

ESP变频驱动输出谐波影响分析及正弦波滤波器设计

潜油电泵是目前海上油田机采井生产中最重要的人工举升设备，变频控制因其具有起动平稳、保护及时及调产范围宽等优势，成为潜油电泵控制的主要控制技术。由于海洋平台潜油电泵机组与变频控制设备之间存在长电缆、分布电容和电感，变频器采用高频SPWM调制输出电压波会对长电缆和电动机绝缘造成损伤，故必须配置正弦波滤波器方可用于ESP驱动。因此，围绕平台潜油电泵驱动特点和正弦波滤波器设计进行介绍。

张 嵘/中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司

0 引言

由于潜油电泵变频拖带方式可以扩大潜油电泵排量的调整范围^[1-2]，使井下电泵机组工作在最佳工况点，保证严重供液不足油井的连续运转及减少起动次数，降低电动机功率，减少能耗。因此变频技术的应用可以充分使潜油电泵的特性和油井生产能力相匹配，提高整个潜油电泵机组的运行效率，延长检泵周期，减小作业费用，目前已经成为海洋平台潜油电泵的主要控制设备。

由于海洋平台特殊的环境限制，潜油电动机的泵挂深度一般在几百米到数千米，变频器与潜油电动机之间需要经过长电缆连接，目前海洋平台潜油电泵拖带所用的变频器多为电压源型变频器，其输出逆变器一般采用SPWM（正弦脉宽调制）技术，逆变器的开关频率一般在1.5~4 kHz。逆变器IGBT的高速

开关带来的 du/dt 会造成电缆和电动机端的过电压从而造成绝缘的损伤，从而无法拖带潜油电泵机组。

为解决上述问题，在长电缆驱动应用中，必须在变频器的输出端增加滤波器，以抑制逆变器产生的谐波，保证现场设备的运行和使用寿命。

1 变频SPWM输出电压对电缆和电动机的影响

在海上平台应用中，变频器在地面安装，电动机安装在油井底部，电动机和驱动设备需要很长的电缆线连接。SPWM变频器通过长电缆驱动感应电动机系统如图1所示。

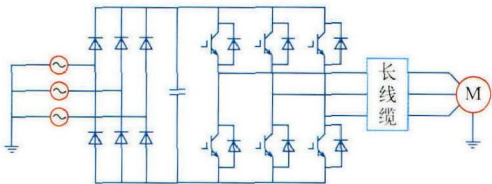
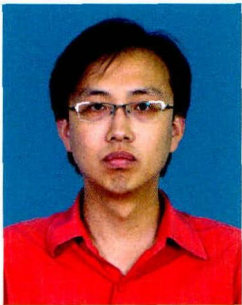


图1 采用长电缆的变频调速系统示意图

SPWM变频器的输出电压由一系列具有正弦规律的SPWM脉冲组成，由于变频器的开关频率较高，一般在2.5~4 kHz，且变频器输出的脉冲边沿陡， du/dt 高，脉冲经过长线电缆传输至电动机，由于长线电缆存在的分布参数，存在漏电感和耦合电容，会在电动机端产生电压反射现象，出现高频阻尼振荡现象，而产生过电压，加剧电动机绕组的绝缘老化^[3-5]。

针对电动机端的过电压对电动机绝缘的压力，可以通过加强电动机绝缘强



张 嵘/工程师

关键词/Keywords
海上油田 ·
潜油电泵 ·
变频 ·
输出谐波 ·
正弦波滤波器 ·

中海油能源发展股份有限公司“海上潜油电泵专用变频控制系统自主化研究”科研项目（HFKJ—GJ2015011）。

度来解决，但这会大大增加电动机的成本和制造的复杂性。目前，多采用LC或者RLC正弦波滤波器进行波形治理。

2 变频器输出正弦波滤波器的应用现状

现在海洋石油海上平台潜油电泵用的变频器中普遍应用正弦波滤波器。为降低变频器输出对电缆、电动机的影响，一般用于潜油电泵的滤波器谐波总畸变率THD_v不大于5%，以得到近似的正弦波。正弦波在长线电缆中的传输不受电缆参数的影响，不会产生电压反射现象，可以适用于较长电缆长度的场合，在海上平台正弦波滤波器作为变频器的标准配置使用。

在正弦波滤波器的设计中，要考虑潜油电泵变频器驱动系统对滤波器参数的限制，保证系统的工作安全。

3 变频器输出正弦波滤波器设计

一般的SPWM逆变器采用LC低通滤波器，对于LC滤波器的设计，首先考虑滤波器的截止频率，这样可以消除逆变器输出电压中高于截止频率的大多数低次谐波^[6-7]。但是仅依据截止频率不能确定滤波器的参数，除去截止频率的因素，还需综合考虑滤波器的功率容量、损耗、体积和滤波器对变频器及电动机的影响等要素对逆变器的功率密度、重量及性价比等指标的影响。

这些限制条件可以作为初步选择滤波器元件参数的依据。另外在对滤波器的参数进行优化时，这些限定条件可以作为目标函数的约束条件。

3.1 LC滤波器的分析

单相电压型PWM 逆变器拓扑^[8]，如图2所示。假设：①直流电压E_d为理想电压源；②逆变器的开

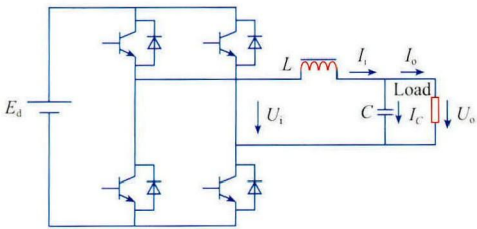


图2 单相电压型PWM逆变器拓扑图

关为理想开关；③忽略电感与电容的寄生参数；④负载为线性负载。由于逆变器以高频PWM方式工作，输出滤波器的作用是滤掉高次谐波分量，使输出电压接近正弦波。

因此，滤波器设计目标包括：①输出电压畸变率THD_v不大于5%；②滤波器整体体积小；③滤波器对高频谐波阻抗高；④滤波器消耗功率低。根据以上原则，对滤波器特性进行分析。LC滤波器的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_L^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_L} s + 1}$$

(1)

式中， ω_L 为LC谐振角频率， $\omega_L = 1/\sqrt{LC}$ ； ξ 为阻尼系数； $U_o(s)$ 为滤波器输出电压； $U_i(s)$ 为滤波器输入电压； s 为拉普拉斯变换算子。

3.2 滤波器截止频率的确定

对于单相SPWM逆变器输出电压U_o的频谱分析，各次谐波形成以 $n = jk$ ($j = 1, 2, 3, \dots$)为中心幅值递减的上、下边频谐波带，其中 k 为调制比（载波频率与基波频率之比），带中各次谐波可以表示为 $n = jk \pm b$ ，其中 $j + b \neq$ 偶数，逆变器输出电压频谱图，如图3所示。

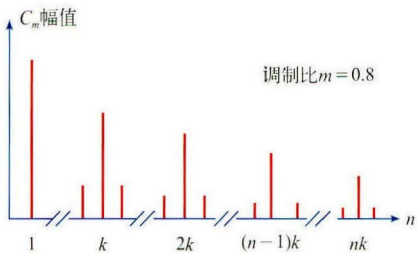


图3 逆变器输出电压频谱

由图3可以看出，SPWM逆变器输出电压的最低谐波群为： $n = k \pm b$ ，由于边频带谐波幅值是衰减的，足以产生影响的 b 值不会很高，故低谐波群的位置取决于 k 值，即 k 值越高，最低的一个下边带离基波就越远。为了使滤波器输出电压接近正弦波同时又不会引起谐振问题，LC滤波器的截止频率 $f_L = 1/2\pi\sqrt{LC}$ 必须要远小于PWM电压中所含有的最低次谐波频率，同时又要远大于基波频率。LC截止频率 f_L 选为

$$10f_1 < f_L < f_{har(min)} \tag{2}$$

式中， f_1 为基波频率； $f_{har(min)}$ 为最低次谐波频率。

对于高频的PWM逆变器，载波频率远大于10倍的基波频率， f_L 选为载波频率的1/10~1/4。

3.3 参数计算

1) 根据变频器功率确定电抗器的额定电流为

$$I_{VR} = \frac{P_{VR}}{\sqrt{3}U_{VR}} \tag{3}$$

式中， I_{VR} 为变频器额定电流，A； P_{VR} 为变频器额定功率，W； U_{VR} 为变频器额定电压，V。

2) 计算滤波器总电流为

$$I_L = \frac{I_{VR}}{\cos \varphi} \tag{4}$$

式中， I_L 为电抗器总电流，A； I_{VR} 为变频器额定电流，A； $\cos \varphi$ 为功率因数。

3) 计算滤波器阻抗，为达到变频器输出总谐波畸变THD不大于5%的性能要求，一般取10%的电抗器压降进行计算，即

$$X_L = \frac{U_L}{\sqrt{3}I_L} \times 10\% \tag{5}$$

式中， X_L 为滤波器电抗， Ω ； U_L 为电网电压，V。

4) 计算电抗器电感量

$$L = \frac{X_L}{\omega} \times 10^3 = \frac{X_L}{2\pi f} \times 10^3 \tag{6}$$

式中， L 为电抗器电感量，mH。

针对开关频率为4 kHz的变频器，此次设计的滤波器截止频率 $f_L = 1$ kHz，则滤波器的LC常数为

$$LC = \frac{1}{2\pi f_L^2} \tag{7}$$

5) 计算滤波器电容

$$C = \frac{LC^2}{L \times 10^9} \tag{8}$$

式中， C 为电容器容量， μF 。

4 变频器输出正弦波滤波器性能测试

按照以上公式计算所得数据，组装正弦波滤波器，电容器值220 μF ，电抗器值0.12 mH 进行

空载测试，测试结果如下表所示，测试波形如图4~6所示，满足输出THD_v不大于5%的要求。

表 经过滤波器后不同频率THD_v(%)测试数据

测试频率/Hz	30	40	50
THD _v (%)	0.7	0.7	1.6

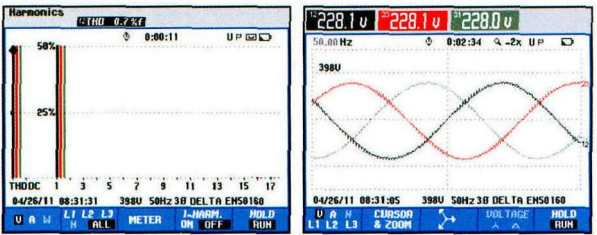


图4 30 Hz空载测试波形图

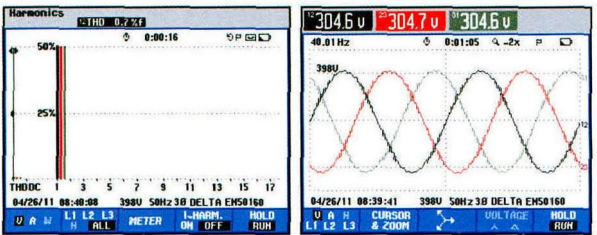


图5 40 Hz空载测试波形图

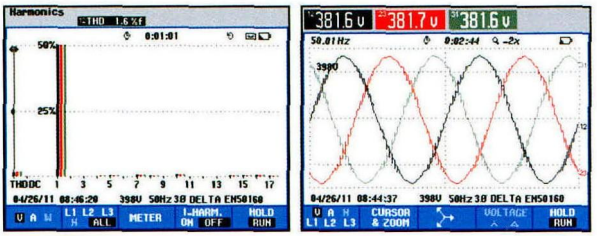


图6 50 Hz空载测试波形图

5 结束语

由于海洋平台潜油电泵特殊的应用工况，电机与变频器之间的电缆长度均在几百米至几千米不等，普通SPWM逆变输出含有大量的高频谐波成分，在长电缆驱动时会造成电缆绝缘损坏，电压波形如图7所示。

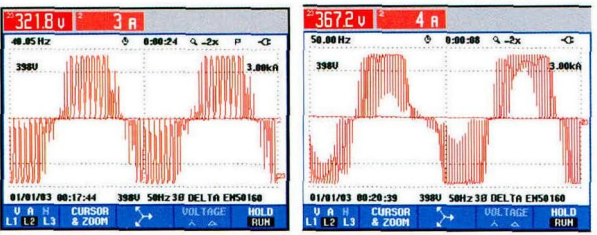


图7 SPWM调制变频器输出电压波形图

故普通变频器对负载测的电缆长度有严格要求，图8为西门子变频器负载电缆允许数据。

没有输出滤波电容器的最大
导线长度

功率	额定电压	非屏蔽导线 和 PROTOFLEX EMV	屏蔽导线
~ 4 kW	200 V ~ 600 V	50 m	35 m
5.5 kW	200 V ~ 600 V	70 m	50 m
7.5 kW	200 V ~ 600 V	100 m	67 m
11 kW	200 V ~ 600 V	110 m	75 m
15 kW	200 V ~ 600 V	125 m	85 m
18.5 kW	200 V ~ 600 V	135 m	90 m
22 kW	200 V ~ 600 V	150 m	100 m
30 kW ~ 200 kW	380 V ~ 690 V	150 m	100 m

图8 西门子G150变频器对电动机电缆长度限值

通过在变频器输出端增加正弦波滤波器，可以很好地滤除变频器SPWM波中的谐波成分，使得电动机端得到的电压和电流波形接近完美的正弦波，避免了电动机电缆长度的限制，使潜油电泵长线电缆变频拖带成为现实，有效地增加了潜油电缆和电动机的使用寿命，减少了海上平台油井的修井次数，降低了海上平台的采油成本。

参考文献

[1] 崔晓霖, 邢海燕, 孙燕, 等. 潜油电泵变频技术的研究与应用 [J]. 石油矿场机械, 2004, 33 (增刊1): 57-59.

[2] 李中林, 徐琳, 李林燕, 等. 油井变频调速技术的特点及应用 [J]. 石油石化节能, 2012 (7): 29-30.

[3] 马文忠, 李耀华, 孔力. 电潜泵变频驱动负面问题研究 [J]. 石油学报, 2006, 27 (2): 132-136.

[4] 马洪飞, 徐殿国, 陈希有, 等. PWM逆变器驱动异步电动机采用长线电缆时电压反射现象的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (11): 110-113.

[5] 行震. 变频器负面效应分析与滤波器设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[6] 汤钦圣. 网络与传输线 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1989: 89-102.

[7] 颜斌. 变频器输出滤波器的优化设计与仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.

[8] 陈希有, 颜斌, 徐殿国, 等. 变频器输出滤波器的模糊优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8): 71-75.

(收稿日期: 2016-10-10) EA