

三相异步电动机的能效分级

黄 坚

(国家中小型电机及系统工程技术研究中心, 上海 200063)

摘 要: 论述了我国三相异步电动机产品的发展过程, 主要代表产品有 JO、JO2、Y、Y2、Y3、YX3、YE2、YE3 等系列三相异步电动机。介绍了自 1978 年起我国三相异步电动机系列产品采用国际标准的情况, 以及近几年等同采用国际标准 IEC 60034-30 的情况, 并结合我国中小型电机产品的实际情况, 对三相异步电动机的能效分级进行了分析浅议。

关键词: 三相异步电动机; 效率; 能效分级

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)01-0001-06

Energy Efficiency Classification of Three Phase Asynchronous Motor

HUANG Jian

(National Engineering Research Center of M&S Motor System, Shanghai 200063, China)

Abstract: The development process of China's three-phase asynchronous motor were discussed, the main representative products were JO, JO2, Y, Y2, Y3, YX3, YE2, YE3 series three-phase asynchronous motor. The international standard of three-phase asynchronous motor series products since 1978 were introduced, and Equivalent to the adoption of international standard IEC60034-30 in recent years and combined with the actual situation of small and medium motor products in China, the energy efficiency classification of three-phase asynchronous motors was analyzed.

Key words: three phase asynchronous motor; efficiency; energy efficiency classification

0 引 言

自 20 世纪 70 年代起, 随着世界经济的不断发展, 能源供应日趋紧张。由于电机系统所消耗的电能, 约占整个社会总用电量 50% 左右, 因此世界各国政府和国际组织对电机系统的节能均给予了高度重视, 美国、欧洲、加拿大、澳大利亚等国家和地区都制订了有关电动机的能效标准。

美国于 1992 年通过了电动机有关节能的新能源法令 (EPACT), 规定自 1997 年 10 月 24 日起, 在美国生产和进口到美国市场的电动机必须达到该法令所规定的效率标准, 否则将不能进入市场。该法令所规定的电动机为一般用途、单速、在 230/460 V 和恒定 60 Hz 的电源下运行的

三相笼型异步电动机, 功率范围为 1~200 马力, 极数为 2、4、6P。该法令所规定的电动机最低效率标准比当时一般工业用电机的效率平均提高了 2.7%, 电动机损耗下降了 15%~33%, 平均下降了 24.3%。2001 年美国又制定了超高效率电机标准 (NEMA Premium 标准), 其功率范围为 1~500 马力、单速, 2、4、6P, 为连续定额的三相笼型异步电动机, 并自 2011 年起在全球范围内率先强制推行超高效率电动机。

欧盟于 1999 年制订了电动机能效标准 (EU—CEMEP 协议), 将电动机的效率水平分为 EFF1、EFF2 和 EFF3 三级, 其中, EFF3 电机为低效率 (Low efficiency) 电动机, EFF2 电动机为效率改善 (Improved efficiency) 电动机, EFF1 电动机为

高效率(High efficiency)电动机。该协议规定制造商应在产品铭牌和样本数据表上列出效率级别的标识及效率数值,以便于用户选用和识别。该协议还规定,制造商除应标明电动机在额定负载时的效率数值外,还应标明电动机在 3/4 负载时的效率数值。该协议所覆盖的产品为全封闭扇冷型(IP54 或 IP55)三相交流笼型异步电动机,功率范围为 1.1~90 kW,极数为 2、4P,电压为 400 V、50 Hz、S1 工作制(即连续定额),标准设计(即其起动性能符合 IEC60034-12 中 N 设计的技术要求)。

鉴于世界上许多国家和地区都相继制订了低压三相异步电动机的能效标准,如美国、加拿大、欧盟、澳大利亚和新西兰、巴西、中国等,又由于在有关高效电机的标准定义方面存在较大的差异,给各国对高效电机的认同及全球贸易带来了一些障碍,为此,国际电工委员会 IEC 组织于 2008 年 10 月颁布了 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 四个等级,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,并制订了 50 Hz 和 60 Hz 两套标准体系,分别用于电源频率 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:额定电压为 1 000 V 及以下,输出功率为 0.75~375 kW,极数为 2、4、6P,S1 连续工作制或 S3 断续工作制(负载持续率为 80% 及以上)。

2014 年国际电工委员会 IEC 颁布了 IEC 60034-30-1《在线运行交流电机能效分级(IE 代码)》,效率分为 IE1、IE2、IE3、IE4 和 IE5 五个等级(其中 IE5 仅为概念,未有具体数值)。该标准规定范围为:额定电压为 1 000 V 及以下,输出功率为 0.12~1 000 kW,极数为 2、4、6、8P^[1],适用于所有在线运行的交流电动机。该标准还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 1 所示。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》。2016 年 IEC 组织又发布了 IEC 60034-30-2:2016《变速交流电机能效分级(IE 代码)》,对于在变频器供电下的各种变频调速电机规定相应的效率分级标准。该标准规定的功率适用范围与 IEC 60034-30-1 相同。该标准还第一次正式发布了 IE5 效率标称限定值(见文献[2])。该标准也将等同转换为我国的国家标准或行业标准。

表 1 IEC 给出各类电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	自起动永磁(LSPM)	是	是	是	困难	否

1 我国三相异步电动机产品及高效标准发展概况

1.1 三相异步电动机产品的发展

三相异步电动机是量大面广的产品,产品的覆盖面遍及工业、农业、国防、交通、公用设施等各个领域。伴随着我国国民经济的持续发展以及中

小型电机行业的技术进步,我国中小型三相异步电动机产品的技术发展大致情况如下:

(1) 自 1950 年解放初期起,我国尚还没有形成自己的工业基础和标准体系,当时主要是采用了原苏联国家标准体系。该阶段主要的代表产品有 J、JO 和 J2、JO2 系列三相异步电动机。1952 年

我国首个中小型三相异步电动机 J、JO 系列产品诞生,第一次统一了我国中小型电机工业的技术体系,彻底改变了旧中国遗留的电机产品的混乱局面。通过开展电机的标准化、系列化、通用化工作,使产品达到统一并成系列化发展,为中国电机工业的迅速发展奠定了坚实的基础。1958 年开始组织进行 J2、JO2 系列全国统一设计,1965 年 J2、JO2 系列电机通过鉴定,并在全国进行推广应用。J2、JO2 电机延续生产了二十多年,一直延续到 1981 年 Y 系列三相异步电动机产品开发完成,1985 年国家发布公告被正式宣布淘汰。

(2) 自 1978 年起改革开放以后,中小型电机行业开始转入采用国际电工委员会组织 IEC 标准体系。该阶段的主要代表产品有 Y、Y2、Y3、YX3、YE2 和 YE3 三相异步电动机等系列产品。

1982 年我国首个符合 IEC 标准的 Y 系列三相异步电动机通过鉴定,自 1985 年起,国家发布公告淘汰 J、JO 和 J2、JO2 老系列产品,并推广采用 Y 系列电机。自此,Y 系列及其派生系列产品在全国范围内推广。

为了进一步提高我国中小型异步电动机在国际市场上的竞争能力,90 年代初开始组织 Y2 系列三相异步电动机的研制,于 1996 年通过鉴定,Y2 系列电机投入市场赢得国外用户市场的欢迎,成为电机出口市场的主要产品。

自 2002 年 1 月起,根据国家开展淘汰热轧硅钢片、推广采用冷轧硅钢片(即“以冷代热”)的需要,完成了 Y3 系列三相异步电动机的研制,2003 年 3 月通过鉴定。Y3 系列电机是国内第一个全系列采用冷轧硅钢片设计的系列电机,其效率指标达到了国标 GB 18613—2006《中小型三相异步电动机能效限定值和节能评价》中能效限定值的规定,同时达到欧洲 EFF2 效率标准。随后又完成了 YX3 系列高效率三相异步电动机开发,其效率指标满足 GB 18613《中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价》中节能评价要求,同时符合欧洲 EFF1 标准。

自 2007 年起,按照国际电工委员会 IEC 组织的有关电机高效和超高效率最新标准体系,开展了 YE2 高效和 YE3 超高效率三相异步电动机系列产品的开发。近期又在组织行业开展 YE4 超高效率三相异步电动机系列产品的开发。

1.2 高效率电机标准的发展

我国最早的高效率电机标准应该是始于 1985 年。当时为了满足我国工业领域节能的需要,在 Y 系列三相异步电动机产品基础上,开发了 YX 系列高效率三相异步电动机产品,效率平均比 Y 系列提高 3.5% 左右。该产品的额定电压为 380 V、输出功率为 0.55~90 kW,极数为 2、4、6P,并制订了行业标准《YX 系列高效率三相异步电动机技术条件》。该标准的制订早于美国的高效电机(EPACT)标准。由于当时用户对高效电机的认识还不够,同时也没有相应的配套政策进行推广,该产品及标准也未能得到广泛的推广应用。

1995 年在开发 Y2 系列三相异步电动机产品的同时,完成了 Y2-E 系列高效率三相异步电动机产品的开发,Y2-E 系列效率平均比 Y2 系列提高 1.8% 左右。根据 Y2 和 Y2-E 系列产品编制了行业标准《Y2 系列三相异步电动机技术条件》。该标准的效率指标分为 Y2 和 Y2-E 两个部分,应该说这是最早的效率分级标准,也早于欧盟于 1999 年制订的电动机能效分级标准(EU—CEMEP 协议)。

进入 21 世纪后,跟随国际上有关电动机效率标准的发展趋势,以及配合我国节能减排政策的落实,我国开始制订国家标准 GB 18613《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》。2002 发布第一版国标 GB 18613—2002,2006 年又推出了第二版 GB 18613—2006。第一版与第二版相差不大,两个标准中的能效限定值和节能评价或高效率标准,主要参考了欧洲 EFF2 和 EFF1 效率等级标准。

根据国际电工委员会 IEC 组织于 2008 年 10 月颁布的 IEC 60034-30“单速、三相笼型感应电动机的能效分级”标准,我国也相应对国标 GB 18613《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》进行了修订,第三版国标 GB 18613—2012 于 2012 年 5 月发布,自 2012 年 9 月 1 日起开始实施。

国标 GB 18613 第三版与前两版相比变化较大,一是效率数值发生了变化,二是效率的考核方法也不一样,新国标按 I12B 法实测杂散损耗计算效率,第一、二版标准则是按杂散损耗为 0.5% 推

荐值计算效率。

按照我国的习惯,第三版国标(GB 18613)中的能效等级的高低顺序与 IEC 的不一样,我们的 1 级效率为最高值,而 IEC 的 1 级效率为最低值。新、老国标(GB 18613)与 IEC 标准的效率对应关系如表 2 所示,其中新国标(GB 18613)中的 2 级、3 级效率数据与 IE3 和 IE2 完全一致;新国标(GB 18613)中的 1 级效率数据与 IEC 中的 IE4 为同一能效等级,但不完全一致,这主要是 GB 18613—2012 当时采用的为 IE4 数据草案稿,该数据发布后经国际专家多次论证做了适当修正的缘故,该数据与 IEC 60034-30-1:2014 标准发

布的 IE4 效率指标值也不完全一致,应该说修正后正式发布的数据更趋于合理。

表 2 中同时还列出了我国近些年所开发的 Y、Y2、Y3、YX3、YE2、YE3 等系列三相异步电动机产品与国际 IEC 60034-30 和国标 GB 18613 能效等级的基本对应关系,其中 Y、Y2、Y3 等系列电机基本为 IE1 级效率等级产品,YE2、YX3 等系列电机基本为 IE2 级类高效率等级产品。YE3、YZTE3 等系列电机为 IE3 级超高效率等级产品。目前正在组织开发的 YE4、YZTE4 等系列电机为 IE4 级超超高效率等级产品,YE4、YZTE4 系列电机应该说是目前效率最高的三相异步电动机系列产品。

表 2 GB 18613—2012 与 IEC 60034-30 的对应关系

GB 18613—2012 新标准	GB 18613—2006 老标准	IEC 60034-30-1	平均效率/%	备注
效率标准 1 级	无	IE4-超超高效率等级	93.1	对应 YE4、YZTE4 等系列电机
节能评价价值或效率标准 2 级	超高效率标准(1 级)	IE3-超高效率等级	91.5	对应 YE3、YZTE3 等系列电机
能效限定值标准 3 级	节能评价价值或高效率标准(2 级)	IE2-高效率等级	90.0	对应 YE2、YX3 等系列电机
无(已废止)	能效限定值标准(3 级)	IE1-普通效率等级	87.0	对应 Y、Y2、Y3 等系列电机

新标准的实施表明我国三相异步电动机产品的整体效率水平进行了提升,平均提升了 3% 左右。同时也表明,我国三相异步电动机进行了一次产品的更新换代。目前我国还在大量使用的 Y、Y2、Y3 系列三相异步电动机应该全部停止生产,已由 YE2 系列高效率三相异步电动机、YE3 系列超高效率三相异步电动机等产品来替代。

国际电工委员会 IEC 于 2014 年最新颁布的 IEC 60034-30-1《在线运行交流电机能效分级(IE 代码)》,已等同转化为国标。按照该标准的最新变化,国标 GB 18613—2012 也在开始考虑进行修订。

2 对三相异步电动机能效标准的认识

2.1 我国三相异步电动机产品采标情况

为了推进我国中小型电机行业的技术进步及扩大外贸出口,自 1978 年改革开放起,中小型电机行业开始转入采用国际电工委员会组织 IEC 标准体系,同时尽可能等同采用最新的 IEC 标准。电动机的效率指标、起动性能指标、安装方式及尺寸、电动机功率、转速和机座号的对应关系等均采用了相应的国际标准,比如部分电动机功率、转速和机座号的对应关系如表 3 所示,部分电动机的

结构型式及安装方式如表 4 所示。表 3 和表 4 所列出的部分电动机额定功率等级(如 0.75、1.1、1.5、2.2、3.0、4.0……等)、机座号(如 H80M、H90S、H100L、H112M……等)以及电动机的结构型式及安装方式(如 IMB3、IMB5、IMB35、IMV1……等)均等同采用了相应的国际标准,我国的三相异步电动机已成为标准化、系列化、通用化程度很高的系列化产品,与国外同类产品也具备了良好的互换性。

自 1978 年以来,借助改革开放的好政策,经行业同仁的共同努力,我国已成为电机的出口大国和使用大国,预计 2017 年中国电机企业的产销量可达到全球总量的 40% 左右,将超过日本、北美和西欧市场的总和,当然我国三相异步电动机也达到了国际同类产品的先进水平。

跟随国际标准的变化,我国中小型电机行业也陆续完成了 YX3、YE2、YE3 等不同效率等级等系列产品的开发,目前正在组织开发的 YE4 系列电机为 IE4 级超超高效率等级产品,也是 GB 18613 标准一级能效等级产品。由表 2 可知,对应 GB 18613—2012 标准中三类能效等级的产品的开发已陆续完成,代表三级能效水平的 YE2 系列等高效率三相异步电动机,已取代 Y、Y2、Y3 系列,成为中

表 3 电动机功率、机座号与转速的对应关系表

机座号	同步转速/(r·min ⁻¹)			
	3 000	1 500	1 000	750
	功率/kW			
80M1	0.75	0.55	—	—
80M2	1.1	0.75	—	—
90S	1.5	1.1	0.75	—
90L	2.2	1.5	1.1	—
100L1	3	2.2	1.5	0.75
100L2		3		1.1
112M	4	4	2.2	1.5
132S1	5.5	5.5	3	2.2
132S2	7.5			
132M1	—	7.5	4	3
132M2			5.5	
160M1	11	11	7.5	4
160M2	15			5.5
160L	18.5	15	11	7.5
180M	22	18.5	—	—
180L	—	22	15	11
200L1	30	30	18.5	15
200L2	37		22	
225S	—	37	—	18.5
225M	45	45	30	22
250M	55	55	37	30
280S	75	75	45	37
280M	90	90	55	45

表 4 电动机的结构及安装方式

机座号	结构及安装代号(IM)
80~160	B3、B5、B6、B7、B8、B35、V1、 V3、V5、V6、V15、V17、V35、V37
180~280	B3、B5、B35、V1

小型电机行业的主导产品;代表二级能效水平的 YE3 系列等超高效率三相异步电动机,已成为中小型电机行业重点推介的节能产品;代表一级能效水平的 YE4 系列等超超高效率三相异步电动机,将成为下一阶段推广的新一代高效节能产品。

2.2 关于能效标准升级的问题

随着三相异步电动机效率水平的不断提高,能够实现的难度也越来越高。在目前全球范围内

常规的设计和制造水平条件下,国际电工委员会 IEC 组织认为三相异步电动机达到 IE1、IE2 和 IE3 效率等级是可行的,达到 IE4 效率等级是非常“困难”的,达到 IE5 效率等级是“否”(即不可能的),如表 1 所示。

笔者有幸参与了我国中小型电机行业从 Y、Y2、Y3 系列到 YX3、YE2 和 YE3 系列以及目前正在开展的 YE4 系列产品的开发。从目前国内中小型电机行业的设计及制造水平来看,达到 IE2、IE3 效率水平是没有问题的,如要达到 IE4 效率水平,在设计和工艺加工方面必须要采用相应的措施,借助“洪荒”之力,勉强可达到 IE4 标准要求。从 YE4 系列设计情况来看,通过在设计上采用不等匝正弦绕组、采用目前最好的冷轧硅钢材料,在加工工艺方面提高加工精度及采用特殊的加工工艺等,从而达到了 IE4 标准。由于 YE4 系列电机的外径轮廓尺寸较 YE2 系列有所放大,所以部分规格在结构设计方面给采用国际标准安装方式(IM)带来一些困难(尤其对于小功率电机)。由于小功率电机 IE4 效率较 IE3 提高得较多,所以在结构设计方面又存在一些困难。从我们所收集到的德国 Siemens 公司、ABB 公司和巴西 Weg 公司同类产品的样本看,缺乏小功率 IE4 效率电机方面的资料,表明这是在设计 IE4 效率电机方面遇到了共同的问题。如果还要再设计 IE5 效率等级的三相异步电动机,那更是难上加难,实现的可能性几乎为零。从系列产品的角度出发,应该说 IE4 效率是目前三相异步电动机系列产品能够达到的最高的能效等级。

国标 GB 18613—2012 的实施,表明我国三相异步电动机进行了一次产品的更新换代,整体提升了我国三相异步电动机产品的效率水平,也反映了目前我国三相异步电动机产品的真实水平和现状。从目前我国中小型电机行业的制造能力以及国内的供求市场和用户实际的使用情况来看,在近一段时期内,国标 GB 18613—2012 的实施是符合国情的,对高效电机的规范和发展起到了积极的促进作用。但对于 GB 18613—2012 第 4.4 条“电动机目标能效限定值在额定输出功率的效率应不低于表 1 中 2 级的规定,在表 1 中,7.5~375 kW 的目标能效限定值在本标准实施之日 4 年后开始实施,7.5 kW 以下的目标能效限定

值在本标准实施之日 5 年后开始实施,并替代表 1 中 3 级的规定。”的实施,笔者认为值得斟酌,主要理由如下:

(1) 从以上的分析可知,基于国内中小型电机行业贯彻国际标准标准化和系列化程度情况,在目前的设计和制造水平条件下,IE4 效率(对应 GB 18613—2012 的 1 级能效等级)是三相异步电动机系列产品能够达到的最高能效等级,但在结构设计方面也还存在着诸多的困难,若将该类能效电机作为行业推广的主导产品,可能对于某些结构安装类型的产品制造厂难以实现,会给用户的选用带来一些困难。同时,该类能效产品由于缺乏某些结构安装型式,可能也无法构成一个功率范围齐全完整的系列产品。

(2) 根据 IEC 组织颁布的 IEC 60034-30-1:2014 对于三相异步电动机产品达到 IE5 能效等级给予否定的判定;若按照 GB 18613—2012 第 4.4 条的规定,IE3 降为 3 级能效等级后,IE4 效率降为 2 级能效,IE5 则为 1 级能效等级。这样的安排可能会造成 1 级能效等级在目前相当长一段时间内形成虚设的情况,而对产品的规范和发展失去指导意义。

(3) 电机效率适当的提高是应该的,但若无限的、不断的提高,是不经济、不合理的。GB 18613—2012 的发布和实施,已将我国的电机效率提升了一个等级,也是这些年来在国家的倡导和行业同仁的共同努力下,水到渠成的结果。但在短短的几年里,电机的效率再提升一级,这对于社会资源的合理利用及电机行业标准体系的建立,也不是非常有利的。

(4) 采用高效率电机总体来说对国家能源的节约和环境的改善是非常有利的,但并不是说在所有的场合采用高效率电机都会取得预期的节能效果。比如对于一些使用水泵或风机的场合,由于高效率电机在效率提高的同时,电机的输出转速一般也会提高,可能会出现采用高效率电机并不节能或节能效果不佳的情况,而水泵和风机配用电机的使用场合占的比例也相当高,约占电机总产量的 30%。对于这一特殊情况,必须引起我们的高度重视。

2.3 关于 8P 电动机效率的问题

由于 8P 电动机实际的使用量相对偏少,故

早期能效标准对其未有关关注,重点关注的是 2P、4P、6P 电动机,美国 1992 年发布的新能源法令 (EPACT) 和 2001 年发布的超高效率电机标准 (NEMA Premium 标准) 仅包括 2P、4P、6P 电动机;IEC 组织发布的 IEC 60034-30:2008 和我国发布的 GB 18613—2012 也仅包括 2P、4P、6P 电动机。自 IEC 发布 IEC 60034-30-1:2014 后,8P 电动机开始正式列入能效标准考核范围,所给出的 8P 电动机 IE1~IE5 能效标准如表 5 所示。表 5 中同时列出了我国已淘汰的 Y 系列和 Y3 系列三相异步电动机 8P 效率标准,由表 5 中的对比数据可知,Y 系列和 Y3 系列 8p 电动机效率标准并不低,已高于 IE2 能效标准等级。这是今后在推广及更换高效率电动机时应引起注意的问题。

从我国这些年 Y 系列、Y2 系列和 Y3 系列的

表 5 8P 电机 IE5 等额定效率标准值 (%) 对比

功率/kW	IE1	IE2	IE3	IE4	IE5	Y3 系列	Y 系列
0.75	61.2	66.2	78.9	78.4	82	70	
1.1	66.5	70.8	81	80.8	84	72	
1.5	70.2	74.1	82.5	82.6	85.5	74	
2.2	74.2	77.6	84.3	84.5	87.2	79	80.5
3	77	80	85.6	85.9	88.4	80	82
4	79.2	81.9	86.8	87.1	89.4	81	84
5.5	81.4	83.8	88	88.3	90.4	83	85
7.5	83.1	85.3	89.1	89.3	91.3	85.5	86
11	85	86.9	90.3	90.4	92.2	87.5	87.5
15	86.2	88	91.2	91.2	92.9	88	88
18.5	86.9	88.6	91.7	91.7	93.3	90	89.5
22	87.4	89.1	92.2	92.1	93.6	90.5	90
30	88.3	89.8	92.9	92.7	94.1	91	90.5
37	88.8	90.3	93.3	93.1	94.4	91.5	91
45	89.2	90.7	93.7	93.4	94.7	92	91.7
55	89.7	91	94.1	93.7	94.9	92.8	92
75	90.3	91.6	94.6	94.2	95.3	93.5	92.5
90	90.7	91.9	94.9	94.4	95.5	93.8	93
110	91.1	92.3	95.1	94.7	95.7	94	93.3
132	91.5	92.6	95.4	94.9	95.9	93.7	
160	91.9	93.5	95.6	95.1	96.1	94.2	
200	92.5	93.5	95.8	95.4	96.3	94.5	

(下转第 29 页)

- based control of port-controlled Hamiltonian systems [J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [4] WAHYU K W. Genetic algorithm tuned PI controller on PMSM simplified vector control [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3042-3048.
- [5] 卢涛, 于海生, 山炳强, 等. 永磁同步电机伺服系统的自适应滑模最大转矩/电流控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(2): 251-255.
- [6] 王同旭, 马鸿雁, 聂沐吟. 电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究[J]. 电工技术学报, 2015(增刊1): 43-47.
- [7] 符晓玲, 刘旭东. 基于反馈线性化和预测控制方法的电动汽车用 IPMSM 速度控制[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(2): 67-71.
- [8] SHAO M L, YU H S, YU J P, et al. Four quadrant PMSM drive system via single neuron adaptive control and backstepping[J]. ICIC Express Letters, 2016, 10(2): 433-438.
- [9] 许家群, 朱建光, 邢伟, 等. 电动汽车驱动用永磁同步电动机系统效率优化控制研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 81-84.
- [10] ORTEGA R, SCHAFT A, MAREELS I, et al. Putting energy back in control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(2): 18-33.
- [11] BASIC D, MALRAIT F, ROUCHON P. Euler-Lagrange models with complex currents of three-phase electrical machines and observability issues[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(1): 212-217.
- [12] 吴春, 齐蓉, 高峰. 基于扩张 PCHD 模型的永磁同步电机无源控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(5): 895-900.
- [13] YU H S, YU J P, LIU J, et al. Nonlinear control of induction motors based on state error PCH and energy-shaping principle [J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 72(72): 49-59.
- [14] 孙静, 张承慧, 裴文卉, 等. 考虑铁损的电动汽车用永磁同步电机 Hamilton 镇定控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(12): 1899-1902.
- [15] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [16] 崔培良, 赵克友. 面装永磁同步电机最小损耗的速度控制[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(11): 35-38.
- [17] OREGA R, NICKLASSON P J. Passivity-based control of Euler-Lagrange systems [J]. Mechanical Electrical and Electro-Mechanical Applications, New York: Springer, 1998.
- [18] ORTEGA R, ESPINOSA-PÉREZ G. Passivity based control with simultaneous energy shaping and damping injection: The Induction Motor Case Study[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2005, 38(1): 477-482.
- [19] 蔡新红, 赵成勇. 基于欧拉-拉格朗日模型的模块化多电平换流器的无源控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 224-232.
- [20] 于海生, 赵克友, 郭雷, 等. 基于端口受控哈密顿方法的 PMSM 最大转矩/电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 82-87.

收稿日期: 2017 -05 -17

(上接第 6 页)

实际生产及使用情况来看, 应该说 IEC 60034-30-1:2014 发布的 8P 电动机标准值偏低。笔者近期在参与 IE4 效率系列产品开发过程中, 也遇到如下的问题: 即在设计 2P、4P、6P 电动机时, 达到 IE4 效率需要采用高牌号的冷轧硅钢片, 而设计 8P 电动机仅需采用中、低牌号的冷轧硅钢片即可达到 IE4 效率, 通过样机试制也证明了这一现象。这一现象说明 8P 电动机与 2P、4P、6P 电动机的效率标准等级不完全匹配, 有必要进行适当的修改。

3 结 语

以上为笔者近些年在推广高效率电机过程中, 对一些问题的认识, 仅为个人见解, 可供行业同仁参考。如有不妥之处, 敬请指正。

【参 考 文 献】

- [1] 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].
- [2] 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: 2017 -11 -10