

调速电气传动系统能效标准的现状及发展趋势

王春武¹, 陈实², 柴青¹, 连孝藩³, 罗巨龙¹

(1. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180;

2. 苏州汇川技术有限公司, 江苏 苏州 215104;

3. 施耐德电气(中国)有限公司上海分公司, 上海 201203)

摘要: 901部分对调速电气传动系统能效标准相关基本概念进行了定义, 规范了扩展产品及其部件的功耗计算方法。902部分主要说明了变频器(CDM)、电气传动系统(PDS)和电机系统(MS)的损耗确定方法。同时定义了电机系统(主要是CDM/PDS)的IE(CDM的能效)/IES(PDS的能效)和它们的损耗限值, 并提供了相应的测试方法。901部分是902部分的基础, 902部分是901部分的具体应用。随着能效标准相关数据和方法的完善、技术进步的推进、亟待解决的生态问题的要求、以及工程设计和产品设计优化提升的需求, 能效标准将不断发展完善。

关键词: 扩展产品法(EPA); 半解析模型(SAM); 调速电气传动系统(PDS); 变频器(CDM); 能效指标(EEI); 能效等级/系统能效等级(IE/IES); 参考变频器(RCDM); 参考电气传动系统(RPDS)

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **DOI:** DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed22131

Current Situation and Development Trend of Energy Efficiency Standard of Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems

WANG Chunwu¹, CHEN Shi², CHAI Qing¹, LIAN Xiaofan³, LUO Julong¹

(1. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China; 2. Suzhou Inovance Technology Co. Ltd., Suzhou 215104, Jiangsu, China; 3. Schneider Electric (China) Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai 201203, China)

Abstract: In 901 part, the basic concepts related to the energy efficiency standard of variable speed electric drive system are defined, and the energy consumption calculation method of extended products and its components is standardized. In 902 part, the loss determination method of completed drive module (CDM), Adjustable speed electrical power drive system (PDS) and motor system (MS) is described. At the same time, the IE (energy efficiency of CDM) / IES (energy efficiency of PDS) of motor system (mainly CDM / PDS) and their loss limits are defined, and the corresponding test methods are provided. The 901 part is the foundation of the 902 part, and the 902 part is the extension of the 901 part. With the improvement of relevant data and methods of energy efficiency standards, the advancement of technological progress, the requirements of ecological problems to be solved, and the requirements of engineering design and product design optimization, energy efficiency standards will continue to develop and improve.

Key words: extended product approach (EPA); semianalysis model (SAM); adjustable speed electrical power drive system (PDS); completed drive module (CDM); energy efficiency index (EEI); international efficiency/international energy efficiency system (IE/IES); reference complete drive module (RCDM); reference power drive system (RPDS)

随着中国经济高速发展, 工业生产对节能降耗的要求也越来越高, 以变频器为核心的调速电气传动系统正在广泛地替代工频电机供电控制, 其在工业领域的节能降耗效果以及带来的生态

基金项目: 天津电气科学研究院有限公司科研开发创新基金项目(JC2018ZL001)

作者简介: 王春武(1964—), 男, 学士, 教授级高级工程师, Email: bh9126@163.com

通讯作者: 柴青(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, Email: aimee_chai@hotmail.com

环保的改善也越来越被广泛地认可和接受。

为了更好地计算和比较各种系统方案节能的优劣,需要清楚地知道调速系统及应用中主要组成部件的能效等级,通过调速电气传动系统能效标准就可以很好地解决这个问题。

能效标准即能源利用效率标准,是对用能产品的能源利用效率水平或在一定时间内能源消耗水平进行规定的标准。能效标准具有较高的社会和经济效益。据国际能源机构统计,目前世界上已有多个国家实施了能效标准。目前,我国已颁布实施了多项用能产品的能效国家标准,涉及家用电器、照明器具和交通工具等。在调速电气传动系统关键部件中,目前已经有了电机能效国家标准《GB18613-2012》,但缺乏统一的调速电气系统的能效国家标准作为系统损耗和节能计算的指导。

1 调速电气传动系统能效国家标准的出现

为了尽快改变不利的现状,弥补调速电气系统能效国家标准空白,由全国电力电子系统和设备标准技术委员会含半导体电力变流器的调速电气传动系统分技术委员会(SAC/TC60/SC1)组织国内变频调速领域行业专家对已经发布的两项IEC标准进行了等同转化。两项国家标准分别为《GB/T12668.901-2021 调速电气传动系统-第9-1部分:电气传动系统、电机起动器、电力电子设备及其传动应用的生态设计-采用扩展产品法(EPA)和半解析模型(SAM)制定电气传动设备能效标准的一般要求》和《GB/T12668.902-2021 调速电气传动系统-第9-2部分:电气传动系统、电机起动器、电力电子设备及其传动应用的生态设计-电气传动系统和电机起动器的能效指标》,以下简称901,902^[1-2]。

2 能效国家标准内容的现状

2.1 901与902之间的关系

901部分和902部分同为调速电气传动系统的能效标准,它们之间既是总则和分项的关系,也有内容互为补充的关系。901部分是902部分的基础,902部分是901部分的扩展。902部分是对901部分的具体应用,进一步对变频器(completed drive module, CDM)、电气传动系统(electrical power drive system, PDS)能效等级进行说明

和具体分析。

2.2 901和902的范围和基本内容

901部分对调速电气传动系统能效标准相关基本概念进行了定义,规范了扩展产品及其部件的功耗计算方法,适用于由电机起动器或变频器(CDM)控制的电机系统。

准确理解能效标准,需要知道半解析模型(semianalytic model, SAM)、扩展产品(extended product, EP)、扩展产品法(extended product approach, EPA)。

图1形象地描述了什么是扩展产品(EP),其中能效标准讨论的重点是其中的电气传动系统(PDS)^[3]。扩展产品(EP)可以理解为应用,如节能的泵系统(含变频器、电机、被传动设备)。

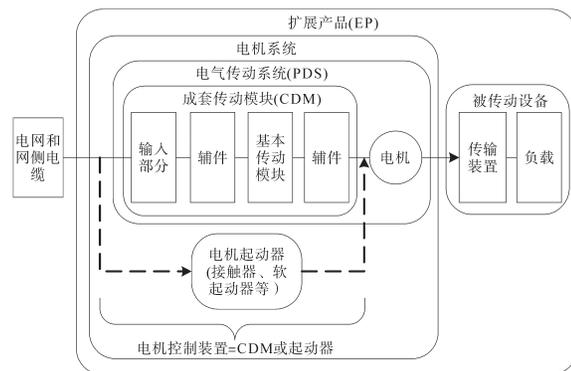


图1 含电机系统的扩展产品(EP)示意图

Fig.1 Illustration of the extended product(EP) with embedded motor system

半解析模型(SAM)是确定电机系统或被传动设备损耗的模型,半解析模型(SAM)包含扩展产品(EP)各子部件的物理参数和数学参数以及算法。为了得到整体损耗,有必要通过多个半解析模型(SAM)来得到扩展产品(EP)各子部件的典型相对损耗。半解析模型(SAM)允许结合各参考工作点(最多8点)的损耗得出其它任何一个工作点的损耗。

扩展产品法(EPA)是采用传动设备的速度-力矩的关系曲线、电机系统的相对功耗以及应用工作制确定扩展产品(EP)能效指标(energy efficiency index, EEI)的方法。

图2可以直观地看出如何运用扩展产品法(EPA)和半解析模型(SAM)得到扩展产品(EP)能效指标(EEI)的。图2中,相对功耗及允差是扩展产品(EP)与半解析模型(SAM)之间的连接环节和输入数据。而表1则描述了多个半解析模型(SAM)间的输入输出逻辑关系以及相关方的责任。

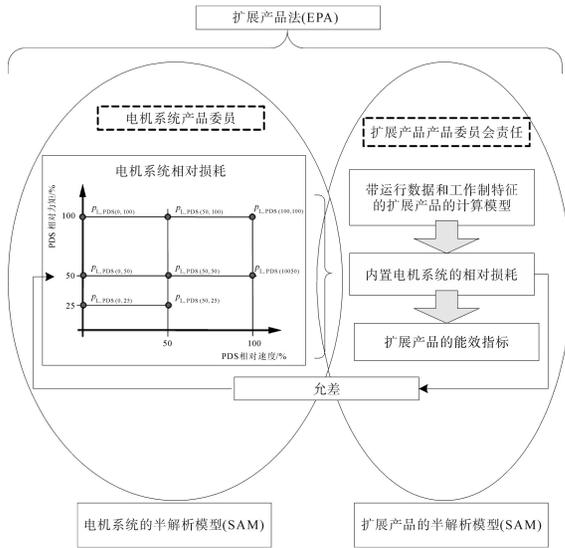


图2 扩展产品法(EPA)

Fig.2 Extended product approach (EPA)

表1 电机系统、扩展产品(EP)和扩展产品法(EPA)的半解析模型(SAM)的输入输出关系

Tab.1 Relationship between input and output of semi analytical model (SAM) for motor system, extended product (EP) and extended product approach (EPA)

扩展产品法的要素	输入	输出	参考	责任
电机系统的半解析模型(SAM)	电机系统的特征(实体部件、额定功率等)	电机系统在标准化工作点的相对损耗	GB/T 12668.902	IEC SC 22G, TC 2
扩展产品(EP)的半解析模型(SAM)	电机系统的半解析模型(SAM)输出与被传动设备(负载设备)的特征	扩展产品在标准化工作点的相对损耗	EP标准	负载设备相关技术委员会(例如ISO TC115, TC117, TC118)
扩展产品法(EPA)	扩展产品(EP)的半解析模型(SAM)输出,应用需求(工作制、运行时间等)以及允差	应用的扩展产品(EP)能效指数(EEI)	EP标准	扩展产品的相关技术委员会(例如ISO TC115, TC117, TC118)

在现实应用中,我们更关心的是扩展产品(EP)的能效指标(EEI),分析各种节能方案的能效指标(EEI),可以帮助我们找到最优。但是做到这一点的前提是我们必须知道扩展产品(EP)各部件的损耗,而902部分针对变频器(CDM)/电气传动系统(PDS)的损耗确定方法进行了详细的说明。

902部分主要说明了变频器(CDM)、电气传动系统(PDS)和电机系统(motor system, MS)的损耗确定方法,同时定义了电机系统(主要是CDM/PDS)的能效等级(international efficiency, IE)(CDM的能效)/系统能效等级(international energy efficiency system, IES)(PDS的能效)和它们的损耗限值,并提供了相应的测试方法,以用于CDM/PDS能效等级的确定。

902部分是对901部分具体细化的过程,即如何具体地实现第901部分的2个半解析模型(SAM)。902部分认为,电气传动系统(PDS)可能的工作点(力矩,速度)的集合是无限的,理论上有必要知道每个点产生的功耗的值。然而在实践中,知道有限(8个)特定工作点的功耗就足够了。这对应图2的左边电机系统的半解析模型(SAM)。

因此,可以通过参考变频器(reference complete drive module, RCDM)、参考电机(reference motor, RM)、参考电气传动系统(reference power drive system, RPDS)对应8点图(图3)来预测应用中的变频器、电机、电气传动系统的损耗,这些损耗数据用于图2的右边EP的半解析模型(SAM),是求解扩展产品(EP)的能效指标(EEI)所必需的。图3中,参考电机(RM)8点图类似参考电气传动系统(RPDS),未列出。在图3中,有3种方法可以应用于计算相关的损耗,即最大损耗法、二维线性插值法和数学模型法,其中,二维插值法和数学模型法应用较多,如果参考点的数据足够准确,二维插值法在工程上更为实用。

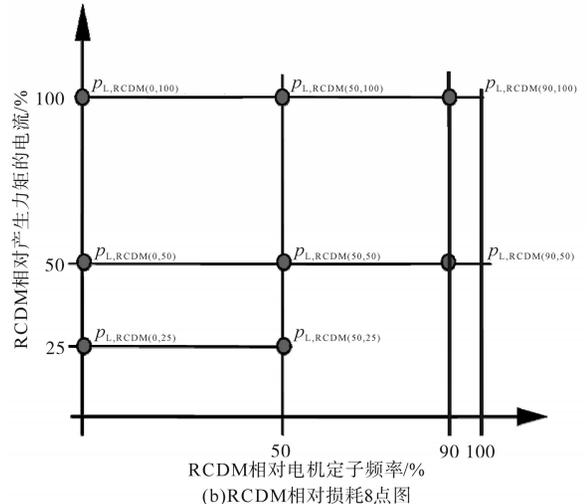
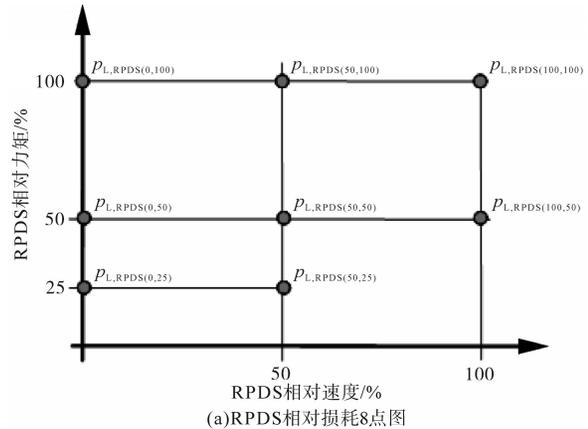


图3 RCDM/ RPDS 相对损耗 8点图

Fig.3 8-point illustration of relative loss of RCDM / RPDS

其次,902部分有很大篇幅在讲如何确定变频器(CDM)、电机(motor, M)、电气传动系统(PDS)的能效等级(IE/IES)、能耗限值以及相应损耗的测试方法和步骤。

其中,IE是在变频器(CDM)额定电流和额定电机定子频率(对应于额定电机电压)的90%条件下进行测试、计算和评估;IES是在电气传动系统(PDS)额定力矩和额定速度条件下进行测试、计算和评估。

对于变频器(CDM)和电气传动系统(PDS)需要按以下规则确定变频器(CDM)和电气传动系统(PDS)的IE/IES能效等级,参见图4。图4中,电机的IE等级在IEC 60034-30(所有部分)中定义,在此不再表达。

从图4中可以看出,IEC的IE0/IES0是能效等级最低的,即IE等级越高说明产品越节能,与中国现有的能效标识规定是相反的(能效值越小越节能)。

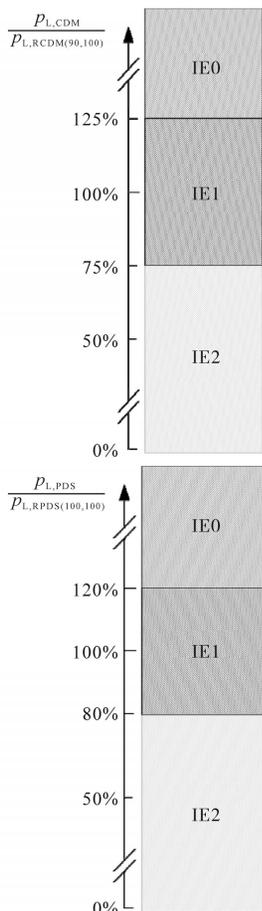


图4 CDM/PDS的IE/IES等级示意图

Fig.4 Illustration of IE / IES classes for CDM/ PDS

图4中,用于IE/IES计算的参考CDM/PDS的相对损耗 $p_{L,RCDM(90,100)}$ 来自前面用于8点图中的额

定点(即IE/IES等级限值,参见902部分表18/19)。

图4中,用于IE/IES所需要的实际CDM/PDS的相对损耗 $p_{L,RCDM(90,100)}/p_{L,RPDS(100,100)}$ 可以通过数学模型算法、输入-输出测量法和发热测量法得出。目前输入-输出测量法实用性好,测量示意图如图5所示。通过这种方法,既可以得到用于计算IE/IES的 $p_{L,CDM(90,100)}/p_{L,PDS(100,100)}$,也可以得到8点图中其它参考点的数据,用于扩展产品(EP)的能效指标(EEI)的计算。

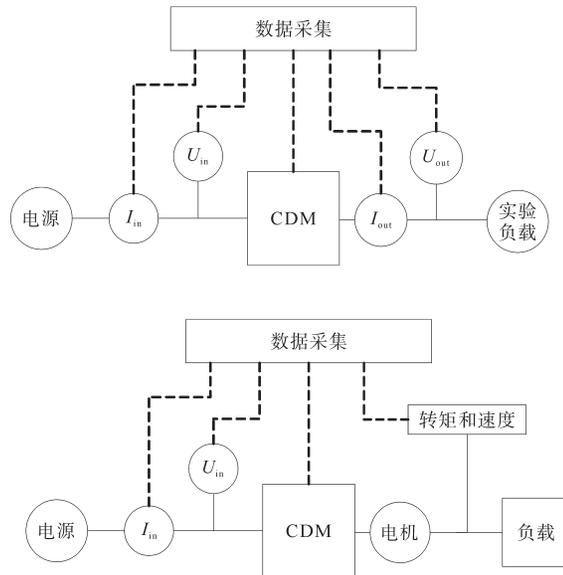


图5 CDM/PDS损耗的输入-输出测量法

Fig.5 Input-output measurement of CDM / PDS loss

总之,901,902这两个国家标准规范了能效的基本概念,规定了项目和系统各方应尽的技术责任、如何定义调速电气传动系统(PDS)(变频器、电机)的能效等级以及如何根据扩展产品法(EPA)流程来求解系统的能效指标。

3 调速电气传动系统能效国家标准的发展趋势

3.1 完善能效标准相关数据和方法

由于调速电气传动系统的复杂性,901,902采用的IEC61800-9-1:2017和IEC61800-9-2:2017目前版本尚存在一些不足的地方,特别体现在9-2中,参考CDM/PDS的损耗是基于仿真模型的,这些值从未在相关产品上验证过,且评定IE等级无统计证据;变频器的测试方法描述得不够详细,关于8点图中零速基准工作点的设置也是有争议的。

为了解决这一系列问题,早日让能效标准实用化,国际能源署(IEA)和国际电工委员会(IEC)达成协议,通过采用统一测试协议(UTP)的变频器(CDM)循环比对测试实验(RRC)对国际知名品牌

(国外品牌有ABB、西门子、施耐德丹佛斯等,中国有汇川、英威腾、森兰等)低压变频器进行测试。我国的天津电气科学研究院有限公司的实验室被列入国际测试实验室之一。通过众多具有代表性的变频器在各实验室中的循环对比测试,得到的相关测试数据及结论比较客观公正。测试中各国专家不断总结和更新,目前测试协议已经从UTP1.0更新到UTP2.0阶段。随着RRC实验数据的完善,能效标准也会及时更新,变得更有指导意义。

3.2 生态问题推动能效标准的发展

全球生态问题的迫切需要会大力促进能效标准的推广、更新和应用。欧盟市场上存在大量的变频器,2015年,变频器将约265 TW·h的电能从电网转换为电力,这相当于1.05亿吨二氧化碳排放量。预计到2020年,该值将上升至380 TW·h左右,到2030年将达到570 TW·h左右。欧盟认为在改善这些电机驱动系统的能效方面还有很大的空间。欧盟已立法(EC)No 640/2009来推进高效电机和变频器的应用。这意味着应该调整电机的生态设计要求并为变频器(CDM)设定生态设计要求,以实现其具有成本效益的能效的全部潜力。欧盟近两年会进一步修正法案,IEC现有的能效标准也会及时更新。中国和欧盟面临同样的全球生态环境问题,因此中国政府和标准化组织需要及时跟进。

3.3 技术进步推动能效标准的发展

随着技术进步和工业化、智能化的不断深入,会不断推进能效标准的改进。目前901,902能效标准仅适用于交流1 kV以下、1 000 kW以下调速传动系统,902中数据目前仅支持异步电机和两象限变频器。后期标准必须及时完善。变频器涵盖高压变频器、工程型变频器,并要考虑多拓扑、多传、四象限多方面组合;电机考虑永磁同步电机、磁阻电机、电励磁同步电机等等。还要考虑出现的一些新型传动设备的负载特征。同时,考虑到国情和市场的差异,我们在能效标准上不仅需要跟随,而且可以在特定行业上做新的能效标准,比如,即将发布的能源局变频器能效标准《变频调速设备的能效限定值及能效等级》。

3.4 工程设计和产品设计优化提升的需求推动能效标准的发展

能效国家标准的出现,从趋势上将中国的工程应用领域的节能事业产生助力。在能效标准没有出来之前,我们在节能工程计算中,每家的节能方案不一样,节能计算结果完全由各种因

素决定。变频器厂家只对变频器熟悉,对电机和设备的损耗不甚了解。因为各方不可能对复杂的调速电气传动系统以及传动设备的每个部件认识都很专业,造成初期方案中计算的节能数据非常不准确,实际实施后节能效果和初期计算大相径庭的比比皆是,结果是给各方都造成了不必要的经济损失。而能效标准的出现,给各方指明了计算流程、计算方法和步骤,并规定了各方应承担的责任(各方节能相关数据的提供)。

4 结论

随着工业化、数字化、智能化的发展,新兴节能材料、器件和设备的出现,原有的能效衡量标准势必不能满足要求,能效标准需要与时俱进。只有这样,能效标准才能发挥它应有的作用,指导意义才会更大。

参考文献

- [1] 国家标准化管理委员会第60技术委员会第1分技术委员会. GB/T 12668.901—2021. 调速电气传动系统—第9-1部分:电气传动系统、电机起动器、电力电子设备及其传动应用的生态设计—采用扩展产品法(EPA)和半解析模型(SAM)制定电气传动设备能效标准的一般要求[S].北京:中国标准出版社,2021.
SAC/TC60/SC1.GB/T 12668.901—2021.Adjustable speed electrical power drive systems—part 9-1: ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications—general requirements for setting energy efficiency standards for power driven equipment using the extended product approach (EPA) and semi analytic model (SAM) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [2] 国家标准化管理委员会第60技术委员会第1分技术委员会. GB/T 12668.902—2021. 调速电气传动系统—第9-2部分:电气传动系统、电机起动器、电力电子设备及其传动应用的生态设计—电气传动系统和电机起动器的能效指标[S].北京:中国标准出版社,2021.
SAC/TC60/SC1.GB/T 12668.902—2021.Adjustable speed electrical power drive systems—part 9-2: ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications—energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [3] 国家标准化管理委员会第60技术委员会第1分技术委员会. GB/T 12668.501—2013. 调速电气传动系统—第5-1部分:安全要求—电气、热和能量[S].北京:中国标准出版社,2014.
SAC/TC60/SC1.GB/T 12668.501—2013.Adjustable speed electrical power drive systems—part 5-1: safety requirements—electrical, thermal and energy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

收稿日期:2020-07-05
修改稿日期:2020-09-29