

# 逆变器供电的潜油电机的损耗分析

李莹 孟大伟 徐永明

哈尔滨理工大学, 黑龙江哈尔滨(150040)

**摘要** 针对逆变器供电对潜油电机损耗的影响, 利用 Matlab 建立了逆变器的仿真电路, 得到了逆变器输出高次谐波的电压频谱, 并计算出了潜油电机的高次谐波作用下的铜耗铁耗。研究发现, 高次谐波对电机损耗影响很大, 会直接导致效率下降。

**关键词** 逆变器 潜油电机 谐波频谱分析 铜耗 铁耗

中图分类号 TM301.2 文献标识码 B 文章编号 1008-7281-(2008)01-0038-04

## The Loss Analysis of Submersible Motor Fed by Inverter

Li Ying, Meng Dawei, and Xu Yongming

**Abstract** In order to analyze the influence of inverter on the loss of submersible motor, an simulation circuit of the inverter is established by MATLAB, then the voltage spectrum of high-order harmonic produced by the inverter is given, meanwhile the copper loss and iron loss which are brought in by the submersible motor's high-order harmonic component are calculated in this paper. The result indicates that the high-order harmonic plays an important influence on the submersible motor's loss, it will lead to the descent of the efficiency directly.

**Key words** Inverter, submersible motor, analysis of harmonic spectrum, copper loss, iron loss.

## 0 引言

潜油电机是一种结构细长、定转子分段立式工作的三相鼠笼型异步电动机, 一般工作在距离地面 1 000 ~ 3 000m 的深井内<sup>[1]</sup>, 采用扁平铠装电缆供电, 其带动多级离心泵高速旋转使得油流在多级增压下形成足够的压头, 被举升至地面。潜油电泵系统正常工作时主要存在两个问题: 一是起动电流大, 电机电缆损坏频繁, 对泵的机械冲击损害严重; 二是由于井下情况复杂, 无法根据井下液面变化自动控制排量及工作状态, 很难保证抽油质量, 并容易将泥沙抽出造成沙卡导致电机损坏, 这些都对节能、提高效率等方面产生不利影响<sup>[2]</sup>。

变频调速技术的采用可以实现软起动, 消除井下机械和电力冲击, 延长潜油电泵机组的使用寿命, 同时也可以扩大潜油电泵排量的调整范围, 使泵工作在最佳工况点, 减少能耗, 从而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。

然而变频器的应用同时也给潜油电泵的运行

带来一些负面影响, 变频器输出电流中含有大量的高次谐波成分, 会给其他设备带来电磁干扰并且引起额外的铜耗、铁耗导致温升致使电机效率下降<sup>[3]</sup>。

本文通过建立逆变器电路的仿真模型, 得到输出电流高次谐波的频谱分布图, 进而分析出潜油电机损耗的变化情况及高次谐波对电机效率的影响。

## 1 SPWM 逆变电路电源谐波频谱分析

在 SPWM 逆变电路中, 设调制信号波  $U_r(t)$  频率为  $f_r$ , 幅值为  $M_r$ , 载波  $U_c(t)$  频率为  $f_c$ , 幅值为  $M_c$ , 故

载波比  $N = f_c / f_r$  ( $N$  为整数);

调制度  $\alpha = M_c / M_r$ ,

采用 SPWM 逆变电路的变频器输出的线电压频谱分布取决于调制信号波和载波在一个正弦周期内的交点所唯一确定的一组开关角, 而其开关角是由载波比  $N$  和调制度  $\alpha$  所决定<sup>[4]</sup>。

为了分析 SPWM 逆变电路输出电压中的高次谐波分量, 利用 Matlab/Simulink 中 SimPower-

Systems 库中的模块进行仿真分析<sup>[5]</sup>, 仿真结构示意如图 1 所示。

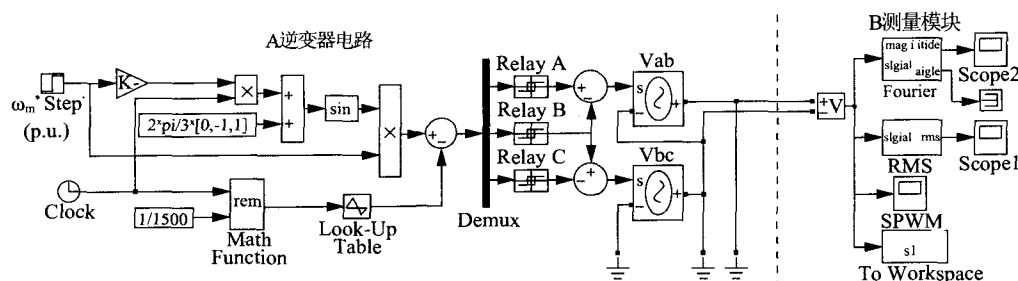


图 1 系统仿真结构图

系统的仿真模型是由逆变器电路仿真模块和测量模块两部分构成, 以上部分均为 Simulink 中的基本模块搭建。图中虚线左侧为逆变器电路的仿真模块, 它可以输出较好的三相 SPWM 波形。图中虚线右侧为测量模块, 通过它并且利用 psbfft\_scope 函数编写的 m 文件可以得到逆变器输出电压的谐波频谱分布图, 包括各次谐波的幅值和相角。图 2 所示即为逆变器输出高次电压谐波频谱分布图, 其中横坐标为谐波次数, 纵坐标为各次谐波幅值与基波幅值的比值 (%)。

如图 2(a) ~ (d) 为四种不同情况下, 逆变器

的输出电压频谱分布图, 对此频谱图进行对比分析, 可看出: 输出电压的基波幅值和调制度  $M$  成正比, 和载波比  $N$  基本无关; 逆变器输出的谐波分量主要集中在载波频率  $f_c$  及其整数倍频率  $2f_c$ 、 $3f_c$ ……附近, 并且以这些频率为中心; 载波的频率大小决定了频谱中心线的位置, 载波频率的改变将引起谐波分布中心的迁移; 当  $N$  取偶数时, 输出电压频谱中既有奇数次谐波, 也有偶数次谐波; 当  $N$  取奇数时, 输出电压频谱中只有奇数次谐波; 如果提高调制频率, 则幅值较大的谐波分量将朝着频率增大的方向移动。

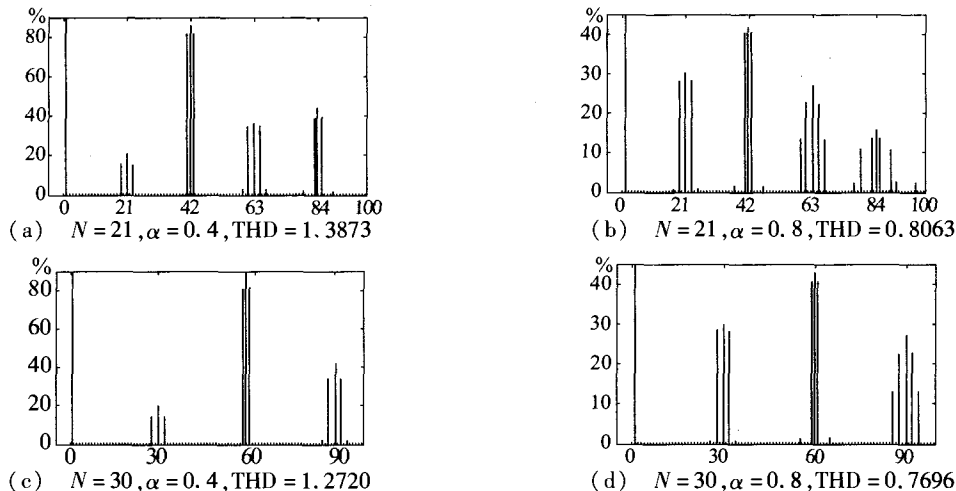


图 2 谐波电压频谱分布

在实际应用中, YQY114P - 31kW 潜油电机采用 Siemens6SE70 变频器供电, 变频器采用 SPWM 逆变电路, 其参数设置为  $N = 30$ ,  $\alpha = 0.8$ 。对图 2 逆变电路的参数进行修改, 基波频率 50Hz, 载波频率 1500Hz, 调制度为 0.8, 运行 psbfft\_scope 函数可得到所用变频器输出电压的谐波频谱分布图, 同时在仿真过程中也以表格形式给出了各高次谐波占基波幅值的百分比, 如表 1 所示。

表 1 各高次谐波所占基波电压百分比

各次谐波频率值 (Hz)	谐波次数	各次谐波所占百分比 (%)
50	Fund	100
1400	h28	27.52
1500	h30	28.12
1600	h32	27.50
2950	h59	39.26
3000	h60	41.35
3050	h61	39.33
4300	h86	13.10
4400	h88	22.03
4500	h90	26.83
4600	h92	22.06
4700	h94	13.01

由于逆变器输出的谐波分量主要集中在载波频率及其整数倍频率附近,并且以这些频率为中心,故在表1中仅列出主要次谐波及其占基波的百分比。

## 2 高次谐波对潜油电机的影响

通过频谱分析发现,变频器电源输出的电流波形中含有大量的高次谐波分量,这些谐波分量作用在潜油电机上,会引起电机的附加发热,导致电机的额外温升,致使电机降额使用。

### 2.1 高次谐波等效电路问题描述

如果不考虑铁心饱和等非线性因素的影响,认为电机电路是线性的,则根据叠加原理,可以将各次谐波电源分别加到同一个稳态等效电路上。对于k次谐波电压和电流,潜油电机的谐波稳态等效电路如图3所示。

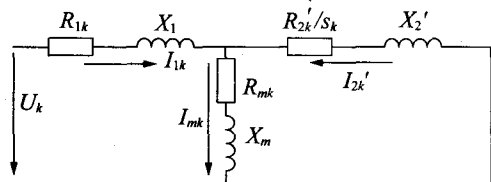


图3 潜油电机谐波等效电路

$r_{1k}$ 、 $r_{2k}'$ 、 $r_{mk}$ —k次谐波定子电阻、折合后转子电阻、铁耗等效电阻; $X_1$ 、 $X_2'$ 、 $X_m$ —定子、转子漏抗和激磁电抗; $U_k$ —k次谐波相电压; $s_k$ —一定子k次谐波电流所产生的旋转磁场相对转子的转差率。

$$s_k = \frac{[k \pm (1 - S_1)]}{s_k} \quad (1)$$

由于基波转差率很小,因此对于高次谐波旋转磁场,由式(1)可知,可以认为  $s_k \approx 1$ 。此外,考虑到激磁电抗  $X_m$  一般比定、转子漏抗  $kX_1$  和  $kX_2'$  要大得多,因此对图3可进一步简化,如图4所示。

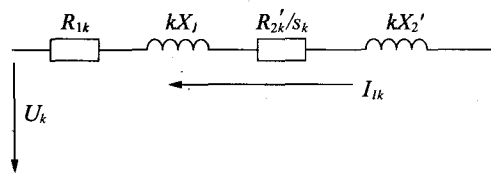


图4 简化的潜油电机谐波等效电路

由于图4忽略磁化电流的影响,k次谐波电流为

$$I_{1k} = I_{2k}' = \frac{U_k}{\sqrt{(r_{1k} + r_{2k}')^2 + (kX_1 + kX_2')^2}} \quad (2)$$

在高频情况下,潜油电机的定、转子电阻会远小于  $kX_1$  和  $kX_2'$ ,因此

$$I_{1k} = \frac{U_k}{k(X_1 + X_2')} \quad (3)$$

潜油电机定子绕组为星形接法,因此  $k \geq 5$ ,从而得到总的谐波电流有效值为

$$I_{hk} = \sqrt{\sum_{k \geq 5} I_{1k}^2} \quad (4)$$

相电流有效值为

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k \geq 5} I_{1k}^2} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,含有谐波的相电流有效值高于基波相电流有效值,谐波电流有效值将减小。

### 2.2 高次谐波对潜油电机铜耗的影响

谐波电流流过电机定转子绕组时产生的铜耗为

$$\Sigma P_{Cu,k} = \Sigma I_{hk}^2 (R_1 + R_2') \quad (6)$$

潜油电机转子线圈为鼠笼型结构,因此集肤效应不可忽略。当考虑集肤效应时,应该引入转子电阻增大系数  $k_{rk}$  来进行修正,修正后的算式为

$$\Sigma P_{Cu,k} = \Sigma I_{hk}^2 (R_1 + k_{rk} R_2')$$

上式表明,由于集肤效应的影响,谐波电流产生的附加铜耗将进一步增大。

设高次谐波电压所占基波电压的百分比为  $t$ ,则

$$U_k = tU_1 \quad (7)$$

将式(7)代入k次谐波铜耗计算公式,得到

$$P_{Cu,k} = \frac{t^2 U_k^2}{k^2 (X_1 + X_2')^2} (R_1 + k_{rk} R_2') \quad (8)$$

将式(8)与基波铜耗  $P_{Cu,1}$  相除,可得到

$$P_{Cu,k} = \frac{t^2}{k^2} P_{Cu,1} \quad (9)$$

式(9)表明,k次谐波铜耗与  $t$ 、 $k$  及  $P_{Cu,1}$  均相关。 $t$  越大,则k次谐波铜耗越大; $k$  越大,则k次谐波铜耗越小。

### 2.3 高次谐波电流对潜油电机铁耗的影响

与基波电流产生的磁场不同,谐波电流产生的磁场以不同倍数的同步速度相对于定、转子旋转,所以它在转子铁心中也要产生附加铁耗。谐

波磁场相对于定、转子的旋转速度虽然不同,但比较接近,而且谐波次数越高,两者越接近。为简化计算,近似认为谐波磁场在定转子铁心中的交变频率相同,等于基波频率乘以谐波次数。则  $k$  次谐波电流产生的铁耗为

$$P_{Fe,k} = P_{Fe,1} \left( \frac{B_k}{B_1} \right)^2 \left( \frac{f_k}{f_1} \right)^{1.5} \left[ \frac{(G_1 + G_2)}{G_1} \right] \quad (10)$$

式中,  $P_{Fe,1}$ —基波磁场在定子铁心中产生的铁损耗;  $B_k/B_1$ — $k$  次谐波磁通密度幅值和基波磁通密度幅值之比;  $f_k/f_1$ — $k$  次谐波和基波频率之比;  $G_1, G_2$ —一定转子铁心的质量<sup>[6]</sup>。

谐波电流与基波电流产生的磁动势在空间分布规律相同,因而有

$$\frac{B_k}{B_1} = \frac{\Phi_k}{\Phi_1} = \frac{f_1}{f_k} \times \frac{E_k}{E_1} \quad (11)$$

其中,  $\Phi_1, E_1$  和  $\Phi_k, E_k$ —分别为基波和  $k$  次谐波电流产生的每极磁通和气隙电动势。同时,谐波与基波气隙电动势之比近似等于谐波与基波电压之比,即

$$\frac{E_k}{E_1} \approx \frac{U_k}{U_1} \quad (12)$$

将上两式代入  $k$  次谐波电流铁耗计算公式,得到

$$P_{Fe,k} = P_{Fe,1} \times \left( \frac{U_k}{U_1} \right)^2 \times \frac{I}{\sqrt{k}} \times \frac{(G_1 + G_2)}{G_1} \quad (13)$$

式(13)表明,谐波电流在定、转子铁心中产生的附加铁耗与谐波电压分量的幅值成正比,与谐波次数成反比。

同时由谐波电压和基波电压的比例关系,可得到

$$P_{Fe,k} = t^2 \frac{I}{\sqrt{k}} \times \frac{(G_1 + G_2)}{G_1} P_{Fe,1} \quad (14)$$

式(14)表明,  $k$  次谐波铜耗与  $t, k$  及  $P_{Fe,1}$  均相关。  $t$  越大,则  $k$  次谐波铁耗越大;  $k$  越大,则  $k$  次谐波铜耗越小。

### 3 实例计算

以 YQY114P-31kW 潜油电机为例,分析采

用 Siemens6SE70 变频器供电时高次谐波对其铜耗、铁耗的影响。表 2 为正常供电和变频供电时潜油电机损耗、效率的对比,结果表明高次谐波对潜油电机的效率有较大影响,不可忽略。

表 2 正常供电和变频供电情况下损耗、效率的对比

	正常供电(W)	变频供电(W)	损耗增量(%)
铁耗	1078	1203.05	11.60
铜耗	3624	3779.47	4.29
效率(%)	81.73	81.01	0.72

### 4 结语

(1) 逆变器输出的电压波形中含有高次谐波成分,即使提高载波比和调制深度,潜油电机所用的变频器输出电压的高次谐波幅值仍然很大,因此导致了潜油电机铜耗铁耗的增加;

(2) 潜油电机特殊的细长结构决定了不能采用改变槽形的方式来抑制高次谐波,并且由于潜油电机工作在地下几千米处,采用扁平电缆供电,在高次谐波作用下铠装电缆易发生爆裂,因此需要在逆变器输出端增设交流电抗器来抑制高次谐波;

(3) 在逆变器输出端增设交流电抗器后,高次谐波得到抑制,谐波损耗也将减小。

#### 参考文献

- [1] 张玉斌,于海春. 潜油电泵机组可靠性研究[J]. 石油学报. 2003, 24(4): 103-107.
- [2] 贾贵玺,高跃等. 中高压潜油电泵变频调速技术的研究与应用. 电气传动. 2001, 5: 42-44.
- [3] 葛利俊,骆建勇等. 电潜泵中压变频调速系统的改进. 石油机械. 2002, 7: 12-16.
- [4] 王兆安,黄俊. 电力电子技术. 北京:机械工业出版社,2000.
- [5] 洪乃刚等. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真. 北京:机械工业出版社,2006. 1.
- [6] Yamazaki, Katsumi. Loss Calculation of Induction Motors Considering Harmonic Electromagnetic Field in Stator and Rotor. Electrical Engineering in Japan. 2004, 147, (2): 63-73.

收稿日期:2007-09-28.