

氢燃料电池空压机变频器工业应用及发展趋势

刘娟¹, 胡晓磊², 滕易伊娜², 章仕起², 张哲²

(1. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180;

2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 氢燃料电池空压机是氢燃料电池核心部件,但其高能耗带来的高成本问题,阻碍了氢燃料电池进一步的发展。近年来,工业上逐渐采用变频器来控制氢燃料电池空气压缩机的运行,但是目前缺少对氢燃料电池空气压缩机专用变频器的相关资料综述,不利于产业走向规范和成熟。为了给相关研究人员一个行业参考,需要归纳当前氢燃料电池空压机变频器的现状。介绍了变频器控制空气压缩机的优势和原理,对目前国内外氢燃料电池空气压缩机专用变频器的生产厂家及其产品参数进行了综述,并归纳了目前氢燃料电池空气压缩机采用变频器技术的难点以及未来的发展方向。

关键词: 变频器;工业应用;变频空气压缩机;氢燃料电池

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25190

Industry Application and Development Trend of Inverter for Hydrogen Fuel Cell Air Compressor

LIU Juan¹, HU Xiaolei², TENG Yiyina², ZHANG Shiqi², ZHANG Zhe²

(1. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China; 2. School of

Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Hydrogen fuel cells air compressor is an important accessory of hydrogen fuel cell, but the high cost caused by its high energy consumption hinders the further development of hydrogen fuel cell. In recent years, the industry has gradually adopted variable frequency drives to control the operation of hydrogen fuel cell air compressors, but currently the review of manufacturers and product parameters of variable frequency drives dedicated to air compressors is lacking. It is not conducive to the standardization and maturity of the industry. In order to give relevant researchers a reference, it is necessary to summarize the current status of the hydrogen fuel cell air compressor. The advantages and principles of variable frequency drives to control air compressors, the manufacturers and product parameters of dedicated variable frequency drives for air compressors at home and abroad, and the technological difficulties and developing directions of using variable frequency drives technology in hydrogen fuel cell air compressors were introduced.

Key words: inverter; industrial application; variable frequency air compressor; hydrogen fuel cell

随着近些年工业上的氢燃料电池汽车和热电联产系统的飞速发展^[1-2],氢燃料电池技术得到了广泛的关注。Strategy Analysis Inc.分别研究了2012年—2018年对氢燃料电池系统成本的影响因素,从研究中可以看出,影响氢燃料电池系统成本的主要因素由电池组性能和铂(Pt)负载转移到了空气供给子系统^[3-4]。空气压缩机作为氢燃料电池空气供给子系统的核心器件,是由电机驱动将过滤后的空气增压、加湿,送入氢燃料电池反应堆中,氢气和增压后的氧气在电堆中发生电化学反应,输出电能供外部负载和自身空气压缩

机使用。但是,电堆中输出电能的20%~30%被用于空气压缩机,约占氢燃料电池系统整体功耗的80%^[5],这降低了系统的效率,也间接提高了氢燃料电池系统的成本,不利于氢燃料电池在工业市场上更广泛的应用。

目前工业产品上提高氢燃料电池系统效率有以下几种方案:1)加装一个与电机相连的配件膨胀机^[4],吸收多余的排气,降低空气压缩机能耗,提高效率;2)优化空气压缩机系统的控制方法,文献[6]系统地回顾了当前常用的控制方法以及不同控制方法的优缺点,为压缩机不同运行工

况下控制方式的选择提供了参考;3)根据氢燃料电池的具体应用条件,选择此种条件下合适的空气压缩机类型和工作参数,使氢燃料电池的系统效率达到最优^[6-7],从而减少能耗,节约成本;4)氢燃料电池工业上的空气压缩机产品采用的变频器控制策略。

变频器同样是附加在空气压缩机的电机上的配件,它的优势是:可以通过变频调速降低空气压缩机的启动电流,减小对氢燃料电池系统使用时的冲击,同时可以自动调节压力使空气压缩机保持恒压运行,降低系统的能耗并延长设备的使用寿命,从而降低氢燃料电池系统的成本,图1是氢燃料电池系统的工作示意图。

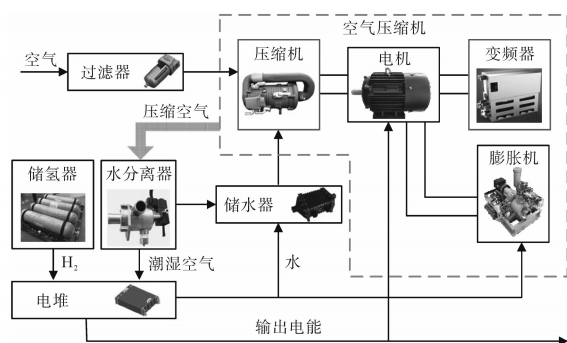


图1 氢燃料电池系统

Fig.1 Hydrogen fuel cell system

随着氢燃料电池产业的迅速发展,氢燃料电池相关零部件产业的市场同样前景广阔,国家也推出了相关政策大力支持。但是通过资料调研得出,目前缺少对氢燃料电池空气压缩机专用变频器的相关资料综述,尤其是对工业上已经产品化的空气压缩机专用变频器技术方案总结较少,不利于该产业走向规范和成熟。

为了给相关研究人员和变频器生产厂家一个行业参考,本文从工业应用的角度出发,第1节简单介绍了变频器接入氢燃料电池空气压缩机的原理;第2节是文章的重点,总结了空气压缩机专用变频器的生产厂家和技术参数,并归纳了氢燃料电池空气压缩机采用变频器技术的难点和未来发展方向;第3节是对文章内容的总结。

1 空气压缩机变频技术原理

变频器是通过恒压供气的原理来控制氢燃料电池空气压缩机的装置,使空气压缩机在理想的压力下保持恒压输出,从而达到节约能耗的作用。下面简单介绍变频器接入氢燃料电池空气压缩机中的优势和原理。

许多学者研究了空气压缩机恒压供气对系统成本的影响。文献[8]说明了氢燃料电池系统成本随空气压力的变化规律,如图2所示,可以得出:随着空气供给压力的增加,可有效降低燃料电池的制造成本;文献[9]也说明了确立一个最佳的空气压缩机供气压力,对功耗、氢燃料电池系统效率和成本的改善都有良好的效果。通过以上文献可得出结论:氢燃料电池空气压缩机在0.3 MPa下工作时,保持该压力恒定不变供气对系统效率的提升和成本的降低都有很好的效果。

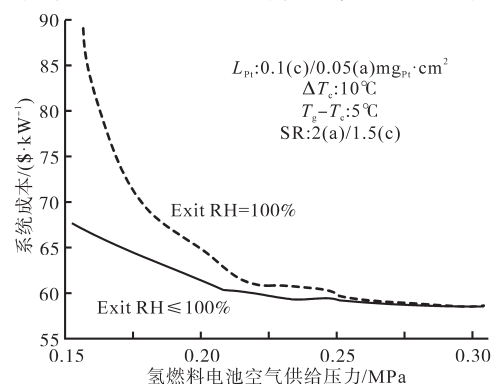


图2 氢燃料电池系统成本随空气压力的变化规律

Fig.2 Variation law of hydrogen fuel cell system cost with air pressure

当变频器接入氢燃料电池中的空气压缩机时,可以进一步调节电机转速,使空压机输出压力保持恒定,还可以降低氢燃料电池启动时的冲击电流,实现氢燃料电池空气压缩机中电机的软启动,延长设备寿命。该方案有以下优势:相比于不附加变频器直接控制电机的方式,空气压缩机能够实现更加稳定的供气输出;通用性强,可以根据氢燃料电池的输出功率,调节适配的空气压缩机输出压力,避免了为不同输出功率的氢燃料电池都进行空气压缩机选型的繁琐;变频器可以搭配膨胀机一起使用,能实现更好的节能效果,降低空气压缩机的损耗,提高系统效率。

变频调速原理图如图3所示。变频器接入之后的控制流程为:首先设定空气压缩机的输出压

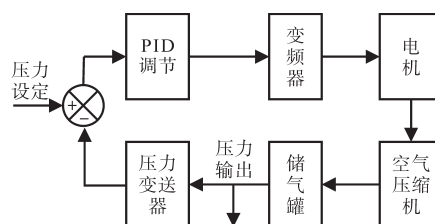


图3 空气压缩机变频调速原理图

Fig.3 Principle diagram of aircompressor frequency conversion speed regulation

力参考值,然后和储气罐压力值比较,通过PID计算获得相应的变频器频率,再通过变频器调节电机转速,最终实现了恒压供气^[10]。

2 空气压缩机变频器工业现状

目前国内外部分的变频器生产厂家有空气压缩机行业专用变频器的系列产品,可以作为氢燃料电池工业发展的助力。由于该行业还未成熟,目前搜集到的数据可为氢燃料电池空气压缩机提供选型参考。

2.1 国内外生产厂家及产品简介

2.1.1 汇川技术(INOVANCE)^[11]

汇川的空气压缩机专用变频器有多个系列,均属于低压变频器,介绍如下:

CP200, CP300, CP320 的输出功率范围为 5.5 ~ 355 kW,可实现频率 0 ~ 500 Hz 的输出;

CP650 系列为空压机应用的单变频一体机,根据功率范围的不同,在 7.5 ~ 15 kW 输出时,可输出 0 ~ 800 Hz 的频率,在 18.5 ~ 55 kW 输出时,可输出 0 ~ 500 Hz 的频率;

CP700 产品系列采用双变频和工频控制,可输出的频率范围为 0 ~ 500 Hz;

MD510 属于高速电机的专用驱动器,功率范围为 22 ~ 160 kW,输出频率最高可达 1 500 Hz。值得注意的是,该产品系列中采用了汇川技术开发的 PMVVC 控制,PMVVC 控制适用于同步电机,对电机的参数要求相对较低。

2.1.2 英威腾(INVT)^[12]

英威腾空气压缩机专用变频器有以下三种型号:

Goodrive300-01A 系列空压机专用变频器是英威腾针对空气压缩机行业的应用特点而定制开发的一款产品,可应用于同步或异步空压机的控制。适用电机容量为 7.5 ~ 200 kW,输出频率范围为 0 ~ 400 Hz;

Goodrive300-01A-RT 系列变频器是一款单变频一体机,适用电机容量为 7.5 ~ 37 kW,输出频率范围为 0 ~ 250 Hz;

Goodrive300-21 系列空压机专用双变频一体机适用于同步或异步双螺杆空压机,适用电机容量为 7.5 ~ 90 kW,输出频率范围为 0 ~ 400 Hz。

2.1.3 蓝海华腾(V&T)^[13]

蓝海华腾有着 V5-H-A9 型号的空气压缩机专用变频器。

2.1.4 正弦电气(SINEE)^[14]

正弦电气的 A98E 系列是永磁螺杆空压机专用变频器,搭配永磁同步电机,电机的额定转速最高可达 60 000 r/min。

2.1.5 普传科技(Powtran Technology)^[15]

PI500-C 系列空压机专用变频器是针对螺杆式空气压缩机过程工艺而设计的,能够对同步或异步空压机实现更优异的控制。可搭配永磁同步电机,在适用电机容量为 7.5 ~ 400 kW,输出频率范围为 0 ~ 400 Hz,在矢量控制下输出频率范围为 0 ~ 300 Hz,在 V/f 控制下输出频率范围为 0 ~ 3 200 Hz。

2.1.6 欧瑞传动(EURA DRIVES)^[16]

KY2000 系列是空压机单变频驱动一体机,可为螺旋杆空压机提供单变频驱动,已经在英格索兰空压机上得到应用,可搭配永磁同步电机。

2.1.7 福瑞电气(FORIPOWER)^[17]

专门针对氢燃料电池系统空压机电机开发的超高速电机变频控制器产品,使用 SVC 控制,输出频率可达 0 ~ 3 000 Hz,电机最高转速可达 180 000 r/min。

2.1.8 新富凌电气(FULING ELECTRIC)^[18]

新富凌电气有着 H200 型号的空压机一体机变频器。

2.1.9 迈凯诺电气(MICNO)^[19]

TE300A 系列空压机专用变频器,在 V/f 控制下可达到输出频率 0 ~ 3 000 Hz,在 SVC 控制下可达到输出频率 0 ~ 300 Hz。

2.1.10 日本安川(YASKAWA)^[20]

E1000 使用高效率同步电机,是压缩机专用的变频器,200 V 机型可适用电机容量为 0.7 ~ 110 kW; 400 V 机型可适用电机容量为 0.75 ~ 630 kW。

2.1.11 德国西门子(SIEMENS)^[21]

西门子有着 SINAMICS-G120XA 型号的压缩机负载专用产品。

2.1.12 丹麦丹佛斯(DANFOSS)^[22]

丹佛斯的 FC103 是压缩机专用产品。

2.1.13 法国施耐德(Schneider Electric)^[23]

施耐德有 AVT212 型号压缩机的行业专用变频器。

市场上的变频器龙头厂家还有瑞士的 ABB^[24] 和日本的三菱^[25],这两家厂家也有用于空气压缩机上的专用变频器产品,但其相关数据暂未公布或者暂未查到。

接下来对以上提到的空气压缩机专用变频器产品的工作电压、输出电流、输出功率、输出频率以及采用的控制方式进行了归纳,如表 1 所示。

表 1 空气压缩机专用变频器生产厂家及产品参数

Tab.1 Manufacturer and product parameters of dedicated variable frequency drives for air compressor

公司	工作电压/V	输出电流/A	输出功率/kW	输出频率/Hz	控制方式
汇川技术	200 ~ 528	13 ~ 520	5.5 ~ 355	0 ~ 1 500	V/f, SVC, FVC, PMVVC
英威腾	220 ~ 690	18.5 ~ 380	7.5 ~ 200	0 ~ 400	SVC、空间电压矢量控制
蓝海华腾	323 ~ 528	17 ~ 176	7.5 ~ 90	0 ~ 300	矢量控制、闭环恒压控制
正弦电气	50 ~ 2 000	0.01 ~ 6 000	0.1 ~ 650	0 ~ 600	V/f, SVC
普传科技	1 ~ 2 000	0.01 ~ 6 553.5	0.1 ~ 1 000	50 ~ 320	V/f、矢量控制
欧瑞传动	380	38 ~ 580	18.5 ~ 315	0.5 ~ 200	SVC
新富凌电气	160 ~ 440	—	—	0 ~ 1 000	动态转矩电流控制
迈凯诺	380	9 ~ 423	4 ~ 220	0 ~ 3 000	V/f, SVC、转矩控制
安川 E1000	200 ~ 400	2.1 ~ 1 200	0.75 ~ 630	0 ~ 200	V/f、矢量控制
西门子	380 ~ 440	2.2 ~ 992	0.75 ~ 560	0 ~ 150	V/f、矢量控制
丹佛斯	200 ~ 690	—	1.1 ~ 800	—	—
施耐德	—	—	0.75 ~ 75	—	—
ABB	—	—	—	—	直接转矩控制(DTC)

根据表 1 可以总结得出:目前厂家生产的大部分氢燃料电池空气压缩机专用变频器的产品,其工作电压多数在 200 ~ 690 V 之间,属于低压变频器;变频器的输出电流均比较高,且产品工作时的输出电压一般和输入电压相同,空气压缩机的电机工作处于低压大电流下。经过对市面上氢燃料电池系统的产品调研,空气压缩机专用变频器的输出功率范围可以覆盖便携式和交通领域的功率范围,但是对于固定式发电领域的功率需求还不能满足。

氢燃料电池专用空气压缩机最常用控制方式为无速度传感器矢量控制(也称作开环矢量控制(SVC))和恒压恒频控制(V/f)。由迈凯诺和普传科技的产品可以看出当采用 V/f 控制时,输出频率可以达到很高的频率输出,而 SVC 和 FVC(闭环矢量控制)控制下,输出频率一般在几百的范围;虽然 DTC 控制也是变频器的常用控制方式,但是在空气压缩机专用变频器的工业产品上,只有 ABB 采用了 DTC 控制。

根据以上总结可以看出,国内厂家的空气压缩机专用变频器产品在指标上可以替代国外产品,国内的企业发展迅速。

2.2 空气压缩机变频器的技术难点和发展方向

2.2.1 变频器应用拓扑和控制方式

根据 Fuel Cell Industry Review 对不同领域应用的氢燃料电池功率范围进行的总结,便携式辅

助电源功率范围在 1 W ~ 20 kW,氢燃料电池汽车领域的功率范围在 1 ~ 300 kW,二者适配的是中低压变频器。中低压变频器的拓扑结构较为统一,均为两电平结构,如图 4 所示。而发电厂和热电联产应用领域的氢燃料电池功率范围可达到 0.5 kW ~ 2 MW,则需要高压变频器来进行驱动。

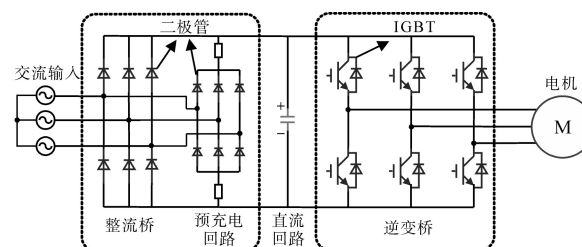


图 4 低压变频器两电平结构拓扑图

Fig.4 Topology diagram of two-level structure of low voltage variable frequency drive

图 4 中的两电平拓扑结构由整流、中间直流环节和逆变三部分组成。整流部分为不控整流桥电路,器件采用的二极管,预充电回路的作用是抑制启动电流对电容的冲击;中间直流环节为滤波、直流储能和缓冲无功功率;逆变部分采用的是全控器件绝缘栅双极晶体管(IGBT),逆变器拓扑可实现两电平的电压输出。

目前常用的控制方式有 V/f^[26], FVC^[27], SVC^[27] 以及 DTC^[27-28]。接下来介绍它们各自的特点和应用场景。

V/f 的控制算法较为简单,其控制电机的输出

转矩,缺点是动态响应慢且控制精度较差,可用于控制精度要求低、负载变化较小和有节能需求的负载。

FVC控制是通过将输出电流分解为励磁电流和转矩电流,实现对转矩和速度的分别控制,动态响应快。但是这种控制方式需要传感器对电机定子电阻和 d, q 轴电感等电机参数的识别,用于需要精确控制和对动态响应能力高的负载。

SVC控制方式与FVC方式相同,但是在速度环上没有传感器进行反馈,控制精度比FVC方式低,需要对转子磁链位置角和转速进行在线识别,可用于需要对转矩和转速分别进行控制,并且对于动态响应能力和精度的要求不是特别高的负载。

DTC控制是直接控制电机的转矩和磁通,不用在复杂空间坐标系之间变化,相比矢量控制简化了控制器结构,在转矩响应和控制精度上具备优势,用于需要高性能控制的场合,尤其是需要快速瞬态转矩响应的大惯量负载系统中。

技术难点上,变频器的核心技术包括电力电子和电机控制算法两部分。目前变频器用在氢燃料电池空气压缩机上需要向着高功率密度、高电磁兼容性、高可靠性、高通用性、高融合性以及更好的快速同步性等技术方向发展。

在电力电子方面,便携式和交通领域的氢燃料电池空气压缩机需要的低压变频器的硬件结构比较成熟,而固定式发电领域需要的高压变频器则需要不断发展新的拓扑结构,例如IGBT模块串联多电平结构、M2C模块化多电平串联结构、高压集成门极换流晶闸管(IGCT)三电平中点钳位式(NPC)结构以及LCI负载换相式晶闸管型结构等,可以将其运用到固定式发电领域的氢燃料电池空气压缩机中。同时电力电子方面还要优化整流和滤波等的结构设计,以提高功率密度;改进散热等外围结构,以提高可靠性。

在电机控制算法方面主要解决的是对电机的转速和输出转矩的控制问题。目前控制算法已经解决了“能不能用”的问题,需要继续优化的是控制算法的通用性,以满足氢燃料电池中不同种类和不同输出功率的空气压缩机需求;同时,要提高变频器的控制算法和控制系统的融合性,兼容不同类型的现场总线通信协议。

2.2.2 高速电机

作为变频器接入氢燃料电池空气压缩机的直接对象,电机的性能对整个氢燃料电池系统至

关重要。2023年,中国船舶重庆公司所属江增重工研发团队攻克了超高速永磁同步电机矢量控制策略等核心技术,成功研制了宽流量无油离心式压缩机及超高速电机控制系统。未来随着高转速、高功率密度、散热以及高频PWM控制(20 kHz以上)引起的开关损耗问题将是主要挑战^[4],但SiC器件和GaN器件的发展也为此提供了解决方案。在中国科技部启动的关键项目中,超高速永磁电机和高频电机控制是未来几年需要解决的技术之一。

2.2.3 完善产业链

氢燃料电池行业发展迅速,各个国家都有着相关政策支持,目前已经形成了完整的上中下游产业链,作为上游的配件行业也势必有着很大的市场需求,基于我国面临“双碳”的宏伟目标愿景,变频器可为氢燃料电池面临的成本和能耗问题提供一个解决方案。

因此,政府应该带头规范氢燃料电池空气压缩机专用变频器行业的通用标准,以及明确在不同领域产品中的性能指标,帮助更多的变频器研究人员和制造商更好地了解行业需求,有针对性地去发展产业技术。

3 结论

氢能源的发展带动了氢燃料电池和其配件的市场发展,氢燃料电池空气压缩机采用变频器控制有着降低能耗,延长系统寿命的优点,有利于减少氢燃料电池系统的使用成本,使氢燃料电池系统的发展更加成熟,但是目前缺少工业上空气压缩机变频器的产品综述。

为了给相关研究人员提供行业参考,本文从工业产品的角度出发,综述了三个方面:

1)介绍了氢燃料电池空气压缩机依据恒压供气技术可以降低系统使用成本的原理,说明了变频器方案较其他方案的优势以及变频器接入氢燃料电池空气压缩机的控制流程;

2)总结了目前国内外市场上空气压缩机专用变频器的生产厂家及其系列产品,对变频器产品的工作电压、输出电流、输出功率、输出频率等参数和控制方式做出了归纳,根据总结得出,目前市面上的产品大多数为低压变频器,控制方式普遍采用SVC和V/f控制,其中V/f控制可以达到更高的输出频率,只有少数产品采用了DTC的方式;

3)总结了目前氢燃料电池空气压缩机采用

变频技术,在拓扑和控制算法上需要解决高功率密度、高电磁兼容性、高可靠性、高通用性、高融合性以及更好的快速同步性的难点,对两电平拓扑结构和控制方式做了介绍,并阐述了未来变频技术的发展方向;在空气压缩机的高速电机上需要实现高转速、高功率密度、散热性好以及高频PWM控制下低损耗;目前该条产业链前景广阔,但是尚未发展完善,希望相关行业标准尽快出台,促进该产业链进一步完善。

参考文献

- [1] CHEN H C, SONG Z, ZHAO X, et al. A review of durability test protocols of the proton exchange membrane fuel cells for vehicle [J]. *Applied Energy*, 2018, 224: 289–299.
- [2] ELMER T, WORALL M, WU S, et al. Fuel cell technology for domestic built environment applications: state-of-the-art review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 913–931.
- [3] STRATEGY ANALYSIS INC.. Hydrogen storage and fuel cell cost analysis[DB/OL]. [2023–7–2]. <https://sainc.com/what-we-do/energy-consulting/>.
- [4] LI Y, PEI P, MA Z, et al. Analysis of air compression, progress of compressor and control for optimal energy efficiency in proton exchange membrane fuel cell[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133(12): 110304.
- [5] 郭爱, 李奇, 陈维荣, 等. 车用燃料电池阴极系统特性[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(6): 1052–1058.
GUO Ai, LI Qi, CHEN Weirong, et al. Characteristics of cathode system for automotive fuel cells[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(6): 1052–1058.
- [6] STOSIC N, SMITH I K, KOVACEVIC A. Optimisation of screw compressors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(10): 1177–1195.
- [7] YU Wan, XU Sichuan, NI Huaisheng. Air compressors for fuel cell vehicles: an systematic review[J]. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2015, 4(1): 115–122.
- [8] 严彦, 周利彪, 白文涛, 等. 燃料电池用空气压缩机的研究现状[J]. *机电工程*, 2021, 38(12): 1513–1519.
YAN Yan, ZHOU Libiao, BAI Wentao, et al. Research status of air compressor for fuel cell[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(12): 1513–1519.
- [9] 陈德鑫. 氢燃料电池车用空气压缩机设计及优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
CHEN Dexin. Design and optimization of air compressor for hydrogen fuel cell vehicles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [10] LIANG H, LI X. Applications of frequency conversion technology in air-compressor units control system[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 944–948.
- [11] 汇川技术. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- INOVANCE. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [12] 英威腾. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- INVT. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [13] 蓝海华腾. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- V&T. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [14] 正弦电气. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- SINEE. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [15] 普传科技. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- POWTRAN TECHNOLOGY. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [16] 欧瑞传动. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- EURA DRIVES. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [17] 福瑞电气. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- FORIPOWER. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [18] 新富凌电气. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- FULING ELECTRIC. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [19] 迈凯诺. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- MICNO. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [20] 安川. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- YASKAWA. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [21] 西门子. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- SIEMENS. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [22] 丹佛斯. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- DANFOSS. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [23] 施耐德. 空气压缩机变频器说明书[z]. 2023.
- SCHNEIDER ELECTRIC. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [24] ABB. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [25] MITSUBISHI. Kong qi ya suo ji bian pin qi shuo ming shu[z]. 2023.
- [26] 朱明东. 永磁同步电机高效V/F控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
ZHU Mingdong. Research on efficient V/F control method for permanent magnet synchronous motor[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [27] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机矢量控制与直接转矩控制比较研究[J]. *电气传动*. 2010, 40(10): 9–12, 17.
LI Yaohua, LIU Weiguo. Comparison of the VC and DTC for the PMSM[J]. *Electric Drive*, 2010, 40(10): 9–12, 17.
- [28] 肖卫文. 永磁同步电机直接转矩控制系统的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
XIAO Weiwen. The research on direct torque control system of permanent magnet synchronous motor[D]. Changsha: Hunan University, 2009.

收稿日期: 2023–06–15

修改稿日期: 2023–08–08