

高速电动机供电系统谐波抑制方法的研究

崔 红¹,王凤翔²

(¹辽宁省交通高等专科学校,沈阳 ²沈阳工业大学,沈阳)

摘要:高速电动机供电系统的谐波电流较大,谐波抑制比较困难,滤波器拓扑结构及滤波器参数的合理选择成为高速电动机控制技术的一个重要问题。高速电动机采用通用变频器时产生的谐波电流会导致高速电机的附加损耗,分析了抑制高速电动机供电系统谐波电流的方法,通过对多种谐波抑制方法的比较,研究了两种有效的谐波电流抑制方法,即在变频器输出端配置两种复合滤波器,这两种方法可以在较宽的频带范围内,在基本上不削弱基波的情况下,能够有效地抑制变频器输出侧的谐波电流,谐波电压也可以通过该滤波器抑制。通过对一台额定功率为 $100kW$ 、额定转速为 $1000r/min$ 的高速永磁电动机的仿真和实验研究验证了该方法的有效性,为实际应用提供了理论依据。

关键词:高速电机;变频器;谐波抑制;滤波器

中图分类号: ^{TU84}

文献标识码: ^A

文章编号: ¹⁰⁰⁸⁻⁹⁷³²⁽²⁰⁰⁸⁾⁰³⁻⁰⁰²⁰⁻⁰⁵

Abstract: Harmonic current of high-speed motor power supply system is larger, harmonic suppression is difficult, filter structure and filter parameters reasonable selection becomes high-speed motor control technology an important problem. When high-speed motor采用通用变频器时, generated harmonic current will cause additional loss of high-speed motor. Analysis of harmonic suppression method of high-speed motor power supply system, through the comparison of various harmonic suppression methods, research two effective harmonic current suppression methods, namely inverter output end configuration of two kinds of composite filter, these two methods can in relatively wide frequency band, in basically not weaken fundamental wave condition, can effectively suppress inverter output side harmonic current, harmonic voltage also can pass through this filter抑制。Through simulation and experimental research of a high-speed permanent magnet motor with rated power of $100kW$, rated speed of $1000r/min$, verified the effectiveness of this method, provides theoretical basis for practical application.

Keywords: high-speed motor; inverter; harmonic suppression; filter
(¹辽阳交通高等专科学校, ²沈阳工业大学)

0.引言 : 电动机谐波抑制技术是近年来研究的热点之一,其主要目的是减小电动机对电网的污染,提高电动机的运行效率。对于高速永磁电动机,由于其转速高,谐波成分多,因此谐波抑制显得尤为重要。目前,对于高速永磁电动机的谐波抑制方法研究较少,且多为理论分析,缺乏实验验证。本文通过对高速永磁电动机采用通用变频器时产生的谐波电流进行分析,研究了两种有效的谐波抑制方法,即在变频器输出端配置两种复合滤波器,这两种方法可以在较宽的频带范围内,在基本上不削弱基波的情况下,能够有效地抑制变频器输出侧的谐波电流,谐波电压也可以通过该滤波器抑制。通过对一台额定功率为 $100kW$ 、额定转速为 $1000r/min$ 的高速永磁电动机的仿真和实验研究验证了该方法的有效性,为实际应用提供了理论依据。

*通信作者 : 崔红,男,1972年生,硕士,讲师,主要从事电气传动与控制方面的教学与研究工作。

引言

高速电动机以其功率密度大、体积小、节能等优点在高性能机械中应用越来越广,如高速磨床、高速离心压缩机等。高速电动机转速可达每分钟数万转甚至数十万转,绕组电流频率较高。由于高频高速的特点及其驱动变频器存在的谐波,由此带来的高速电机供电系统谐波大的问题越来越严重。

高速电动机通常由高频逆变器驱动。由逆变器产生的谐波电流和谐波电压将引起高速电机的附加损耗,导致电机转子温升增加、电机效率下降,还会增加电机的振动和噪声。^[1]受逆变器功率器件开关频率的限制,高频逆变

器与低频逆变器相比,谐波电流阶次低,幅值大。谐波频率接近于基波的频率,因此抑制高速电动机供电系统的谐波电流比较困难。

本文通过对高速电动机采用通用变频器时产生的谐波电流的不同抑制方法比较,研究了两种有效的谐波电流抑制方法即二阶和三阶复合滤波器,这两种方法可以在较宽的频带范围内,使高速电动机供电系统的谐波电流显著减小,而基波电流损失很少。

采用通用变频器时谐波抑制的常用方法

高速电动机变频系统的方框图如图1所示。通过在变频器的整流桥与滤波电容之间的直流侧加直流电抗器可以在一定程度上减小高速电动机供电系统的电流和电压中的谐波成分,改善变频器的功率

收稿日期:2007-07-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50537001)

设计分析

Design and analysis

微特电机

ybýú 年第 úú 卷第 ú 期

因数,还可以起到限制逆变侧短路电流的作用。

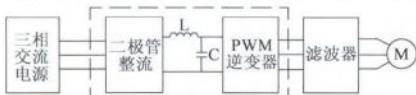


图 y 高速电动机变频系统的方框图

高速电动机供电系统常用的谐波抑制方法是在变频器的输出侧装设无源滤波器。如采用 LCL 滤波器来抑制电机供电系统的电流谐波^[1]。

LCL 滤波器结构如图 y 所示。

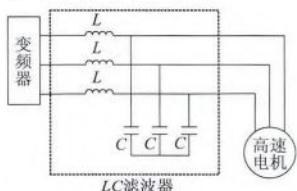


图 y 变频器输出端 LCL 滤波器的结构图

对于 LCL 滤波器的设计首先要考虑滤波器的截止频率。LCL 滤波器的截止频率选择如下^[2]:

$$\hat{e}_c = D \cdot \hat{e}_i \cdot D \cdot \hat{e}_{\text{cutoff}} \quad (y)$$

式中: \hat{e}_c 为逆变器输出的基波频率; \hat{e}_i 为滤波器的截止频率, $\hat{e}_i = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; \hat{e}_{cutoff} 为最低次的谐波频率。

截止频率选择的依据是使滤波器的输出电压近似为正弦波而且要避免谐振。

本研究以被控对象为 $I_e = 10A$, $E_e = 400V$, $\hat{e}_i = 50Hz$ 的高速永磁电动机为例,在使用台达 DVP4000 型号变频器时对图 y 的高速电动机变频系统进行了滤波器参数设计,变频器的输出电压 $E_{out} = 400V$,容量为 $N_{out} = 1.5kW$,输出基波频率 $E_{out} = 50Hz$,载波频率 $E_{carrier} = 10kHz$,选取截止频率 $\hat{e}_c = 100Hz$ 。

采用 MATLAB 软件对高速电动机变频系统在未加和加 LCL 滤波器的情况下分别进行了仿真研究,其中图 u 为变频器输出端未加滤波器时的仿真电流波形及电流谐波分析,图 u 为在变频器输出端

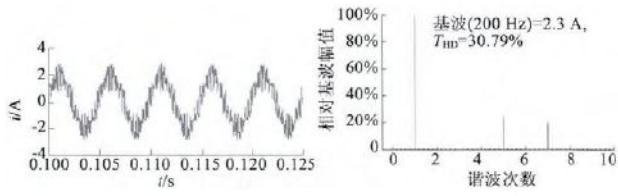


图 u 未加滤波器时仿真电流及谐波分析

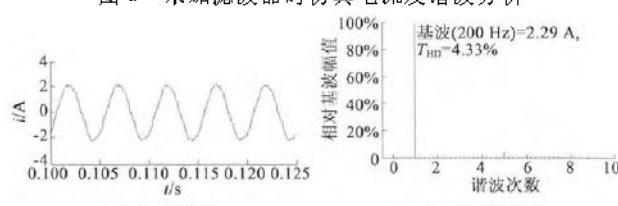


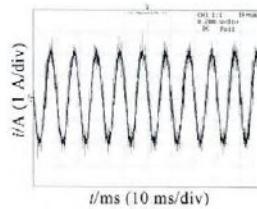
图 u 加 LCL 滤波器时仿真电流及谐波分析

加 LCL 滤波器,电感 $L = 1mH$ 和电容 $C = 1000uF$ 时的仿真电流波形及电流谐波分析。

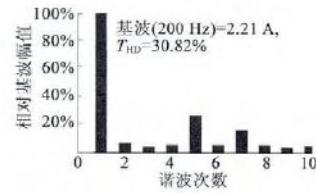
在上述 y 种情况下,在整流器和逆变器之间的直流侧采用两个 $100uF$ 的电容相串联,并在两个电容旁各并联了一个 100Ω 的均压电阻。

从图 u 可以看出,在变频器输出端未加滤波器时,高速电动机供电系统的电流谐波非常大,总谐波畸变率 (THD) 为 30.79%,基波电流幅值为 2.3A。从图 u 可以看出,在变频器输出端加 LCL 滤波器后,THD 为 4.33%。

图 o/y 图 u 为采用通用变频器,在变频器输出端未加和加 LCL 滤波器时,高速电动机供电系统的实验电流波形及谐波分析。

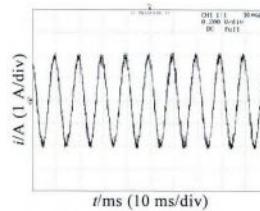


(o) 电流波形

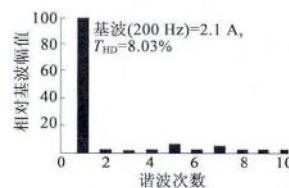


(o) 电流谐波分析

图 o 未加滤波器时的实验电流波形及谐波分析



(o) 实验电流



(o) 电流谐波分析

图 o 加 LCL 滤波器时的实验电流波形及谐波分析

从实验结果可以看出,采用定值 LCL 滤波器对于高速电动机供电系统的电流谐波有一定抑制效果。

y 谐波抑制的有效方法 yyy 加装 nia 和 lai 滤波器

y 在变频器的输出侧加装 UCL 二阶低通滤波器。由于受变频器的载波频率的限制,对于高频逆变器来说,滤波器的截止频率与基波相比较低。由于需要的电感和电容值较大,所以滤波器的成本将增加。因此在设计滤波器时要综合考虑总谐波畸变率 y 基波压降以及滤波器的成本等方面。

变频器输出端 UCL 二阶低通滤波器的结构图如图 N 所示。

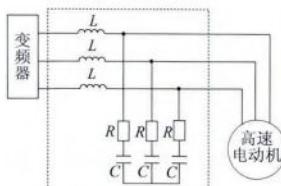


图 o 变频器输出端 UCL 二阶低通滤波器的结构图

对于图 N 的 UEA 二阶低通滤波器, 根据单相等效电路, UEA 滤波器的滤波特性可近似表示:

$$\frac{\dot{E}_o}{\dot{E}_i} \approx \frac{\frac{1}{\omega_c^2}}{1 + \frac{1}{\omega_c^2} + \frac{1}{\zeta^2}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\omega_c^2} + \frac{1}{(\zeta^2)^2}}$$

式中: ω_c 为谐振角频率; ζ 为阻尼比; E_o 为滤波器输出电压; E_i 为滤波器输入电压。

一般不考虑阻尼比 ζ 的情况, 此时损耗比较大。当阻尼比 $\zeta > 1$ 时, 由滤波器的幅频特性可以计算出谐波经过滤波器后的衰减。高频 $\omega > \omega_c$ 时, $|Y_o| \ll |Y_i|$; 低频 $\omega < \omega_c$ 时, $|Y_o| \approx |Y_i|$ (在截止频率的三倍以下) 时, $|Y_o| \approx |Y_i|$ 。

滤波器元件参数选择除了需要考虑上述衰减的要求, 还需考虑下述方面:

(y) 截止频率

截止频率选为载波频率的 10 倍以下, 截止频率还应高于基波频率的十倍以上, 要根据要求折中调整。

(z) 滤波电感

一般要求电感上的基波压降不应超过 10%。电感值的选择应使谐波电流的有效值不能超过逆变器电流容量的 10%~20%, 否则逆变器可能会由于谐波电流过大从而进入保护状态。

(e) 滤波电容

选择电容值时要依据如下的两个条件: 一是流经电容支路的基波电流有效值在空载时不应超过逆变器电流输出容量的 10%~20%; 二是电容和电感值还受截止频率的限制。

(u) 电阻的选择

电阻的取值应使电容支路的谐振电流限制在允许的范围内, 即电容支路的电流不应超过逆变器额定电流的 10%~20%。

同样以上述的高速电动机为被控对象, 根据上述参数选择的原则选取 UEA 滤波器的参数: $\omega_c = 1000 \text{ rad/s}$, $\zeta = 0.707$, $R_c = 0.1 \Omega$

加装二阶 UEA 滤波器之后高速电动机供电系统的仿真和实验电流波形以及谐波分析分别如图 A 图 u 所示。

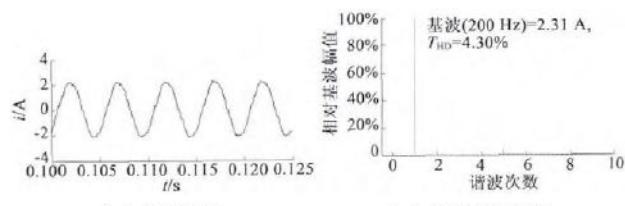


图 o 加二阶 UEA 滤波器时的仿真电流及谐波分析

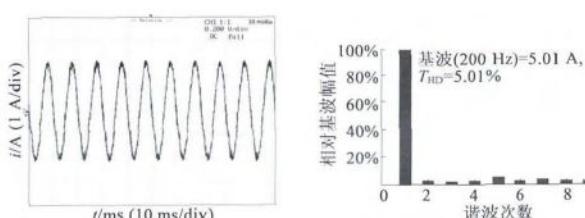


图 o 加二阶 UEA 滤波器时的实验电流及谐波分析

从图 A 和图 u 中可以看出, 与前述的滤波方法相比, 在变频器输出端加装二阶 UEA 滤波器之后, 高速电动机供电系统的电流谐波抑制效果更好一些。

若要减小高速电动机供电系统的电流谐波, 还可以采用在逆变器输出端加装如图 p 所示的三阶 EAE 滤波器。

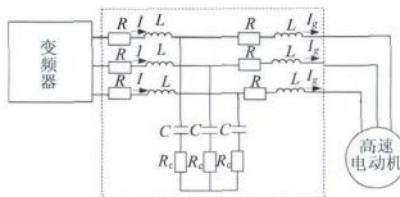


图 p 变频器输出端 EAE 三阶滤波器的结构图

EAE 滤波器的作用是向电机供电系统注入一个与谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流, 以消除谐波。电机的供电电流 I_a 可表示:

$$I_a = \frac{Y_{ea}}{Y_{ea} + Y_e} I_e + \frac{I_s}{I_s + I_a} I_e = \frac{Y_e}{Y_e + Y_{ea}} I_e$$

式中: Y_e , I_e 分别为容抗和阻尼电阻; I_s , I_e 为电感的寄生电阻; Y_{ea} 为变频器侧阻抗。为了使高频电流分量尽量从电容支路流过, 以达到较好的滤波效果, 在设计中必须保证 Y_e 相对 Y_{ea} 足够小。

图 p 中, I_s 的作用是提高系统的稳定性, 避免系统谐振, 但是也会带来线路损耗的问题, 选择时应选用无感功率电阻。电感 I 的作用是将变频器输出的电压转化为补偿电流, 而 I 上的电流由阻抗 Y_e 和 Y_{ea} (为电容 C 支路和 I_a 支路的并联阻抗) 决定。由于引入了电容和 I_a 的并联支路, 所以串联阻抗增大了, 而 I 却减小了, 但并不会减小过多 (因为 Y_{ea} 的限制)。

为了使电流中的高频分量尽可能从电容 C 支路流过, 选择滤波器的参数时要使 $Y_e \ll Y_{ea}$ 。这可以通过增加 C 的电容量或者增加 I_a 的电感量来实现。但是增加电容量会使电容支路对基波的阻抗减小, 使变频器的输出电流增加。同时还应注意增大电感量也会带来损耗大、成本高、体积大等缺点, 因此在参数选择时要综合考虑。

变频器侧电感可以利用归一化方法来设计^[4]。归一化方法是指截止频率为 ω_c 处的特征阻抗 $\omega_c L$ ，特征阻抗为 ω_c^2 的低通滤波器为基准。滤波器的电感参数可以通过式(6)估算，再结合前面的分析来确定电容 C 和电感 L 的参数。

待设计滤波器的特征阻抗

$$\begin{aligned} & \text{基准滤波器的特征阻抗} \\ & \quad \omega_c^2 L = 100 \Omega \quad (6) \\ & \text{待设计滤波器的截止频率} \\ & \quad \omega_c = 100 \text{ rad/s} \\ & \text{基准滤波器的基准频率} \end{aligned}$$

根据上述的滤波器电感的计算方法，截止频率 ω_c 选取在 100π 处，滤波器的特征阻抗选取为 100Ω ，可得， $L = 100\mu\text{H}$ 。

以上述的高速电动机为被控对象，结合滤波器各参数的分析以及参数的变化对谐波抑制效果的影响，通过仿真分析对各参数作适当的调整，即可得到滤波器的优化参数。三阶 E_aE 滤波器的参数选择： $L = 100\mu\text{H}$ ， $C = 10\mu\text{F}$ ， $\omega_c = 100\pi$ rad/s， $\omega_c^2 L = 100\Omega$ 。从图 5-5 和图 5-6 可以看出，在加二阶 U_aE 或三阶 E_aE 滤波器之后谐波抑制效果明显提高。

图 5-5 所示：

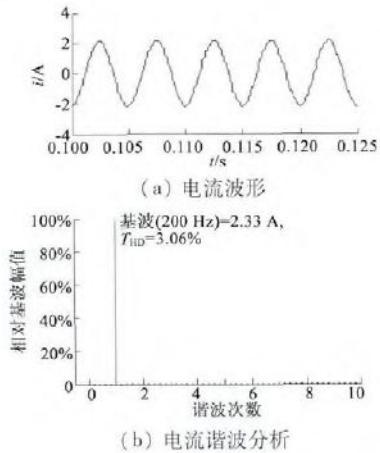


图 5-5 加三阶 E_aE 滤波器时的仿真电流及谐波分析

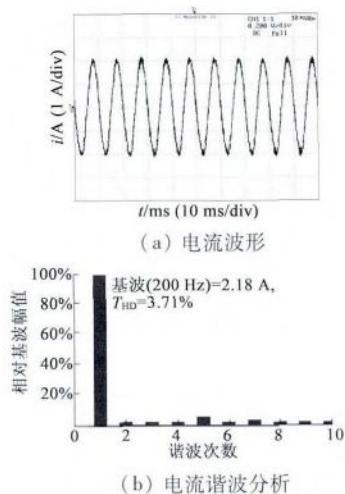


图 5-6 加三阶 E_aE 滤波器时的实验电流及谐波分析

电动机供电系统的谐波电流可以进一步减小，而基波电流削弱得很少。

图 5-7 为上述高速电动机在加不同滤波器时线电压基波压降的实验结果比较图。图 5-8 为上述高速电动机在加不同滤波器时电压谐波抑制的实验结果比较图。

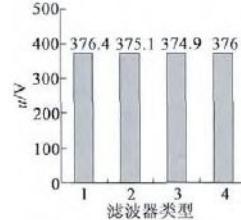


图 5-7 高速电动机加不同

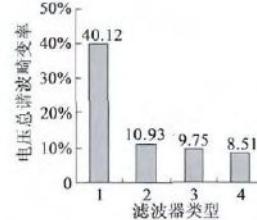


图 5-8 高速电动机加不同

滤波器的基波压降比较

图 5-7 和图 5-8 中 \square 为未加滤波器； \triangle 为加 E_aE 滤波器； \diamond 为加二阶 U_aE 滤波器； \times 为加三阶 E_aE 滤波器。从图 5-7 和图 5-8 中可以看出，在加二阶 U_aE 或三阶 E_aE 滤波器之后谐波抑制效果明显提高。

结语

通过对高速电动机供电系统的仿真和实验研究可知：

(1) 在采用通用变频器时，在不加任何滤波器的情况下，高速电动机供电系统的电流谐波比较大。

(2) 在变频器输出侧加 E_aE 滤波器后，抑制高速电动机供电系统谐波的效果比较明显。

(3) 在采用通用变频器时，抑制高速电动机供电系统电流谐波更有效的方法是在变频器的输出端加二阶 U_aE 或三阶 E_aE 复合滤波器。可以在较宽的频带范围内，使高速电动机供电系统的电流谐波减小显著。对于 $I_E = 10\text{A}$ ， $U_E = 400\text{V}$ 的高速电动机，电流总谐波畸变率小于 5% ，基波电流损失小于 1% ，而电压总谐波畸变率小于 1% ，基波电压损失小于 0.5% ，都在允许的范围内。

参考文献

- [1] 李立毅, 谭广军, 刘家曦, 等. 抑制高速电机电流谐波的 E_aE 滤波电路设计 [J]. 微电机, 2006, 37(10): 10-12.
- [2] 刘春喜, 马伟明, 孙驰, 等. 大容量逆变器输出 E_aE 滤波器设计和低次谐波抑制 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(10): 10-13.

(下转第 57 页)