

# 考虑趋肤效应的海底长线缆变频供电系统研究

郭江艳<sup>1</sup>, 欧阳晖<sup>2</sup>, 彭新<sup>2</sup>, 朱文杰<sup>3</sup>

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205;  
3. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 水下长距离供电方案在深海油气生产系统中广泛应用, 但面临着电动机启动困难、谐振过电压和供电质量差等问题。深海长线缆供电中线缆阻抗和分布式参数导致供电线路参数改变, 对变频器输出特性和电动机运行特性均造成较大影响。在介绍海底长线缆供电系统结构、关键电路和参数的基础上, 首先分析了不同长线缆建模方法, 提出了考虑趋肤效应的长线缆模型, 同时分析了短路输入阻抗的数学模型。然后结合实际测得的线缆参数, 进行了线缆模型阻抗特性仿真和分析, 所提模型能较好地模拟线缆电阻和电感参数, 提高了长线缆模型的准确性。最后搭建了长线缆变频供电系统仿真模型, 分析了系统静态特性、长距离启动、电压和电流谐波等, 对深海长距离变频供电方案应用具有参考意义。

**关键词:** 水下供电; 长线缆; 阻抗; 趋肤效应; 变频驱动

## Research on long-distance cable with skin-effect power supply of variable frequency drive in offshore oil and gas field

GUO Jiangyan<sup>1</sup>, OU Yanghui<sup>2</sup>, PENG Xin<sup>2</sup>, ZHU Wenjie<sup>3</sup>

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Underwater long-distance power supply is widely applied in subsea production system. The system faces problems such as motor startup difficulties, resonance overvoltage and poor power supply quality. The impedance and distributed parameters in subsea long-cable power supply have a significant impact on the output characteristics of the power converters and the induction motor. On the basis of introducing the structure, key power circuits, and parameters of the subsea long-cable power supply system, different modeling methods for long cables are analyzed. And the long cable model with skin-effect is proposed. The mathematical model of short-circuit input impedance is analyzed. Based on the measured cable parameters, the impedance characteristics of the cable model are simulated and analyzed. The proposed model can effectively simulate the characteristics of the resistance and inductance parameters, improving the accuracy of the long cable model. The long-cable variable speed drive is simulated, and the steady characteristics, long-distance startup, voltage and current harmonics of the system are analyzed, which will promote the application of subsea long-distance variable speed drive.

**Key words:** underwater power supply; long distance cable; impedance; skin effect; variable frequency drive

## 0 引言

海洋汽油资源潜力丰富,是重要的资源储备基地<sup>[1-2]</sup>,随着全球经济发展和海洋汽油开采技术的进步,海洋油气勘探开发发展迅速,当前已从300 m以内的浅海区逐渐向深海区拓展。由于深水生产系统中有许多电力设备<sup>[3]</sup>,如电潜泵、增压泵等,水下电动机驱动需要进行长距离的水下电力供应。供电系统方案一般在海上建造固定或浮动式平台,将发电机、变压器和变频驱动器(Variable Speed Drive, VSD)等输电设施放置在水上<sup>[4-5]</sup>,水上VSD与海底的负载之间需要使用一根很长的脐带缆连接并进行电力输送。然而,随着汽油开采距离越来越远,供电电缆的阻抗和分布式参数会增加,长线缆供电系统存在启动失败、谐振过电压等问题<sup>[6-8]</sup>,对系统稳定性和可靠性造成很大的影响。因此,建立考虑海底长线缆分布参数特性的模型,对变频供电系统的研究具有重要意义。

世界上水下输电系统多采用交流输电的方式,所用海底电缆的工作环境复杂,电缆的状态监测、保护、建模分析等极为重要<sup>[9-11]</sup>。海底电缆的参数模型不同于传统的长距离传输参数模型,电缆阻抗不是集总而是分布参数。此外,在水下环境中,趋肤效应和邻近效应的影响将变得显著<sup>[12-13]</sup>。

线缆一般常用Pi模型和T模型,将多个单元模型进行级联,单元模型参数和数量会影响长线缆频率范围和特性。在实际应用中,电阻和电感随频率变化,由于趋肤效应,频率增大后,电阻增大,而电感减小,因此Pi模型未考虑部分损耗能量。在深海长线缆供电系统中,为了提高模型的准确性,可结合线缆数学模型和实测序参数建立实用的线缆模型。

本文以海底长线缆变频供电系统为研究对象,提出了考虑趋肤效应的长线缆模型,并对长线缆阻抗特性和变频供电系统进行分析与验证。

## 1 海底变频供电系统分析

### 1.1 海底变频供电系统

海底长线缆变频供电系统如图1所示。常见

的供电系统有两种形式:直驱供电系统和降压供电系统。直驱供电系统中,母线提供6.3 kV电压,下级接中压VSD,经过水下长距离电缆连接泵电动机。降压供电系统增加了水上升压和水下降压变压器,通过高压传输方式减少线缆损耗。本文针对降压供电系统进行分析。

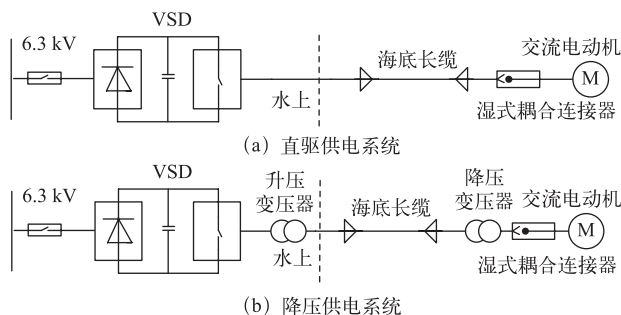


图1 长线缆水下变频供电系统示意图

Fig. 1 Supply system of underwater long-cable variable speed drive

### 1.2 变频驱动变换器

中压大功率变频器采用不控整流器+五电平逆变器方案,其直流侧为36脉波不控整流桥<sup>[14]</sup>,为变频器提供三个独立的直流电源,NPC/H桥五电平实现逆变功能<sup>[15]</sup>。12脉波二极管整流器如图2所示,变压器一次侧为三角形联结,二次侧为两个相差30°的移相变压器,二极管整流桥串联,提供一组直流母线。三个12脉波二极管整流器提供三组直流母线,构成36脉波整流。

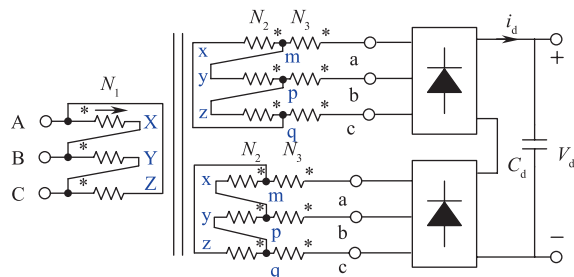


图2 12脉波二极管整流器

Fig. 2 Twelve pulses diode rectifier

逆变部分为NPC-H桥五电平拓扑,如图3所示。每相两个桥臂,由于二极管钳位作用,每相单桥臂输出三个电平,每相输出五个电平。可采用载波层叠调制方法实现对三相开关管的控制。

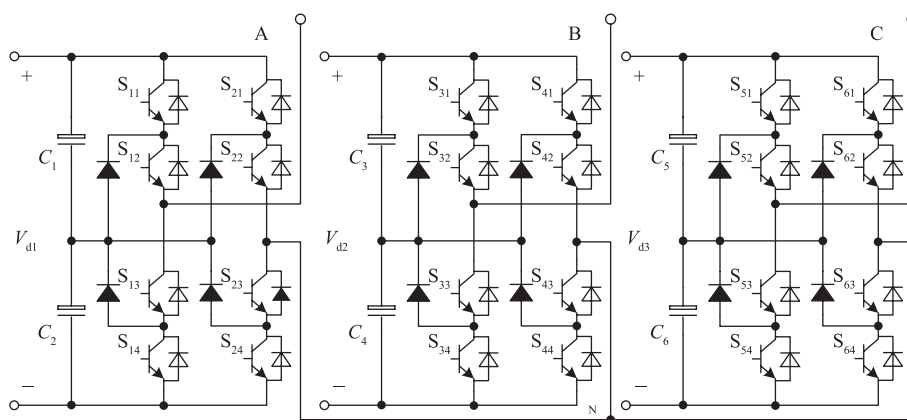


图3 NPC-H 桥五电平拓扑

Fig. 3 NPC-H five-level inverter

### 1.3 泵电动机模型

水下泵类电动机的Γ形近似等效电路<sup>[16]</sup>如图4所示。图4中， $U_1$ 为定子电压； $r_1$ 、 $X_1$ 为定子绕组的电阻和漏电抗； $r_m$ 、 $X_m$ 、 $Z_m$ 为定子铁心损耗等效电阻、主磁通铁心电抗和励磁阻抗； $r'_2$ 、 $X'_2$ 为折算到定子边的转子绕组电阻和漏电抗； $r'_2(1-s)/s$ 为等效的负载电阻， $s$ 为转差率。考虑长线缆后，加上阻抗 $Z_c$ ，则变频器输出电压为 $U_0$ ，线缆电流为 $I_0$ 。

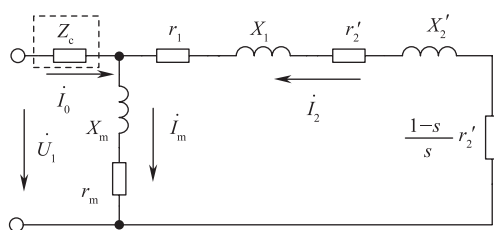


图4 异步电机Γ型等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of induction motor

异步电动机的转矩 $M$ 为<sup>[17]</sup>

$$M = \frac{m_1 p (U_0 - I_0 Z_c)^2 r'_2 / s}{2\pi f_1 \left[ (r_1 + r'_2 / s)^2 + (2\pi f_1 L_1 + 2\pi f_1 L'_2)^2 \right]} \quad (1)$$

式中， $m_1$ 为定子绕组相数； $p$ 为电动机的极对数； $f_1$ 为变频器输出的电压频率。

异步电动机特性曲线如图5所示，电动机启动（AB阶段）过程中， $s$ 减小，转矩增大；转速增大， $s$ 持续减小后，转矩减小。

由图5b转矩-频率曲线可知，转矩随频率升

高呈现先大后小趋势。电动机稳态运行时，由于线缆压降，负载增大后电动机的电压减小，转差率增大。随着负载电流进一步增大，形成负载的放大效应，电动机的转矩特性变软，带载能力减小。同时，变频器输出电压和频率不变，最大扭矩变小，电动机过载能力降低。

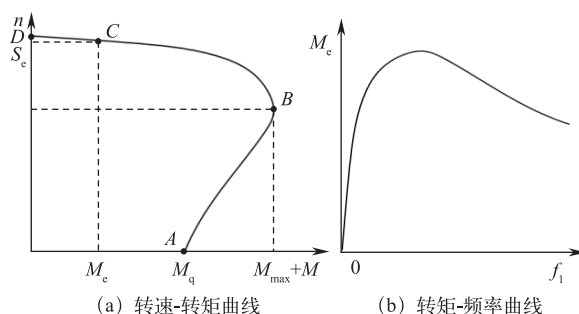


图5 异步电机特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of induction motor

当电动机正常启动时，转差率大（接近于1），负载电阻很小，启动电流较大，电动机启动转矩与定子电压的二次方成正比。考虑长线缆阻抗后，由于启动时线缆阻抗分压作用，且电动机启动阻抗小，电动机电压会更小，对电动机启动影响较大，图5a中的转速-转矩特性曲线会左移。

### 1.4 系统参数

系统参数主要包括升降压变压器参数、泵电动机参数和线缆参数。

升降压变压器参数见表1。

表1 升降压变压器参数

Tab. 1 Parameters of step-up and step-down transformers

| 参数         | 升压变压器   | 降压变压器      |
|------------|---------|------------|
| 额定功率 /MV·A | 14      | 13/6.5/6.5 |
| 额定频率 /Hz   | 75      | 75         |
| 额定一次电压 /kV | 6.6     | 40         |
| 额定二次电压 /kV | 45      | 6.9/6.9    |
| 电阻 /Ω      | 0.964   | 0.423      |
| 电抗 /Ω      | 10      | 10         |
| 升压比        | 3.5     | 3          |
| 空载电流 /A    | 2       | 2          |
| 空载损耗 /W    | 16 500  | 6 000      |
| 负载损耗 /W    | 135 000 | 55 000     |

泵电动机参数见表2, 额定工况为75 Hz, 热态为100 ℃/65 ℃, 启动参数下冷态为4 ℃。实测150 mm<sup>2</sup>线缆参数见表3, 注意表中为正负序参数。

表2 泵电动机参数

Tab. 2 Parameters of pump motor

| 参数                 | 额定工况    | 启动参数    |
|--------------------|---------|---------|
| 定子电阻 $R_1/\Omega$  | 0.112 5 | 0.070 4 |
| 定子电抗 $X_1/\Omega$  | 2.624   | 0.105   |
| 转子电阻 $R_2'/\Omega$ | 0.107 9 | 0.084 4 |
| 转子电抗 $X_2'/\Omega$ | 1.302   | 0.051   |
| 电磁电抗 $X_m/\Omega$  | 62.2    | 2.49    |
| 附加损耗等效阻抗 /Ω        | 1 363   | 21      |
| 转差率 (%)            | 0.883   | -       |
| 频率 /Hz             | 75      | 3       |
| 额定电压 /kV           | 6.6     | 0.264   |
| 额定电流 /A            | 297.1   | -       |
| 功率因数 (pu)          | 0.883   | -       |
| 计算速度 / (r/min)     | 4 460   | -       |
| 计算转矩 /N·m          | 5 352   | -       |
| 初始阻转矩 /N·m         | 1 500   | -       |

表3 实测150 mm<sup>2</sup>线缆参数

Tab. 3 Real parameters of 150 mm<sup>2</sup> cable

| 频率 /Hz | 电阻 (Ω/km) | 电感 / (mH/km) | 电容 /μF  |
|--------|-----------|--------------|---------|
| 25     | 0.124 3   | 0.404 3      | 0.153 0 |
| 50     | 0.125 4   | 0.393 2      | 0.153 0 |
| 67     | 0.126 4   | 0.385 3      | 0.153 0 |
| 77     | 0.127 2   | 0.381 1      | 0.153 0 |
| 100    | 0.129 3   | 0.372 9      | 0.153 0 |
| 200    | 0.143 3   | 0.351 8      | 0.153 0 |
| 500    | 0.205 5   | 0.318 2      | 0.153 0 |
| 1 000  | 0.298 6   | 0.289 0      | 0.153 0 |
| 2 000  | 0.422 6   | 0.266 6      | 0.153 0 |
| 5 000  | 0.666 6   | 0.245 7      | 0.153 0 |
| 10 000 | 0.941 2   | 0.235 2      | 0.153 0 |

## 2 长线缆建模分析

海底长线缆供电系统中, 传输电缆一般等效为理想导体, 未考虑分布参数。当线缆较长时, 其分布参数对系统的影响将无法忽略。因此, 需要建立较为精确的长线缆模型, 为变频供电系统特性分析提供基础。

### 2.1 常规线缆模型

海底电缆浸泡于电离子丰富的海水中, 在交流电作用下, 其内部电芯与外部海床间具有强电容效应。常见的线缆均匀分布参数等效模型如图6所示。

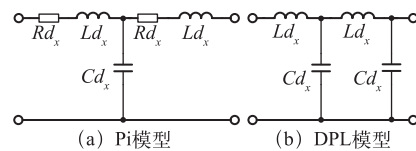


图6 线缆常规线缆模型

Fig. 6 Normal cable parameter model

考虑变频器交流电压的长传输特性, 在高阻抗电动机侧存在反射波, 导致 $dV/dt$ 较高, 线缆上形成的振荡电压波在不同频率段的阻抗不同。如图6a中的Pi模型, 考虑了电阻、电感和电容参数, 结构简单, 仿真中的Pi模型数量随线缆长度增加而增加; 图6b中的DPL模型, 未考虑电阻损耗。实际海底长线缆供电系统中, 线缆损耗与材质、长度、频率和电流等有关, 不可忽略电阻。因此一般采用Pi模型。

### 2.2 考虑趋肤效应的线缆模型

传统的Pi模型只具有单个串联的电阻和电感元件、单个并联的电容和电导, 无法体现水下长电缆趋肤效应对阻抗的影响。当考虑电流受频率影响下在电缆横截面上的分布特性时, 可以将电缆分成许多层, 每一层用一组串联的电阻和电感元件进行模拟, 如图7所示。



图7 考虑趋肤效应的线缆模型

Fig. 7 Equivalent circuit of skin-effect cable

图7所示电缆模型中, 每一层电缆横截面的阻抗 $Z_n$  ( $n=1,2,\dots$ ) 都可以使用一个串联的电阻和电感支路表征。一个电缆截面可从内向外被分为许多层, 当电流频率越高时, 趋肤效应的影响越大, 电流越倾向于从电缆的表面流过, 从而使电缆的等效阻抗随电流的频率发生变化。

具有并联电阻和电感支路的Pi模型等效电路如图8所示。每一个这样的Pi模块都代表着一段长度的水下脐带缆阻抗特性, 将多个Pi模块进行串联, 即可表征很长的一段脐带缆的阻抗特性。考虑到模型的准确度和计算复杂程度, 采用模型具有3个并联的阻抗(电阻和电感串联)支路。阻抗 $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 是经过参数拟合后得到的, 分别表征着电缆的一段圆环形截面的等效阻抗。由于趋肤效应对分布电容的影响很小, 故设分布电容是一个不随频率变化的常数, 将 $C_{01}$ 和 $C_{02}$ 的值设为相等。

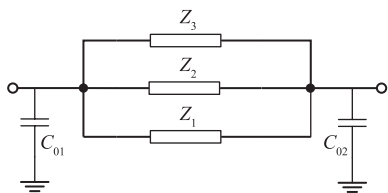


图8 电缆等效电路

Fig. 8 Cable equivalent circuit

在使用具有并联阻感支路的Pi模型时, 需要注意有效的模拟频率范围, 该模型可以模拟的频率范围上限 $f_{\max}$ 计算式为

$$f_{\max} \approx \frac{N}{5\sqrt{L_0 C_0} l} \quad (2)$$

式中,  $L_0$ 为电缆在50 Hz频率下的等效分布电感;  $C_0$ 为电缆在50 Hz频率下的等效分布电容;  $N$ 为整条长电缆具有的Pi模块总数;  $l$ 为电缆的总长度。

由式(2)可知, 当电缆的等效分布参数和总长度不变时, 若一个Pi模块模拟的电缆长度减小, 则Pi模块总数 $N$ 增大, 模型能够模拟的频率范围上限将会升高。而当电缆的等效分布参数和一个Pi模块模拟的电缆长度不变时, 若电缆的总长度增加, 则模块可模拟的频率范围上限将会降

低。当一个Pi模块模拟的电缆长度无穷小时, 模型可模拟的频率范围将会无穷大, 导致Pi模块总数 $N$ 趋于无穷。因此, 在实际仿真分析中, 需要在模型准确度和仿真复杂度之间进行折中选择, 选取合适的Pi模块总数 $N$ 。

### 2.3 短路输入阻抗分析

短路输入阻抗即为电缆终端短路时的输入阻抗。由于变频器及其连接负载的阻抗特性相当复杂, 为了简化分析, 将脐带缆的输入端设置成开路, 而输出端设置为短路。趋肤效应模型中, 从输入端测量得到的阻抗即为电缆的短路输入阻抗。由于在水下交流输电系统中, 长电缆的阻抗特性对系统的影响较大, 因此这里使用短路输入阻抗对系统整体的阻抗进行分析。电缆的串联阻抗为 $Z_0=R+j\omega L$ , 并联导纳为 $Y_0=G+j\omega C$ ,  $R$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $C$ 分别为电缆在不同频率下的等效分布电阻、电感、电导和电容,  $\omega$ 为角频率。

电缆的传播常数 $\gamma$ 和特征阻抗 $Z_C$ 分别为

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} \quad (3)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} \quad (4)$$

在计算出传播常数和特征阻抗后, 电缆终端短路时的输入阻抗 $Z_{in}$ 可根据下式计算

$$Z_{in} = Z_C \frac{Z_g / Z_C + \tanh(\gamma l)}{(Z_g / Z_C) \tanh(\gamma l) + 1} \quad (5)$$

式中,  $Z_g$ 为电源阻抗, 对于理想电源可认为 $Z_g=0$ 。

由式(5)容易发现, 趋肤效应会影响电缆的等效分布电阻和电感, 进而对短路输入阻抗产生影响。水下长脐带缆的阻抗特性对整个系统的谐波特性具有重要影响。

## 3 仿真实验

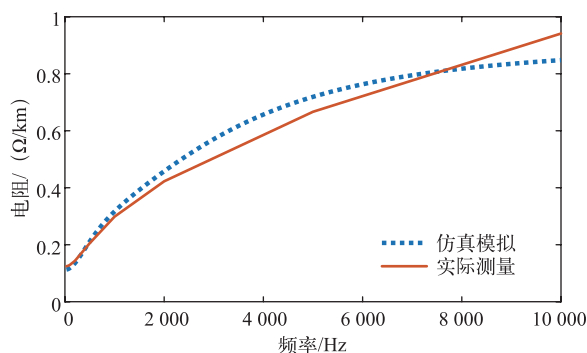
为了验证基于趋肤效应的长线缆模型正确性和分析供电系统的特性, 在MATLAB/Simulink中搭建水下长线缆供电系统模型, 并进行仿真分析。

### 3.1 长线缆特性仿真

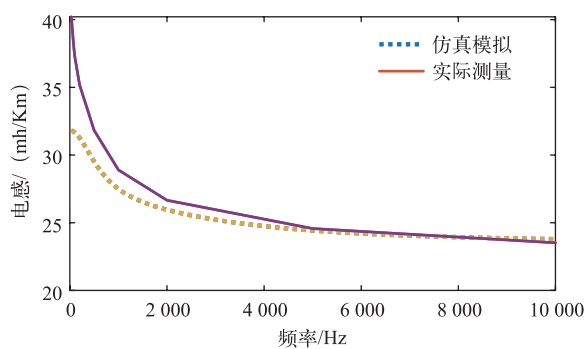
根据实测电缆数据, 等效参数 $L_0=0.393$  mH/km,

$C_0=0.142\ 3\ \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $R_0=0.125\ \Omega/\text{km}$ , 电导 $G_0$ 的影响可忽略。电缆总长度 $l=80\ \text{km}$ , Pi模块的总数量 $N=20$ , 每一个Pi模块可模拟4 km长的电缆。计算出该模型可以模拟的频率上限 $f_{\max}\approx 6.6\ \text{kHz}$ 。

在趋肤效应的影响下, 等效分布电阻和电感关于频率呈现非线性的特性, 采用最小二乘法进行参数拟合。电阻和电感的拟合结果如图9所示, 在0~1 000 Hz范围内, 所提模型对电缆的分布电阻拟合较好, 在10 kHz范围内误差不超过10%。随着频率的升高, 分布电阻增大, 分布电感减小。由于水下电缆的分布电容很大, 电抗呈电容性。例如在5 kHz时, 电感阻抗为7.7  $\Omega$ , 远小于电容阻抗的223.8  $\Omega$ 。所以在低频时较大的分布电感拟合差异不会对电缆输入阻抗的模拟产生较大的影响。



(a) 等效分布电阻



(b) 等效分布电感

图9 电缆分布参数拟合结果

Fig. 9 Fitting results of cable distribution parameters

根据电缆分布参数的实测和拟合结果, 可以计算得到短路输入阻抗。实测和仿真的短路输入阻抗如图10所示。可以发现, 在0~10 kHz范围内, 输入阻抗的拟合结果较好。

由于电缆过长, 输入阻抗随频率变化, 发生了谐振现象, 这将会使得系统的谐波含量增加, 恶化水下负载的电磁兼容环境。

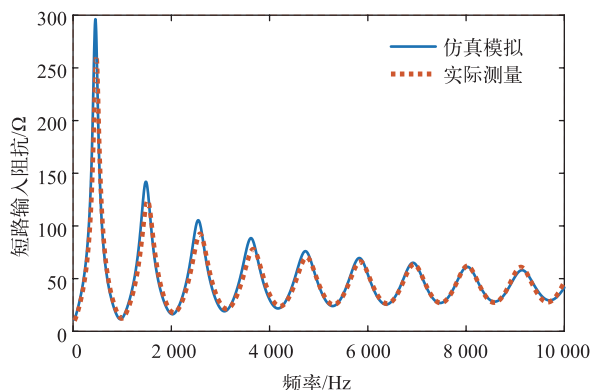


图10 短路输入阻抗波形

Fig. 10 Short-circuit input impedance results with simulation and actual measurement

有无趋肤效应时的短路输入阻抗如图11所示。由图11可知, 在考虑趋肤效应的影响后, 随着频率增加, 短路输入阻抗的等效电阻会增加(波谷上升), 谐振峰峰值逐渐降低。而当不考虑趋肤效应时, 短路输入阻抗随频率呈现周期性变化的特性, 等效电阻和谐振峰峰值不变。

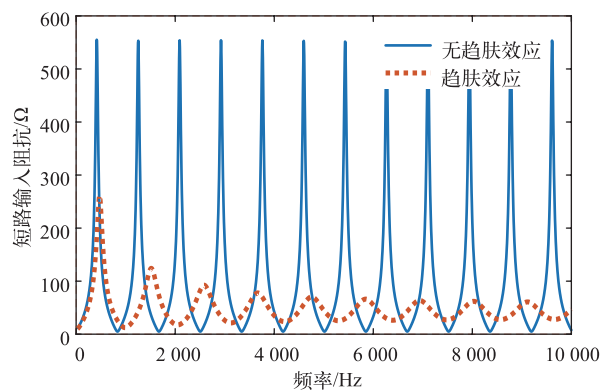


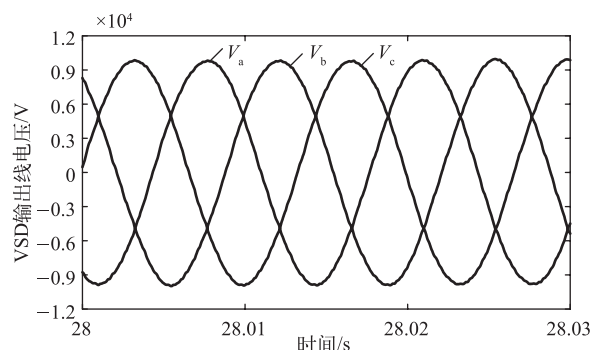
图11 趋肤效应和无趋肤效应下短路输入阻抗

Fig. 11 Short-circuit input impedance results with and without skin-effect

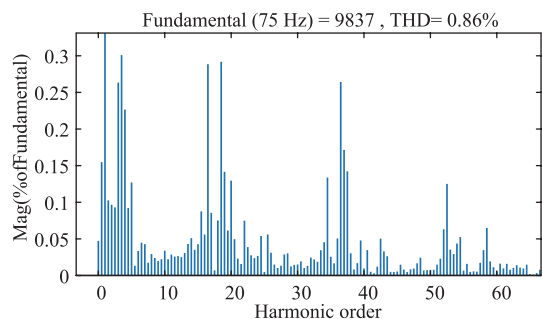
因此, 水下长线缆供电系统受趋肤效应的影响, 等效分布电阻随着频率的增加而增加, 使得电缆的功率损耗增大, 但也抑制了系统的高频谐振, 故系统的谐波含量可能会减少。

### 3.2 变频供电系统仿真

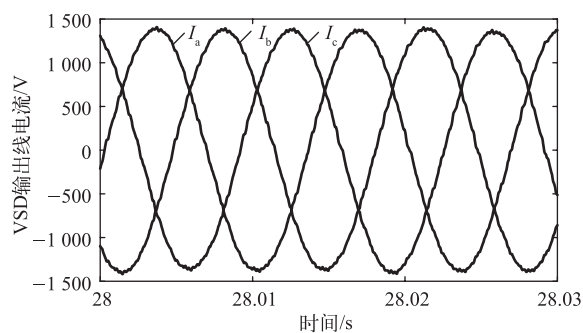
在海底长线缆变频供电系统中, 设置LC滤波器提升输出波形质量。供电系统稳态仿真波形如图12所示。



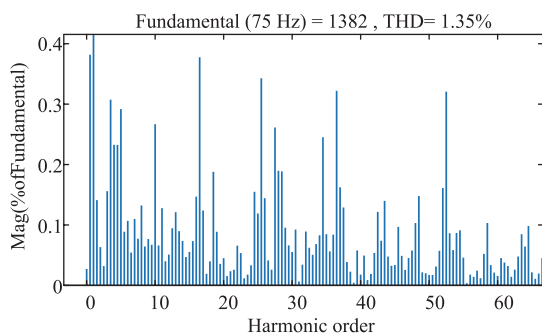
(a) 变频器输出线电压波形



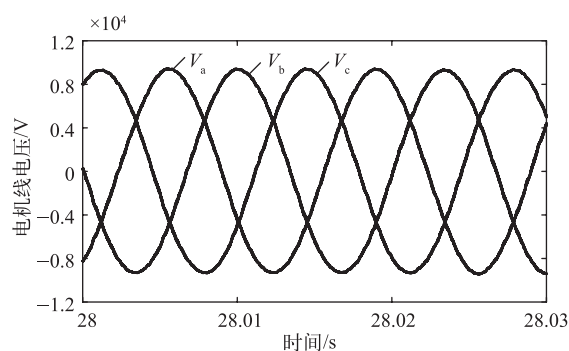
(b) 变频器输出线电压频谱



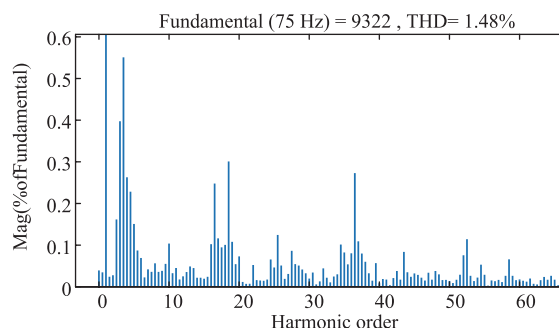
(c) 变频器输出线电流波形



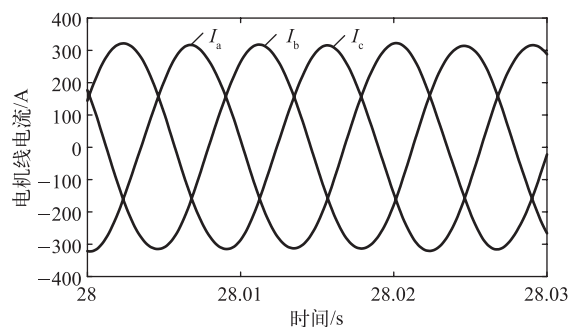
(d) 变频器输出线电流频谱



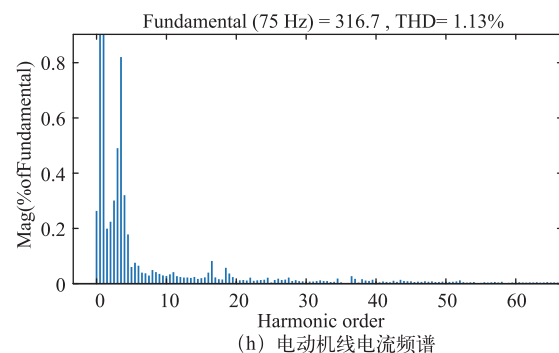
(e) 电动机线电压波形



(f) 电动机线电压频谱



(g) 电动机线电流波形



(h) 电动机线电流频谱

图 12 供电系统稳态波形

Fig. 12 Simulated steady waveforms of power supply system

从图12中可以看出, 变频器输出线电压峰值为9 837 V, 总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 为0.86%; 电流为1 382 A,

THD为1.35%。电动机线电压峰值为9 322 V，THD为1.48%；电流为316.7 A，THD为1.13%。

VSD输出电压经过变压器升压后，通过水下长线缆降压，线缆首末端的电流频谱如图13所示。

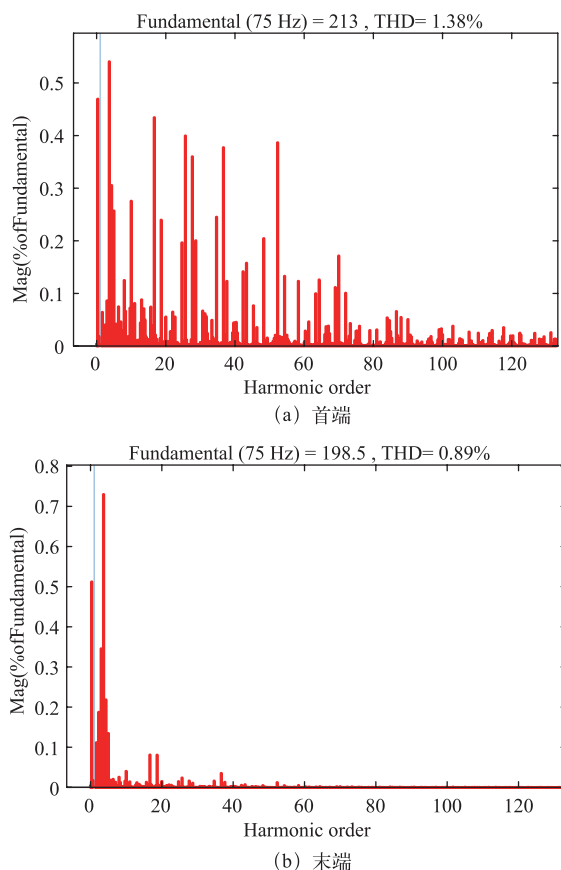


图 13 线缆电流频谱

Fig. 13 Current spectrum of long distance cable

从图13中可以看出，经过长线缆后，电流谐波含量下降，由1.38%下降至0.89%。从谐波频谱看，20次边频及以上谐波下降较为明显，线缆末端高频谐波量很低，线缆首端谐波低频在0.4%左右，高频在0.1%以下。仿真表明，水下长线缆的趋肤效应会增加滤波器阻抗，提升谐波滤除效果。

电动机启动过程如图14所示。启动频率设定为3 Hz，频率随着电压增加而增加。

由图14可知，通过变频启动方式，电动机可正常启动，启动前5 s，最大电流477 A，在5 s左右转矩振荡，20 s后电动机启动完成。

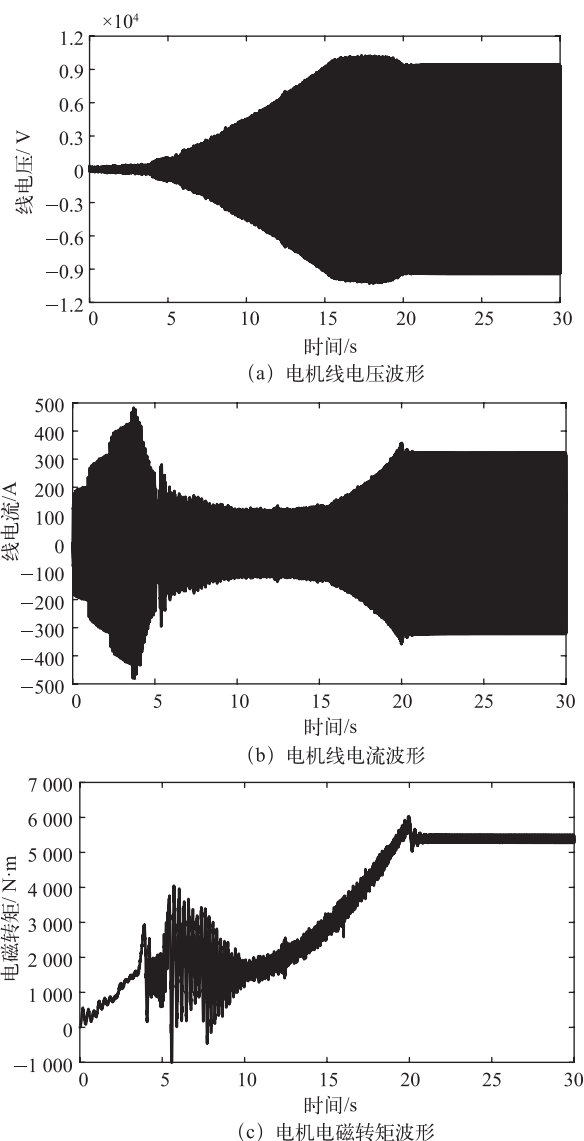


图 14 电机启动波形

Fig. 14 Start process of induction motor

## 4 结束语

深海长线缆变频供电系统中，变频器输出的交流电通过几十千米的海底电缆驱动泵电动机，线缆的分布参数会导致多频次谐振，使变频器输出阻抗改变，影响系统供电质量；同时，长线缆阻抗与电动机阻抗并联后，会影响电动机启动特性。本文提出了考虑趋肤效应的长线缆模型，根据实测线缆参数模拟得到实用线缆模型，提高了线缆参数准确度。对海底长线缆供电系统进行建模和仿真分析，验证了长线缆模型的正确性。在考虑趋肤效应下，水下电缆输入阻抗谐振峰得到

抑制, 会使线缆阻抗的等效电阻增加, 对谐波电流起到抑制作用。

#### 参考文献

- [1] 郭宏, 屈衍, 李博, 等. 国内外脐带缆技术研究现状及在我国的应用展望[J]. 中国海上油气, 2012, 24(1): 74-78.
- [2] 邱银锋, 李强, 万光芬, 等. 深水油气田开发长距离大功率供电技术发展综述[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 157-163.
- [3] 李志刚, 贾鹏, 王洪海, 等. 水下生产系统发展现状和研究热点[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(5): 944-952.
- [4] 王双成, 郭宏, 郭江艳, 等. 海洋油气中压大功率水下设备远距离变频驱动关键技术及实验验证研究[J]. 电气应用, 2023, 42(1): 45-53.
- [5] 郭江艳, 王双成, 王永, 等. 油气田水下供电技术综述[J]. 电气技术, 2021, 22(3): 1-5.
- [6] 段安民, 赵锦波, 徐皓. 海底光缆网络恒压与恒流供电拓扑研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(12): 51-57.
- [7] RAJASHEKARA K, KRISHNAMOORTHY H S, NAIK B S. Electrification of subsea systems: requirements and challenges in power distribution and conversion[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(4): 259-266.
- [8] 平朝春, 王艳红, 郭宏, 等. 水下大功率电机远距离变频驱动过电压问题分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(S1): 160-165.
- [9] 陈玉, 郝义, 姚凯, 等. 500 kV充油海底电缆运行状态综合在线监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 133-139, 169.
- [10] 李浩原, 李健. 500 kV交流海底电缆过电压保护与绝缘配合研究[J]. 四川电力技术, 2020, 43(2): 53-58, 66.
- [11] 刘培林, 苏锋, 张志远, 等. 水下脐带缆电传输特性仿真分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 135-141.
- [12] AMARIR S, Al-Haddad K A. Modeling technique to analyze the impact of inverter supply voltage and cable length on industrial motor-drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 753-762.
- [13] AMARIR S, Al-Haddad K A. New design tool to protect industrial long-cable PWM ASD systems against high-frequency overvoltage problems[J]. IEEE Transactions on Electrical and Computer Engineering, 2008, 33(3): 125-132.
- [14] 王英, 王亚兰, 陈小强, 等. 基于直流侧混合电压谐波注入的低谐波串联36脉波整流器[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5288-5303.
- [15] 兰志明, 王成胜, 段巍, 等. 基于IGCT的大功率五电平中点钳位/H桥变流器[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4249-4255.
- [16] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2015.
- [17] 张丹丹, 郑建康, 冯南战, 等. 基于阻抗谱的同轴电力电缆高频传输特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 18-23.

#### 作者简介

郭江艳(1985—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事水下生产系统方面的研发、设计工作。

欧阳晖(1983—), 男, 通信作者, 博士, 电气工程师, 主要从事电气系统的研发、设计工作。

彭新(1988—), 男, 硕士, 电气工程师, 主要从事大功率变频器设计与研发工作。

朱文杰(1987—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电力电子拓扑与控制。

(收稿日期: 2024-06-04)