永磁同步电动机空载铁耗研究

佟文明， 孙静阳， 段庆亮， 朱龙飞， 陈萍
(沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心，辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 从产生根源出发，对永磁同步电动机空载铁耗进行细致分类。在此基础上，利用有限元法和Bertotti铁耗计算模型，以一台5 kW、3 000 r/min永磁同步电机为例，对正弦波供电永磁同步电动机的空载铁耗分布特性进行分析计算，得到基本铁耗与空载杂散损耗的比例关系以及不同因素所引起的空载杂散损耗分布规律。进而，研究了变频器供电空载电流时间谐波引起的谐波损耗，分析了不同极槽配合对变频器供电永磁同步电机的谐波损耗影响规律。最后，通过多台样机的空载铁耗试验，验证了计算的正确性。

关键词: 永磁同步电动机; 有限元法; 空载铁耗; 谐波损耗; 永磁体损耗
DOI: 10.15938/j.emc.2017.05.007
中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-449X(2017)05-0051-07

No-load iron loss of permanent magnet synchronous motors

TONG Wen-ming， SUN Jing-yang， DUAN Qing-liang， ZHU Long-fei， CHEN Ping
(National Engineering Research Center for Rare Earth Permanent Magnet Machines，
Shenyang University of Technology，Shenyang 110870，China)

Abstract: The no-load iron losses of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) were classified in detail on the basis of its origin. The finite element method and the Bertotti's iron loss model were adopted to calculate the iron losses of PMSM. The distribution characteristics of no-load iron losses were calculated in detail and analyzed by taking a 5 kW，3 000 r/min PMSM as an example. The proportional relationship between the basic iron loss and the no-load stray loss were obtained，and the distribution regularities of the no-load stray loss under different factors were also gained. Harmonic losses produced in PMSM by current harmonics generated by the frequency converter were studied. Without changing the basic parameters of the motor，the harmonic losses in PMSMs were analyzed under different pole and slot combinations. Finally，through the no-load iron loss test of several prototype motors，the results verify the feasibility of the calculation method.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; finite element method; iron loss; harmonic loss; permanent magnet loss

收稿日期: 2015-07-01
基金项目: 国家自然科学基金(51307111，51677122)；国家重点研发计划(2016YFB0300503)
作者简介: 佟文明(1984—)，男，博士，副教授，研究方向为特种电机及其控制与电机多物理场仿真分析；
孙静阳(1991—)，女，硕士研究生，研究方向为永磁电机多物理场仿真；
段庆亮(1988—)，男，硕士，研究方向为永磁电机损耗计算与分析；
朱龙飞(1988—)，男，博士研究生，研究方向为永磁电机损耗分析与计算；
陈 萍(1987—)，女，博士，研究方向为永磁电机损耗与温升计算。
通信作者: 佟文明

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

永磁同步电动机由于采用永磁体励磁，其效率、功率密度和控制性能要优于同规格的异步电机，在高性能驱动领域得到越来越广泛的应用。在高性能永磁同步电机设计之初，准确的分析电机各部分损耗大小及分布特性，能够为进一步改进电机设计、降低损耗提供依据，对设计高效、高功率密度永磁同步电动机具有重要意义。

对于变频器供电永磁同步电动机的铁耗计算，工程上仍较多沿用传统的基于磁路分析的损耗计算方法与工程近似方法，该方法在计算时通过引入经验系数来计及影响损耗的众多因素，无法计及某一特定因素对损耗的影响情况，并且难以满足对空载铁耗分布特性进行深入研究的要求。

已有许多文献利用有限元法对电机内部损耗进行多方面研究，文献[1]利用时步有限元法，计算分析了一台55 kW异步启动永磁同步电动机铁心内的磁滞损耗与涡流损耗，对实验结果进行了验证；文献[2]运用二维时步有限元法进行分析计算，考虑了实际电机运行时铁心材料中的交变损耗和旋转损耗，并对一台20 000 r/min的高速永磁无刷直流电机进行了分析计算；文献[3]研究了4种不同转子结构的永磁同步电机，利用有限元法分析不同电机在各种运行模式下的负载铁耗变化；文献[4]以一台5.5 kW异步电机为例，分析了空载运行时铁心不同位置磁密随时间变化波形，并得出铁心不同区域铁耗分布情况；文献[5]通过有限元分析，综合考虑电机中交变与旋转磁场的影响，对一台高速永磁电机的铁耗进行了分析计算，并与试验结果进行了比较；文献[6]采用三维有限元法计算了考虑旋转磁化的高速爪极电机的铁耗，并将铁耗与热分析模型进行耦合；文献[7]利用二维有限元法分析了不同驱动方式对无刷直流电机各部分损耗的影响；文献[8]采用二维时步有限元法计算了包括铁心损耗在内的永磁游标电机的空载损耗，并通过实验进行了验证。上述文献对铁耗与变频器供电谐波损耗的分析重点集中在总的损耗，缺乏对损耗具体分布情况及电机不同参数对损耗影响等方面的分析。文献[9-10]针对变频器供电永磁同步电机电流时间谐波在电机中引起的损耗大小和分布规律进行了深入、细致的研究。文献[11]针对正弦波供电的异步起动永磁同步电机的空载杂散损耗进行了分析计算，得到了空载杂散损耗的修正系数。

本文在对变频器供电永磁同步电动机空载铁耗产生根源进行深入分析的基础上，以一台5 kW、3 000 r/min永磁同步电机为例，利用有限元方法分析了正弦波供电和变频器供电永磁同步电动机的空载铁耗分布特性和变化规律，并通过实验验证分析方法的可行性。相关研究工作为进一步分析和抑制永磁同步电机损耗提供了依据。

1 永磁同步电机铁耗分类与计算方法

1.1 正弦波供电永磁同步电动机空载铁耗分类

正弦波供电永磁同步电动机的空载铁耗可分为基本铁耗和空载杂散损耗两个部分。

1) 基本铁耗。

基本铁耗是由材料厂商提供的损耗曲线计算得出的理想情况下的铁耗，它只计及交变磁化引起的磁滞损耗和基波磁场在钢片中均匀分布时引起的涡流损耗。

2) 空载杂散损耗：

①由加工导致损耗特性改变引起的铁耗变化；

②永磁体产生的气隙磁场分布非正弦，铁心存在旋转磁化和小磁滞回线引起的铁耗增量；

③定子铁心开槽导致气隙磁导不均匀引起的铁耗增量(定子铁心磁导谐波在空间不动，主要在转子特别是永磁体中产生的损耗增量)；

④永磁体端部漏磁场在铁心附近的金属结构件中产生的涡流损耗；

⑤正弦波电压供电时，定子空载电流与永磁体产生的合成磁场空间谐波分量在定、转子铁心(主要指铁心表面损耗和齿中脉振损耗)中产生的损耗与空载电流为零时同类损耗的增量；

⑥正弦波电压供电时定子空载电流产生的谐波磁场在永磁体中引起的损耗；

⑦正弦波电压供电时定子空载电流产生的端部漏磁场在附近金属结构件中产生的损耗。

对于变频器供电永磁同步电动机而言，根据IEC60034-2-1标准，由变频器供电引入的电流时间谐波在电机各部位引起的损耗称为谐波损耗。由此可知，谐波损耗可由变频器供电和正弦波电压供电下空载损耗之差得到。

1.2 计算方法

为了获得准确的计算结果，本文采用有限元为主的方法计算永磁同步电动机的空载铁耗。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1) 基本铁耗。

根据电机齿部、轭部磁密幅值、查工作频率下的材料损耗曲线,即可得到特定磁密下齿部和轭部的损耗密度,乘以相应的重量即可得到基本铁耗。

2) 空载杂散损耗。

①冲剪工艺对铁心损耗曲线的影响。

在计算加工导致铁心损耗特性变化对铁耗的影响时,本文主要计及冲剪加工后由于定子齿部和轭部加工边缘应力集中所造成的损耗曲线变化,利用文献[12]中根据爱泼斯坦方圈法测试总结得到的不同宽度情况下损耗曲线修正系数 k_p 为

$$K_p = 0.89 + (3.0/W)。\tag{1}$$

式中 W 是冲剪加工后的硅钢片宽度(mm),对应于电机的齿宽或轭高。

除基本铁耗外,本文在计算空载杂散损耗各部分分量时,均采用考虑冲剪加工后的损耗曲线,即在材料厂商提供的损耗曲线基础上,乘以式(1)所示的修正系数。

②空载运行时的定、转子铁心损耗计算。

永磁电机中典型的磁密正半周波形如图 1 所示。在磁密增加或减小的过程中,存在局部磁密反向的现象,形成小磁滞回环。这些小磁滞回环会影响电机的磁滞损耗。根据文献[13],可以得到考虑小磁滞回环引起的磁滞损耗修正系数为

$$k_B = 1 + k_m \sum_{\xi=1}^{e} \left(\frac{\Delta B_{m\xi}}{B_m}\right)^{\alpha_h}。\tag{2}$$

式中: k_B 是小磁滞回环修正系数; k_m 是常数,一般取 0.65; $\Delta B_{m\xi}$ 是局部磁密的变化量; B_m 是磁密幅值; e 是一个电周期内局部磁密变化次数; α_h 是磁滞损耗系数,根据损耗曲线非线性回归得到。

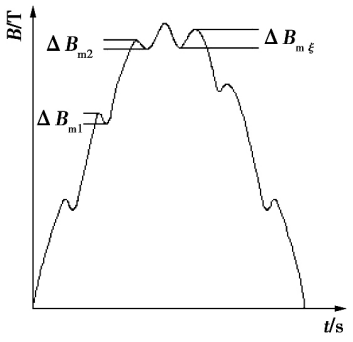


图 1　永磁电机中典型的磁密波形

Fig. 1　Typical flux density waveform in PM motor

电机铁心内部的磁化方式分为交变磁化和旋转磁化。定子铁心的不同部位磁化方式也不同,齿部一般仅为交变磁化,轭部及齿联轭部位则为旋转磁化。对于旋转磁化,利用文献[14]所提出的正交分解旋转磁化计算模型进行计算,并考虑冲剪加工、小磁滞回环和磁场谐波的影响,得到铁耗计算公式为:

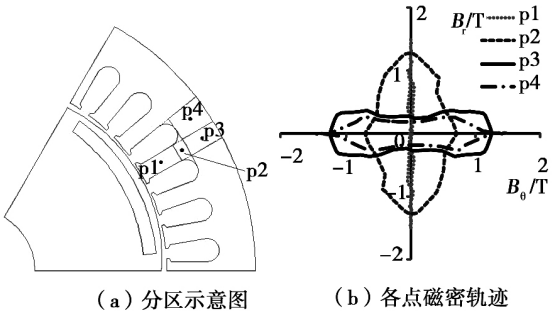
$$P_{Fe} = P_h + P_e,\tag{3}$$

$$P_h = k_p k_h k_B \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu f\left(B_{\nu rm}^{\alpha_h} + B_{\nu\theta m}^{\alpha_h}\right),\tag{4}$$

$$P_e = k_p k_e \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu^2 f^2\left(B_{\nu rm}^2 + B_{\nu\theta m}^2\right)。\tag{5}$$

式中: P_h、P_e 分别为磁滞、涡流损耗; k_h、k_e 分别是磁滞、涡流损耗系数; ν 为磁场谐波次数; f 为磁场交变频率; $B_{\nu rm}$、$B_{\nu\theta m}$ 分别为正交分解后的 ν 次磁密谐波径向和切向幅值(也就是椭圆形磁场长轴与短轴磁密值)。

按磁化特性将定子铁心分为 4 个区域,在每个区域中间取一点,如图 2(a)所示,利用二维瞬态电磁场计算铁心中各个点径向和切向磁密随时间变化波形,并绘制出不规则的椭圆形磁场,如图 2(b)所示。对各个点的不规则椭圆形磁密波形进行傅里叶分析,可以得到一系列椭圆形谐波磁密矢量,取各次椭圆形谐波磁密的径向和切向最大值代入式(3)~式(5)中,即可得到定子铁心损耗的计算结果。对于转子铁心损耗,可采用相近的方法进行取点、计算。对表面式转子磁极结构,转子铁心磁密脉动较小、损耗较小,可取较少点;对内置式转子磁极结构,需根据具体的磁极结构特点进行分区计算。



(a) 分区示意图　　(b) 各点磁密轨迹

图 2　铁心分区图与取点示意图

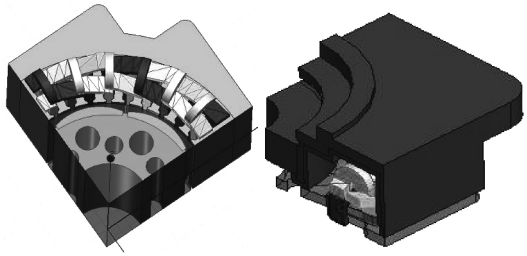
Fig. 2　Iron core division and sampling point distribution

③永磁体涡流损耗与金属结构件损耗。

永磁体和金属结构件中的涡流损耗利用三维有限元进行仿真计算,在网格剖分时需要考虑高次谐波的透入深度,对产生涡流损耗部件的表面进行细致剖分。为了计及永磁体的轴向分段情况,同时分析涡流损耗沿轴向方向上的分布规律,采用三维有限元计算永磁体涡流损耗。由于永磁体涡流损耗由

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电枢磁动势谐波和磁导谐波作用产生，因此，建立模型时仅需建立电机有效长度范围内的模型，而忽略机壳、端盖等部件，如图3(a)所示。金属结构件损耗是由绕组端部和永磁体端部漏磁场引起的，仅限于铁心端压板、机壳和端盖等端腔区域而与铁心长无关，为了简化模型，在进行金属结构件损耗计算时仅建立较短的定转子有效长度部分，如图3(b)所示。



(a)永磁体损耗计算模型 (b)结构件损耗计算模型

图3 永磁体和结构件损耗计算模型

Fig. 3 Calculation models for losses in permanent magnets and structural components

1.3 电机参数

本文以一台5 kW永磁同步电机为例，计算正弦波电压供电和变频器供电时电机的空载铁耗的大小和分布特性，该电机的主要参数如表1所示。电机采用表面式转子磁极结构，永磁体外圆弧经过优化处理形成不等气隙，以改善气隙磁密的波形，减少谐波含量。同时，该电机采用铝制机壳和端盖，定转子铁心两侧无压板等金属结构件。

表1 样机参数

Table 1 Parameters of the prototype

参数	数值
额定功率/kW	5
额定转速/(r·min^{-1})	3 000
槽数/极数	36/8
定转子铁心材料	35W270
定子铁心外径/mm	174
定子铁心长/mm	120
转子结构	不等气隙表面式

1.4 计算结果与分析

参照2.1节正弦波供电永磁同步电动机的空载铁耗分类方法，将空载杂散损耗各个分类用编号1～7替代，利用2.2节所给出的各部分损耗计算方法对该电机的各部分空载铁耗进行分析、计算，计算结果如表2所示。对于编号2和5，可采用相同的二维电磁场计算模型，差别仅在于所加载的电流激励不同；编号3和6可采用相同的三维电磁场模型，差别同样在于激励源不同；编号4和7采用相同的模型，在计算永磁体端部漏磁场引起的结构件损耗时，绕组端部不施加任何电流，而在计算绕组端部漏磁场引起的结构件损耗时，可将永磁体赋成无磁性材料。

对于变频器供电电流时间谐波所引起的永磁同步电机谐波损耗计算方法与正弦波供电时的情况相同，差别仅在于作为激励源的电流波形有所不同。

表2 5 kW永磁同步电机正弦波供电时铁耗计算结果

Table 2 Iron loss calculation results of a 5 kW PMSM powered by sinusoidal voltage

分类	编号	损耗部位	损耗/W
基本铁耗	—	定子铁心	66.91
空载杂散损耗	1	定子铁心	30.83
	2	定子铁心	22.13
	3	永磁体	1.23
	4	金属结构件	0.28
	5	定、转子铁心	0.49
	6	永磁体	0.005
	7	金属结构件	0.014

对表1中数据进行分析，可得：

1)该5 kW永磁同步电机的基本铁耗占总铁耗的68.46%，而空载杂散损耗占总铁耗的31.54%。

2)引起空载杂散损耗的各因素中，由剪切加工所引起的铁耗增量(编号1)所占比重最大，达到56%；永磁体产生的气隙磁场非正弦分布、小磁滞回线、定子轭部旋转磁化所引起的铁耗增量(编号2)次之，为40.3%。其余因素所引起的空载杂散损耗所占比重较小。其中，由正弦波电压供电时定子空载电流产生的电枢磁场引起的定、转子铁心和永磁体损耗(编号5和6)与电机的极槽配合、气隙长度等有关；由永磁体端部漏磁场以及正弦波电压供电时空载电流产生的端部漏磁场在附近金属结构件中产生的损耗(编号4和7)很小，这与所计算电机采用铝制机壳、无端压板的结构形式有关。

3)从空载杂散损耗产生的部位分类，电机的定子铁心中的空载杂散损耗(编号1、2和5中的一部分)约为53.2 W，占空载杂散损耗总量的近96.8%；永磁体、转子铁心损耗(编号3、6和5中的一部分)为1.5 W，占空载杂散损耗总量的2.7%；其余为电

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

机金属结构件中的损耗,仅有约 0.05% 。

2　变频器供电电流谐波引起的谐波损耗

2.1　谐波损耗的分布规律

变频器供电所带来的电流时间谐波会在电机的定、转子铁心、永磁体等部位产生大量附加的谐波损耗,这部分损耗是变频器供电电机相对于正弦波供电电机的损耗增量,是变频电机空载损耗的另一个主要构成部分。这些损耗一方面使得电机的效率下降,降低电机的力能指标; 另一方面也有可能使得电机的转子(尤其是永磁体) 过热,从而危害电机的可靠运行。

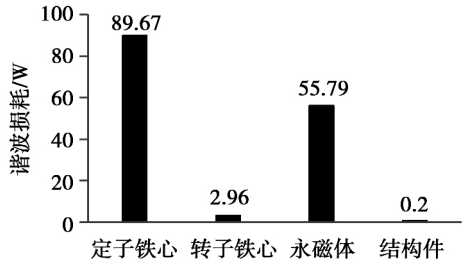


图 4　谐波损耗分布

Fig. 4　Harmonic loss distribution

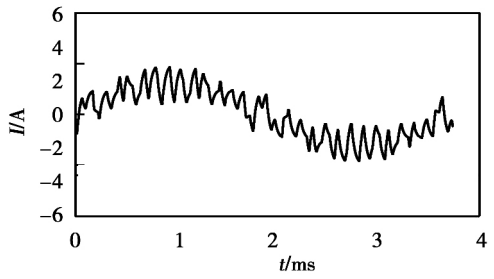


图 5　变频器供电空载电流波形

Fig. 5　No-load current waveform powered by inverter

本文利用有限元法计算了变频器供电空载电流时间谐波引起的永磁同步电机谐波损耗的分布特性,如图 4 所示。从图中可以看出,变频器供电相对于正弦波供电所引起的谐波损耗为 148.62 W,是正弦波供电空载铁耗总量的 1.2 倍,由此可见,变频器供电空载电流谐波在电机定、转子铁心、永磁体中引起的谐波损耗数值上很大,可能比正弦波供电时总的空载铁耗还要大。在各部分谐波损耗中,定子铁心所占比重最大,达到 60.3% ,永磁体次之,占 37.5% ,转子铁心与结构件损耗较小,其中,转子铁心谐波损耗很小与所采用的表贴式转子磁极结构有很大关系。在有限元计算中,采用电机实测变频器供电空载电流波形作为激励,图 5 为实测变频器供电空载电流波形。

2.2　不同极槽配合对谐波损耗的影响

为了研究不同极槽配合对变频器供电空载电流时间谐波引起的永磁同步电机谐波损耗的影响规律,选取一台尺寸较小的电机(外径 123 mm、铁心长 110 mm、气隙 1.5 mm) 作为分析对象以减少三维场的计算时间,对采用 8 极 9 槽、8 极 12 槽、8 极 24 槽、8 极 36 槽方案的谐波损耗进行对比分析。在分析时,保证不同极槽配合电机主要尺寸、气隙磁密和空载反电动势等参数基本保持不变,并采用相同的电流波形。

对 4 种不同极槽配合永磁电机的谐波损耗进行计算,计算结果如图 6 所示。由图可知,4 种极槽配合中,8 极 9 槽电机的谐波损耗最大,8 极 24 槽电机的谐波损耗最小。8 极 9 槽电机中永磁体内的谐波损耗值在 4 种极槽配合中最大,为 75.83 W,占其总谐波损耗的 70.4%; 8 极 24 槽电机永磁体中的谐波损耗最小,为 34.36 W,占其总谐波损耗的 48.4% 。不同极槽配合电机定子轭部、转子铁心中的谐波损耗数值相差不大。这主要是由于不同极槽配合电机的电枢磁动势空间谐波差别导致的。对于类似 8 极 9 槽的分数槽集中绕组永磁电机,其电枢空间磁动势谐波含量相对较大,相应的谐波损耗也要大于其他几种极槽配合。

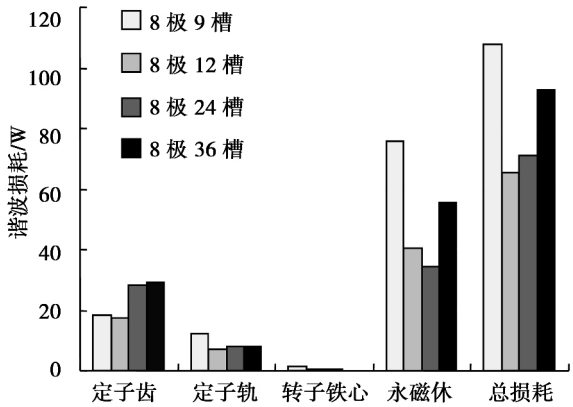


图 6　不同极槽配合电机谐波损耗

Fig. 6　Harmonic losses of motors with different pole-slot combinations

3　空载铁耗与谐波损耗试验

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.1 正弦波供电空载铁耗试验

本章对4台永磁同步电机进行正弦波供电空载铁耗试验，试验电机的部分参数如表3所示。4台电机的定转子冲片尺寸与材料完全相同(定转子铁心均为35W270硅钢片)，永磁体结构与尺寸完全相同，仅铁心长和运行频率有所不同。

表3 试验样机参数

Table 3 Parameters of tested motors

额定功率/kW	定子铁心外径/mm	铁心长/mm	额定频率/Hz	极数/槽数	气隙长度/mm
3.5	174	120	100	8/36	2
4.5	174	160	100	8/36	2
5	174	120	200	8/36	2
11.5	174	205	200	8/36	2

根据国家标准《GB/T 25442－2010 旋转电机确定损耗与效率的试验方法》，对表3中4台电机进行正弦波供电下的空载铁耗试验，试验平台如图7所示。

空载试验数据处理如下

$$P_{Fe0t} = P_0 - P_{Cu0} - P_{fw}。 \tag{6}$$

式中：P_{Fe0t}是电机空载铁耗测试值；P_0是正弦波供电下的空载输入功率；P_{Cu0}为铜耗；P_{fw}为机械耗，通过制作无磁性假转子，将原动电机拖动带有假转子电机和原动电机单独运行两种情况下的损耗之差即为被试电机的机械损耗。

图7 试验平台

Fig. 7 Test platform

令空载铁耗试验值与计算值之比为空载铁耗修正系数。4台电机空载铁耗计算数据与试验数据对比结果如表4所示。从表中可以看出，空载铁耗修正系数在1.05～1.09之间，计算值与实验值比较接近。

表4 正弦波供电铁耗试验数据与计算结果对比

Table 4 Iron loss comparison between calculation results and tested results powered by sinusoidal voltage

额定功率/kW	频率/Hz	基本铁耗计算值/W	空载杂散损耗计算值/W	空载铁耗试验值/W	空载铁耗修正系数
3.5	100	27.31	22.31	54.02	1.09
4.5	100	34.08	27.59	65.04	1.05
5	200	66.91	54.36	128.02	1.06
11.5	200	106.49	87.16	203.21	1.05

3.2 变频器供电空载谐波损耗试验

变频器供电引起的谐波损耗试验值P_{adt}为

$$P_{adt} = P_{0PWM} - P_0 - (P_{cuPWM} - P_{cu0})。 \tag{7}$$

式中：P_{0PWM}是变频器供电时电机的空载输入功率；P_{cuPWM}是变频器供电空载时的铜耗。

令谐波损耗修正系数k_{ad}为谐波损耗试验值P_{adt}与谐波损耗计算值之比。变频器供电所引起的谐波损耗试验数据与计算数据对比如表5所示(试验采用22 kW无位置传感器DTC控制的变频器，开关频率为4 kHz)。从表中数据可以看出，所计算的4台电机谐波损耗系数从1.08～1.37范围变化，平均值为1.2。对于结构型式相近的电机，采用本文所提出的损耗分析方法，该系数具有一定的借鉴意义。

表5 谐波损耗计算结果与试验数据对比

Table 5 Harmonic loss comparison between calculation results and tested results

额定功率/kW	频率/Hz	谐波损耗计算值/W	谐波损耗试验值/W	谐波损耗系数K_{ad}
3.5	100	29.93	32.45	1.08
4.5	100	114.86	156.82	1.37
5	200	148.62	166.24	1.12
11.5	200	263.25	328.25	1.25

4 结 论

本文将变频器供电永磁同步电动机的空载损耗进行详细分类，并以一台5 kW、3 000 r/min永磁同步电机为例，运用有限元法，研究了正弦波电压供电时电机的空载铁耗和变频器供电空载电流时间谐波引起的谐波损耗特性，并利用试验进行了验证，得出如下结论：

1) 对于正弦波电压供电的表面式永磁同步电机，其空载杂散损耗值较大，甚至与基本铁耗相当或略小于基本铁耗，这与通常认为的空载杂散损耗是基本铁耗的2～2.5倍的观点不同。在各空载杂散

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

损耗中，由剪切加工、永磁体产生气隙磁场非正弦、小磁滞回线、旋转磁化所引起的损耗增量所占比重较大。

2) 变频器供电空载电流谐波在表面式永磁电机中引起的谐波损耗数值上很大，甚至比正弦波供电时总的空载铁耗还要大。对表面式转子磁极结构，其主要分布在定子铁心和永磁体中。其中，永磁体中的谐波损耗达到总谐波损耗的 50% 以上，甚至可达 70% ~80%。对于变频供电的永磁电机，较大的转子损耗会导致转子发热严重，尤其是高速高频电机。

3) 变频器供电永磁电机的空载铁耗和谐波损耗的实验值可通过正弦波空载试验和变频器与正弦波空载铁耗实验值之差得到。经过试验验证，证明了本文损耗分析方法与计算结果的正确性，所得到的相关损耗系数对采用相似极槽配合、转子磁极结构和功率等级的永磁同步电机具有一定的参考意义。

参 考 文 献:

[1] 胡笳，罗应立，李志强，等. 永磁电动机不同运行条件下的损耗研究[J]. 电机与控制学报，2009，13(1)：11－16.
HU Jia，LUO Yingli，LI Zhiqiang，et al. Investigation of losses in permanent magnet motor under different operation conditions [J]. Electric Machines and Control，2009，13(1)：11－16.

[2] 余莉，胡虔生，易龙芳，等. 高速永磁无刷直流电机铁耗的分析和计算[J]. 电机与控制应用，2007，34(4)：10－14.
YU Li，HU Qiansheng，YI Longfang，et al. Analysis and calculation of the iron losses of high speed brushless permanent magnet DC motor [J]. Motor and Control Application，2007，34(4)：10－14.

[3] 陈阳生，王文中. 在恒转矩和弱磁控制状态下的各种永磁同步电机负载铁耗[J]. 电工技术学报，2007，22(9)：45－50.
CHEN Yangsheng，WANG Wenzhong. Iron loss in PM synchronous motors under constant torque and field-weakening control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2007，22(9)：45－50.

[4] 赵海森，罗应立，刘晓芳，等. 异步电机空载铁耗分布的时步有限元分析[J]. 中国电机工程学报，2010，30(30)：99－106.
ZHAO Haisen，LUO Yingli，LIU Xiaofang，et al. Analysis on no-load iron losses distribution of asynchronous motors with time-stepping finite element method [J]. Proceedings of the CSEE，2010，30(30)：99－106.

[5] 孔晓光，王凤翔，徐云龙，等. 高速永磁电机铁耗的分析和计算[J]. 电机与控制学报，2010，14(9)：27－30.
KONG Xiaoguang，WANG Fengxiang，XU Yunlong，et al. Analysis and calculation of iron losses of high-speed permanent magnet machines [J]. Electric Machines and Control，2010，14(9)：27－30.

[6] 黄允凯，胡虔生，朱建国. 顾及旋转铁耗的高速爪极电机三维磁热耦合分析[J]. 电工技术学报，2010，25(5)：54－60.
HUANG Yunkai，HU Qiansheng，ZHU Jianguo. Magneto-thermal analysis of a high-speed claw pole motor considering rotational core loss [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2010，25(5)：54－60.

[7] 邹继斌，李建军，徐永向，等. 驱动方式对永磁无刷直流电机损耗的影响[J]. 电工技术学报，2011，26(9)：43－47.
ZOU Jibin，LI Jianjun，XU Yongxiang，et al. Influences of drive strategies on the loss of permanent magnet brushless direct current motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2011，26(9)：43－47.

[8] 朱洒，程明，李祥林，等. 新型外转子低速直驱永磁游标电机的损耗[J]. 电工技术学报，2015，30(2)：14－20.
ZHU Sa，CHENG Ming，LI Xianglin，et al. Loss analysis of a new low-speed direct-drive permanent-magnet vernier machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(2)：14－20.

[9] 佟文明，朱晓锋，贾建国，等. 时间谐波对永磁同步电机损耗的影响规律[J]. 电工技术学报，2015，30(6)：60－69.
TONG Wenming，ZHU Xiaofeng，JIA Jianguo，et al. Influence law of additional losses induced by time harmonic in permanent magnet synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(6)：60－69.

[10] 佟文明，朱晓锋，朱龙飞，等. 不同供电方式对非晶合金永磁同步电机铁耗的影响[J]. 电工技术学报，2015，30(10)：115－122.
TONG Wenming，ZHU Xiaofeng，ZHU Longfei，et al. The impact of different supply modes on core losses of amorphous alloy permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(10)：115－122.

[11] 安忠良，吕顺. 高效永磁同步电动机空载杂散损耗计算及分析[J]. 微特电机，2015，43(8)：9－13.
AN Zhongliang，LÜ Shun. Analysis and calculation on no-load stray loss of high efficiency PMSM [J]. Small & Special Electrical Machines，2015，43(8)：9－13.

[12] LIU Yujing，KASHIF S K，SOHAIL A M. Engineering considerations on additional iron losses due to rotational fields and sheet cutting [C] //International Conference on Electrical Machines，September 6－9，2008，Vilamoura，Portugal. 2008：1－4.

[13] LAVERS J D，BIRINGER P P，HOLLITSCHER H. A simple method of estimating the minor loop hysteresis loss in thin laminations [J]. IEEE Transactions on Magnetics，1978，14(5)：386－388.

[14] STUMBERGER B，HAMLER A，GORICAN V，et al. Accuracy of iron loss estimation in induction motors by using different iron loss models [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2003，24(7)：272－276.

(编辑: 刘琳琳)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net