

GIL 运输专用机具驱动与制动系统设计研究

毛继兵¹, 黄志高², 俞越中², 李刚³, 张宁¹, 袁健³, 郝建光⁴, 陈晓敏⁴

(1. 国家电网公司 交流建设分公司, 北京 100052; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210008;
3. 江苏省送变电有限公司, 江苏 南京 210037; 4. 太原重工股份有限公司, 山西 太原 030024)

摘要: 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)运输专用机具是为安全、可靠、高效地完成苏通 GIL 综合管廊工程 GIL 单元的运输任务而研制的专用机具, 其中驱动与制动系统设计是整机设计的中中之重, 二者的稳定性与可靠性设计将直接决定整机研发的成败。通过对驱动系统驱动电机选择、驱动轮设置、驱动电机控制, 对制动系统电制动方式选择、机械制动器设计、机械制动器控制的研究, 明确了设计原理及技术路线, 为苏通 GIL 运输专用机具的研制扫清了障碍, 指明了方向。

关键词: GIL 运输专用机具; 驱动系统; 制动系统; 变频器

中图分类号: TM7 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2019)04-0196-05

Research on Driving and Braking System of Sutong Special Transportation for GIL and Its Design

MAO Jibing¹, HUANG Zhigao², YU Yuezhong², LI Gang³, ZHANG Ning¹, YUAN Jian³, HAO Jianguang⁴, CHEN Xiaomin⁴

(1. Engineering management department, State Grid Co., Ltd., Beijing 100052, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

3. Jiangsu Diversion Co., Ltd., Naning 210037, China; 4. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: The gas insulated metal closed transmission line to ensure the safety, reliability and high efficiency of the GIL unit in the Sutong GIL comprehensive pipe corridor project. The design of the driving and braking system is of the most importance of the whole machine design. The success or failure of the research and development mainly depends on its stability and reliability. Through researching on the selection of the braking mode and the design and control of the mechanical brake, the design principle and the technical route of the brake system are clarified by the choice of driving motor, the setting of driving wheel and the control of the motor, thus clearing away the obstacles and pointing out the direction of the research and development of the special equipment for the Sutong GIL transportation.

Keywords: GIL transportation special equipment; driving system; braking system; inverter

0 引言

苏通 GIL 运输专用机具是一种轮轨式特种运输机具, 其研制目的是为了安全、可靠、高效地完成苏通 GIL 综合管廊工程 GIL 设备在管廊内的运输与预就位任务。

苏通 GIL 综合管廊工程是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、技术水平最高的超长距离 GIL 创新工程。工程建成后, 世界上首个特高压交流环网, 贯穿皖、浙、苏、沪负荷中心的华东特高压受端环网将合环运行。工程位于苏通大桥上游 1 km 处, 起于南岸苏州引接站, 止于北岸南通引接站, 是目前国内埋深最深、水土压力最高的隧道工程。工程运用世界上最先进的 GIL 输电技术, 其具有输电容量大、损耗小、运行可靠性高等显著优点。GIL 管线单相长度达 5.8 km, 6 相总长约 35 km, 其电压等级、输电容量、输送距离均为世界之最, 国内外尚无可借鉴的成熟

产品。根据工程设计要求, 在工程建设期间需将约 2000 段各类 GIL 单元设备分别由南岸苏州引接站、北岸南通引接站运输至管廊内部并预就位。GIL 单元设备长约 18 m, 最大单体质量达 5.1 t, 三相运输单元最大质量 13 t, 运输任务艰巨。为实现管廊综合利用最大化, 管廊内设计预留的 GIL 设备运输空间极为有限。为适应长江沉积砂层的地质特点, 管廊呈现多处变坡与转弯, 最大坡度高达 5%。作为世界上最先进的 GIL 输电技术, 保证 GIL 运输与预就位作业的安全与质量是必须考虑周全的。

为适应 GIL 综合管廊长距离、大坡度、多变径的环境特点及重负荷、高强度、精就位的施工需求, GIL 运输专用机具采用安全性最高的轮轨式技术路线, 设计长度为 22.5 m, 设计时速为 5 km/h, 采用动力锂电池供电, 不仅可以实现同时运输一回 3 相 GIL 单元, 还可以将已就位的单相 GIL 单元移出和复位。整机创新性地采用前后两个半车设计形式, 半车间采用铰接形式, 每个半车 4 组车轮设计。

1 驱动系统设计研究

1.1 驱动电机选择

由于整机采用动力锂电池供电,故采用电机驱动是较为合理的选择,这是由于选择电机驱动会使得驱动系统能量传递环节少,传递效率高。在确定电机驱动形式后随之而来的就是电动机形式选择的问题。目前工业中应用较为广泛的主要有:直流电机、永磁同步电机、异步电机。

直流电机是指将直流电能转换成机械能或将机械能转换成直流电能的旋转电机。其具有良好的起、制动能力,宜在大范围内平滑调速,在许多需要调速或快速正反向电力拖动领域得到了广泛的应用^[1]。然而由于直流电机自身构造复杂,具有电刷和机械换向器等机构,制约其瞬时过载能力;而且在长时间工作的情况下,电机的机械机构会产生损耗,必须定期进行检查维护。且直流电机体积偏大,对环境要求较高,坚固性较差。此外直流电机运转时的电刷火花会使转子发热,浪费能量,散热困难,还会造成高频电磁干扰,影响整机性能。目前已经被逐步替代。

永磁同步电机是由永磁体作为转子,三相绕组作为定子的一种旋转电机。由于其转子是永磁体,减少了励磁所带来的损耗,定子通过交流电产生转矩,所以冷却相对容易。由于这类电机不需要安装电刷和机械换向结构,工作时不会产生换向火花,运行安全可靠、维修方便,能量利用率高^[3],是理论上的最优选择,但是由于受到永磁体材料本身限制,在高温、震动和过流的条件下,转子的永磁体会产生退磁现象,所以在相对复杂的环境条件下,永磁同步电机容易发生损坏。所以永磁同步电机并不是最优的选择。

异步电机又称为感应电机,是由气隙旋转磁场与转子绕组感应电流相互作用产生电磁转矩,从而实现电能转换为机械能的一种交流电机。是目前工业中应用最为广泛的一类电机^[1]。由于其定、转子间没有相互接触的机械部件,所以其结构简单,运行极为可靠耐用,维护非常简单方便。与同功率的直流电机相比体积小、质量轻。采用矢量控制技术,可以获得与直流电机相媲美的可控性和更宽的调速范围,故是苏通 GIL 运输专用机具驱动系统的最优选择。

1.2 驱动轮设置

根据苏通 GIL 运输专用机器的整体设计,整机共设计有 8 个车轮,每个半车各 4 个。如图 1 所示。

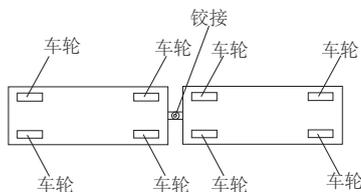


图 1 GIL 运输专用机具车轮分布示意

由于电机的驱动力是通过驱动轮踏面与轨道间的粘着摩擦传递的,驱动轮数量过少,会造成驱动轮打滑,从而对整机产生安全隐患。整机启动时驱动轮不打滑,其数量需满足式(1)要求^[2]。

$$n \geq K_0 \times \frac{a+g \times \omega + g \times \alpha}{\mu_0} \times n_0 \quad (1)$$

式中: n 为驱动轮数量; K_0 为粘着摩擦安全系数; a 为平均起动加速度,单位为 m/s^2 ; g 为重力加速度,单位为 m/s^2 ; ω 为静阻力系数; α 为最大坡度; μ_0 为粘着摩擦系数; n_0 为车轮总数量。

对于苏通 GIL 运输专用机具,粘着摩擦安全系数 $K_0 = 1.2$;平均起动加速度 $a = 0.1 \text{ m/s}^2$;静阻力系数 $\omega = 0.0095$;最大坡度 $\alpha = 5\%$;粘着摩擦系数 $\mu_0 = 1.2$;车轮总数量 $n_0 = 8$;重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。代入式(1)得出驱动轮数量 $n \geq 5.23$,取整即驱动轮数量不少于 6 个,综合考虑整机受力均布以及系统冗余能力,驱动轮数量设计为 8 个,即为全轮驱动。

1.3 驱动电机控制

由于异步电机的动态数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。对异步电机的控制来说也是较为复杂。目前最为先进的控制方式是将异步电机的定子电流矢量分解为产生磁场的电流分量(励磁电流)和产生转矩的电流分量(转矩电流)分别加以控制,并同时控制两分量件的幅值和相位,既控制定子电流矢量,也成为矢量控制。通过矢量控制将磁链与转矩解耦,有利于分别设计两者的调节器,以实现异步电机的高性能调速。这样就可将一台异步电机等效为直流电机来控制,因此获得与直流调速系统同样的静、动态性能。这一过程一般是由变频器来完成的,其简化原理图如图 2 所示,其中: G 为动力电池, V 为变频器, M 为电机。

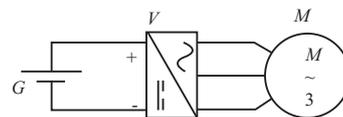


图 2 驱动系统简化原理图

在此系统中,当电机处于电动运转状态时,能量从蓄电池经由变频器传递至电机,转化为机械能驱动负载(GIL 运输专用机具),因此负载具有动能(加速、移动)或势能(上坡)。当负载释放动能(减速、停止)或势能(下坡)寻求改变运动状态时,机械能将转化为电能,能量从电机经变频器传递至蓄电池,转换为化学能储存在蓄电池中,实现系统能量回收。系统能力传递过程如图 3 所示。

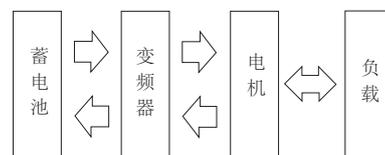


图 3 系统能量传递示意图

对于苏通 GIL 运输专用机具来说,虽然其采用前后半车设计,但由于其前后半车以铰形式连接,且其一直在轨道上行走,所以其驱动系统可以认为是一个刚性整体结构。一般情况下,整机在轨道上行走时,要求所有车轮转速一致,每个驱动轮的驱动力经由刚性车架整体传递至整机。理论上,每个驱动电机的输出转矩应该一致,但由于受机具载荷分布不均、轨道转弯与铺设偏差、加工误差等因素影响,实际行走过程中,每台电机的转矩不可能完全一致,并且每台电机将会存在一定转矩波动。这就要求每台电机在保证转速的同时需要快速响应其实际转矩的变化,因此这就需要对每台电机进行独立的矢量控制,即每台电机需要由一台独立的变频器进行控制。

在工程实践中,为了保证整机的平稳运行,防止在行走过程中因某个电机单独长时间过载,所以对每个电机设置转矩保护,限制其实际输出转矩。由于 GIL 运输专用机具行走机构属于大惯性、重负载起动,所以在行走机构起、制动过程中对单电机的转矩保护值会略大一些,一般为额定转矩的 1.8~2.4 倍。在其平稳运行时由于整机惯性功率消失,整机需求转矩会小于起、制动过程,所以其转矩保护值会略小一些,一般为额定转矩的 1~1.6 倍。

根据苏通 GIL 运输专用机具整机设计,驱动系统分为完全相同的前、后半车子系统。前、后半车各设有 1 个主控制器,2 个控制器通过独立的高速 CAN 总线网络连通,进行数据交互与协调控制。每个半车驱动子系统的 4 台变频器通过独立 CAN 总线网络通讯分别与各自半车的主控制器连通,由半车主控制器协调控制驱动系统,驱动系统半车设计方案如图 4 所示。

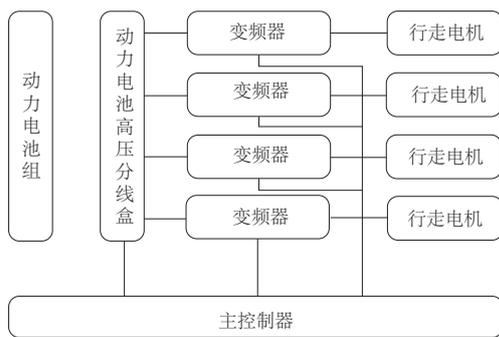


图 4 半车驱动系统设计方案图

2 制动系统设计研究

2.1 电制动方式选择

由于整机采用电机驱动,在设计制动系统时可充分利用电机的电制动原理。基于苏通 GIL 运输专用机具驱动系统采用了矢量控制变频器,所以适用的电制动方式主要有:直流制动、能耗制动、再生制动 3 种方式。

直流制动在制动过程,变频器向电机定子加载直流电压,此时变频器的输出频率为 0,这时定子产生静止的恒定磁场,转动着的转子切割此磁场产生制动力矩,迫使电机转子较快地停止,在这一过程电机存储的动能转换成电能以热损耗的形式耗于电机的转子电路中。鉴于苏通

GIL 运输专用机具大惯性、重负载的特点,如果适用这种制动方式,电机转子会严重发热,甚至烧毁转子,所以这种方式不适用。

能耗制动是各种电机制动中应用最为广泛的。其与再生制动均是利用电机-发电机可逆原理来实现的。在制动过程中,当电机从高速到低速(零速)过程中,电气的频率变化很快,但由于电机的转子与负载(GIL 运输专用机具)相连,有较大的机械惯性,不可能很快地停止,这样就会在电机内部产生一个反电势,使得电机处于发电状态。其产生反向转矩与原电动状态转矩相反,而使电机具有较强的制动力矩,迫使转子较快停下来。在此过程中电机处于发电状态,将机械能转化为电能。

能耗制动方式中,产生的电能会使得变频器主电路电容两端电压升高。当电压超过设定的上限值电压时,制动回路导通,制动电阻流过电源,从而将动能变热能消耗,电容两端电压随之下降,待电压降至设定下限值时即关断制动回路。

再生制动方式中产生的电能将由动力电池或有源逆变装置吸收,转化为化学能存储在动力电池中或与电网同频率、同相位的交流电回馈至电网^[4]。

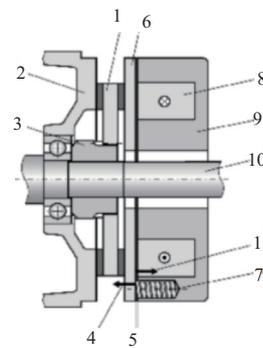
由于苏通 GIL 运输专用采用动力锂电池供电,电机制动过程的能量是可以由动力电池吸收,提高能量的利用率,所以再生制动方式是首选方案。但动力电池的容量并不是无限的,且动力电池不能过充电。考虑极端情况下,动力电池无法吸收制动能量时,能耗制动应当作为再生制动的一种补充方式。

机具在制动时,首先采取电制动措施,将车速降低至额定车速的 6%~10%。

2.2 机械制动器研究

电制动减速过程结束后即可采用常规的机械制动器将电机抱死,使其停止。当车辆停止后,电机不会再提供任何转矩,此时整机需要依靠机械制动器抱死车轮,达到驻车目的。所以制动系统采用的制动器是常闭式制动器。

为了适应苏通 GIL 运输专用机具车架的有限空间,机械制动器采用了可以与电机紧密结合的电磁盘式制动器,直接安装在电机尾部。其轴向尺寸短小、结构紧凑坚固。制动器通电时依靠电磁力释放,断电时依靠弹簧力制动。如图 5 所示。



1—制动盘;2—制动后端盖;3—花键套;4—弹簧力;
5—制动间隙;6—压力盘;7—制动弹簧;8—制动线圈;
9—电磁铁芯(制动线圈载体);10—电机轴;11—电磁吸力

图 5 制动器内部结构及制动原理示意图

电机轴通过花键套与制动盘相连,当电磁铁芯失磁时,制动盘靠制动弹簧的压力将压力盘与制动盘压紧,通过摩擦力限制电机转动。当制动线圈通电时,电磁吸力克服弹簧弹力,使得压力盘被吸回与电磁铁芯接触,这时制动盘可以随电轴自由转动。制动器制动力的的大小可由制动弹簧数量与类型确定。

为了确保电机启动时的快速响应,要求制动器具有极短的反应时间,这样既可以减少电机启动过程的能量损失,又降低了电机启动时制动器的摩擦损耗。为实现这一目的,制动器采用了独特的双线圈形式,其原理如图 6 所示。其中①为制动器,②为制动器控制单元,BS 为加速线圈,TS 为部分线圈组,BS+TS=保持线圈。

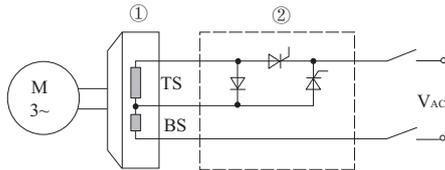


图 6 制动器电路控制原理图

这种线圈设计保证了制动器在通电后先接通加速线圈,产生一个强大的电磁吸力使得制动器快速响应,控制系统将自动切换成保持线圈(即整个线圈),使得保持电流很小,此时制动电磁铁芯的电磁力只需确保压力盘可靠安全地维持释放打开状态即可。这种设计使得制动器发热降至最小,其开启过程线圈电流曲线如图 7 所示。其中①为加速阶段,②为保持阶段, I_B 为加速电流, I_H 为保持电流。

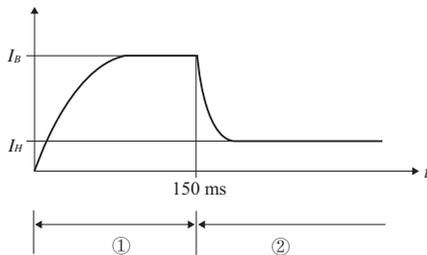


图 7 制动器线圈开启过程电流示意图

在制动器选型时,需要的制动力矩通常是应用工况需要的减速度来计算选择的。一般情况下,为了确保制动安全,制动力矩必须>2 倍的最大静态负载力矩。苏通 GIL 运输专用机具工作的最不利工况是在 5%坡道上运输 13t 的三相 GIL 单元,此时单电机的静态负载转矩约为 39 N·m,选取的制动器额定制动转矩为 110 N·m,是静态负载转矩的 2.8 倍,满足安全要求。

制动器选型时另一个主要因素是要考虑制动器机械使用寿命。制动器机械使用寿命是用制动器检查周期内许用制动次数来考量的,是由每次制动的许用制动功和到检查周期内制动器允许的总制动功来共同确定的,按照式(2)进行计算:

$$NB = \frac{W_{\text{insp}}}{W_1} \quad (2)$$

式中: NB 为制动器检查周期内许用制动次数; W_{insp} 为制

器制动器检查周期内许用总制动功,单位为 J; W_1 为制动器每次需要的制动功,单位为 J。

制动器每次需要的制动功按照式(3)计算确定:

$$W_1 = \frac{J_{\text{tot}} \times n^2 \times M_B}{182.4 \times (M_B + M_L)} \quad (3)$$

式中: W_1 为每次制动需要的制动功,单位为 J; J_{tot} 为折算到电机轴上的总转动惯量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; n 为电机转速,单位为 r/min ; M_B 为制动力矩,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$; M_L 为负载力矩,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

对于苏通 GIL 运输专用机具,若在 10%额定转速下进行机械制动,此时电机转速为 147 r/min ;折算到电机轴上的总转动惯量约为 0.104 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;制动器制动力矩为 110 $\text{N} \cdot \text{m}$,负载力矩约为 39 $\text{N} \cdot \text{m}$;代入式(3)得出每次制动需要的制动功约为 9.1 J。制动器检查周期内许用总制动功设计值为 8×10^7 J;代入式(2)得出制动器检查周期内许用制动次数为 8791208 次。理论上可以认为在机具全生命周期内机械制动器是足够安全可靠的。但在紧急制动时摩擦盘的磨损会加剧,在某些恶劣的情况下,其磨损量是正常的 100 倍。所以频繁使用紧急制动会造成制动器磨损加剧。

2.3 机械制动器控制

由于整机采用前、后半车设计,制动系统也分为前、后半车制动力系统。每个半车子系统中制动器都受控于半车主控制器,控制电源由本车半车提供。考虑极端情况时,整机正常运行,半车主控制器故障或半车突然失电。为了整机安全运行,故障半车制动器依然需要释放,此时,故障半车制动器应受控于正常半车。

依据上述控制思路设计的制动控制系统简易原理图如图 8 所示。

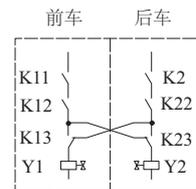


图 8 制动系统控制简易原理图

从图中可看出当主控制器检测到电源系统、电机控制器、电机状态均正常时即控制继电器 K13、K23 吸合。此时前车行走机构制动器和后车行走制动器分别受控于前车主控制器和后车主控制器。

正常情况下,当主控制器检测到电机建立足够力矩时即控制继电器 K11、K12、K21、K22 吸合,制动器打开。当主控制器检测到电机接近停止时,K11、K12、K21、K22 断开,制动器抱死。两个制动器控制继电器设计是为了确保在继电器无法复位的极端情况下,能切断制动器电源,保证制动器可以失电制动。

由于整机行走机构是 8 个车轮同时运转,所以当半车出现失电、电机控制器故障等严重故障时,K13 或 K23 会迅速断开,故障半车的制动器会受控于正常半车,防止车轮出现单独抱死。

3 结语

通过对 GIL 运输专用机具驱动系统与制动系统设计的详细研究,确定了驱动系统为全轮驱动,采用三相异步电机驱动、矢量变频调速控制的技术路线;确定了制动系统以再生制动为主、能耗制动为辅的电制动方式,采用常闭式、双线圈、电磁盘式机械制动器的技术路线。同时明确了驱动系统的电机控制策略与制动器控制原理,为苏通 GIL 运输专用机具的研制奠定了坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 张志文,王金诺,程文明,等. 起重机设计手册[M]. 北京:中国铁道出版社,2013.
- [3] 崔胜民. 新能源汽车技术解析[M]. 北京:化学工业出版社,2016.
- [4] 蒋志坚,郭百泉. 电机再生电能回收技术研究[J]. 北京建筑工程学院报,2013,29(3):40-44.

收稿日期:2019-04-29

(上接第 172 页)

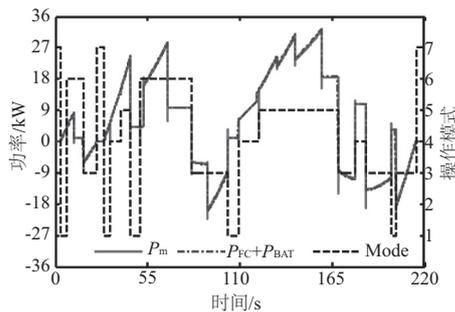


图 10 自定义工况混合动力系统功率验证

4 结语

1) 设计的基于状态机能量管理策略能够实现混合动力系统在汽车不同运行工况下驱动和制动的可持续性,使得燃料电池工作在较为高效、稳定的区域。

2) 在 ECE15 和自定义工况下运行的仿真结果中可以看出,该自适应反演滑模控制方法对燃料电池电流的追踪响应速度快,追踪精度高,抗干扰能力强,且混合动力系统在不同工况下燃料电池功率输出稳定、切换平滑,避免了燃料电池输出功率的频繁变动。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 中国制造 2025[R]. 中国制造,2015.
- [2] 李建秋,方川,徐梁飞. 燃料电池汽车研究现状及发展[J]. 汽车安全与节能学报,2014,5(1):17-29.
- [3] 向培勇. 燃料电池蓄电池混合动力系统能量管理策略研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2014.
- [4] 曾卫. 燃料电池电动汽车能量管理系统优化控制与动态仿真研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.
- [5] P Thounthong, S Rael, B Davat. Control algorithm of fuel cell and batteries for distributed generation system[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(1): 148-155.
- [6] 刘涛. 空冷燃料电池/锂电池混合动力系统设计[D]. 成都:西南交通大学,2017.

- [7] KS Jeong, WY Lee, CS Kim. Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics[J]. Journal of Power Sources, 2005, 145: 319-326.
- [8] Q Li, HQ Yang, Y Han, et al. A state machine strategy based on droop control for an energy management system of PEMFC-battery-supercapacitor hybrid tramway[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(36): 16148-16159.
- [9] SN Motapon, LA Dessaint, K Al-Haddad. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(3): 1320-1334.
- [10] CH Zheng, GQ Xu, YI Park, et al. Prolonging fuel cell stack lifetime based on Pontryagin's Minimum Principle in fuel cell hybrid vehicles and its economic influence evaluation[J]. Journal of Power Sources. 2014, 248: 533-544.
- [11] FBarbir. PEM Fuel Cells: theory and practice[J]. Elsevier Academic Press, 2005, 36(17): 451-456.
- [12] O Tremblay, LA Dessaint, AI Dekkiche. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[J]. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007: 284-289.
- [13] YX Wang, K O, Y Kim. Power source protection method for hybrid polymer electrolyte membrane fuel cell/lithium-ion battery system[J]. Renewable Energy, 2017, 111: 381-391.
- [14] D Grenier, LA Dessaint, O Akhrif. Experimental nonlinear torque control of a permanent magnet synchronous motor using saliency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(5): 660-687.
- [15] Q ning, D xuan, Y kim. Modeling and control strategy development for fuel cell hybrid vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(2): 229-238.
- [16] 宋珂,章桐. 纯电动和串联式混合动力汽车电机传动系参数匹配[J]. 汽车工程, 2013(6): 559-564.
- [17] P Atwood, S Gurski, DJ Nelson. Degree of hybridization modeling of a hydrogen fuel cell PNGV-class vehicle[J]. Neuroimage, 2002(2): 436-443.

收稿日期:2018-03-12