

# 异步电机铁心损耗计算方法的分析与研究

翁琪

(国网浙江省电力有限公司岱山县供电公司,浙江 舟山 316200)

**摘要:**采用变频启动、自启动、串电阻启动等方式启动的异步电机内的组成部件中的电磁场分布并不相同,因此各组成部件的损耗分析方法也应各不相同。各种形式的斯坦梅茨方程可分析计算铁心损耗,且斯坦梅茨方程中的系数可由硅钢片制造商提供的损耗曲线获得,然而,硅钢片制造商提供的损耗曲线仅能在几个固定的频率下获得。采用了一种曲线拟合技术,可计算任意频率下的损耗曲线。为验证该方法,搭建了实验平台,分析不同负载转矩下、不同开关频率下异步电机的损耗。对比结果表明,该方法能够准确地预测异步电机的铁心损耗。

**关键词:**异步电机;铁心损耗;斯坦梅茨方程;磁化频率

**中图分类号:**TM315 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20391

## The Analysis and Research on the Calculation Method of the Core Losses in an Induction Motor

WENG Qi

(State Grid Zhejiang Electric Power Company Daishan Power Supply Company,  
Zhoushan 316200, Zhejiang, China)

**Abstract:** The induction motor can be started by the grid, the PWM converter, the resistance in series and so on. By different starting mode, the electromagnetic field distribution (EFD) in the different part of an induction motor is different. Thus, the calculation method for the core loss in the different part of an induction motor is also different. Various types of Steinmetz equations can be applied to calculate the core loss, and the coefficients in Steinmetz equations are obtained from the core loss data, which is provided by the manufacturer. While the core loss data provided by the manufacturer is at some certain magnetization frequencies. A curve fitting method which could calculate the core loss data at any magnetization frequency was proposed. To verify this method, an experiment setup was built to analyze the core losses of induction motor with different load torque and different switching frequency was proposed. The comparison results show that this method can predict the core losses in an induction motor accurately.

**Key words:** induction motor; core loss; Steinmetz equation; magnetization frequency

文献[1-2]介绍了几种分析异步电机铁心损耗的方法。文献[3-4]分析了输入电压中谐波分量引入的铁心损耗。文献[5]采用有限元数值分析法分析了由PWM变换器驱动的异步电机内定子铁心的损耗。文献[6]中假定异步电机的转子铁心损耗为零,进而分析了定子铁心内的损耗,但是负载运行状态下,异步电机的转子铁心损耗无法被忽略。文献[7-8]分析了定子铁心内一个点的磁感应强度,进而计算定子铁心损耗,然而异步电机内各组成部件的磁感应强度分布并不相同。文献[9-10]分析了异步电机铁心损耗的系

数,然而该方法未考虑异步电机各组成部件内电磁场分布的不同。

异步电机定、转子铁心中磁感应强度分布受到定、转子铁心开槽与电源内的高次谐波的影响,进而影响铁心损耗。文献[11-14]介绍了异步电机定、转子铁心内磁感应强度非正弦分布时,铁心损耗的计算方法。文献[15]计算了定、转子铁心内磁感应强度的变化率,进而采用一种等效频率法计算铁心损耗。文献[16]采用了一种广义斯坦梅茨方程分析磁感应强度非正弦分布时异步电机的铁心损耗。文献[17]采用了一种局部回

路法推导的改进广义斯坦梅茨方程计算异步电机的铁心损耗。

本文提出了一种计算不同工况下异步电机各部分铁心的铁心损耗的通用方法。该方法首先采用有限元数值分析软件 Ansoft 分析异步电机内非正弦分布的磁感应强度。通常,制造商提供的硅钢片铁心损耗数据是某些特定的频率、特定的磁感应强度下,单位质量或单位体积的铁心损耗。本文采用了一种曲线拟合方法,可获得任意频率下的铁心损耗曲线,进而根据有限元软件分析的磁感应强度计算异步电机的铁心损耗。

本文搭建了试验平台,分析了不同负载功率下、不同开关频率下异步电机的铁心损耗。本文一共采用了4种方法计算异步电机的铁心损耗,分别为本文提出的方法、二维有限元法、改进的广义斯坦梅茨方程法以及基于速率模型的方法。分析对比结果表明,本文提出的方法分析的铁心损耗具有很高的准确度。

## 1 铁心损耗计算方法

异步电机铁心损耗包含2个部分,涡流损耗与磁滞损耗。部分文献中,将附加损耗也认为是铁心损耗。涡流损耗与磁滞损耗均取决于硅钢片中磁感应强度的变化率。由于定、转子铁心开槽,定、转子铁心饱和与变频器供电电源内高次谐波的影响,定、转子铁心内磁感应强度为非正弦分布。

### 1.1 斯坦梅茨方程

斯坦梅茨提出了分析铁心损耗的一般斯坦梅茨方程,如下式(1)所示:

$$P = C_m f^\alpha B_{\max}^\beta \quad (1)$$

式中: $P$ 为单位质量的铁心损耗; $B_{\max}$ 为磁感应强度幅值; $f$ 为磁化频率; $C_m, \alpha, \beta$ 为常数, $\alpha$ 的取值范围为[1, 3], $\beta$ 的取值范围为[2, 3]。

此后,许多学者对一般斯坦梅茨方程进行了改进,提出了许多不同形式的斯坦梅茨方程。如将铁心损耗分为磁滞损耗与涡流损耗时,斯坦梅茨方程可表示为

$$P = k_h f^\alpha B_{\max}^\beta + k_e f^2 B_{\max}^2 \quad (2)$$

式中: $k_h, k_e$ 分别为磁滞损耗系数与涡流损耗系数。

为了减小式(2)计算铁心损耗的误差与计算铁心的异常损耗,斯坦梅茨方程可表示为

$$P = k_h f^\alpha B_{\max}^\beta + k_e f^2 B_{\max}^2 + k_a f^{1.5} B_{\max}^{1.5} \quad (3)$$

式中: $k_a$ 为异常损耗系数。

式(1)~式(3)所示的方程中,磁感应强度是正弦分布的。

为分析磁感应强度非正弦分布的铁心内的损耗,可采用下式所示的改进斯坦梅茨方程:

$$P = (C_m f_{\text{eq}}^{\alpha-1} B_{\max}^\beta) f \quad (4)$$

$$\text{其中 } f_{\text{eq}} = \frac{2}{\pi^2 \Delta B^2} \int_0^T \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 dt$$

式中: $f_{\text{eq}}$ 为铁心内磁感应强度的等效频率; $B$ 为磁感应强度; $T$ 为磁化周期; $\Delta B$ 为一个周期内磁感应强度的变化值。

式(4)也可改写为另一种形式,如下式所示:

$$P = (C_m f^\alpha B_{\max}^\beta) \frac{f}{f_{\text{eq}}} \quad (5)$$

式(4)与式(5)所示的改进斯坦梅茨方程也可应用于磁滞损耗与涡流损耗的计算中。此时,铁心损耗可表示为

$$P = (k_h f_{\text{eq}}^{\alpha-1} B_{\max}^\beta + k_e f_{\text{eq}} B_{\max}^2) f \quad (6)$$

$$P = (k_h f^\alpha B_{\max}^\beta + k_e f^2 B_{\max}^2) \frac{f}{f_{\text{eq}}} \quad (7)$$

考虑铁心的异常损耗时,改进斯坦梅茨方程可表示为

$$P = (k_h f_{\text{eq}}^{\alpha-1} B_{\max}^\beta + k_e f_{\text{eq}} B_{\max}^2 + k_a f_{\text{eq}}^{\frac{1}{2}} B_{\max}^{\frac{3}{2}}) f \quad (8)$$

$$P = (k_h f^\alpha B_{\max}^\beta + k_e f^2 B_{\max}^2 + k_a f^{\frac{3}{2}} B_{\max}^{\frac{3}{2}}) \frac{f}{f_{\text{eq}}} \quad (9)$$

考虑铁心的异常损耗、变频器供电电源内的谐波含量与磁感应强度幅值的变化,铁心损耗可表示为

$$P = k_h f^\alpha B_{\max}^\beta + k_e f^2 B_{\max}^2 + k_a f^\gamma B_{\max}^\delta \quad (10)$$

$$P = (k_h f^\alpha B_{\max}^\beta + k_e f^2 B_{\max}^2 + k_a f^\gamma B_{\max}^\delta) \frac{f}{f_{\text{eq}}} \quad (11)$$

$$P = (k_h f_{\text{eq}}^{\alpha-1} B_{\max}^\beta + k_e f_{\text{eq}} B_{\max}^2 + k_a f_{\text{eq}}^{\gamma-1} B_{\max}^\delta) f \quad (12)$$

式中: $\gamma, \delta$ 均为考虑铁心异常损耗的常数。

### 1.2 曲线外推法

本文提出了一种外推法,该方法认为斯坦梅茨方程中的系数为磁化频率 $f$ 与磁感应强度幅值 $B_{\max}$ 的函数。若斯坦梅茨方程中的系数与磁化频率间的关系已知,则可计算任意频率下的铁心损耗。

本文采用该外推法分析了硅钢片 50WW470 的斯坦梅茨方程中的系数和磁化频率 $f$ 、磁感应强度幅值 $B_{\max}$ 之间的关系。式(2)所示的斯坦梅

茨方程中包含4个未知系数,即可通过4组数据获得未知系数。表1为磁化频率为50 Hz,100 Hz,200 Hz以及400 Hz时、磁感应强度幅值为0.1 T,0.2 T,0.3 T以及0.4 T时,硅钢片50WW470的铁心损耗。

表1 硅钢片50WW470的铁心损耗

Tab.1 The loss data of silicon steel sheet 50WW470

磁感应强度 $B/T$	0.1	0.2	0.3	0.4
$P_{loss}/(W \cdot kg^{-1})/50 \text{ Hz}$	0.03	0.13	0.26	0.43
$P_{loss}/(W \cdot kg^{-1})/100 \text{ Hz}$	0.07	0.29	0.61	1.00
$P_{loss}/(W \cdot kg^{-1})/200 \text{ Hz}$	0.23	0.84	1.71	2.78
$P_{loss}/(W \cdot kg^{-1})/400 \text{ Hz}$	0.58	2.14	4.37	7.17

图1所示为硅钢片50WW470在不同频率下的铁心损耗曲线。

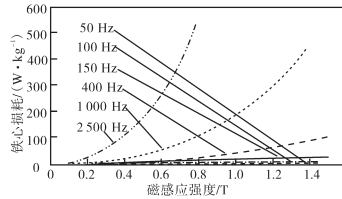


图1 硅钢片50WW470的损耗曲线

Fig.1 The loss data of silicon steel sheet 50WW470

根据表1所示的数据,本文计算了磁化频率为50 Hz,100 Hz,200 Hz以及400 Hz时,式(2)所示的斯坦梅茨方程中的4个系数,如表2所示。

表2 硅钢片50WW470的铁心损耗系数

Tab.2 The coefficient of core loss of silicon steel sheet 50WW470

频率/f/Hz	50	100	200	400
$k_h$	8.188 0	8.154 0	8.129 0	8.103 0
$k_e$	1.961 0	1.959 0	1.959 0	1.959 0
$\alpha$	1.415 6	1.409 7	1.405 3	1.400 8
$\beta$	1.759 2	1.755 7	1.752 1	1.752 1

本文采用式(12)所示的拟合公式,分析了不同频率下 $k_h, k_e, \alpha, \beta$ ,如下式所示:

$$k_h(k_e, \alpha, \beta) = a \times f^b + c \quad (13)$$

式中: $a, b, c$ 为系数,且 $a > 0, b < 0, c > 0$ 。

图2为系数 $k_h$ 随频率的变化曲线。由图2可知, $k_h$ 为幂函数,且不同频率下的 $k_h$ 满足下式:

$$\begin{cases} k_h(400) \leq k_h(200) \leq k_h(400) + x \cdot k_h(400) \cdot \xi_{200} \\ k_h(200) + D_{h3} \leq k_h(100) \leq k_h(200) + D_{h3} + x \cdot k_h(200) \cdot \xi_{100} \\ k_h(100) + D_{h2} \leq k_h(50) \leq k_h(100) + D_{h2} + x \cdot k_h(100) \cdot \xi_{50} \end{cases} \quad (14)$$

其中  $D_{h3} = k_h(200) - k_h(400)$

$D_{h2} = k_h(100) - k_h(200)$

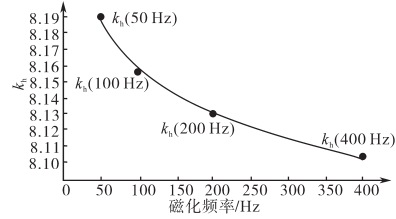


图2 不同磁化频率下 $k_h$ 的值

Fig.2 The value of  $k_h$  under different magnetization frequency

通过该方法可确定不同频率下 $k_h$ 的大致取值范围。其他系数 $k_e, \alpha, \beta$ 的取值方法类似。

利用外推法获得系数后,可采用斯坦梅茨方程计算磁化频率为任意值时,硅钢片的铁心损耗。表3为磁化频率为200 Hz与1 000 Hz时,硅钢片50WW470的铁心损耗。

表3 硅钢片50WW470不同频率下的铁心损耗

Tab.3 The core loss of silicon steel sheet 50WW470 at different magnetization frequencies

磁感应强度/T	200 Hz			1 000 Hz		
	预测损耗/ $(W \cdot kg^{-1})$	实验数据/ $(W \cdot kg^{-1})$	误差比/%	预测损耗/ $(W \cdot kg^{-1})$	实验数据/ $(W \cdot kg^{-1})$	误差比/%
0.4	2.79	2.78	0.36	25.08	27.50	8.80
0.5	3.74	4.03	7.12	44.84	41.80	7.27
0.6	5.25	5.48	4.25	63.49	60.30	5.29
0.7	6.98	7.12	1.92	85.20	83.70	1.79
0.8	8.95	9.02	0.81	110.00	113.00	2.65
0.9	10.47	11.20	6.54	156.90	149.00	5.30
1.0	13.32	13.70	2.78	196.70	193.00	1.92
1.1	16.57	16.60	0.17	241.40	246.00	1.87
1.2	20.24	20.00	1.21	291.20	307.00	5.15

由表3可知,采用该外推法计算的铁心损耗与硅钢片生产制造公司提供的实验数据的误差较小,均在10%以下。

### 1.3 异步电机定转子铁心

异步电机铁心如图3所示。为简化分析一台异步电机的铁心损耗,将异步电机分为如图3a所示的定子齿距区域与转子齿距区域。定子齿距区域可分为3个组成部分,分别为:定子轭部区域、定子齿区域、定子槽口区域;转子齿距区域可分为3个组成部分,分别为:转子轭部区域、转子齿区域、转子槽口区域,如图3b以及图3c所示。图3b以及图3c中,定子齿距区域与转子齿距区域划分为许多矩形单元,且各矩形单元足够小到可认为该矩形单元内的磁感应强度为常数。因此矩形单元越小,分析结果越精确。然而矩形单

元越小,矩形单元数越多,计算量越大,而且矩形单元数量达到一定程度后,继续增加矩形单元的数量,对计算结果的精确度影响较小。因此需权衡矩形单元数量与计算量的大小。有限元分析法将异步电机铁心划分为三角形单元,三角形单元相比于矩形单元更为优越,然而采用三角形单元,计算量大。

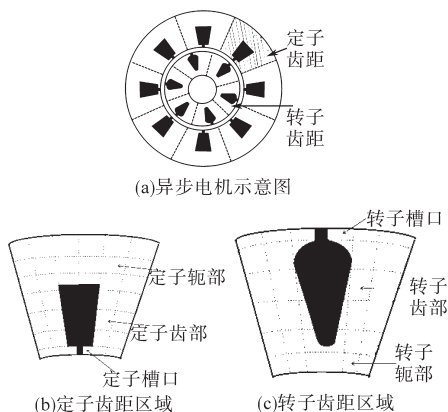


图3 异步电机铁心  
Fig.3 The core of induction motor

异步电机铁心分块如图4所示。

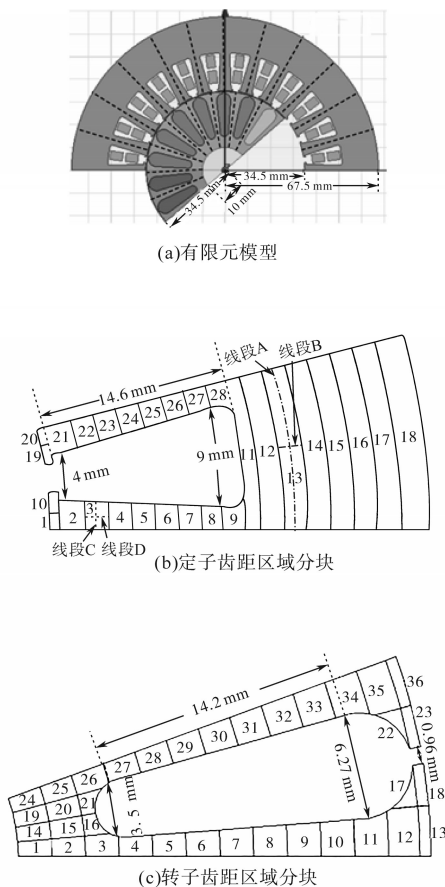


图4 异步电机铁心分块

Fig.4 The segment of iron core in induction motor

本文采用了一台 1.1 kW, 50 Hz 的异步电机有限元模型,阐述该损耗计算方法的具体流程,如图4a所示。由于定、转子铁心内的电磁场频率不一样,转子铁心内的电磁场频率较低,因此需设置2种求解步长。并将定子齿距区域剖分为28个单元,转子齿距区域剖分为36个单元。定子齿距区域的剖分方法如图4b所示,转子齿距区域的剖分方法如图4c所示,每个剖分单元内的各点的电磁场为常数。

在某个时刻,图4b中单元13内的线A与线B的磁感应强度分布与单元3内的线C与线D的磁感应强度分布分别如图5a、图5b、图5c以及图5d所示。

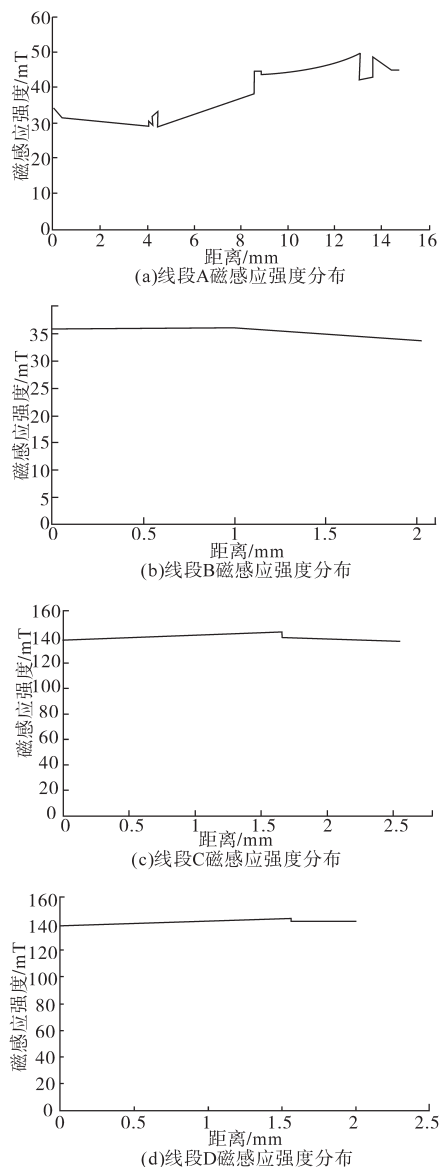


图5 某一时刻沿着线段的磁感应强度分布

Fig.5 The magnetic induction intensity distribution versus the line segments at a certain time

由图5可知,磁感应强度在单元3与单元13内的变化很小。因此,在稳态运行时,可通过提取各单元内某点的磁感应强度计算铁心损耗。

## 2 铁心损耗计算过程

### 2.1 $f_{eq}$ 与 $B_{max}$ 分析

采用本文提出的方法计算异步电机内的铁心损耗时,第1步为计算  $f_{eq}$  与  $B_{max}$ 。

利用二维有限元软件 Ansoft 可分析异步电机内任意一点的随时间变化的磁感应强度波形,并可通过下式获得  $f_{eq}$ :

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \sum_{k=2}^n \frac{(B_k - B_{k-1})^2}{t_k - t_{k-1}} \quad (15)$$

其中  $\Delta B = B_{max} - B_{min}$   
 式中:  $B_1, \dots, B_k, \dots, B_n$  分别为时间点  $t_1, \dots, t_k, \dots, t_n$  时的磁感应强度;  $B_{min}$  为磁感应强度最小值。

图6为转速为2 880 r/min时,异步电机定子铁心单元5内某一点的磁感应强度波形。由式(15)可知,  $f_{eq}$  为296 Hz,  $B_{max}$  为0.724 T。

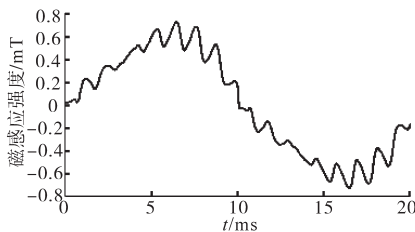


图6 1个周期内某一点的磁感应强度随时间的分布

Fig.6 The magnetic induction intensity versus the time within one period at a certain point

### 2.2 硅钢片 50WW470 的损耗曲线

采用本文提出的方法计算异步电机铁心损耗时,第2步为分析等效磁化频率为296 Hz时硅钢片的损耗曲线。

由前文分析的外推法可知,50WW470在频率为296 Hz时的损耗曲线如图7所示。

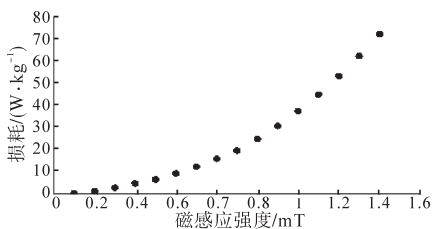


图7  $f_{eq}$  为296 Hz时,50WW470的损耗曲线  
 Fig.7 The loss curve of 50WW470 at  $f_{eq}=296$  Hz

### 2.3 计算铁心损耗

采用本文提出的方法计算异步电机内的铁

心损耗时,第3步为计算各单元的铁心损耗。

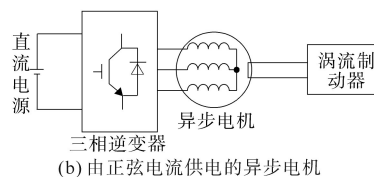
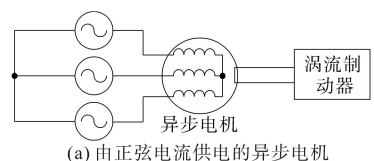
由有限元仿真软件计算可知单元5的面积为  $4.8 \text{ mm}^2$ ,而该电机的轴向长度为  $0.135 \text{ m}$ 。因此单元5的体积为  $651 \text{ mm}^3$ ,质量为  $0.005 \text{ 013 kg}$ 。利用外推法与式(1)~式(4)、式(5)~式(12),可分析获得单元5的铁心损耗,如表4所示。由表4可知,式(1)~式(4)、式(5)~式(12)所示的斯坦梅茨方程计算的铁心损耗的结果非常接近。

表4 单元5的铁心损耗

斯坦梅茨方程 编号	单元5单位质量铁心损耗/ ( $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	单元5铁心损耗/ mW
1	12.66	63.48
2	12.72	63.77
3	13.11	65.71
4	12.66	63.47
6	12.66	63.47
7	12.72	63.76
8	12.70	63.68
9	13.08	65.57
10	13.10	65.67
11	12.72	63.77
12	12.72	63.78
13	12.73	63.81

## 3 实验方法分析

为了验证所提出的计算铁心损耗的方法,设计了2个异步电机实验平台,实验平台示意图如图8所示。其中一台异步电机有正弦电流供电,如图8a所示,另外一台异步电机由PWM变频器供电,如图8b所示,实验平台实物图如图8c所示。



(c)实验平台实物图

图8 实验平台示意图

Fig.8 The schematic diagram of experimental platform

对于由正弦电流供电的异步电机而言,计算

了供电电压不变情况下,不同负载时异步电机的损耗。对于由PWM变频器供电的异步电机而言,计算了不同开关频率下异步电机的损耗。下式所示为利用实验平台计算铁心损耗的方法。

$$P_{core} = P_{in} - P_{out} - P_{mech} - P_{copper} \quad (16)$$

式中: $P_{core}$ 为异步电机内的铁心损耗; $P_{in}$ 为输入功率; $P_{out}$ 为输出功率; $P_{mech}$ 为包含风磨损耗与摩擦损耗的机械损耗; $P_{copper}$ 为总铜耗。

### 3.1 输入与输出功率

输入功率 $P_{in}$ 可通过三相功率分析仪获得, $P_{out}$ 可通过下式获得。

$$P_{out} = \omega_m \times T_L \quad (17)$$

式中: $\omega_m$ 为转子速度; $T_L$ 为负载转矩。

异步电机的转速可通过数字式转速表测得,负载转矩由涡流制动器提供。

### 3.2 机械损耗

机械损耗与转速密切相关,速度不变时异步电机的机械损耗不变。因此可通过直流电机测量在固定转速下的异步电机的机械损耗。首先测量直流电机在固定转速下的空载输入功率 $P_{dc-without-IM}$ ,然后由直流电机驱动异步电机旋转在固定转速下,测量此时直流电机的输入功率 $P_{dc-with-IM}$ 。则异步电机的机械损耗可表示为

$$P_{mech} = P_{dc-with-IM} - P_{dc-without-IM} \quad (18)$$

### 3.3 铜损耗

异步电机工作时,定子绕组与转子鼠笼条中均会产生铜损耗。利用功率分析仪可获得定子电流,利用万用表可测量定子绕组的电阻,则定子绕组的铜损耗可表示为

$$P_{cu-stator} = m \times I_s^2 \times R_s \quad (19)$$

式中: $P_{cu-stator}$ 为定子绕组铜损耗; $I_s$ 为定子电流有效值; $R_s$ 为定子绕组电阻; $m$ 为相数。

由异步电机的T型等效电路可知,转子鼠笼条的铜损耗可表示为

$$P_{cu-rotor} = s \times \omega_s \times T_L \quad (20)$$

式中: $P_{cu-rotor}$ 为转子鼠笼条的铜损耗; $s$ 为转差率; $\omega_s$ 为同步转速。

## 4 实验结果分析

### 4.1 由正弦电流供电的异步电机铁心损耗分析

图9为正弦电流供电时,本文提出方法以及其他方法计算的异步电机铁心损耗实验结果图。由前文分析可知,式(1)~式(4)、式(5)~式(12)分析计算铁心损耗的差距很小,可忽略不

计。因此,本文选择式(1)所示的斯坦梅茨方程计算了铁心损耗。其他计算损耗的方法选用了IGSE法、二维有限元软件分析法以及基于速率模型<sup>[18]</sup>的算法。

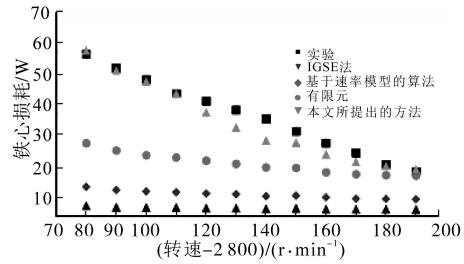


图9 异步电机铁心损耗

Fig.9 The core loss of induction motor

采用不同方法计算的铁心损耗与实验相比的误差率 $E$ ,可通过下式计算获得:

$$E = \frac{P_{core-expt} - P_{core-method}}{P_{core-expt}} \times 100\% \quad (21)$$

式中: $P_{core-expt}$ 为采用实验计算的铁心损耗; $P_{core-method}$ 为采用不同方法计算的铁心损耗。

表5为由正弦电流供电时,异步电机铁心损耗的误差率。

表5 异步电机不同转速下铁心损耗误差率

Tab.5 The error rate of core loss of induction motor at different speed

速度/ (r·min <sup>-1</sup> )	本文提出的方法/ %	Ansoft/ %	IGSE/ %	速率模型/ %
2 880	2	49	84	73
2 890	1	49	83	73
2 900	1	49	82	72
2 910	0	45	80	69
2 920	8	44	80	69
2 930	14	43	78	67
2 940	18	42	77	66
2 950	11	35	74	62
2 960	12	32	72	59
2 970	11	26	68	55
2 980	1	15	63	48
2 990	3	6	59	43

由图8与表5所示的结果可知,与其他方法相比,采用本文所提出方法计算的铁心损耗与实验分析获得铁心损耗较为接近。而且异步电机低速运行或重载运行时,铁心损耗增加。

### 4.2 由PWM变换器供电的异步电机损耗分析

图10a为开关频率为300 Hz与5 000 Hz时,由PWM变换器供电的异步电机定子绕组电流,图10b所示为定子电流的谐波含量。由图10b可知,开关频率低时定子电流的谐波含量高。

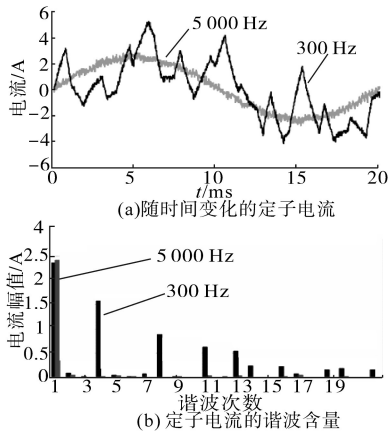


图10 异步电机定子电流

Fig.10 The stator current of induction motor

图 11 为采用本文提出方法与实验分析获得的随开关频率变化的异步电机铁心损耗以及损耗的误差比。由图 11 可知,不同的开关频率下,两种方法获得铁心损耗较为接近,即该方法可准确分析异步电机的铁心损耗。

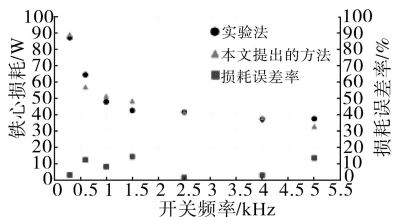


图 11 不同开关频率下的异步电机的铁心损耗

Fig.11 The core loss of induction motor at different switch frequencies

### 5 结论

本文提出了一种计算各种工况下异步电机各部分铁心损耗的方法。该方法可分析任意频率下硅钢片的损耗曲线、斯坦梅茨方程系数。该方法需通过有限元仿真软件获得异步电机内各部分铁心的磁感应强度分布,确定异步电机内各部分铁心的等效磁化频率。然后根据该磁化频率下的损耗曲线、斯坦梅茨方程系数分析异步电机各部分的铁心损耗,最终获得异步电机的总铁心损耗。该方法考虑了异步电机内谐波磁场对铁心损耗的影响。

本文采用提出的方法分析了正弦激励的异步电机在不同负载工况下的铁心损耗与PWM变换器激励的异步电机在不同开关频率下的铁心损耗。与实验分析结果的对比表明该方法可准确计算异步电机的铁心损耗。

#### 参考文献

[1] 陈晶. 高效高压异步电动机铁心损耗和附加损耗的分析计

算[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.

[2] 赵海森. 超高效异步电机损耗模型及降耗措施研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.

[3] Kaczmarek R, Amar M, Protat F. Iron loss under PWM voltage supply on epstein frame and in induction motor core[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(1): 189-194.

[4] Roy R, Prabhakar K K, Kumar P. Core-loss calculation in different parts of induction motor[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(9): 1664-1674.

[5] 李跃龙. PWM 逆变器供电下异步电动机铁耗分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.

[6] 房建俊,徐余法,罗玉东,等. 笼型异步电机降耗与分析方法综述[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(7): 57-62.

[7] Dems M, Komezka K. The influence of electrical sheet on the core losses at no-load and full-load of small power induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2433-2442.

[8] 张艳丽,李玉梅,刘洋,等. 考虑不同磁特性模型的感应电机铁心损耗分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 120-126.

[9] Jamil M K, Baldassari P, Demerdash N A. No-load induction motor core losses using a combined finite-element/state-space model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 2820-2822.

[10] 李宏涛,戈宝军. 变频器驱动下异步电机铁心损耗的研究[J]. 大电机技术, 2013(1): 4-6.

[11] 黄平林,胡虔生,崔杨,等. PWM 逆变器供电下电机铁心损耗的解析计算[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 19-23.

[12] Liu Y, Bazzi A. A general analytical three-phase induction machine core loss model in the arbitrary reference frame[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53(5): 4210-4220.

[13] 孟大伟,肖利军,徐永明,等. 多频情况下存在绝缘故障的叠片铁心的涡流及涡流损耗的分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 92-98.

[14] 赵海森,王博,王翔宇,等. 过电压条件下谐波磁场对异步电机附加损耗的影响[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 1-7.

[15] 刘金鹏. 高效高压感应电动机铁耗及电磁力分析计算[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011.

[16] Sun G, Zhang L, Cai H. Research of copper and core loss minimization for Induction motors based on high-order sliding-mode control[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 60-66.

[17] Nour M, Thirugnanam P. Investigation of voltage and frequency variation on induction motor core and copper losses[C]//2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), 2017: 1-5.

[18] Boglietti A, Cavagnino A, Ionel D M, et al. A general model to predict the iron losses in PWM inverter-fed induction motors[J]. IEEE transactions on industry applications, 2010, 46(5): 1882-1890.

收稿日期:2019-06-14

修改稿日期:2019-07-01