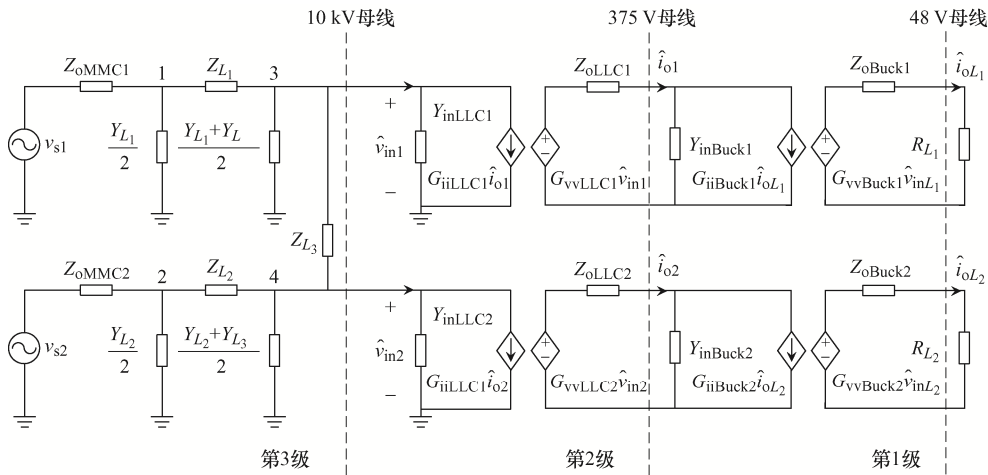


图 4 海底双端直流供电系统的频域阻抗等效电路

Fig. 4 Frequency-domain impedance equivalent circuit of subsea double-ended DC power supply system

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

变换器	参数	数值
MMC	输出电压 $V_{dc}/kV$	10
	桥臂电感 $L_{am}/H$	0.02
	子模块电容 $C_{SM}/mF$	1
	输出功率 $P/kW$	50
	桥臂电阻 $R_{am}/\Omega$	0.1
	子模块数 $N_{MMC}/个$	20
LLC 谐振变换器	输入电压 $V_{in\_LLC}/kV$	1
	输出电压 $V_{o\_LLC}/V$	375
	子模块数 $N_{LLC}/个$	10
	额定功率 $P_{LLC}/kW$	5
	输入电容 $C_{in\_LLC}/\mu F$	120
	谐振电感 $L_r/\mu H$	52
	谐振电容 $C_r/nF$	43.9
	励磁电感 $L_m/\mu H$	364
	输出电容 $C_o/\mu F$	2 200
	比例参数 $K_{p1}$	10
积分参数 $K_{i1}$	10 000	
Buck 变换器	输出电压 $V_{o2}/V$	48
	负载数量 $N_{Buck}/个$	10
	输出功率 $P_{o2}/kW$	5
	电容参数 $C/\mu F$	1 250
	比例参数 $K_{p2}$	0.05
积分参数 $K_{i2}$	10	

首先, 针对 Buck 变换器自身的稳定性, 可以根据式(5)中输入导纳  $Y_{inBuck}$  是否存在右半平面极点进行判断, 若输入导纳包含右半平面极点, 则 Buck 变换器自身不稳定, 反之则稳定。

其次, 针对接驳盒子系统的稳定性分析。图 5 为接驳盒子系统的等效电路, 其中  $Y_{inBuck}$  为负载 Buck 变换器的等效输入导纳,  $Y_{inLLC}$  和  $Z_{oLLC}$  分别为 LLC 谐振变换器的输入导纳和输出阻抗。由于  $Y_{inBuck}$  中包含第 1 级母线负载阻抗, 第 1 级母线负载与第 2 级母线变换器的交互影响可由  $Y_{inBuck}$  与 LLC 谐振变换器交互来反映。由于变频控制的 LLC 谐振变换器输出阻抗包含右半平面极点, 不满足传统阻抗比判据应用的前提, 因此需要计算接驳盒子系统等效输入导纳  $Y_{ineq}$ , 并根据  $Y_{ineq}$  是否包含右半平面极点来判断 LLC 谐振变换器和负载的交互稳定性。

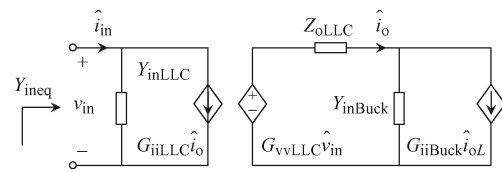


图 5 接驳盒子系统等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of junction box subsystem

最后, 针对模块化多电平变换器、光电复合海缆网络和接驳盒子系统之间的交互影响。如图 6 所示, 第 3 级系统为多输入、多输出系统, 需采用基于节点导纳矩阵的稳定性判据进行稳定性分析。

首先, 根据基尔霍夫电流定律列出系统节点导纳方程, 有

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ V_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_o \\ I_{in} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{V}_o=[v_{o1} \ v_{o2}]^T$ ;  $\mathbf{V}_{in}=[v_{in1} \ v_{in2}]^T$ ;  $\mathbf{I}_o=[i_{o1} \ i_{o2}]^T$ ;  $\mathbf{I}_{in}=[-i_{in1} \ -i_{in2}]^T$ 。

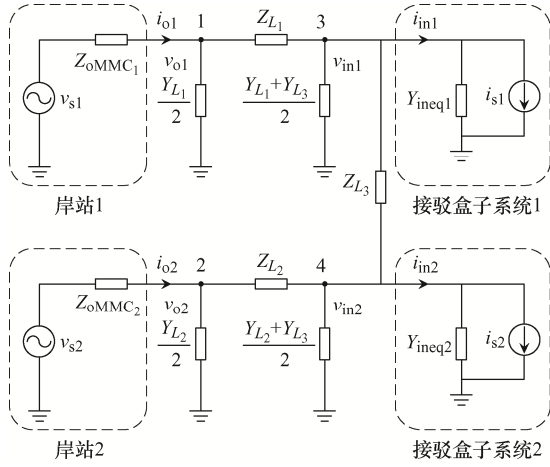


图 6 海底两端供电系统等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of subsea double-ended power supply system

同时可得到系统节点阻抗方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_o \\ \mathbf{V}_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_o \\ \mathbf{I}_{in} \end{bmatrix} \quad (8)$$

模块化多电平变换器输出特性和接驳盒子系统输入特性的表达式分别为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_o = \mathbf{V}_s - \mathbf{Z}_{eq} \mathbf{I}_o = \mathbf{V}_s - \mathbf{Z}_{eq} (\mathbf{Y}_{11} \mathbf{V}_o + \mathbf{Y}_{12} \mathbf{V}_{in}) \\ \mathbf{I}_{in} = \mathbf{I}_s + \mathbf{Y}_{eq} \mathbf{V}_{in} = \mathbf{I}_s + \mathbf{Y}_{eq} (\mathbf{Z}_{21} \mathbf{I}_o - \mathbf{Z}_{22} \mathbf{I}_{in}) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{V}_s=[v_{s1} \ v_{s2}]^T$ ;  $\mathbf{I}_s=[i_{s1} \ i_{s2}]^T$ ;  $\mathbf{Z}_{eq}=\text{diag}(Z_{oMMC1} \ Z_{oMMC2})$ ;  $\mathbf{Y}_{eq}=\text{diag}(Y_{ineq1} \ Y_{ineq2})$ 。

结合式(7)~式(9)可推导出系统的回比矩阵为

$$\mathbf{G}_{net} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{eq}(\mathbf{I}-\mathbf{Z}_{21}\mathbf{Y}_{12})^{-1}\mathbf{Z}_{22} & -\mathbf{Y}_{eq}(\mathbf{I}-\mathbf{Z}_{21}\mathbf{Y}_{12})^{-1}\mathbf{Z}_{21}\mathbf{Y}_{11} \\ -\mathbf{Z}_{eq}(\mathbf{I}-\mathbf{Y}_{12}\mathbf{Z}_{21})^{-1}\mathbf{Y}_{12}\mathbf{Z}_{22} & \mathbf{Z}_{eq}(\mathbf{I}-\mathbf{Y}_{12}\mathbf{Z}_{21})^{-1}\mathbf{Y}_{11} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为  $4 \times 4$  的单位矩阵。

若系统回比矩阵  $\mathbf{G}_{net}$  满足广义奈奎斯特判据, 即其广义奈奎斯特曲线不包围点  $(-1, 0)$ , 则系统稳定; 若不满足广义奈奎斯特判据, 则系统不稳定。

### 3.2 系统稳定性影响因素分析

采用第 2 节提出的稳定性分析方法判断海底供电系统的稳定性, 并利用参数灵敏度定量分析部

分系统参数对于各级稳定性的影响。

#### 3.2.1 第 1 级稳定性分析

为了定量分析参数对稳定性的影响, 可以采用参数灵敏度法进行研究。将相对参数灵敏度定义为

$$S = \frac{\Delta\{\text{Re}[P_d]\}}{\Delta\alpha} \quad (11)$$

式中:  $P_d$  为输入导纳的主导极点;  $\Delta\{\text{Re}[P_d]\}$  为主导极点实部的相对变化量,  $\Delta\{\text{Re}[P_d]\}=(\text{Re}[P_d]-\text{Re}[P_d])/\text{Re}[P_d]$ ;  $\Delta\alpha$  为某系统参数的相对变化量, 一般选取一个较小值, 如 0.01。

Buck 变换器自身稳定性参数灵敏度分析结果如图 7 所示, 可见: 增大控制参数  $K_{p2}$  或者减小电容参数  $C$  和控制参数  $K_{i2}$  可以提高 Buck 变换器自身的稳定性, 其中  $K_{i2}$  对系统稳定性的影响最大, 而电感参数  $L$  对系统稳定性的影响较小。

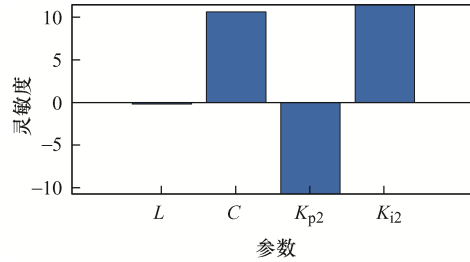


图 7 Buck 变换器参数灵敏度分析结果

Fig. 7 Parameter sensitivity analysis result of Buck converter

以 Buck 变换器控制器积分参数  $K_{i2}$  为例, 参数发生变化时 Buck 变换器输入导纳的零极点分布如图 8 所示, 可见: 随着  $K_{i2}$  的增大, 主导极点向虚轴靠近, 甚至出现右半平面极点, 系统稳定性下降。

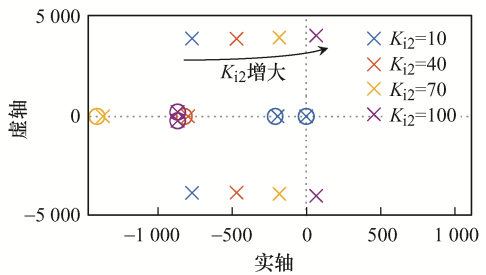


图 8 Buck 变换器输入导纳零极点图

Fig. 8 Pole and zero plot of input admittance of Buck converter

### 3.2.2 第 2 级稳定性分析

在保证 Buck 变换器稳定的前提下,可以对第 2 级 LLC 谐振变换器与 Buck 变换器的交互稳定性进行分析。同第 1 级稳定性分析方法类似,可以得到接驳盒子系统各参数灵敏度分析结果,如图 9 所示。可见:增大 Buck 变换器电感参数、电容参数,或者减小 Buck 变换器控制器比例参数、LLC 谐振变换器的谐振电感参数均可有效提高接驳盒子系统的稳定性,其中 Buck 变换器控制器比例控制参数  $K_{p2}$  对系统稳定性的影响较大。

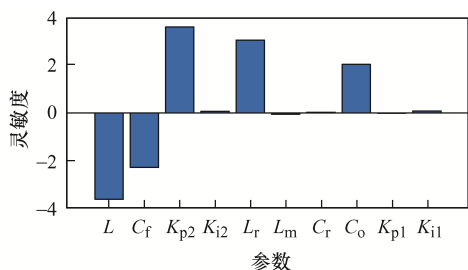


图 9 接驳盒子系统各参数灵敏度分析结果

Fig. 9 Parameter sensitivity analysis results of junction box subsystem

以 Buck 变换器控制器控制比例参数  $K_{p2}$  为例,当比例参数  $K_{p2}$  发生变化时,接驳盒子系统等效输入导纳的零极点分布如图 10 所示。可见:随着  $K_{p2}$  的增大,主导极点向虚轴靠近,甚至出现右半平面极点,系统稳定性下降。

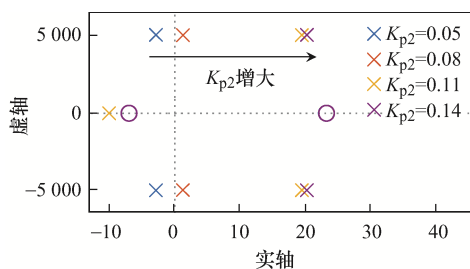


图 10 接驳盒子系统等效输入导纳零极点图

Fig. 10 Pole and zero plot of equivalent input admittance of junction box subsystem

### 3.2.3 第 3 级稳定性分析

在接驳盒子系统稳定的前提下,海底双端直流供电系统的稳定性受到光电复合海缆参数、岸站变换器和接驳盒变换器阻抗特性的影响。当系统运行

于表 1 所示参数时,系统回比矩阵的广义奈奎斯特曲线如图 11 所示,可以看到,曲线包围点  $(-1, 0)$ ,系统失稳,穿越频率为 1 126 Hz,振荡频率为 1 254 Hz。

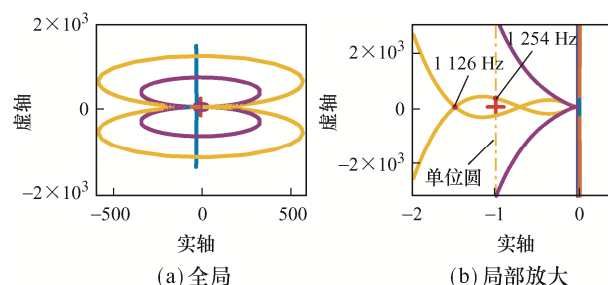


图 11 失稳系统  $G_{net}$  广义奈奎斯特曲线

Fig. 11  $G_{net}$  generalized Nyquist curve of unstable system

由于系统参数较多,首先通过灵敏度定量分析系统各模块对稳定性的影响,初步识别系统失稳主导模块,简化分析复杂度。将相对参数灵敏度定义为

$$S = \frac{\Delta\lambda(f_{cr})}{\Delta\alpha} \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  为包围点  $(-1, 0)$  的特征值;  $\Delta\lambda(f_{cr}) = [\lambda(f_{cr2}) - \lambda(f_{cr1})] / \lambda(f_{cr1})$  为参数改变前、后穿越频率处特征值  $\lambda$  的相对变化量;  $\Delta\alpha$  为某系统参数的相对变化量,一般选取一个较小值,如 0.01。

各模块灵敏度分析结果如图 12 所示,可以看到:光电复合海缆电阻、电感参数和接驳盒子系统的输入导纳对系统稳定性的影响较大,岸站变换器输出阻抗和光电复合海缆电容参数对系统稳定性的影响较小。同时,针对接驳盒子系统对系统稳定性的影响,首先分析接驳盒子系统输入导纳的实部和虚部对系统稳定性的影响,灵敏

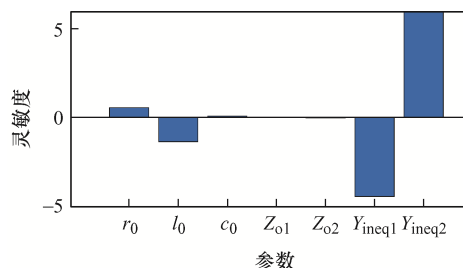


图 12 双端供电系统稳定性参数灵敏度

Fig. 12 Parameter sensitivity of stability of double-ended power supply system

度分析结果如图 13 所示, 可见: 输入导纳的虚部对系统稳定性的影响较大, 实部对系统稳定性的影响相对较小。接着分析控制参数对于输入导纳的影响, 分析结果如图 14 所示, 可见: 接驳盒子系统控制参数对输入导纳实部影响较大, 对于虚部的影响极小。故接驳盒子系统输入导纳  $Y_{ineq}$  对系统稳定性的影响较小, 第 3 级稳定性主要受光电复合海缆电阻和电感参数的影响。

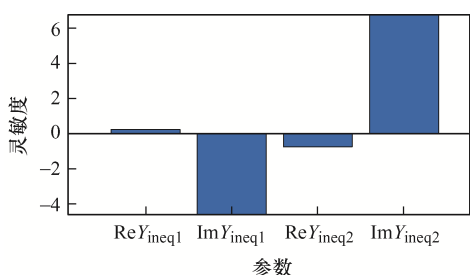


图 13 接驳盒输入导纳实、虚部灵敏度分析结果

Fig. 13 Sensitivity analysis results of real and imaginary parts of junction box input admittance

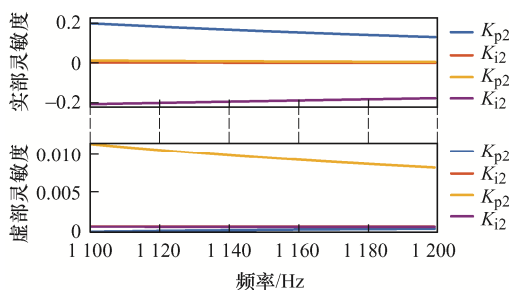
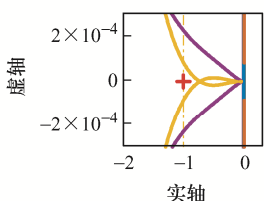


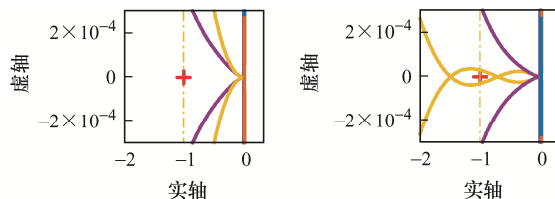
图 14 接驳盒子系统控制参数灵敏度分析结果

Fig. 14 Sensitivity analysis result of control parameters of junction box subsystem

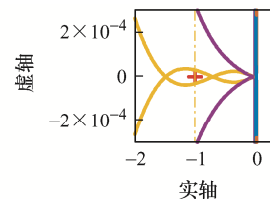
当光电复合海缆电阻、电感参数和 Buck 变换器比例参数取不同值时, 系统回比矩阵  $G_{net}$  的广义奈奎斯特曲线如图 15 所示, 可见: 当增大光电复合海缆电阻参数或者减小电感参数时,



(a) 增大  $r_0=0.1 \Omega/\text{km}$



(b) 减小  $L_0=0.75 \text{ mH}/\text{km}$



(c) 减小  $K_{p2}=0.025$

图 15 不同参数下系统回比矩阵  $G_{net}$  广义奈奎斯特曲线  
Fig. 15 Generalized Nyquist curve of  $G_{net}$  under different parameters

$G_{net}$  广义奈奎斯特曲线均不包围点  $(-1, 0)$ , 表明系统稳定; 而当减小 Buck 变换器控制参数  $K_{p2}$  时,  $G_{net}$  广义奈奎斯特曲线包围点  $(-1, 0)$ , 表明系统仍不稳定。

## 4 仿真验证

为了验证理论分析的正确性, 通过 PLECS 仿真平台搭建仿真模型进行仿真验证。

### 4.1 第 1 级稳定性分析验证

不同控制参数下的 Buck 变换器输出电压波形如图 16 所示, 可见: 当  $K_{i2}=100$  时, 系统振荡失稳; 当  $K_{i2}=10$  时, 系统稳定, 仿真结果与理论分析相符。

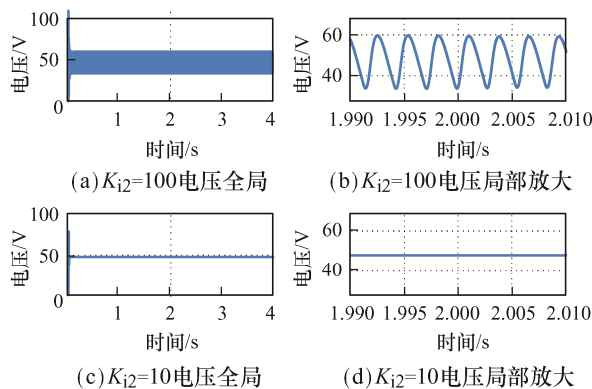


图 16 Buck 变换器输出电压波形

Fig. 16 Output voltage waveforms of Buck converter

### 4.2 第 2 级稳定性分析验证

不同控制参数下, LLC 谐振变换器输出电压波形如图 17 所示, 可见: 当  $K_{p2}=0.05$  时, 系统稳定; 当  $K_{p2}=0.10$  时, 系统振荡失稳, 仿真结果与理论分析相符。

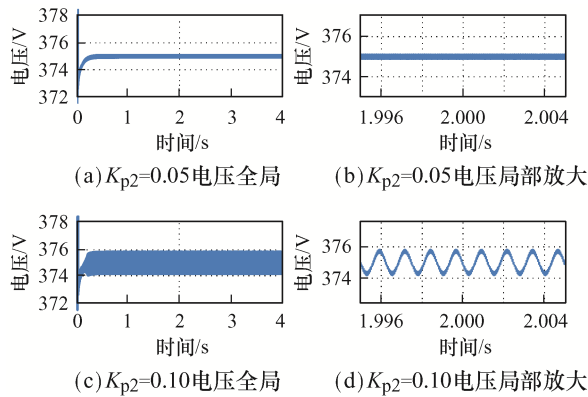


图 17 LLC 谐振变换器输出电压波形

Fig. 17 Output voltage waveforms of LLC resonant converter

### 4.3 第 3 级稳定性分析验证

不同参数下,海底供电系统节点 3 处的电压波形如图 18 所示,可以看到:失稳案例的系统节点 3 处的电压波形振荡发散,振荡频率为 1 250 Hz,增大电阻参数或减小电感参数后,电压波形收敛,系统稳定;减小控制参数  $K_{p2}$  后,电压波形仍振荡发散,稳定性改善不明显,仿真结果与理论分析相符。

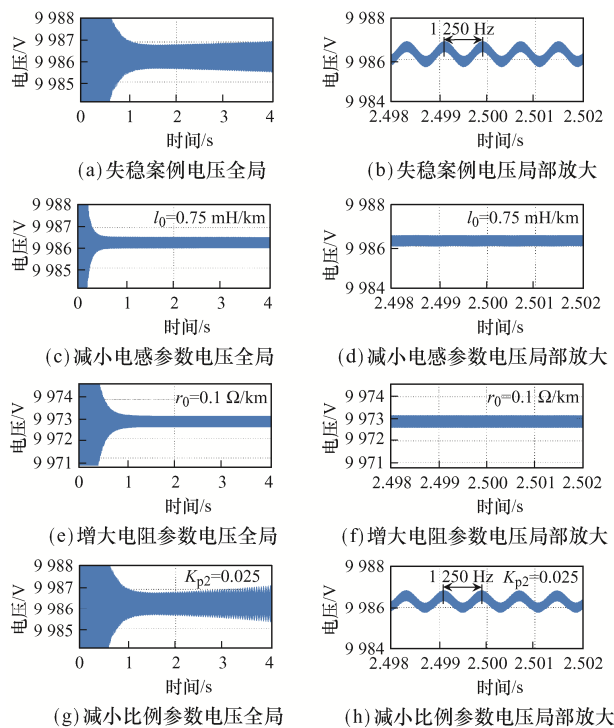


图 18 不同参数下系统节点 3 电压波形

Fig. 18 Voltage waveforms of system at node 3 under different parameters

## 5 结论

本文针对海底双端直流供电系统,首先建立了关键变换器的阻抗模型,在此基础上采用逐级分析法对海底双端直流供电系统的稳定性进行了分析,通过参数灵敏度定量探究了系统参数对于各级系统稳定性的影响,最后通过仿真验证了理论分析的正确性,得到主要结论如下。

(1)在第 1 级稳定性分析中,增大电感参数和控制比例参数或减小电容参数和控制积分参数均可以提高 Buck 变换器自身的稳定性,其中 Buck 变换器控制积分参数是该级的主导参数。

(2)在第 2 级稳定性分析中,增大 Buck 变换器电感、电容参数或减小 Buck 变换器控制比例参数、LLC 谐振变换器谐振电感参数均可有效提高接驳盒子系统的稳定性,其中 Buck 变换器控制比例参数是该级的失稳主导参数。

(3)在第 3 级稳定性分析中,光电复合海缆电阻参数的增大或电感参数的减小均能提高海底双端直流供电系统的小信号稳定性。

在不同级的稳定性分析过程中,参数对于稳定性的影响效果存在冲突,在实际工程设计时需要注意参数的优化折中。

### 参考文献:

- [1] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志, 2007, 29(3): 125-130.  
Wang Pinxian. Seafloor observatories: The third platform for earth system observation [J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(3): 125-130. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[N]. 人民日报, 2021-03-13 (001).  
Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035 [N]. People's Daily Online, 2021-03-13(001). (in Chinese)
- [3] Lu Shuai. Infrastructure, operations, and circuits design of

- an undersea power system [D]. Washington: University of Washington, 2006.
- [4] 朱正斌, 徐航捷, 潘本仁, 等. 直流分布式系统源荷对等型阻抗比判据研究[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 64-73.  
Zhu Zhengbin, Xu Hangjie, Pan Benren, et al. Research on source and load peer-to-peer impedance-based stability criterion for DC distributed system [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 64-73. (in Chinese)
- [5] He Bangbang, Chen Wu, Mu Han, et al. Small-signal stability analysis and criterion of triple-stage cascaded DC system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2): 2576-2586.
- [6] Li Yang, Shuai Zhikang, Fang Junbin, et al. Small-signal stability analysis method for hybrid AC-DC systems with multiple DC buses [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 17-27.
- [7] He Bangbang, Chen Wu, Ruan Xinbo, et al. A generic small-signal stability criterion of DC distribution power system: Bus node impedance criterion (BNIC) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 6116-6131.
- [8] Yang E X Q. Extended describing function method for small-signal modeling of resonant and multi-resonant converters [D]. Blacksburg: Virginia Tech, 1994.
- [9] 宋宇琦. 中压直流配电系统小信号稳定性分析与参数优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.  
Song Yuqi. Research on small signal stability analysis and parameter optimization design of medium voltage DC distribution system [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [10] Peralta J, Saad H, Denneriere S, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.
- [11] Lü Jing, Zhang Xin, Cai Xu, et al. Harmonic state-space based small-signal impedance modeling of a modular multilevel converter with consideration of internal harmonic dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2134-2148.
- [12] Yang Heya, Dong Yufei, Li Wuhua, et al. Average-value model of modular multilevel converters considering capacitor voltage ripple [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 723-732.
- [13] 朱蜀. 考虑谐波交互的 MMC 模型及其在小信号稳定性分析中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.  
Zhu Shu. MMC models considering harmonic interaction and their application to small-signal stability analysis [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (in Chinese)
- [14] 周国华, 冷敏瑞, 李媛, 等. 开关变换器及其控制环路的建模综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 183-199, 386.  
Zhou Guohua, Leng Minrui, Li Yuan, et al. A review on modeling of switching converters and their control loops [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 183-199, 386. (in Chinese)
- [15] 陈庆, 袁栋, 袁宇波, 等. 多电压等级直流配电系统小信号稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 80-88.  
Chen Qing, Yuan Dong, Yuan Yubo, et al. Small-signal stability assessment method for DC distribution system with multiple voltage levels [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 80-88. (in Chinese)



陈浩杰

## 作者简介:

陈浩杰(1997—), 男, 硕士研究生。  
研究方向: 直流系统建模与稳定性分析。  
E-mail: chenhaojie@hnu.edu.cn。

李杨(1991—), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员。研究方向: 电能质量控制和电力电子。E-mail: mydygyx@163.com。

帅智康(1982—), 男, 博士, 教授。  
研究方向: 先进电能质量控制理论、微电网的稳定性分析及控制、电力电子技术及应用。E-mail: szk@hun.edu.cn。

吴向阳(1993—), 男, 博士研究生。  
研究方向: 中压直流系统稳定性分析。  
E-mail: wuxy@hnu.edu.cn。

(责任编辑: 郭凯凯)