

IE5 能效等级三相异步电动机的研制

黄 坚¹, 顾卫东¹, 杨 旭², 冯俊锋²

(1. 国家中小型电机及系统工程技术研究中心, 上海 200063;

2. 云南铜业压铸科技有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要: IE5 为国际电工委员会(IEC)于 2016 年发布的目前全球最高的电动机能效等级。针对 IE5 能效等级目标开展了三相异步电动机研制。在设计方面, 主要考虑采用优质的冷轧硅钢片, 尝试不同风扇结构型式和不等匝绕组型式, 并针对小功率电机考虑采用铸铜转子工艺方案, 降低了电机损耗。在工艺方面, 主要考虑提高加工精度, 减小定、转子冲片毛刺等, 进一步降低电机的空载损耗。样机测试结果表明, 效率、功率因数、起动电流、起动转矩、最大转矩、温升等指标均达到设计要求, 实现了 IE5 能效等级三相异步电动机研制目标。

关键词: 三相异步电动机; 能效等级; IE5

中图分类号: TM 343+.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)01-0073-05

doi: 10.12177/emca.2020.169

Development of IE5 Energy Efficiency Three-Phase Asynchronous Motor

HUANG Jian¹, GU Weidong¹, YANG Xu², FENG Junfeng²

(1. National Engineering Research Center for Small & Medium Electric Machine and Systems, Shanghai 200063, China;

2. Yunnan Copper Die-Casting Technology Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: IE5, published by International Electrotechnical Commission (IEC) in 2016, is currently the highest energy efficiency of motor in the world. The development of IE5 energy efficiency three-phase asynchronous motor is carried out. For the motor design, we consider to use high-quality cold rolled silicon steel sheet, try different fan structural styles and windings with unequal turns, and use cast copper rotor in low power motors, so as to lower the motor loss. For the process technology, measures to improve the machining accuracy and reduce burrs during stator and rotor punching are applied, so that the no-load loss of the motor can be further reduced. Prototype test results show that the indices including efficiency, power factor, starting current, starting torque, maximum torque and temperature rise all meet the design requirements. The goal of IE5 energy efficiency is achieved.

Key words: three-phase asynchronous motor; energy efficiency; IE5

0 引 言

国际电工委员会(IEC)于 2008 年 10 月发布了 IEC 60034-30“单速、三相笼型感应电动机的能效分级”标准, 统一了全球的电机效率标准。根据各国不同的情况, IEC 60034-30 统一将电动机能效标准分为 IE1、IE2、IE3、IE4 等 4 个等级, 其

中 IE1 为最低效率、IE4 为当时的最高效率等级。IEC 制订了 50 Hz 和 60 Hz 2 套标准体系, 分别适用于电源频率 50 Hz 和 60 Hz 的国家和地区; 同时统一了效率的测试方法。该标准适用范围为: 额定电压 1 000 V 及以下, 输出功率 0.75 ~ 375 kW, 极数为 2、4、6 极, S1 连续工作制或 S3 断续工作制(负载持续率为 80% 及以上)。

收稿日期: 2020-09-30; 收到修改稿日期: 2020-10-28

作者简介: 黄 坚(1960—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电机设计。

2014年,IEC发布了IEC 60034-30-1:2014标准^[1],将效率分为IE1、IE2、IE3、IE4、IE5 5个等级,其中IE5作为最高的效率等级,为第一次提出的概念,并未给出具体数值。该标准规定适用范围为:额定电压1 000 V及以下,输出功率为0.12~1 000 kW,极数为2、4、6、8极,适用于所有在线运行的交流电动机。该标准已等同转化为国标GB/T 32891.1—2016《旋转电机 效率分级(IE代码) 第1部分:电网供电的交流电动机》^[2]。

2016年,IEC发布了IEC 60034-30-2:2016标准^[3],规定了变频器供电的各种变频调速电机相应的效率等级,同时还第一次正式发布了IE5效率标准数值。该标准规定的适用范围与IEC 60034-30-1相同,也已等同转换为国标GB/T 32891.2—2019^[4]。

中国的最新版强制性国家标准GB 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》^[5]于2020年5月发布,并将于2021年6月1日起正式实施。GB 18613—2020已将IE5效率列为中国三相异步电动机最高的一级能效等级指标。新国标还规定,自标准实施之日起,IE3效率将成为中国最低的三相异步电动机能效限定值(三级能效),低于IE3能效限定值的三相异步电动机(如YE2系列电机等)不允许再生产销售,表明中国中小型三相异步电动机效率水平再次提升了一个等级。新国标同时还将IE4效率列为二级节能评价价值指标。

IEC 60034-30系列文件作为全球统一的电动机能效标准,已被世界上各个国家及相关的国际组织认可及采用。尽管IEC认为三相交流电动机达到IE4及以上效率是目前国际范围的难题,但根据IEC电动机能效标准的最新变化,世界各国的行业同仁仍在积极开展符合IE4、IE5效率等级电动机的研究,例如:德国西门子等公司2016年样本中推出了符合IE4效率等级的三相异步电动机产品^[6];上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司与国内中小型电机行业多家企业共同开展了IE4能效等级的超超高效率电动机系列产品的开发^[7];格力电器珠海凯邦电机制造有限公司等开发了达到IE4、IE5能效等级的永磁辅助同步磁阻电机等^[8]。

根据国际电机效率最新的发展情况,我们立项开展了IE5效率等级三相异步电动机样机的研制工作。本文介绍了样机研制情况和测试结果。样机测试结果表明,效率等主要指标均达到设计要求,实现了IE5能效等级三相异步电动机研制目标。

1 样机研制情况

1.1 样机设计考虑

IEC 60034-30-1:2014标准^[1]给出了各种类型的电动机达到各级效率等级的难易程度,如表1所示。

表1 各种类型的电动机达到各级效率等级的难易程度

电动机类型		IE1	IE2	IE3	IE4	IE5
三相笼型感应电动机	散嵌绕组(所有防护等级,各种定额)	是	是	是	困难	否
	成型绕组;IP2x(开启式电动机)	是	是	困难	否	否
	成型绕组;IP4x及以上等级	是	是	是	困难	否
三相绕线式转子感应电动机		是	是	是	困难	否
单相感应电动机	电容起动	困难	否	否	否	否
	电容运转	是	困难	否	否	否
	起动/运转电容器	是	困难	否	否	否
同步电动机	分相	困难	否	否	否	否
	自起动永磁	是	是	是	困难	否

IEC 60034-30-2:2016标准^[3]给出的IE5效率等级标准值如表2所示。

表1中,IEC 60034-30-1:2014标准给出了三相交流电动机达到IE5效率的可能性为“否”的结论。这一评价主要基于以下两点:(1)目前全球范围内实际的设计及制造水平限制;(2)国际上通行的IM安装方式及相关外形尺寸的约束。但GB 18613—2020的发布与实施,已将IE5效率作为中国三相异步电动机的一级能效指标,这是未来几年业界需努力探求及实现的目标。为此,结合IE5效率等级标准值,开展IE5效率等级三相异步电动机样机的研制。

针对达到IE5效率的方法,主要从设计与工艺2个方面考虑,并选择5个典型规格(不同功率、不同极数)开展样机试验验证。

表 2 IE5 效率等级标准值^[3]

额定功率/kW	效率/%			
	3 000	1 500	1 000	750
	r/min	r/min	r/min	r/min
0.12	71.4	74.3	69.8	67.4
0.18	75.2	78.7	74.6	71.9
0.20	76.2	79.6	75.7	73.0
0.25	78.3	81.5	78.1	75.2
0.37	81.7	84.3	81.6	78.4
0.40	82.3	84.8	82.2	78.9
0.55	84.6	86.7	84.2	80.6
0.75	86.3	88.2	85.7	82.0
1.1	87.8	89.5	87.2	84.0
1.5	88.9	90.4	88.4	85.5
2.2	90.2	91.4	89.7	87.2
3	91.1	92.1	90.6	88.4
4	91.8	92.8	91.4	89.4
5.5	92.6	93.4	92.2	90.4
7.5	93.3	94.0	92.9	91.3
11	94.0	94.6	93.7	92.2
15	94.5	95.1	94.3	92.9
18.5	94.9	95.3	94.6	93.3
22	95.1	95.5	94.9	93.6
30	95.5	95.9	95.3	94.1
37	95.8	96.1	95.6	94.4
45	96.0	96.3	95.8	94.7
55	96.2	96.5	96.0	94.9
75	96.5	96.7	96.3	95.3
90	96.6	96.9	96.5	95.5
110	96.8	97.0	96.6	95.7
132	96.9	97.1	96.8	95.9
160	97.0	97.2	96.9	96.1
200~1 000	97.2	97.4	97.0	96.3

在设计方面,主要考虑采用优质的冷轧硅钢片,针对小功率电机考虑采用铸铜转子工艺方案,同时开展不等匝绕组和风扇的对比试验验证,进一步降低电机损耗。在工艺方面,参考 YE4 和 YZTE4 等 2 个系列超超高效率三相异步电动机研制成功的经验,主要考虑提高加工精度,减小定、转子冲片毛刺等,进一步降低电机的空载损耗^[7]。

本次 IE5 效率等级样机安排了 H80M1-2-

0.75 kW、H100L1-4-2. 2 kW、H112-4-4 kW、H160M-6-7.5 kW 和 H280S-8-37 kW 等不同机座号、不同功率和不同极数的 5 个典型规格样机的试验验证,其中 H80M1-2-0.75 kW、H100L1-4-2.2 kW 和 H112-4-4 kW 等 3 个规格样机采用铸铜转子结构,H160M-6-7.5 kW 和 H280S-8-37 kW 等 2 个规格样机采用铸铝转子结构。

样机的主要性能指标包括效率、功率因数、温升、起动转矩、起动电流等,其中效率是样机最重要的考核指标。IE5 样机主要技术性能指标,包括样机的效率、功率因数和起动性能等,如表 3 所示。表 3 中“本项目”指标为立项任务书早期提出的指标,IE5 指标为 IEC 60034-30-2:2016 中的电动机能效值。样机的功率因数、温升和起动转矩、起动电流等性能指标的确定主要参考了《YE4 系列(IP55)三相异步电动机技术条件(机座号 80~450)》(JB/T 13299—2017)^[9],并编制了相应的试制用《IE5 系列(IP55)三相交流电动机技术条件(机座号 80~355)》文件。

表 3 IE5 样机主要技术性能指标

规格	效率标准值/%		功率因数	起动电流倍数	起动转矩倍数	最大转矩倍数
	本项目	IE5				
80M1-2-0.75 kW	86.60	86.30	0.83	8.5	2.2	2.3
100L1-4-2.2 kW	91.49	91.40	0.79	9.0	2.3	2.3
112M-4-4 kW	92.72	92.80	0.80	9.5	2.3	2.3
160M-6-7.5 kW	92.00	92.90	0.76	8.0	2.0	2.1
280S-8-37 kW	94.96	94.40	0.78	7.9	2.0	2.0

1.2 样机试制情况

参与 IE5 样机研制的单位有上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司、安徽皖南电机股份有限公司(简称皖南电机)、佳木斯电机股份有限公司(简称佳木斯电机)、江苏大中电机股份有限公司(简称大中电机)、浙江江潮电机实业有限公司(简称江潮电机)、山西电机制造有限公司(简称山西电机)、湖北宝达机电有限公司、江苏通达动力科技股份有限公司、云南铜业压铸科技有限公司和北京首钢股份有限公司等,其中湖北宝达机电有限公司和江苏通达动力科技股份有限公司配合提供部分样机冲片铁心的加工,云南铜业压铸科技有限公司协助完成铸铜转子压铸,北京首钢股份有限公司为样机提供优质的冷轧硅钢

片,皖南电机、佳木斯电机、大中电机、江潮电机和山西电机等 5 家电机制造企业开展样机试制。所安排的 5 个规格 19 台样机的试制分工情况如表 4 所示。

表 4 IE5 样机试制分工情况		
样机规格	台数	试制厂家
80M1-2-0.75 kW(铸铜转子)	4	皖南电机
100L1-4-2.2 kW(铸铜转子)	2	佳木斯电机
	3	皖南电机
112M-4-4 kW(铸铜转子)	3	大中电机
160M-6-7.5 kW	2	大中电机
	2	江潮电机
280S-8-37 kW	3	山西电机

1.3 样机性能指标和材料用量

在样机试制单位的共同努力下,5 个规格 19 台样机全部试制完成并完成了性能测试。从性能测试数据看,所试制完成的 19 台样机基本达到了设计及标准要求。下面就已完成的 5 个规格 19 台样机的主要性能指标试制情况进行分析。

1.3.1 样机主要性能指标达标情况

将所试制的 5 个规格 19 台样机的效率、功率因数和起动性能等主要技术性能指标实测值与立项技术任务书的要求进行对比,除 H100L1-4-2.2 kW 规格有 1 台样机的效率指标不合格外,其他 18 台样机的性能实际测试数据全部达到技术任务书及试制用技术条件的标准要求。效率指标不合格的 1 台样机,其效率虽未达到技术任务书要求,但仍达到 IE5 效率等级指标的标准要求。

样机主要性能指标具体情况分析如下。

(1) 效率指标。

已完成的 5 个规格 19 台样机的效率实测值均达到 IE5 效率等级指标的标准要求,有 18 台样机的效率实测值达到本项目的标准要求,其中效率高于等于本项目标准值的样机 12 台,吃容差小于 50% 的 5 台,吃容差大于 50% 的 1 台,效率不合格的 1 台。效率指标合格率为 94.74%。效率指标达标情况如表 5 所示。

效率不合格的 1 台样机为 H100L1-4-2.2 kW 样机。该规格样机由 2 家企业共试制了 5 台样机,试验数据如表 6 所示。该规格样机的效率,本项目目标为 91.49%,最小值 90.21%,IE5 指标为

表 5 IE5 样机效率指标达标情况		
效率达标情况分类	台数	占比/%
≥本项目规定的指标	12	63.16
<容差的 50%	5	26.32
≥容差的 50%	1	5.26
不合格	1	5.26

表 6 H100L1-4-2.2 kW 样机效率实测值对比								
样机 编号	效率/ %	功率 因数	定子 铜耗/W	转子 铝耗/W	铁耗/ W	机械 损耗/W	杂散 损耗/W	
1	90.880	0.787 2	91.50	29.9	44.6	24.8	29.8	
2	90.190	0.794 5	90.90	31.0	64.0	27.1	26.3	
3	90.349	0.813	80.30	30.6	56.9	16.4	50.8	
4	91.388	0.811	79.23	30.2	54.7	20.5	22.7	
5	91.792	0.813	77.91	28.4	49.1	15.4	25.9	

91.4%,最小值 90.11%。其中 2 号样机的铁耗测试值略偏大,造成效率不合格,但该样机的效率仍达到了 IE5 效率标准要求(考虑容差后的最小值为 90.11%)。

由表 6 还可知,对于 H100L1-4-2.2 kW 规格,还有 1 台样机的效率吃容差大于 50%、2 台吃容差小于 50%,表明该规格样机达到项目效率指标的难度较高。

(2) 其他指标。

5 个规格 19 台样机的功率因数指标全部达到标准和设计要求,其中功率因数实测值高于等于标准值的 17 台,吃容差小于 50% 的 2 台。

5 个规格 19 台样机起动电流实测值全部达到标准和设计要求,其中,吃容差小于 50% 的 15 台,吃容差大于 50% 的 4 台。

5 个规格 19 台样机的起动转矩和最大转矩指标全部达到标准要求。

5 个规格 19 台样机的温升全部合格。

1.3.2 样机材料用量对比

IE5 效率样机的设计主要借鉴了 YE4 和 YZTE4 系列超超高效率三相异步电动机的三圆尺寸及部分槽型。5 个规格 IE5 样机与 YE3、YE4/YZTE4 系列相应规格电动机的材料平均用量对比如表 7 所示。由表 7 可知,IE5 样机的铁心材料平均用量比 YE3 系列电动机增加了 22.78%,比 YE4 和 YZTE4 系列电动机增加了 18.08%;定子用铜平均用量比系列 YE3 电动机增

加了 37.84%,比 YE4 和 YZTE4 系列电动机增加了 9.71%;转子用铝或铜平均用量比 YE3 系列电动机增加了 16.52%,比 YE4 和 YZTE4 系列电动机分别增加了 4.34% 和 13.83%。

表 7 IE5 样机与 YE3、YE4/YZTE4 系列电动机材料平均用量对比 $\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$

电动机类别	材料平均用量			
	铁心	定子用铜	转子用铝	转子用铜
YE3	10.401	1.369	0.351	—
YE4/YZTE4	10.815	1.720	0.392	1.591
IE5	12.770	1.887	0.409	1.811

2 结 语

为了达到 IE5 这一非常高的效率指标,样机设计时槽满率的取值相对偏高,给样机的试制带来了一定的困难。比如 H80M1-2-0.75 kW 和 H100L1-4-2.2 kW 等规格样机在试制过程中出现了下线困难等情况。通过交流与沟通,承担样机试制任务的企业克服了重重困难,圆满地完成了样机的试制。在样机试制过程中开展了不同风扇结构型式及不等匝绕组型式的对比试验验证,取得了预期效果,为下一阶段继续开展工作积累了一定的经验及数据,可供行业同仁参考及借鉴。

致谢 对参与样机试制任务的皖南电机、佳木斯电机、大中电机、江潮电机、山西电机、湖北宝达机电有限公司、江苏通达动力科技股份有限公

司、云南铜业压铸科技有限公司和北京首钢股份有限公司等单位 and 人员表示衷心感谢!

【参 考 文 献】

[1] International Electrotechnical Commission (IEC). Rotating electrical machines—Part 30-1. Efficiency classes of line operated AC motors (IE-code); IEC 60034-30-1;2014[S]. 2014.

[2] 中国电器工业协会. 旋转电机 效率分级(IE 代码) 第 1 部分: 电网供电的交流电动机: GB/T 32891.1—2016[S]. 2016.

[3] International Electrotechnical Commission (IEC). Rotating electrical machines—Part 30-2. Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code); IEC TS 60034-30-2;2016[S]. 2016.

[4] 中国电器工业协会. 旋转电机 效率分级(IE 代码) 第 2 部分: 变速交流电动机: GB/T 32891.2—2019 [S]. 2019.

[5] 国家标准化管理委员会. 电动机能效限定值及能效等级:GB 18613—2020[S]. 2020.

[6] Siemens. Siemens 公司样本: D81. 1 _ 2016 _ SIMOTICS_GP_SD_XP_DP_EN[Z]. 2016.

[7] 黄坚,姚丙雷,顾德军,等. IE4 超超高效率电动机系列产品的开发[J]. 电机与控制应用,2018,45 (2): 56.

[8] 珠海凯邦电机制造有限公司. 珠海凯邦电机制造有限公司样本:永磁辅助同步磁阻电机[Z]. 2020.

[9] 中国机械工业联合会. YE4 系列(IP55)三相异步电动机技术条件(机座号 80 ~ 450);JB/T 13299—2017[S]. 2017.



(上接第 72 页)

[5] WANG J, KANG J, TANG L. Theoretical and experimental studies for wind turbine's shrink disk [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 229(2): 325.

[6] WANG J, NING K, LI P, et al. A multi-objective dynamic design method for interference fit of conical surface [J]. Journal of Mechanical Science and

Technology, 2020, 236(2): 321.

[7] 唐亮,王建梅,陶德峰,等. 装配间隙对风电锁紧盘性能的影响分析[J]. 太原科技大学学报, 2013, 34(2): 125.

[8] 唐亮. 风电锁紧盘的算法优化与分析研究[D]. 太原:太原科技大学, 2014.

[9] 王建梅,唐亮. 锁紧盘设计理论与方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014: 37-41.