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

王双成[1]，郭　宏[1]，郭江艳[1]，王善芬[2]，李　鑫[1]，穆思叶[1]，吕晶剑[2]

（1. 中海油研究总院有限公司，北京 100028；2. 青岛海洋工程水下设备检测有限公司，山东 青岛 266000）

摘要：随着我国深海油气田开采战略的逐步深化，水下生产技术的不断发展和应用推广，水下供电系统将成为制约我国水下生产技术开拓创新的重要因素。开展远距离变频供电系统核心问题分析仿真和远距离变频驱动实验平台搭建，依托实验平台开展电动机起动、电潜泵特性模拟和负载突变等实验，验证了远距离变频驱动实验平台的实验验证能力，表明系统可以有效模拟实际工程的应用工况、运行状态，能够对水下供电系统的研究提供全面的技术支撑。

关键词：水下供电；远距离供电；供电测试

Key technology and experimental verification of subsea equipment power supply by remote variable frequency drive in offshore oil and gas field

WANG Shuangcheng[1], GUO Hong[1], GUO Jiangyan[1], WANG Shanfen[2], LI Xin[1], MU Siye[1], LV Jingjian[2]

（1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China;
2. Qingdao Ocean Engineering and Subsea Equipment Inspection&Testing Co., Ltd., Qingdao 266000, China）

Abstract: With the gradual deepening of my country's deep-sea oil and gas field exploration strategy and the continuous development and application of sub-sea production technology, the sub-sea power supply system will become an important factor restricting the development and innovation of our country's sub-sea production technology. By carrying out load mutation, motor startup, compressor simulation and other long-distance variable frequency power supply system tests, the test verification ability of the medium voltage high-power variable frequency drive power supply system is verified, which shows that the system can effectively simulate the application conditions and operating conditions of the actual project. Provide comprehensive technical support for the research of sub-sea power supply system.

Key words: sub-sea power supply; long-distance power supply; power supply test

0　引言

近几十年，随着海上油气田开发水深的不断增加，水下生产系统以其显著的技术优势、可观的经济效益得到了各大石油公司的广泛关注和应用。远距离变频驱动系统是油气田水下生产系统的关键组成部分，为深水井口电潜泵、注水泵和增压泵等大功率设备供电，在国内外深水油田开发中已获得了大量应用。在国内，利用该技术相继开发了流花11-1、陆丰22-1、流花16-2和流花4-1等多个深水油田，并取得了良好的应用效

果。其中在流花16-2项目中，通过布置在浮式生产储油船（FPSO）上部组块的变频器，直接驱动流花16-2、流花20-2和流花21-3三个油田26台水下电潜泵。该项目中，变频器和水下电潜泵间的距离最远超过了27 km，是目前世界上水下电潜泵直接变频驱动的最长距离[1-4]。

在一般情况的工业生产中，变频器与电动机均是直接连接或是通过短距离电缆进行连接。但是在海洋油气开采这一特殊应用环境下，由于油气井很多情况下距离开采平台较远，甚至达上百公里，需要长距离电缆连接变频器与电动机。长距离电缆的寄生参数会带来一些实际应用问题，如过电压问题、系统运行问题和变频器的控制策略要求及其出口滤波器的选型问题等[5-6]。

本文通过中压大功率变频驱动供电系统[7-9]实验技术的研究，开展电动机起动、电潜泵特性模拟和负载突变等实验，通过远距离变频供电系统的测试分析，验证该平台针对深海油气开发中水下供电系统开展测试的可行性。

1 远距离变频驱动关键技术及仿真

1.1 远距离变频供电系统介绍

以流花16-2油田远距离变频驱动水下电潜泵项目为例，系统示意如图1所示，相关参数见表1～表3。FPSO电力系统为电流源型变频器供电，变频器输出经过海缆后到达电潜泵。

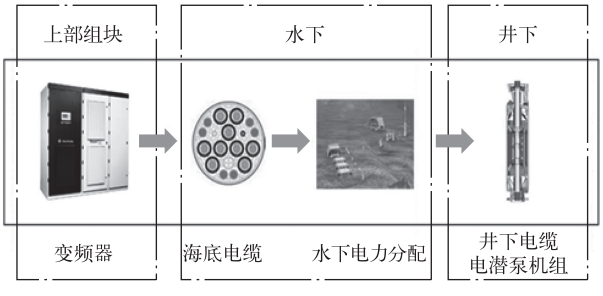


图 1 流花 16-2 油田变频器长距离驱动水下电潜泵供电方案图

Fig. 1 Liuhua 16-2 oilfield subsea ESP power supply scheme by remote VFD

表 1 流花 16-2 油田 A1 井电潜泵变频器及输出滤波器参数

Tab. 1 Parameters of ESP VFD and output filter of well A1 in Liuhua 16-2 oilfield

参数	参数值
变频器容量 /kV·A	800
输出电压 /kV	0 ～ 6.0
输出频率 /Hz	0 ～ 70
功率单位额定电流 /A	105
输出滤波器电感 /mH	7.0
输出滤波器电阻 /Ω	300

表 2 流花 16-2 油田海底电缆束参数（电缆截面积：3×3C×150 mm²）

Tab. 2 Parameters of subsea cable bundle in Liuhua 16-2 oilfield (Cable cross section: 3×3C×150 mm²)

温度 /℃	20.0	90
类型	正序	正序
单位长度电阻 /（Ω/km）	0.131 0	0.166 7
单位长度电抗 /（mH/km）	0.372 2	0.373 1
点位长度电容 /（μF/km）	0.4	0.4

表 3 流花 16-2 油田 A1 井电潜泵电动机参数

Tab. 3 ESP motor parameters of well A1 in Liuhua 16-2 oilfield

参数	参数值
额定功率 /kW	500
额定电压 /V	4 200
额定电流 /A	103
额定转差率（%）	4.5
电动机额定转矩 /N·m	1 401
额定转速 /（r/min）	3 600

1.2 电潜泵起动特性及仿真

应用电磁等效原理，将电动机的转子电流、阻抗、漏抗及转子负载折算到定子侧，可增加长电缆后的电动机Γ形等效电路如图2所示。

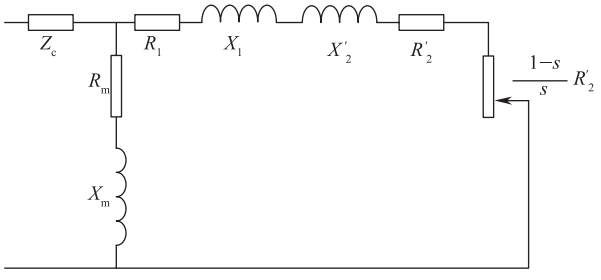


图 2 异步电动机的 Γ 形等效电路

Fig. 2 Γ Shape equivalent circuit of asynchronous motor

图2中，Z_c为电缆阻抗；R_1、X_1为定子绕组的电阻和漏抗；R'_2、X'_2为折算到定子侧的转子电阻和漏抗；$(1-s)R'_2/s$为等效的负载电阻；R_m为与定子铁心损耗相对应的励磁电阻；X_m为与主磁通相对应的铁心磁路的励磁电抗；s为转差率。

长距离的潜油电动机起动扭矩公式为

$$M=\frac{m_1 p U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1\left[\left(R_1+\frac{R'_2}{s}\right)^2+\left(X_1+X'_2\right)^2\right]}\times\left(\frac{Z_m}{Z_c+Z_m}\right)^2 \quad (1)$$

式中，M为电动机的转矩；m_1为定子绕组相数；U_1为定子电压；p为电动机的极对数；f_1为电源频率。

根据式（1）可得出电动机转矩特性曲线，如图3、图4所示。

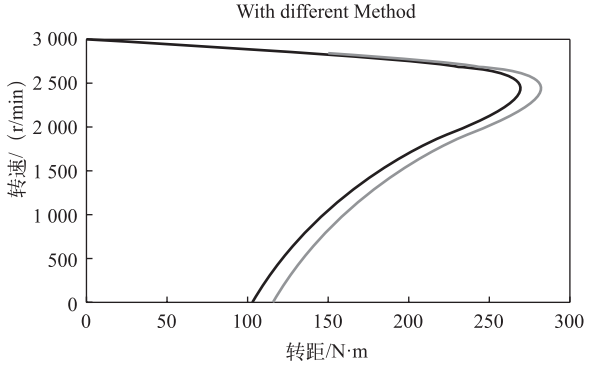


图 3 最大转矩变小特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of maximum torque reduction

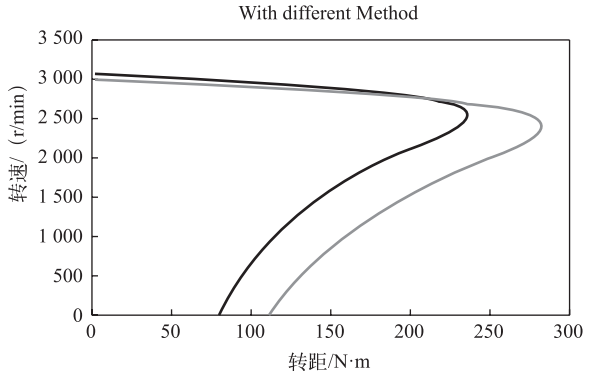


图 4 带载能力减小特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of load capacity reduction

从图3、图4可看出，对于确定的潜油电动机，其额定状态下起动转矩是确定的。增加长电缆后，电动机的转矩特性会变软，带载能力会减弱；电动机的最大输出转矩因电缆的增加而变小；起动时由于电动机阻抗分量较小，所以起动转矩会因电缆增加而减小，在大转矩起动时需加起动补偿电压以确保可靠起动。实际起动扭矩取决于电缆的阻抗和电动机起动时阻抗的分量。

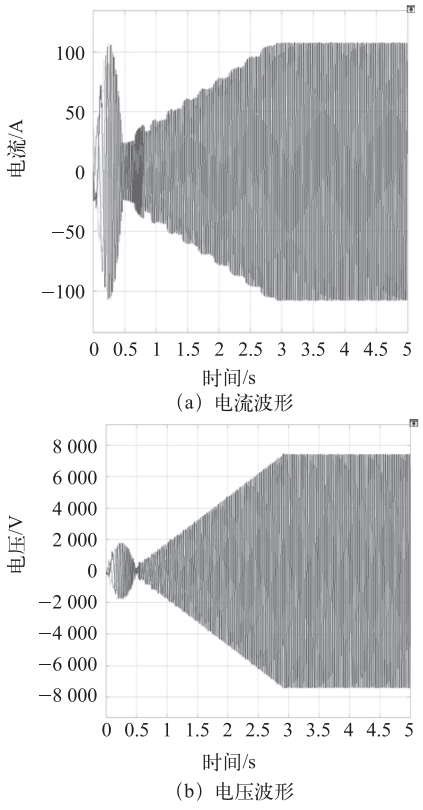
随着频率的提升，电动机感抗显著增大，电动机的定子分压也相应增大，但电动机起动电流也随之增大，受制于变频器允许输出的最大电流，如果在达到最大电流之前，电动机的定子电压相对比例较高，起动转矩大于所需克服的阻力矩，电动机可以顺利实现起动。否则变频器无法起动潜油电动机。

由上述可知，采用变频器拖动潜油电动机时，长电缆阻抗对电动机起动有明显影响。不同的电动机参数与设计，电缆对其影响也各不相同，但是总体趋势相似。实际的电缆阻抗是不可控的，变频器和电潜泵之间的距离因生产条件的不同也会发生变化，因此有必要解决长电缆影响潜油电动机起动的问题。

通过仿真得到变频器输出端以及电动机输入端的电流和电压波形，如图5、图6所示。长电缆对潜油电动机变频起动的影响主要是因为电动机起动时起动电流大于工作电流，电缆压降增大。因此，如果能够补偿电动机低频起动时电缆产生的压降，就可以实现潜油电动机的低频起动。为此，变频器需在起始频率点对电缆的压降进行补偿，而不是在变频器输出的总电压上补偿额定工作下的电缆压降。

1.3 系统谐振过电压

变频器与电潜泵之间海缆长度为27 km，海缆的电气等效电路图如图7所示。海缆的电气寄生参数（电阻R、电感L和电容C）组合具备了RLC振荡特性，当系统内存在与振荡回路自振频率相同或相近的频率分量时，就有可能导致变频供电系统产生谐振现象，使系统内出现过电压，使海缆绝缘老化甚至造成击穿，同时会使电潜泵电动机端电压电流产生畸变，减小了控制准度，并使电动机发热严重。

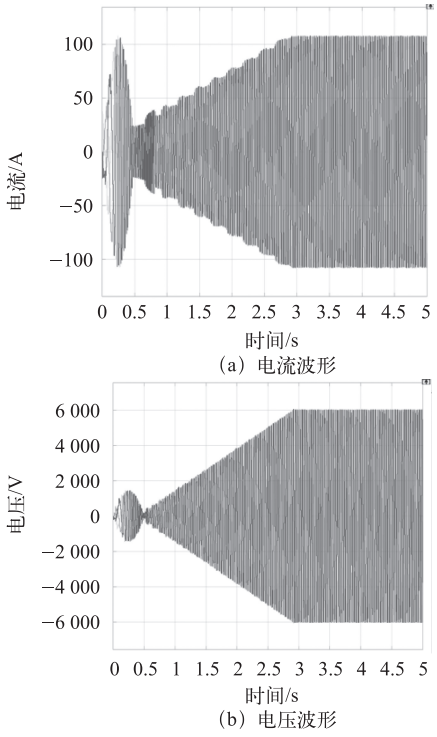


（a）电流波形

（b）电压波形

图 5　变频器输出电流和电压波形

Fig. 5 VFD output current & voltage waveform



（a）电流波形

（b）电压波形

图 6　电动机输入电流和电压波形

Fig.6 Motor input current & voltage waveform

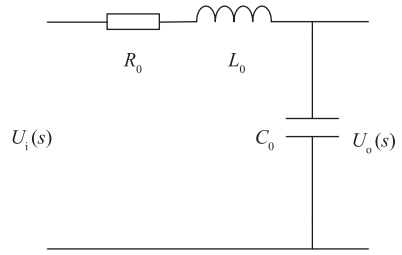


图 7　*RLC* 谐振等效电路图

Fig. 7 *RLC* resonance equivalent circuit diagram

图8为根据用户实际数据进行的频谱分析结果，在谐振频率为710 Hz、距离为17.4 km的位置出现了2.29倍的最大幅值，且此谐振点靠近变频器的开关频率，系统易产生谐振。在变频器输出端增加专门设计的滤波器后，谐振频率变为1 000 Hz，距离为10.4 km位置，幅值已经降低到了1.35倍，对应的受影响最大的为19和21次谐波，而19、21次谐波的含量在系统里低于1%，且远离了变频器的开关频率，基本可以确认谐振已经对系统无影响，仿真结果如图9所示。

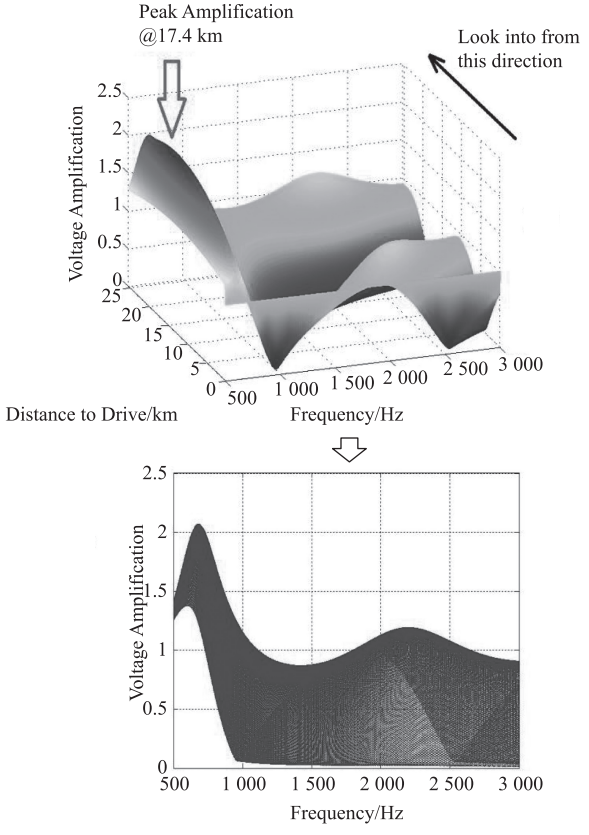


图 8　无滤波器系统谐振频谱分析图

Fig. 8 Resonance spectrum analysis diagram of filter free system

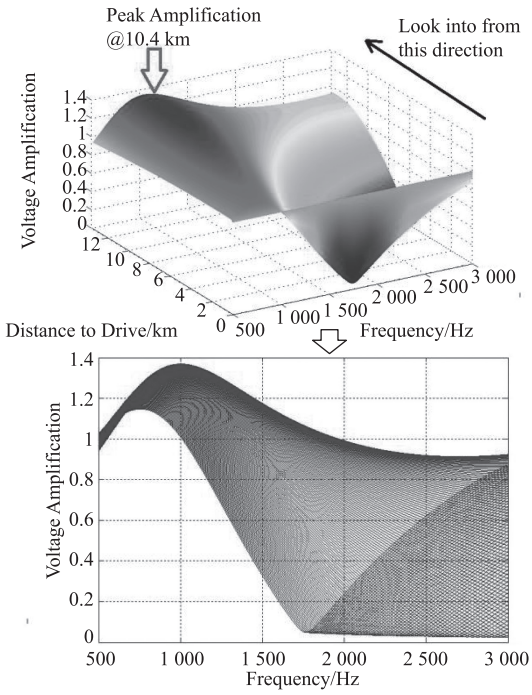


图 9　带滤波器系统谐振频谱分析图

Fig. 9 Resonance spectrum analysis diagram of system with filter

2　实验系统介绍

根据流花16-2油田远距离变频驱动供电系统特点搭建了实验平台，实验平台由供电模块、变频器模块、电缆模拟装置模块、电动机模块、陪试系统模块和测量控制模块等组成，如图10所示。可进行电潜泵等不同负载特性实验、转矩突变实验、转速突变实验和电动机起动实验等。

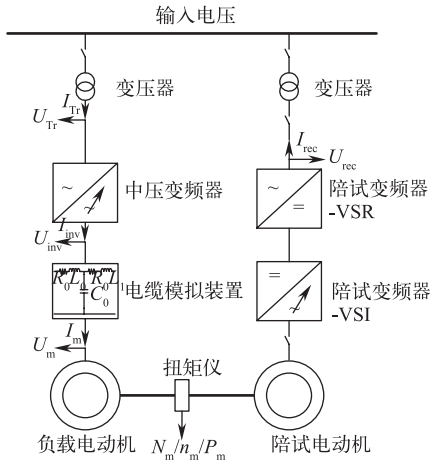


图 10　中压大功率变频驱动供电系统总体架构

Fig. 10 Overall architecture of medium voltage high-power variable frequency drive power supply system

实验平台额定功率为500 kW，最高转速为6 000 r/min、最大转矩为3 000 N·m，具有一套全尺寸的电缆模拟装置，可模拟电缆长度为0～30 km，详细参数见表4。

表 4　实验平台参数

Tab. 4 Parameters of experimental platform

序号	名称	参数大小
1	输入电压 /kV	10±10%
2	输入频率 /Hz	50±2%
3	变频输出电压 /kV	0 ～ 6
4	变频输出频率 /Hz	0 ～ 120
5	额定功率 /kW	500 kW（可扩展）
6	最高转速 /（r/min）	6 000
7	额定转矩 /N·m	2 000
8	电动机	异步电动机或永磁同步电动机（PMSM）

3　实验结果及分析

3.1　负载突变实验

实验时，首先使实验平台工作在额定电压、输出半额定转矩工况下，将电动机输出转矩增加到额定转矩。待实验平台运行平稳后，将电动机输出转矩由额定转矩降到半额定转矩。观察实验平台运行情况，并测量记录电动机速度、平均输出转矩、变频器输出线电压、变频器输出相电流、电动机线电压和电动机相电流，如图11～图14所示。

从图11～图14可见：当实验台工作在额定电压、输出半额定转矩工况下，将电动机输出转矩增加到额定转矩，电动机正常运行。当电动机输出转矩由额定转矩降到半额定转矩时，系统应能正常工作，变频器不报故障，电动机平稳运行。

3.2　电动机起动实验

在额定输入电压时，电缆模拟装置模拟电缆长度30 km工况下起动电动机，并测量记录电动机速度、平均输出转矩、变频器输出线电压、变频器输出相电流、电动机线电压和电动机相电流，如图15～图18所示。

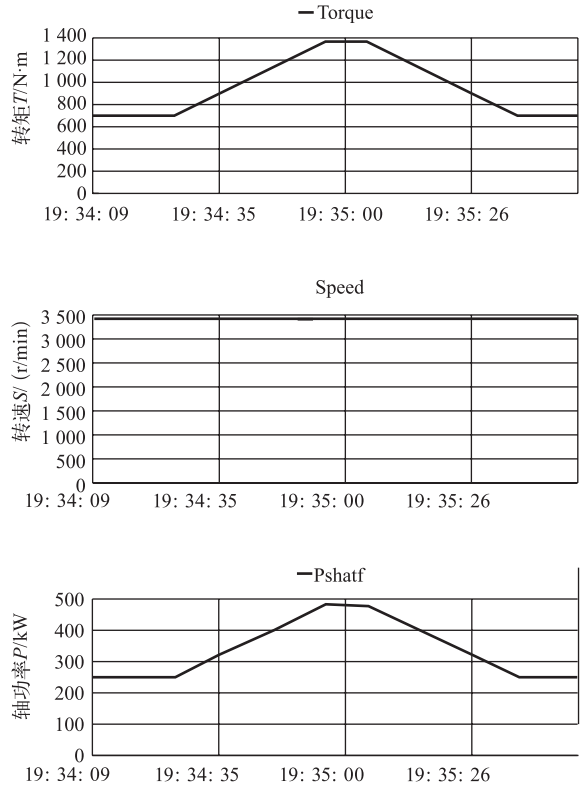


图 11　输出转矩、电动机速度和轴功率曲线

Fig. 11 Output torque，motor speed，shaft power curve

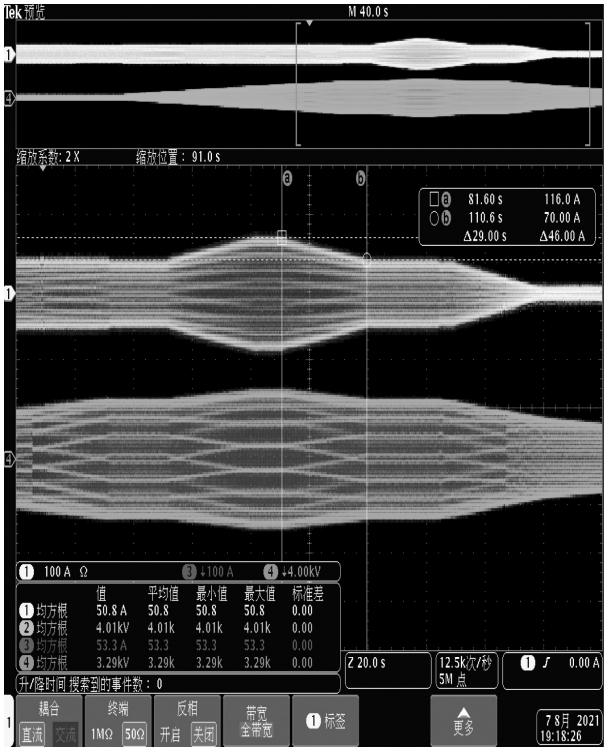


图 12　电压、电流曲线

Fig. 12　Voltage and current curve

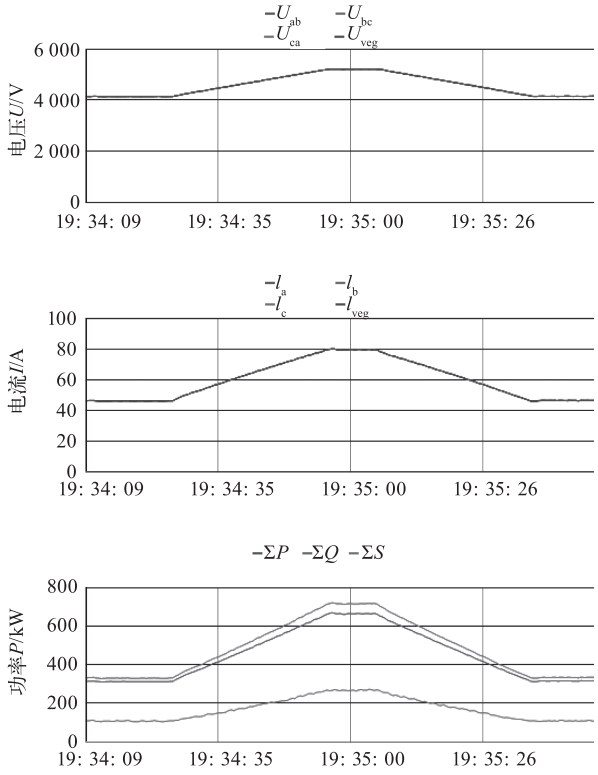


图 13　变频器输出线电压、相电流和功率曲线

Fig. 13 VFD output line voltage，phase current and power curve

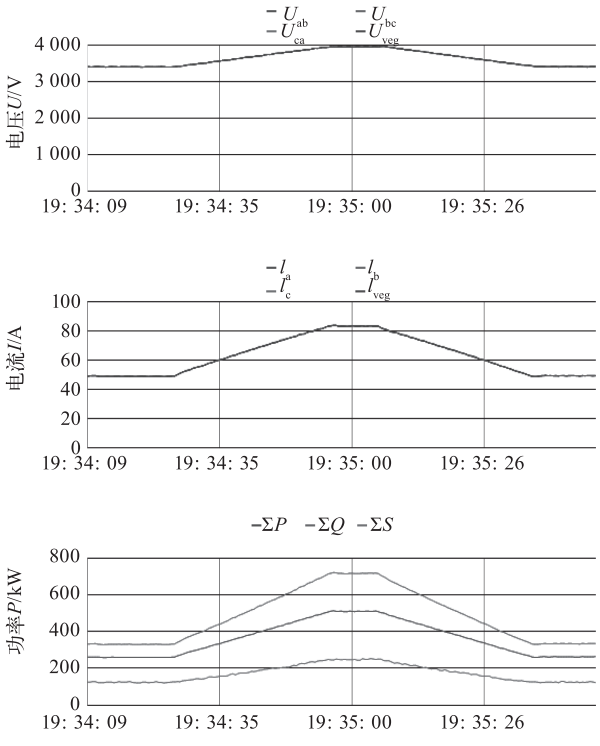


图 14　电动机端线电压、相电流和功率曲线

Fig. 14 Motor terminal line voltage，phase current and power curve

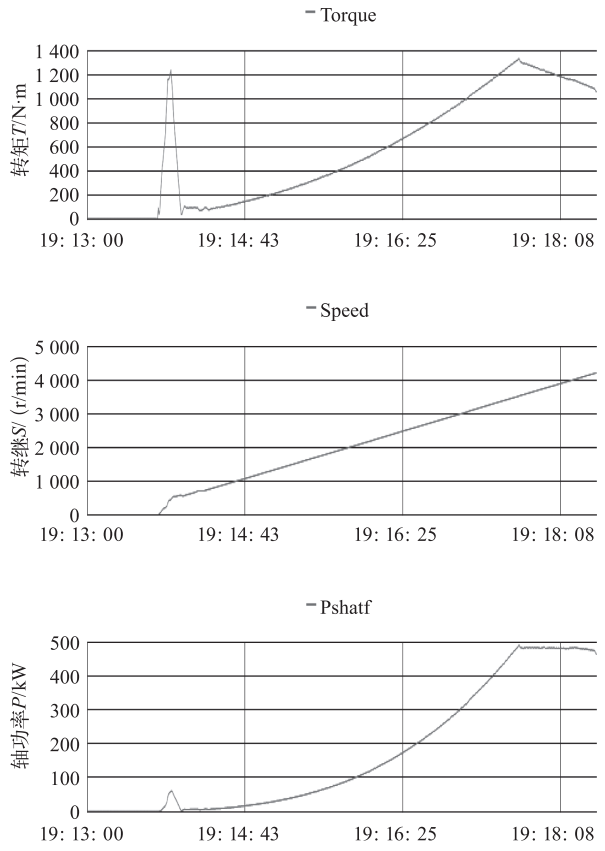


图 15 输出转矩、电机速度和轴功率曲线

Fig. 15 Output torque，motor speed，shaft power curve

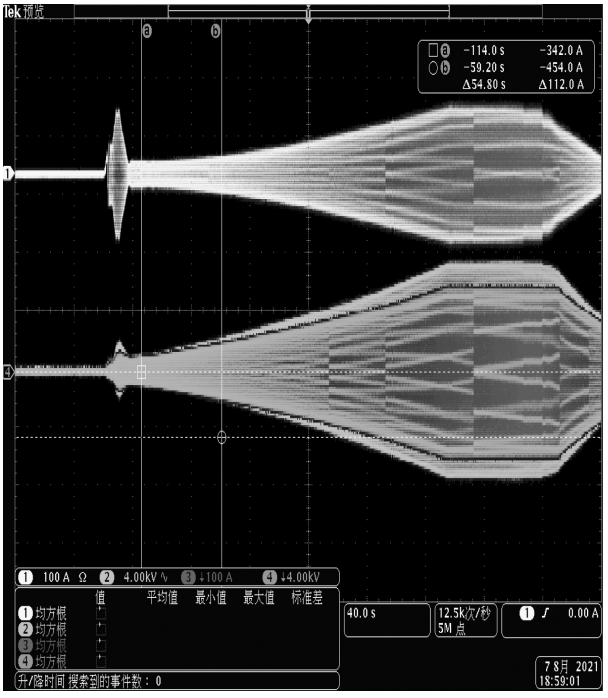


图 16 电动机端电压、电流曲线

Fig. 16 Motor terminal voltage and current curve

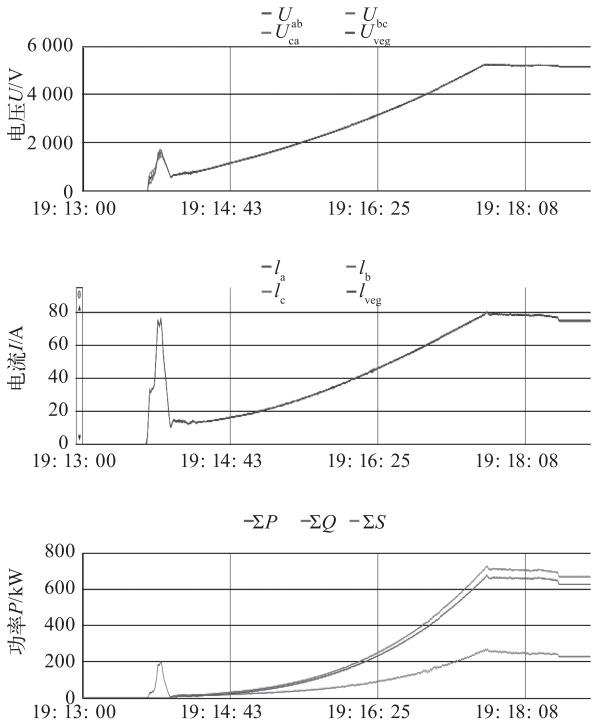


图 17 变频器输出线电压、相电流和功率曲线

Fig. 17 VFD output line voltage，phase current and power curve

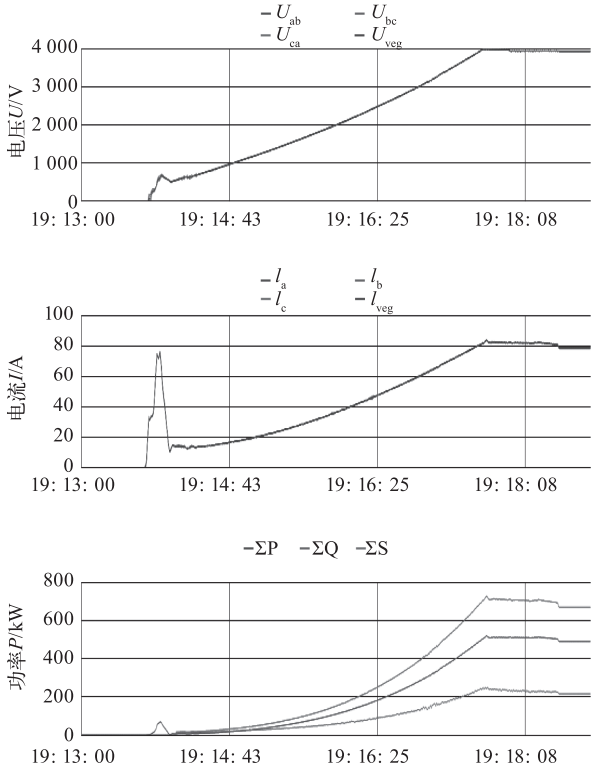


图 18 电动机端线电压、相电流和功率曲线

Fig.18 Motor terminal line voltage，phase current and power curve

从图15～图18可见：变频器在长电缆工况下，电动机可以正常起动；起动转矩设定为90%额定转矩时，电动机侧的电流、电压、频率及输出转矩均完全符合工艺控制要求，系统波形正常，没有谐振产生；起动转矩设定为90%额定转矩时，由于长距离电缆的影响，电动机的转矩特性将变软。

3.3 负载特性实验

模拟电缆长度在30 km工况下，通过改变陪试电动机的输出转矩和负载电动机的速度，在整个速度区段范围内升速和降速两个方向进行扫描，使负载电动机输出的转矩转速符合电潜泵特性曲线、压缩机特性曲线。电潜泵的特性曲线如图19所示。

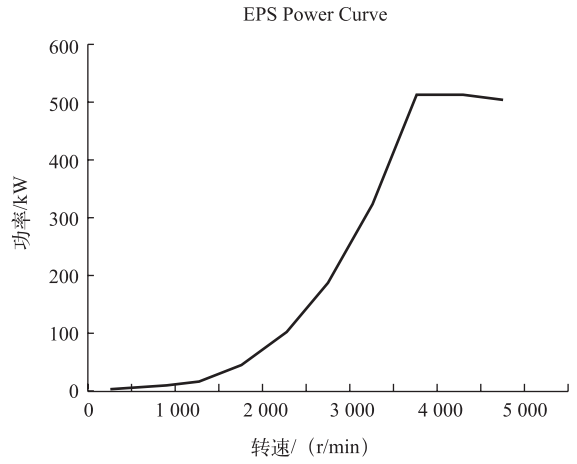


图 19 电潜泵特性曲线

Fig. 19 ESP characteristic curve

借助于实验平台的数据采集系统以及专业测量仪表，对电动机速度、平均输出转矩、变频器输出线电压、变频器输出相电流、电动机线电压和电动机相电流等参数进行实时测量，如图20～图23所示。

从图20～图23可见：负载特性实验验证了实验平台在电潜泵负载特性时的运行情况。电潜泵在负载特性时转矩随转速的增加，以转速二次方的规律增加，在额定速度时达到额定转矩。实验结果表明：系统能正常工作，电动机平稳运行，能正确模拟电潜泵特性。

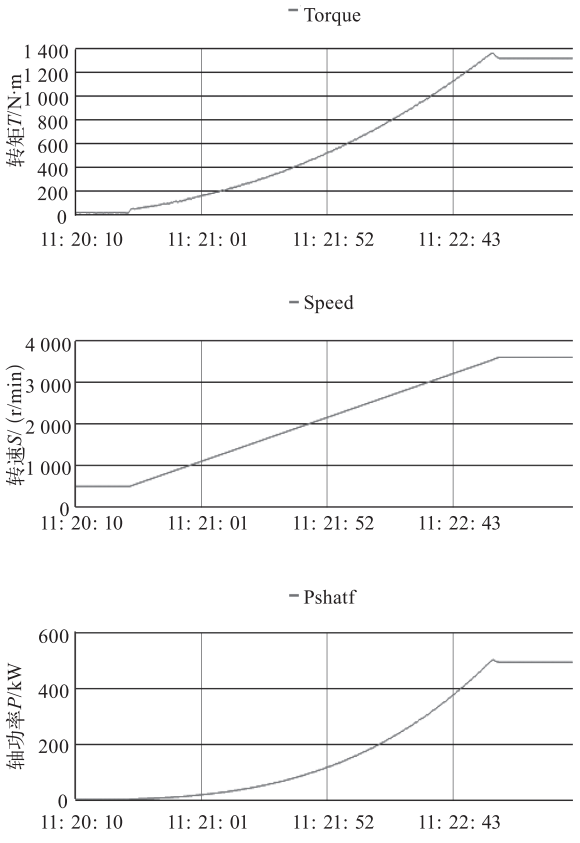


图 20 电动机输出转矩、电动机速度和轴功率曲线

Fig.20 Motor output torque，motor speed，shaft power curve

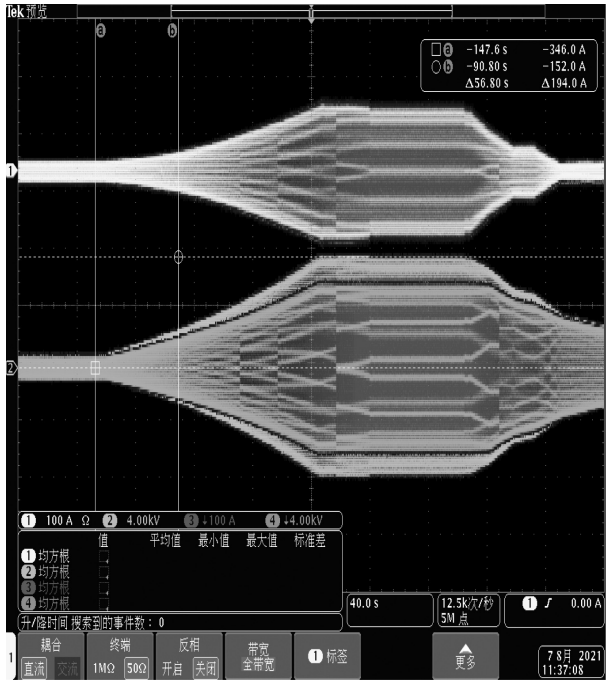


图 21 电动机端电压、电流曲线

Fig. 21 Motor voltage and current curve

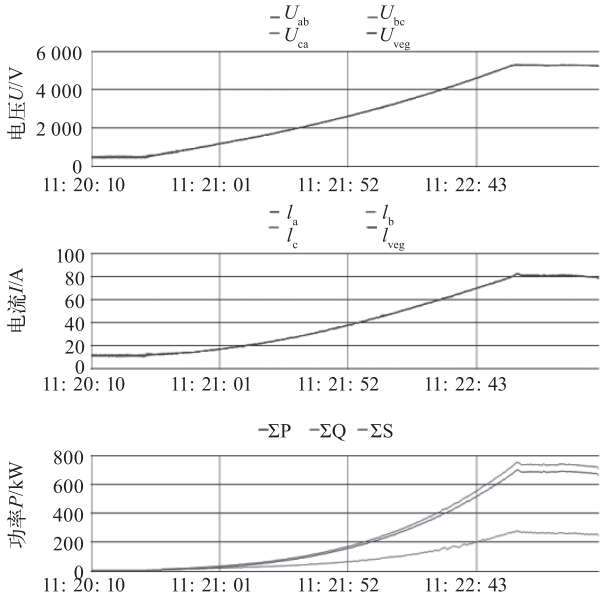


图 22 变频器输出线电压、相电流和功率曲线

Fig. 22 VFD output line voltage，phase current and power curve

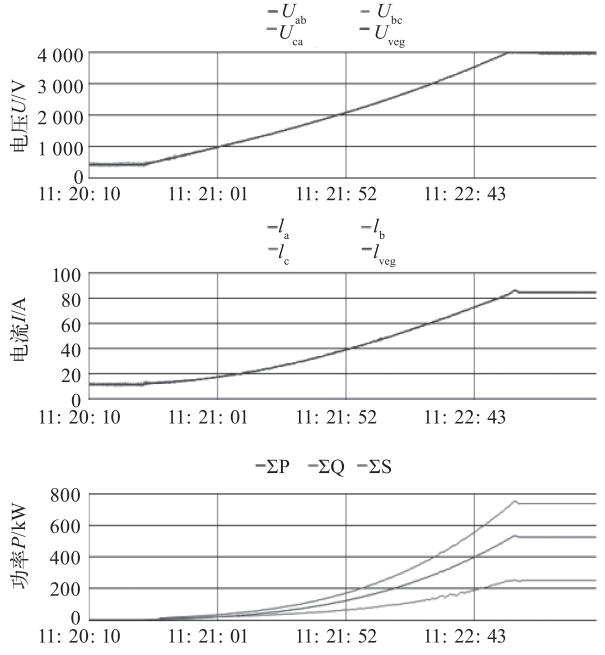


图 23 电动机端线电压、相电流、功率曲线

Fig. 23 Motor terminal line voltage，phase current and power curve

4 结束语

本文给出了不同的实验类型下实验的具体过程与实验的结果数据。远距离变频驱动实验平台通过开展电动机起动、电潜泵特性模拟和负载突变等实验可以得出如下结论：

1）验证了远距离变频驱动实验平台的可行性，该平台针对深海油气开发中水下供电系统开展相关测试，可以进行实际工程的应用工况、运行状态的复现。

2）负载特性实验验证了实验平台在电潜泵负载特性时的运行情况，证明了依据相同的原理该平台可以开展电潜泵、压缩机等不同负载特性实验验证。

参考文献

[1] 秦世利，张俊斌，畅元江，等．流花4-1油田水下电潜泵远程控制系统研究及方案设计[J]．中国海上油气，2014，26(3)：102-106．

[2] 平朝春，郭宏，李锐鹏，等．变频驱动分析中长线电缆传输模型应用对比[J]．广东电力，2018，31(10)：101-109．

[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] 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．

[5] 张海磊，杨洪庆，刘晓明．变频器远距离水下电潜泵控制的问题研究[J]．资源节约与环保，2020(2)：95-97．

[6] 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．

[7] 王成，李正，金建中．能量回馈式节能型异步电机对拖试验方案设计[J]．电子科技，2016，29(11)：44-46．

[8] 王家．基于共直流母线的变频器对拖试验系统设计[J]．电力电子技术，2014，48(7)：10-12．

作者简介

王双成（1990—），男，硕士，工程师，从事海洋油气开采水下设备供配电设计工作。

（收稿日期：2022-11-02）