

基于超级电容储能技术的CRH380BG动车组自力行走技术研究

李宇昕, 金 钧

(大连交通大学电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 随着我国高铁运营里程的不断增长, 发生接触网失电的概率也直线上升。为了解决接触网失电导致动车组紧急停车, 严重影响行车的时效性与安全性的问题, 提出了一种基于超级电容储能的解决方案, 旨在实现 CRH380BG 动车组的自力行走功能, 即在接触网断电情形下, 动车组依靠自身超级电容所储能量, 以 40 km/h 的速度行走 60 km 的距离。首先对 CRH380BG 动车组自力行走过程所需能耗及储能系统容量进行了计算; 另外在超级电容储能控制策略方面, 采用了滑模电压控制和充放电自切换控制相结合的控制方法, 增加了系统鲁棒性; 最后在 MATLAB/Simulink 中搭建了动车组牵引传动模型及超级电容储能模型, 验证了设计的合理性及有效性。

关键词: CRH380BG 动车组; 自力行走; 超级电容储能; 滑模控制

Research on self driving of CRH380BG EMU based on super capacitor energy storage technology

LI Yuxin, JIN Jun

(School of Electrical Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021, China)

Abstract: With the continuous growth of China's high-speed railway operation mileage, the probability of OCS power loss is also rising. In order to solve the problem of emergency stop of EMU caused by power loss of OCS, which seriously affects the timeliness and safety of train operation. A solution based on super capacitor energy storage is proposed, which aims to realize the self walking function of CRH380BG EMU, that is, in the case of power failure of OCS, the EMU relies on the energy stored by its own super capacitor to walk 60 km at the speed of 40 km / h. Firstly, the energy consumption and the capacity of the energy storage system of CRH380BG EMU in the process of self driving are calculated; In addition, in the aspect of super capacitor energy storage control strategy, a control method combining sliding mode voltage control and charge discharge self switching control is adopted to increase the robustness of the system; Finally, the traction transmission model and super capacitor energy storage model of EMU are built in MATLAB / Simulink to verify the rationality and effectiveness of the design.

Key words: CRH 380BG EMU; Walking independently; super capacitor energy storage; sliding mode control

0 引言

当高速铁路线路由于意外情况导致接触网失电时, 动车组需停车等待救援。在线路上停车等

待严重影响运营秩序, 同时停车等待救援时间太长也会导致车厢内高温、缺氧等客室环境质量下降问题, 影响乘客的旅行体验, 动车组自力行走

技术能有效解决上述问题。

动车组自力行走技术在许多发达国家已得到应用与推广,但在我国尚处于初运行阶段。文献[1]中JR东日本铁路公司使用氢燃料电池作为动力源,实现动车组的无网运行,但氢燃料电池动态响应速度远低于超级电容,且使用安全性有待验证。文献[2]中京张智能高铁采用钛酸锂电池作为动力源以实现自力行走功能,但蓄电池使用寿命仅不到超级电容的1/10,成本却只是其1/3左右。文献[3]中使用内燃动力包作为动力源,但相对于超级电容,其具有污染大、噪声大和维护复杂的缺点。

本研究将具有更高转化效率、循环寿命和性价比的超级电容储能技术应用到CRH380BG动车组上,对该动车组自力行走过程的牵引能耗和超级电容串并联个数进行了计算,建立了动车组牵引传动模型及超级电容储能模型,通过MATLAB/Simulink仿真验证了自力行走技术的可行性。

1 CRH380BG动车组

1.1 动车组自力行走功能拓扑设计

图1、图2分别为车载超级电容储能的CRH380BG动车组正常运行和自力行走的功能拓扑图。

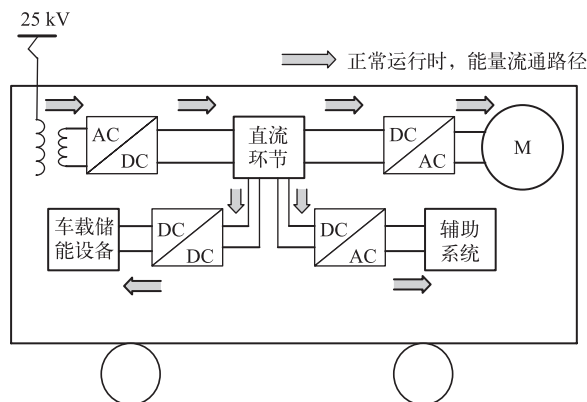


图1 正常运行工况拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of normal operating conditions

牵引工况时,能量传递过程为:受电弓从牵引网获得25 kV单相正弦交流电,通过车载变压

器降压后,由网侧变流器进行交-直变换输出稳定的直流电压,最后由电动机侧变流器进行直-交变换,输出三相正弦交流电驱动牵引电动机运行,中间直流电压通过双向DC/DC变换器给超级电容充电。

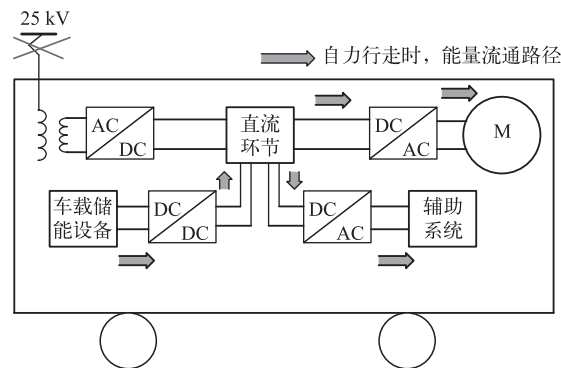


图2 自力行走工况拓扑图

Fig. 2 Topological diagram of self-propelled walking condition

动车组进行自力行走时,能量传递过程为:超级电容释放能量,通过双向DC/DC变换器给辅助供电单元和牵引电动机供电,实现动车组应急通风及应急照明系统的正常工作及动车组的自力行走。图3为动车组自力行走时的操作流程。

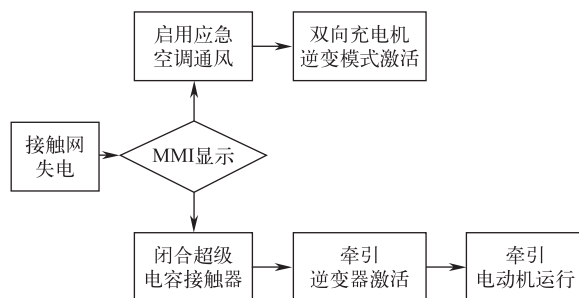


图3 操作流程

Fig. 3 Operation flow chart

1.2 牵引能耗计算

当今国内外关于动车组能耗计算的方法主要为基于运动做功和基于经验公式的测算方法。文献[4]建立了列车运行过程中牵引力的做功模型,认为停站次数主要影响列车在加速段的牵引能耗;文献[5]按照动车组运行过程的起停、运行等环节,提出了动车组分段能耗计算方法;文献[6]提出了基于运动做功的列车牵引能耗测算

方法,在考虑机械效率因素下,构建了高速铁路全天开行的列车牵引能耗测算模型。

本研究在基于运动做功的列车牵引能耗测算方法的基础上,构建了动车组牵引能耗的测算模型^[7]。

$$E = \frac{\delta M}{\eta} \left[\frac{1}{2} v_m^2 + (B_0 + B_1 v_t + B_2 v_t^2) L + g \Delta h \right] \quad (1)$$

式中, E 为动车组的总牵引能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; M 为动车组的总重量, t ; η 为动车组的机械效率; δ 为功能转换系数, 取 $1 \text{ kW} \cdot \text{h} / 3\,600 \text{ J}$; v_m 为动车组每次加速到的速度目标值, km/h ; v_t 为动车组全程的平均技术速度, km/h ; L 为起点站与终点站间的距离, km ; Δh 为起点站与终点站的高程差; B_0 、 B_1 和 B_2 为动车组在固定载荷下的经验系数, 计算公式为

$$\begin{cases} B_0 = ag \\ B_1 = 3.6bg \\ B_2 = 12.96cg \end{cases} \quad (2)$$

式中, g 为重力加速度, 取值 9.8 m/s^2 ; a 、 b 和 c 为动车组单位基本阻力计算系数, 由动车组运行过程中单位重量受到的平均阻力计算公式决定, 计算公式为

$$\omega_0 = a + bv_t + cv_t^2 \quad (3)$$

式中, ω_0 为动车组运行基本阻力, N/t ; v_t 为速度, km/h ; a 、 b 和 c 为大于零的系数常量, 由车型决定。

对于 CRH380BG 动车组, 选取的主要参数为: $a=3.1$; $b=0.036\,22$; $c=0.001\,099$; 速度 = 40 km/h ; $L=60 \text{ km}$; $M=488$; 将计算参数代入式 (1) 中, 得该动车组在自力行走过程中的牵引能耗为 $784 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

2 车载超级电容储能系统

2.1 超级电容计算

三种储能方式比较见表 1。

由表 1 的比较分析, 可以看到, 超级电容具有更高的转化效率、更长的循环寿命和更高的性价比, 故选超级电容作为储能介质。

表 1 三种不同类型储能方式之间的比较

Tab. 1 Comparison of three different types of energy storage methods

储能类型	蓄电池	飞轮	超级电容
循环寿命	几千次	50 万次	40 ~ 50 万次
效率	90% 左右	85% 左右	95% 左右
功率密度	百	千	千

超级电容储能电源的单体电容串联数取决于车辆各系统最高工作电压 $U_{\max}$, 若确定了车辆最高工作电压 $U_{\max}$, 就可以确定超级电容的串联数 m_c , 三者之间关系为

$$U_{\max} = m_c U_c \quad (4)$$

超级电容电源的电容并联数 m_b , 电容并联数 m_b 与超级电容电源最大储能量 $E_{\max}$ 、最大充放电电流 I 、超级电容组总容量 C_z 和超级电容储能电源可用储能量 E 有着直接的关系

$$C_z = C_c / (m_b m_c) \quad (5)$$

式中, C_c 为单体超级电容容量。

超级电容储能电源的最大充放电电流 I 计算公式为

$$I = I_{\max} m_b \quad (6)$$

式中, $I_{\max}$ 为单体超级电容最大充电电流。

超级电容电源最大储能量 $E_{\max}$ 计算公式为

$$E_{\max} = \frac{1}{2} U_{\max} C_z \quad (7)$$

超级电容电源最大储能量 $E_{\max}$ 体现了超级电容储能电源所能存储的最大能量, 但是在超级电容的放电过程中, 随着储能量的减少, 储能电源系统的电压 U 降低, 而动车组车载电子系统的工作电压存在最低值, 储能电源系统的电压 U 不能低于最低值, 否则车载系统无法正常工作。

$$E = E_{\max} - E_{\min} = \frac{1}{2} C_z (U_{\max}^2 - U_{\min}^2) \quad (8)$$

式中, $U_{\min}$ 为最低供电电压; $E_{\min}$ 为车辆最低电压供电时, 超级电容电源所储存的电能。

CRH380BG 正常运行时, 中间直流环节的工作电压为 $2\,700 \sim 3\,600 \text{ V}$; 自力行走时最低电压有所下降, 中间直流环节的工作电压为 $2\,200 \sim 3\,500 \text{ V}$ 。考虑一定裕量, 串联数为 1 285 个, 并

联5组, 超级电容总电量为920 kW·h。

2.2 储能系统控制策略

双向DC/DC变换器近年来得到了快速的发展及应用。双向DC/DC变换器的控制方法有了很大的发展。数字PID控制法是迄今应用最为广泛的控制方法^[9], 但负载或输入电压出现扰动时, 输出电压存在动态响应速度慢的现象。近年来, 模糊控制、鲁棒控制和神经网络控制方法相继出现^[10-12], 使DC/DC变换器的动态性能有了较大的提升。

2.2.1 滑模电压控制器设计

为了维持中间环节直流电压稳定, 本研究采用了滑模电压控制器, 滑模控制原理图如图4所示。

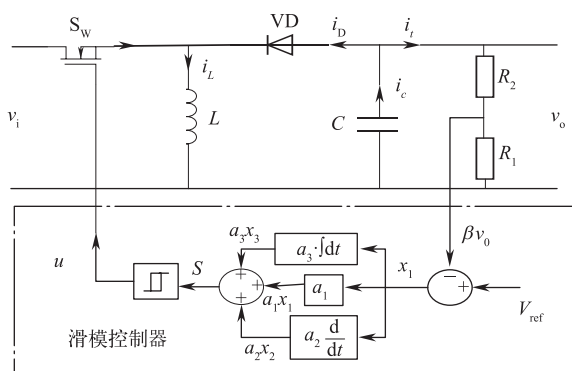


图4 滑模控制变换器原理图

Fig. 4 Schematic diagram of sliding mode control converter

图4中, i_C 、 i_L 和 i_r 分别为电容、电感和负载的瞬时电流; V_{ref} 、 v_i 和 βv_o 分别为参考电压、瞬时输入电压和瞬时输出电压; β 为反馈网络的比例。

升降压变换器的状态空间方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (9)$$

式中, C 、 L 和 r_L 分别为变换器的电容、电感和瞬时负载电阻; x_1 、 x_2 和 x_3 分别为电压误差、电压误差变化率与电压误差的积分。

使用常规的滑模控制律, 采用如下开关函数

$$u = \begin{cases} 1, S > 0 \\ 0, S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, u 为功率开关 S_w 的开关状态; S 为瞬时状态轨迹。

S 的计算公式为

$$S = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 = J^T x \quad (11)$$

式中, $J = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^T$; α_1 、 α_2 和 α_3 为滑动系数。

为保证滑模状态的存在, 由李雅普诺夫可达性条件得

$$\lim_{S \rightarrow 0} S \cdot \dot{S} < 0 \quad (12)$$

滑动系数必须满足

$$0 < \beta L \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{r_L C} \right) i_C + LC \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (v_{ref} - \beta v_o) < \beta v_o \quad (13)$$

2.2.2 储能装置工作状态控制系统

在储能装置工作状态选择方面, 本研究设计了充放电自切换策略, 其工作状态选择条件见表2。表2中 U_j 表示牵引网有无电能供应, U_j 为1时, 牵引网正常供电; 为0时, 说明牵引网失电。SOC为储能装置荷电状态, 超级电容在荷电状态处于0.25~0.95时充放电效率最高。因此, 将0.9作为SOC上限值, 0.2作为SOC下限值。

当接触网正常供电, 且 $SOC \leq 0.9$ 时, 双向DC/DC变换器处于Buck模式, 储能系统工作在充电状态。当接触网失电, 且 $SOC \leq 0.2$ 时, 双向DC/DC变换器处于Boost模式, 储能系统工作在放电状态。

表2 储能装置工作状态选择

Tab. 2 Selection of working state of energy storage device

工作状态	选择条件
充电状态	$SOC \leq 0.9$ 且 $U_j=1$
备用状态	$SOC > 0.9$ 或 $SOC < 0.2$
放电状态	$SOC \geq 0.2$ 且 $U_j=0$

3 CRH380BG系统建模与仿真

动车组网侧变流器采用瞬态直接电流控制, 电动机侧采用矢量控制方式。储能单元采用滑模电压控制。0~4 s电源正常供电, 4 s时电源断

电。电压波形如图5所示。

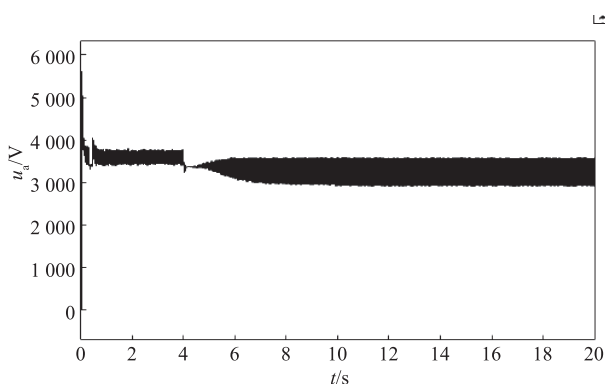


图5 中间直流环节电压波形

Fig. 5 Voltage waveform of intermediate DC link

由图5可知，0~4 s接触网供电，动车组处于正常工作状态，中间直流电压为3 400~3 600 V； $t=4$ s后接触网失电，超级电容储能单元供电，中间直流电压为3 000~3 500 V，符合动车组参数要求。

动车组速度波形如图6所示。

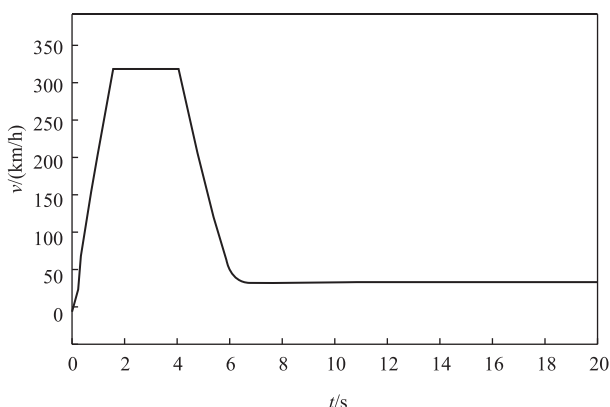


图6 动车组速度波形

Fig. 6 EMU speed waveform

由图6可知，动车组在0~1.5 s处于加速阶段，加速至320 km/h后进入匀速运行阶段；4 s时接触网失电，动车开始减速，超级电容储能系统开始给牵引电动机供电；减速至40 km/h后，动车组依靠超级电容所储能量，在线路上以此速度匀速运行。

图7为CRH380BG动车组自力行走过程中某5 km距离内的超级电容SOC曲线。1~2 km过程中，线路坡度为24‰，属于动车组运行途中经

过的特别大坡度区间，故能量下降幅度较大；2~3 km过程中，线路坡度为15‰，能量下降幅度次之；其余阶段坡度均为零。整个阶段总计能耗为70.2 kW·h，符合设计要求。

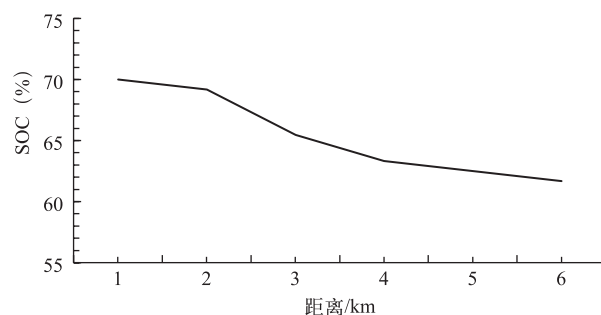


图7 运行阶段 SOC 波形

Fig. 7 SOC waveform in operation phase

4 结束语

本文以接触网失电情形下的CRH380BG动车组为对象，提出了一种基于超级电容储能技术的解决方案，基于选定的列车和线路数据，计算出了动车组自力行走过程所需能量及超级电容储能装置的整体配置。通过仿真分析，验证了动车组自力行走功能的合理性和有效性，为以后高速动车组自力行走功能工程化打下了基础。

参考文献

- [1] 飯田隆幸，刘丽杰．燃料电池混合动力试验动车组的开发[J]．国外铁道机车与动车，2021(5)：1-4.
- [2] 孔羽姝，于明远．京张高铁智能型动车组应急自走行系统组成及功能分析[J]．城市轨道交通研究，2020，23(2)：71-74.
- [3] 李文勇，曹晓龙，刘盛强，等．马来西亚米轨动车组内燃电传动动力包设计[J]．机车电传动，2020(3)：42-46.
- [4] IGNACIO GONZÁLEZ-FRANCO, ALBERTO GARCIA-ÁLVAREZ. Can high-speed trains run faster and reduce energy consumption?[J]. Procedia - Social & Behavioral Sciences, 2012, 48(1): 827-837.

- [5] 薛艳冰, 马大伟, 王烈. 列车牵引能耗计算方法[J]. 中国铁道科学, 2007(3): 84-87.
- [6] 江冰. 新一代高速动车组列车牵引力学计算分析[J]. 内燃机车, 2011(3): 27-28, 38, 56.
- [7] 朱颖, 吕希奎, 等. 动车组牵引计算与仿真系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [8] 孙帮成, 等. CRH380BL型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [9] 杨惠, 孙向东, 钟彦儒, 等. 基于双向DC-DC变换器的超级电容器储能系统研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 456-460.
- [10] 刘恩杰, 孙运全, 杨晨. 基于模糊PI的复合电源双向DC-DC变换器研究[J]. 信息技术, 2018(3): 131-134, 139.
- [11] 张驰, 李忠建. 基于神经网络PID的DC-DC变换器设计与仿真[J]. 电子世界, 2020(15): 122-125.
- [12] 窦晓波, 全相军, 陈峰, 等. 应用于超级电容双向DC/DC变换器的鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 223-231, 359.

作者简介

李宇昕(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为轨道交通电气化与自动化。

(收稿日期: 2021-10-29)