

IE4 超超高效率电动机系列产品的开发

黄 坚， 姚丙雷， 顾德军， 李光耀， 王鸿鹄
[上海电器科学研究所(集团)有限公司,上海 200063]

摘 要: IE4 超超高效率为目前全球统一的最高的电动机能效等级。着重介绍了达到 IE4 效率等级的 4 个系列产品:YZTE4 系列(IP55)铸铜转子三相异步电动机,YE4 系列(IP55)三相异步电动机(H80~355),YE4 系列(IP55)低压大功率三相异步电动机,TYE4 系列(IP55)自启动永磁同步电动机。
关键词: IE4; 超超高效率; 电动机
中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)02-0056-06

Development of IE4 Super Premium Efficiency Motor Series Products

HUANG Jian, YAO Binglei, GU Dejun, LI Guangyao, WANG Honghu
[Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: IE4 super premium efficiency was the highest level of current global energy efficiency. The four products of YZTE4 series (IP55) three-phase induction motors with die-cast copper rotor, YE4 Series (IP55) three-phase induction motors (H80~355), YE4 series (IP55) low-voltage high-power three-phase asynchronous motor and TYE4 series (IP55) self starting permanent magnet synchronous motor were introduced. They had reached the IE4 efficiency level.
Key words: IE4; super premium efficiency; motor

0 引 言

2008 年 10 月国际电工委员会 IEC 组织发布了 IEC 60034-30《单速、三相笼型感应电动机的能效分级》标准,统一将电动机能效标准分为 IE1、IE2、IE3、IE4 共 4 个等级,其中 IE1 为标准效率、IE2 为高效率、IE3 为超高效率,IE4 为最高效率等级,行业中习惯称之为超超高效率。
参考 IEC 60034-30 标准,我国也相应制定了国标 GB 18613—2012《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》,并从 2012 年 9 月 1 日起已正式开始实施。新国标 GB 18613—2012 将效率等级分为三级,其效率等级与 IEC 60034-30 的对应关系如表 1 所示。由表 1 中的对应关系可知,3 级效率平均为 89.85% (对应国际 IEC 标准的 IE2 高效率等级),为我国目前的能效限定值或最低效率标准等级,2 级效率平均为 91.39% (对

应国际 IEC 标准的 IE3 超高效率等级),为我国目前的节能评价标准等级,1 级效率平均为 93.06%,与国际 IEC 60034-30 中的 IE4 效率等级相对应,为目前中小型三相异步电动机我国的最高效率标准等级。

表 1 GB 18613—2012 与 IEC 60034-30 的对应关系

GB 18613—2012	IEC 60034-30	平均效率/%
1 级效率标准	IE4—最高效率等级	93.06
2 级效率标准或节能评价	IE3—超高效率等级	91.39
3 级效率标准或能效限定值	IE2—高效率等级	89.85
无(已废止)	IE1—普通效率等级	87.62

2014 年 IEC 又发布了最新的能效标准 IEC 60034-30-1:2014,将电机功率范围从 0.75~375 kW 扩大到 0.12~1 000 kW,极数在原来的 2、4、6P 基础上增加了 8P;其次,在 IE4 效率等级的基础上,还提出了效率等级更高的 IE5 概念。与

作者简介:黄 坚(1960—),教授级高工,研究方向为电机设计。

此同时,IEC 60034-30-1:2014 又给出了各种类型电动机所能达到各级效率等级的难易程度,如表 2 所示。由表 2 国际电工委员会 IEC 组织给出的提示可知,三相交流电动机达到 IE4 效率等级是世界范围的难题,IE4 也应该是目前国际上三相交流电动机所能达到的最高的效率等级。

为了满足市场和赶超国际先进水平及推动中小型电机行业技术进步的需要,自 2015 年 9 月起,我们组织在中小型电机行业开展了 IE4 能效等级的超超高效率电动机产品的开发,成立了由上海电机系统节能工程技术研究中心、浙江金龙电机有限公司、山东华力电机有限公司、上海上电电机股份有限公司、上海特波电机有限公司、西门子(中国)有限公司、安徽皖南电机股份有限公司、江苏大中电机股份有限公司、卧龙电气集团股份有限公司、佳木斯电机股份有限公司、广东东莞

电机有限公司、北京首钢股份有限公司等 40 家企业组成的 IE4 系列产品开发联合设计工作组。开展了 YZTE4 系列(IP55)铸铜转子超超高效率三相异步电动机(机座号 80~180)、YE4 系列(IP55)铸铝转子超超高效率三相异步电动机(机座号 80~355)、YE4 系列(IP55)低压大功率超超高效率三相异步电动机(机座号 355~450)和 TYE4 系列(IP55)自起动永磁同步电动机(机座号 80~280)4 个系列产品的开发,完成了 46 个规格 167 台样机的试制及测试,样机的主要性能指标全部达到了 IE4 效率等级及相关标准(报批稿)和设计要求。同时,开展了新型绕组、合理选用冷轧硅钢片等设计技术的研究,以及降低电机损耗的铁心加工工艺、转子加工工艺等关键工艺的研究。通过近二年时间的努力,完成了预定的各项任务,顺利达到了预期目标。

表 2 IEC 给出的各类电动机可能达到的能效等级

电动机类型		IE1	IE2	IE3	IE4	IE5
三相笼型感应电动机(ASM)	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
	分相	困难	否	否	否	否
同步电动机		是	是	是	困难	否

1 项目完成情况

1.1 关键技术研究

为了确保所开发的电动机系列产品达到 IE4 效率等级,我们从多方面考虑能够进一步降低电机的各项损耗,主要围绕设计技术、材料选用以及工艺加工等方面开展了试验研究工作。主要内容如下:

1.1.1 开展采用正弦绕组、不等匝绕组对降低电机损耗的技术研究

提出了新型定子绕组分析计算模型(包含绕组方案设计、评判、绕线模尺寸计算等功能),通过优化正弦及不等匝绕组,有效削弱了谐波磁场。开发了正弦绕组、不等匝绕组设计软件,样机验证表明,在降低杂散损耗和起动性能方面取得预期效果。

1.1.2 开展 IE4 效率电机专用风扇结构的研究

通过对 Y、Y2、YX3 系列等风扇及风罩结构形式的风量、风压、效率等特性进行分析,提出了 YE4 电机新风扇结构形式。应用 3D 技术打印的新风扇,在 YE4-132S2-2 等规格样机上开展了对比试验验证,达到了预期效果。YE4 电机新风扇结构具有风量大和损耗低的特点。

1.1.3 采用低损耗轴承 ART 技术的对比试验研究

ART(金属磨损自修复)技术可提高轴承的使用寿命、降低轴承摩擦损耗,通过样机的试验验证,ART 技术对降低电机的机械损耗具有一定的效果。

1.1.4 永磁电机气隙磁场波形的优化研究

针对永磁电机不同的气隙长度、极弧系数、斜

槽等进行了有限元分析和计算,研究了对气隙磁场波形优化和脉动转矩抑制作用,确定了 TYE4 永磁电机系列产品的主要电磁参数。

1.1.5 永磁电机交、直流电抗参数的计算研究

基于永磁同步电机的相量模型,充分考虑永磁电机饱和效应对电感参数的影响,采用场路结合的方法,计算电机额定运行时的直流电抗和交轴电抗,提高了计算的准确性。

1.1.6 永磁电机的永磁材料应用研究

开展了永磁材料不同程度失磁对永磁电机性能影响的研究,根据永磁材料失磁对电机性能影响情况,给出了永磁电机设计时应注意的问题。永磁材料的选用应根据对材料最大去磁和温度稳定性以及永磁体成本等因素进行综合考虑。

1.1.7 IE4 效率电机新绝缘结构的研究

根据 IE4 系列产品开发的需要,提出了专用的绝缘结构,并确定了 IE4 电机绝缘结构规范及评定方案。

1.1.8 选择不同牌号的冷轧硅钢片进行对比试验研究

选择了 0.35 和 0.5 mm 厚度和不同牌号的冷轧硅钢片进行了对比试验,从对比试验数据可知,效率和功率因数指标都达到标准要求,得到基本相近的结果。从今后方便生产考虑,仍以推荐采用 0.5 mm 厚的冷轧硅钢片为佳。

1.1.9 定转子冲片冲剪工艺、铁心压装工艺的试验研究

制定了 IE4 电机工艺规范,对冲片毛刺、叠压力、铁心齿部弹开量等参数进行了规定。同时,开展了转子冲片冲槽切气隙工艺的试验验证。目前传统的加工工艺,电机定转子间的气隙是采用转子表面加工得到,但这种工艺方式,增大了电机杂散损耗。采用转子冲片冲槽切气隙新工艺,在定转子冲片冲槽分离时,气隙直接得到,省却了转子表面加工工艺过程,可有效降低电机的杂散损耗。在 H100L1-4、2.2 kW 样机上进行了对比试验验证,杂散损耗平均降低了 55%。

1.1.10 开展转子“脱壳”工艺的试验验证

从对比试验数据可知,“脱壳”工艺可使杂散损耗平均降低 28.0~34.2%。

1.1.11 开展了转子酸洗工艺的试验研究

采用转子酸洗工艺,可消除电机转子表面的

冲片毛刺和铝须毛刺,明显降低电机的铁耗和杂散损耗,改善电机的性能。该工艺有手工操作和机器操作两种。推荐采用专用酸洗工艺设备取代手工操作,可大大降低劳动强度,提高生产效率、减少环境污染。从对比试验数据可知,酸洗工艺可使电机的杂散损耗降低 19.1~44.3%。

1.1.12 开展了永磁电机批量生产关键工艺及措施的研究

形成两个永磁电机工艺文件《转子永磁体镶嵌工艺守则》和《定子铁心叠压工艺守则》。

1.2 主要技术指标

所开发的 YE4 超超高效率三相异步电动机等 4 个系列产品的主要技术参数如下:

(1) YZTE4 系列 (IP55) 铸铜转子超超高效率三相异步电动机

功率范围:0.55~22 kW;

极数范围:2、4、6、8P;

机座号范围:H80~180 mm。

(2) YE4 系列 (IP55) 超超高效率三相异步电动机

功率范围:0.55~315 kW;

极数范围:2、4、6、8P;

机座号范围:H80~355 mm。

(3) YE4 系列 (IP55) 低压大功率超超高效率三相异步电动机

功率范围:250~1 000 kW;

极数范围:2、4、6、8P;

机座号范围:H355~450 mm。

(4) TYE4 系列 (IP55) 超超高效率自启动永磁三相同步电动机

功率范围:0.55~90 kW;

极数范围:2、4、6、8P;

机座号范围:80~280 mm。

1.3 样机试制情况

按照项目计划任务书要求,完成了 YZTE4 系列铸铜转子、YE4 系列铸铝转子超超高效率三相异步电动机和 TYE4 系列 (IP55) 三相永磁同步电动机共 46 个规格 167 台样机试制,其中,样机的温升全部合格,效率指标合格率为 92.81%,功率因数指标合格率为 98.2%,起动电流指标合格率为 98.5%,其他性能指标也都达到标准和设计要求。IE4 效率超超高效率电动机部分典型规格样

机试验数据如表 3~6 所示,其中 YZTE4 系列铸铜转子三相异步电动机部分典型规格效率测试数据如表 3 所示;YE4 系列三相异步电动机(H80~355)部分典型规格效率测试数据如表 4 所示;YE4 系列低压大功率三相异步电动机(H355~450)部分典型规格效率测试数据如表 5 所示;TYE4 系列(IP55)三相永磁同步电动机部分典型规格效率测试数据如表 6 所示。

表 3 YZTE4 系列部分样机效率测试数据

型号	功率/ kW	极数	IE4 效率/%	测试 效率/%
YZTE4-80M1-2	0.75	4	83.5	82.79
YZTE4-90S-2	1.5	2	86.5	86.96
YZTE4-90L-4	1.5	2	88.2	87.21
YZTE4-100L2-4	3.0	4	90.4	88.24
YZTE4-112M-4	4.0	4	91.1	87.62
YZTE4-132S-4	5.5	4	91.9	91.13
YZTE4-160L-2	18.5	2	93.7	91.03
				91.49
				91.59
				91.85
				92.17
				93.56

表 4 YE4 系列(H132~355)部分样机效率测试数据

型号	功率/ kW	极数	IE4 能效/%	测试 效率/%
YE4-132S-4	5.5	4	91.9	92.80
YE4-132M2-6	5.5	6	90.5	92.65
YE4-180M-2	22	2	94.0	90.09
YE4-200L-4	30	4	94.9	90.23
YE4-280M-2	90	2	95.8	94.11
YE4-315L1-8	90	8	94.4	94.22
YE4-355L-4	315	4	96.7	95.05
				95.06
				95.76
				95.78
				94.51
				94.58
				96.61
				96.48

表 5 YE4 系列(H355~450)样机效率测试数据

型号	功率/kW	极数	IE4 效率/%	测试效率/%
YE4-355-4	355	4	96.7	96.58
YE4-355-6	315	6	96.6	96.32
YE4-4504-6	800	6	96.6	96.64
YE4-400-8	355	8	95.4	95.49

表 6 TYE4 系列部分样机效率测试数据

型号	功率/ kW	极数	IE4 能效/%	测试 效率/%
TYE4-112M-4	4	4	91.1	93.16
TYE4-160M1-2	11	2	92.6	93.87
TYE4-160M-4	11	4	93.3	93.71
TYE4-225M-4	45	4	95.4	93.37
TYE4-225M-6	30	6	94.2	93.1
TYE4-280M-4	90	4	96.1	92.49
TYE4-280M-6	55	6	95.1	94.33
				95.0
				96.6
				96.7
				97.8
				96.18

2 与国外同类产品的对比

自 2014 年国际电工委员会 IEC 组织发布了 IEC60034-30-1:2014《单速、三相笼型感应电动机的能效分级》标准,IE4 作为目前全球最高的效率等级正式发布后,国内外(如德国、美国、意大利、巴西等)电机行业都开始从事 IE4 效率等级电动机产品的研究与开发。从我们近期收集到的德国 SIEMENS 公司、ABB 公司和巴西 Weg 公司的样本来看,国外公司仅有铸铝转子 IE4 效率等级超超高效率电动机系列产品,情况大致如下:

(1) 从最近所收集到的最新的德国 SIEMENS 公司 2016 年样本来看,其最新开发的 1LE1504/1604 系列产品达到了 IE4 效率等级,1LE1504/1604 系列产品的功率范围为 2.2~200 kW,机座号范围为 H100~315,极数有 2、4;

(2) 从最近收集到的最新的德国 ABB 公司 2017 年样本来看,其最新开发的 M3BP 系列产品也达到了 IE4 效率等级,该类产品的功率范围为 45~355 kW,机座号范围仅有 H280、315、355 三个

机座号,极数有 2、4、6;

(3) 从最近收集到的最新的巴西 Weg 公司 2016 年样本来看,其最新开发的 W21 系列产品也达到了 IE4 效率等级,该类产品的功率范围为 3.0~315 kW,机座号范围为 H132~355,极数有 2、4、6。

YE4 超超高效率三相异步电动机系列产品与德国 SIEMENS 公司、ABB 公司和巴西 Weg 公司同类产品的对比情况如表 7 所示。由表 7 的对比情况可知,德国 SIEMENS 公司的 1LE1504/1604 系列、ABB 公司的 M3BP 系列和巴西 Weg 公司的 W21 系列相应的同类产品,规格、极数不全,仅有部分规格或部分功率段产品。相比较而言, YE4 系列为目前国际上首个符合 IE4 效率等级的超超高效率中小型三相异步电动机整马力全系列产品。

表 8 中列出了 YE4 系列典型规格效率、功率因数、噪声和额定电流等主要性能指标与德国 SIEMENS 公司、ABB 公司和巴西 Weg 公司相应同类产品数据的对比情况,其中, YE4 系列产品为数据样机的实测值,德国 SIEMENS 公司 1LE1504/1604 系列产品、ABB 公司 M3BP 系列产品和巴西 Weg 公司 W21 系列产品数据为样本提供的数据

表 7 YE4 系列与 1LE1504/1604 系列、W21 系列比较

类别	功率范围/kW	机座号范围	极数
中国 YE4 系列	0.55~1 000	H80~450	2、4、6、8
德国 SIEMENS 公司 1LE1504/1604 系列	2.2~200	H100~315	2、4
巴西 Weg 公司 W21 系列	3.0~315	H132~355	2、4、6
德国 ABB 公司 M3BP 系列	45~355	H280~355	2、4、6

(表 8 中所提供的 YE4 系列和 SIEMENS 公司 1LE1504/1604 系列产品的噪声值为声功率级, ABB 公司 M3BP 系列产品和巴西 Weg 公司 W21 系列产品样本提供的数据为声压级,通过修正后列入表 8 中的噪声值为声压/声功率级)。从表 8 中所列出的相应规格对比数据可知, YE4 系列超超高效率三相异步电动机产品的效率、功率因数和噪声指标明显优于德国 SIEMENS 公司、ABB 公司和巴西 Weg 公司同类产品的水平。

表 8 YE4 系列与 1LE1504/1604 系列、W21 系列主要性能指标的对比

规格	类别	效率/%	功率因数	噪声 dB/A	额定电流/A
H132S2-2 7.5 kW	YE4	91.75	0.91	74.3	13.73
	SIEMENS	91.70	0.91	80	13
	Weg 公司	92.10	0.86	67/80	14.5
H132S-4 5.5 kW	YE4	92.84	0.81	62.5	11.14
	SIEMENS	91.90	0.83	68	10.4
	Weg 公司	92.10	0.82	56/68	11.05
H132M2-6 5.5 kW	YE4	90.16	0.74	62.6	12.45
	Weg 公司	89.50	0.71	52/63	13.05
H160L-2 18.5 kW	YE4	93.70	0.9	71.5	33.05
	SIEMENS	93.70	0.91	87	31.5
	Weg 公司	93.80	0.87	67/80	34.53
H200L2-2 37 kW	YE4	95.27	0.88	79.7	66.52
	SIEMENS	94.80	0.88	83	64
	Weg 公司	94.80	0.86	69/81	68.95
H200L-4 30 kW	YE4	95.09	0.86	72.6	55.47
	SIEMENS	94.90	0.81	73	56
	Weg 公司	95.00	0.81	63/75	60.3

续表 8

规格	类别	效率/%	功率因数	噪声 dB/A	额定电流/A
H225M-4 45 kW	YE4	95.40	0.85	76.6	84.1
	SIEMENS	95.40	0.84	83	81
	Weg 公司	95.60	0.82	63/76	87.37
H280S-4 75 kW	YE4	96.67	0.88	79.3	134.1
	SIEMENS	96.0	0.85	83	133
	ABB 公司	96.2	0.86	72/86	130
	Weg 公司	96.0	0.84	69/83	138.95
H315S-4 110 kW	YE4	96.39	0.89	84.3	195.9
	SIEMENS	96.30	0.86	87	192
	ABB 公司	96.80	0.85	68/81	194
	Weg 公司	96.40	0.86	71/84	201.05

3 结 语

高效电机的推广应用是我国一项长期的基本国策。2014 年 12 月,国家发改委、财政部、工信部、国家质检总局等七部委联合印发了能效“领跑者”制度实施方案,将达到 IE4 效率等级的电机列入能效“领跑者”队伍;工业和信息化部《关于开展 2017 年度工业节能技术装备推荐及“能效之星”产品评价工作的通知》也将 IE4 电机作为“能效之星”的评选产品范围;2017 年 4 月 27 日上海市经信委、发改委和财政局以沪经信法[2017]220 号文发布了《上海市工业节能和合同能源管理项目专项扶持办法》,该办法也明确鼓励企业采用 IE4 效率电机,并给与适当的财政补贴。2017 年 9 月财政部、国家税务总局、国家发改委、工信部和环保部以财税(2017)71 号文发布了《关于印发节能节水和环境保护专用设备企业所得税优惠目录(2017 年版)的通知》,其中 IE4 能效等级电动机列入所得税优惠目录。

中国机械工业联合会于 2017 年 12 月 18 日在上海组织行业专家对该项目成果进行了鉴定。由中国科学院顾国标院士等 7 位行业专家组成的鉴定委员会,在听取了完成单位的科技成果汇报后认为,所开发完成的 YE4 超超高效率三相异步

电动机等 4 个系列产品,填补了该领域空白。在技术实现难度很大的情况下,该成果综合技术指标达到了国际同类产品先进水平,部分指标居国际领先水平;项目成果提升了相关行业的技术水平,提高了产品在国内外市场的竞争能力;成果的推广应用,为引领行业技术进步,促进节能减排做出了重大贡献。

【参 考 文 献】

[1] SIEMENS 公司(样本).D81.1_2016_SIMOTICS_GP_SD_XP_DP_EN[Z].2016.

[2] Weg 公司(样本).W21 Three Phase LV Motors[Z].2016.

[3] ABB 公司(样本).Low voltage Process performance Motors[Z].2016.

[4] ROTATING ELECTRICAL MACHINES-Part 30-1: Efficiency classes of Line operated AC motors (IE-code) IDT: IEC TS 60034-30-1: 2014[S].

[5] 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].

[6] ROTATING ELECTRICAL MACHINES-Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code) IDT: IEC TS 60034-30-2: 2016[S].

收稿日期: 2018 -01 -22

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告