

高速磁浮列车双边串联供电牵引力特性及速度提升能力研究^{*}

汪自成

(中铁第四勘察设计院集团有限公司 电气化设计研究院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 传统的高速磁浮列车采用双边并联供电模式, 上下行线路各需要三台变流器, 这种供电方式虽然可以减小馈线电缆上的损耗, 增加供电系统的可靠性, 但产生的输出电流受变流器容量本身的限制, 从而导致牵引力和速度能力受限。为了解决上述问题, 提出了一种高速磁浮双边串联供电的牵引力及速度提升方法, 在不改变传统变流器输出能力和绝缘的情况下, 将电机首尾分别接在双边变流器上, 改变输出电压的相角, 实现磁浮列车牵引力和速度能力的提升。最后, 在 Simulink 中建立牵引供电系统模型, 验证发现双边串联供电在最高速度时的电压小于双边并联供电的电压, 其更有利于速度的提升。

关键词: 高速磁浮; 速度能力; 双边串联供电; 相角

中图分类号: TM921 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)09-0014-06

doi: 10.12177/emca.2023.109

Research on Traction Characteristics and Speed Improvement Capability of High-Speed Maglev Train with Bilateral Series Power Supply^{*}

WANG Zicheng

(Electrification Design and Research Institute, China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Traditional high-speed maglev trains adopt a bilateral parallel power supply mode, which requires three converters for each of the upstream and downstream lines. Although this power supply method can reduce losses on the feeder cables and increase the reliability of the power supply system, the output current generated is limited by the converter capacity itself, resulting in limited tractive effort and speed capability. In order to solve the above problems, a high-speed maglev bilateral series power supply method was proposed to improve traction and speed. Without changing the output capacity and insulation of the conventional converter, the motor head and tail were connected to the bilateral converter separately, and the phase angle of the output voltage was changed to achieve the traction and speed capacity enhancement of maglev trains. Finally, the traction power supply system was established in Simulink, and it was verified that the voltage of the bilateral series power supply is smaller than that of the bilateral parallel power supply at the maximum speed, which is more conducive to the speed increase.

Key words: high-speed maglev; speed capability; bilateral series power supply; phase angle

0 引言

高速磁浮列车是一种新型的非接触式地面轨

道交通运输工具, 其以 8~12 mm 的悬浮间隙运行故而取消了传统车辆中的车轮, 实现了非黏着牵引的非接触运行。因其噪声小、速度范围宽、加减速

收稿日期: 2023-03-14; 收到修改稿日期: 2023-06-08

^{*} 基金项目: 中国铁建科技重大专项(2019-A06)

作者简介: 汪自成(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高速磁浮的供电系统设计。

度快、维护费用低等优点具有广阔的应用前景^[1-2]。

目前,长定子直线同步电机实现了高速磁浮列车的驱动与悬浮,而动力主要由牵引供电系统提供,主要包括供电、变流、馈电电缆、轨旁开关等部分,该方式是高速磁浮交通技术中的一项关键技术^[3-4]。

文献[5]主要采用牵引变流器双端并联供电模式为磁悬浮列车提供牵引动力,可以减小线路损耗,提高系统可靠性;文献[6]主要研究了高速磁浮列车在双端供电模式下的牵引控制策略,并建立了该模式下的磁浮列车数学模型;文献[7]主要研究了高速磁浮长定子直线同步电机的换步方式,并分别对比了两步法和三步法对磁浮车辆牵引特性及动力学性能的影响;文献[8]主要对磁浮列车牵引供电系统进行建模与仿真,仿真模型实现了相应的控制和分段供电策略;文献[9]提出通过蓄电池与感应线圈供电相结合的方式,减少地面供电设备数量,利用多重冗余设计保证车辆供电的可靠性;文献[10]建立了双端供电模式下的磁浮列车模型,提出了相应的牵引控制策略,并比较了不同控制条件下磁浮列车的运行情况;文献[11]基于供电系统的数学模型,构建自适应观测器,推导馈线电缆电阻估计下的自适应规律,并运用于供电系统控制。

传统的高速磁浮列车采用双边并联供电模式,双边变电所通过输入变压器、整流器、逆变器和输出变压器处理后,输出三相频率、幅值和相角都可以控制的交流电向直线同步电机的长定子绕组供电。这种供电方式可以减小馈线电缆上的损耗,对系统的容量、可靠性和效率有一定提升,但会产生环流问题^[12]。由于功率器件触发会有延时并且受死区影响等因素,各逆变器输出的瞬时电压不完全一致,线路阻抗差异产生环流,环流的产生会使各变流器功率不均衡,电流波形发生畸变,从而使整个系统工作性能下降^[13]。

本文提供了一种高速磁浮交通的双边串联供电方法,主要是将长定子直线同步电机串入双边变流器中,并根据等电压分配策略,满足幅值相等、相角不同的原则,给直线同步电机的长定子绕组供电;最后通过在 Simulink 中建立长定子直线同步电机和馈线电缆模型,输入上海磁浮列车的速度曲线到并联和串联供电模式中,发现双边串

联供电在最高速度的电压小于双边并联供电的电压,且当限制相同的变流器电压时,双边串联供电的速度更高。

1 双边牵引供电方式

1.1 双边串联供电系统

高速磁浮列车的牵引供电系统主要由牵引变电所、馈线电缆、定子开关站和定子段绕组构成。为保证列车的稳定运行,一般采用双边牵引供电系统,双边串联供电系统如图 1 所示。

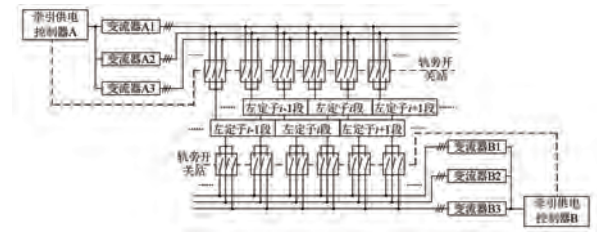


图 1 双边串联供电系统图

长定子段串联在双边变流器中间,左右两侧的变流器输出的幅值相同、相位相差 180°。将左、右变流器的馈线等效为电阻和电感参数,其值与列车运动的位置有关。以一个长定子段为单元,可得到直线同步电机在双边串联供电方式下的等效电路图,其等效电路图如图 2 所示。

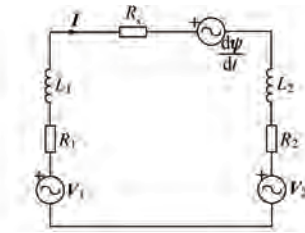


图 2 双边串联供电的等效电路图

三相静止坐标系下的电压方程为

$$\mathbf{V}_1 = (\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_2 + L_1 p + L_2 p) \mathbf{I} + p \boldsymbol{\psi} + \mathbf{V}_2 \quad (1)$$

$$\text{其中, } \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}。$$

式中: u_{a1} 、 u_{b1} 、 u_{c1} 分别为左侧变流器的三相输出电压; R_1 、 L_1 分别为左侧变流器馈线电缆等效电阻和电感; u_{a2} 、 u_{b2} 、 u_{c2} 分别为右侧变流器的三相输出电压; R_2 、 L_2 分别为右侧变流器馈线电缆等

效电阻和电感; i_a 、 i_b 、 i_c 为直线同步电机长定子绕组的三相电流; R_s 为直线同步电机长定子等效电阻; ψ_a 、 ψ_b 、 ψ_c 分别为直线同步电机的三相磁链; p 为时间的微分算子。

为了消除时变电感带来的复杂性, 将 ABC 坐标系的等效电路和微分方程转换到 d - q 坐标系, 采用幅值相等转换原理, 转换矩阵可表示为

$$T_{3s/2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ω 为定子角速度。

将式(1)乘以式(2), 可以得到双边串联供电 d - q 轴下的电压方程为

$$\begin{cases} u_{d1} = (R_1 + R_s + R_2 + L_1 p + L_d p + L_2 p) i_d - \omega L_1 i_q - \omega L_q i_q - \omega L_2 i_q + u_{d2} \\ u_{q1} = (R_1 + R_s + R_2 + L_1 p + L_q p + L_2 p) i_q + \omega L_1 i_d + \omega L_d i_d + \omega M_{sm} i_m + \omega L_2 i_d + u_{q2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{d1} 、 u_{d2} 、 u_{q1} 、 u_{q2} 分别为两侧变流器 d - q 轴的电压; i_d 、 i_q 分别为直线同步电机 d - q 轴的电流; L_d 、 L_q 分别为直线同步电机 d - q 轴的电感; M_{sm} 为定、转子间的互感; i_m 为励磁电流。

1.2 双边并联供电系统

传统的高速磁浮列车采用双边并联供电, 为了比较不同供电模式的电压电流输出, 下面将简要介绍传统的双边并联供电系统。这种方式是将双边变流器并联后连接到长定子段上, 幅值和相位都相同。以一个长定子段为单元, 可以得到直线同步电机在双边并联供电方式下的等效电路, 等效电路图如图3所示。

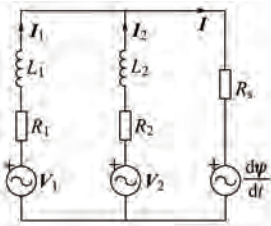


图3 双边并联供电的等效电路

三相静止坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} V_1 = V + R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} \\ V_2 = V + R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \\ V = R_s I + \frac{d\psi}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $I_1 = \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix}$; $I_2 = \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix}$; $V = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$ 。

式中: i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 分别为左侧变流器的三相输出电流; i_{a2} 、 i_{b2} 、 i_{c2} 分别为右侧变流器的三相输出电流; u_a 、 u_b 、 u_c 分别为直线同步电机长定子绕组的三相电压。

根据变换矩阵, 将式(4)乘以式(2), 可以得到双边并联供电 d - q 轴下的电压方程为

$$\begin{cases} u_{d1} = (L_1 p + L_d p + R_1 + R_s) i_{d1} + (L_d p + R_s) i_{d2} - \omega (L_1 + L_q) i_{q1} - \omega L_q i_{q2} \\ u_{q1} = (L_1 p + L_q p + R_1 + R_s) i_{q1} + (L_q p + R_s) i_{q2} + \omega (L_1 + L_d) i_{d1} + \omega L_d i_{d2} + \omega M_{sm} i_m \\ u_{d2} = (L_2 p + L_d p + R_2 + R_s) i_{d2} + (L_d p + R_s) i_{d1} - \omega (L_2 + L_q) i_{q2} - \omega L_q i_{q1} \\ u_{q2} = (L_2 p + L_q p + R_2 + R_s) i_{q2} + (L_q p + R_s) i_{q1} + \omega (L_2 + L_d) i_{d2} + \omega L_d i_{d1} + \omega M_{sm} i_m \end{cases} \quad (5)$$

1.3 等电压分配策略

等电压分配策略在双边串联供电方式下让两侧变流器的电压满足幅值相等, 相位相差 180° ; 在双边并联供电方式下让两侧变流器的电压满足幅值相等, 相位也相等。因此双边串联和双边并联在 d - q 轴下的电压分别满足:

$$\begin{cases} u_{d1s} = -u_{d2s} \\ u_{q1s} = -u_{q2s} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{d1p} = u_{d2p} \\ u_{q1p} = u_{q2p} \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{d1s} 、 u_{q1s} 和 u_{d2s} 、 u_{q2s} 分别是双边串联供电模式下左侧变流器和右侧变流器的 d - q 轴电压; u_{d1p} 、 u_{q1p} 和 u_{d2p} 、 u_{q2p} 分别是双边并联供电模式下左侧变流器和右侧变流器的 d - q 轴电压。

其中双边串联供电模式下的左、右侧变流器的电流等于电机长定子上的电流; 而双边并联模

式下的左、右变流器电流是将式(7)代入式(5)得到,表达式如下:

i_{q1} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} i_q \tag{8}

i_{q2} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} i_q \tag{9}

2 牵引力与阻力特性计算

2.1 牵引力与加速度关系

高速磁浮列车的牵引力与加速度的关系式为

F_x - F_f = ma \tag{10}

式中: F_x 为牵引力; F_f 为阻力; m 为磁浮列车的质量; a 为加速度。

直线同步电机的电磁推力为

F_x = \frac{3\pi}{2\tau} \{ M_{sm} i_m i_q + (L_d - L_q) i_q i_d \} \tag{11}

式中: \tau 为极距。

目前高速磁浮列车的控制大多数以转子磁场定向 i_d = 0 为控制策略, 则式(11)的电磁推力方程可以简化为

F_x = \frac{3\pi}{2\tau} M_{sm} i_m i_q \tag{12}

2.2 运行阻力特性计算

假设整个运行区间没有坡道, 则磁浮列车运行过程中所受的阻力包括空气阻力、涡流阻力、发电机产生的制动力三部分。列车运行总阻力与这三部分阻力满足以下关系:

F_f = f_k + f_w + f_m \tag{13}

式中: f_k 为列车运行过程中的空气阻力; f_w 为列车运行过程中长定子与两侧导轨之间的涡流阻力; f_m 是由于定子铁心齿槽的高频磁场分量在悬浮机车运行过程中在直线发电机线圈中产生感生电流, 从而产生的与列车前进方向相反的阻力。

各部分阻力计算式如下:

f_k = 3.2v^2(0.53N/2 + 0.3) \tag{14}

f_w = 1\,000N(0.1v^{0.5} + 0.02v^{0.7}) \tag{15}

f_m = \begin{cases} 0, & v \in [0 - 5] \text{ m/s} \\ 7\,300N, & v \in (5 - 20] \text{ m/s} \\ 1\,000N(146/v - 0.2), & v \in (20 - 150] \text{ m/s} \end{cases} \tag{16}

式中: v 为列车运行速度, N 为列车编组。

3 双边供电系统建模与验证

本文的仿真参数是以上海高速磁浮列车示范线的实际参数为准, 其馈线电缆与长定子参数如表1和表2所示。

表1 馈线电缆参数

参数名称	参数值
馈线电阻/(\Omega \cdot km^{-1})	0.058 33
馈线电感/(H \cdot km^{-1})	0.000 071

表2 长定子直线同步电机的模型参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/\Omega	0.31
d 轴电感 L_d/mH	3.061
q 轴电感 L_q/mH	2.611
定、动子间互感 M_{sm}/mH	165
极距 \tau/m	0.258
列车质量 m/kg	306 900
列车节数 N/节	5
励磁电流 i_m/A	21

将馈线电缆参数和直线同步电机的长定子参数代入电压和牵引力方程中, 可以建立双边串联供电和双边并联供电的仿真模型。图4和图5分别为双边串联供电和双边并联供电的电压计算模块图。

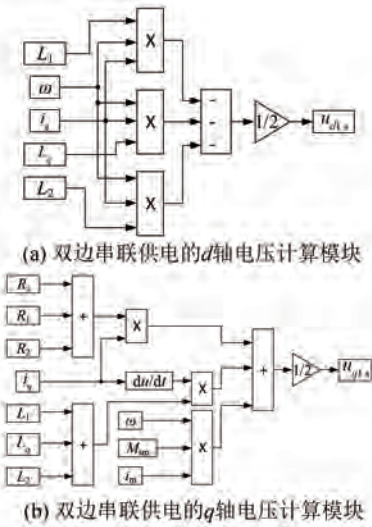


图4 双边串联供电电压计算模块图

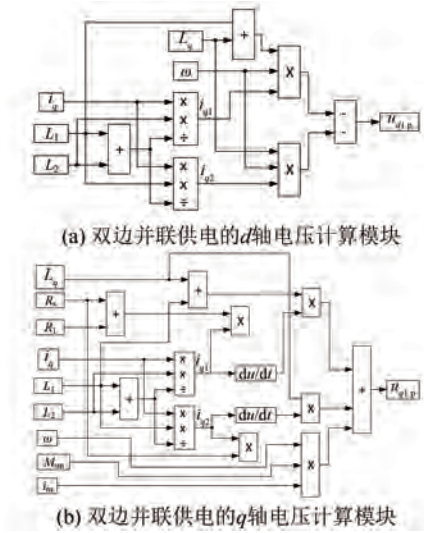


图5 双边并联供电电压计算模块图

把上海高速磁浮列车的速度曲线输入,可以得到不同供电模型下的线路特性,如图6所示。

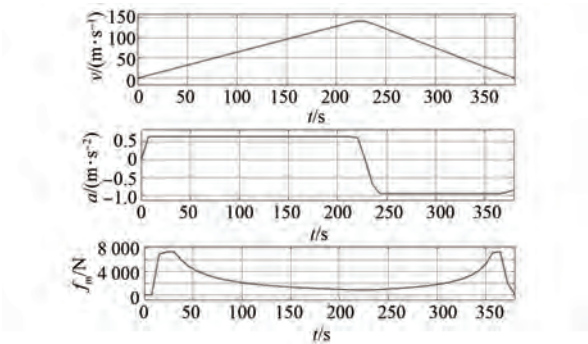


图6 列车速度、加速度和发电机阻力曲线图

列车先加速再制动,最大速度为 140 m/s,发电机阻力也如式(16)一样先为常值再与速度成反比。

双边串联和双边并联供电的 q 轴电流如图7所示,由于仿真系统中输入的都是上海磁浮运行的实际线路信息,所以两者的 q 总电流是相等的,其中双边串联供电中变流器的电流就是总电流,而并联供电中 i_{q1} 是左侧变流器的 q 轴电流, i_{q2} 是右侧变流器的 q 轴电流,两者加起来才是电机上的 q 轴总电流。

不同供电模式下左侧变流器的输出电压如图8所示。结果表明,双边串联供电模式在最高速度时的 d - q 轴电压均低于双边并联供电模式,所以在选择变流器时,双边并联供电需要选择更高的电压配置。

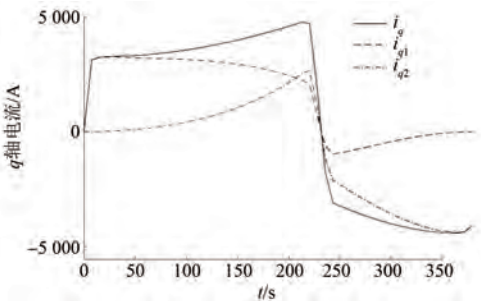


图7 q 轴电流曲线图

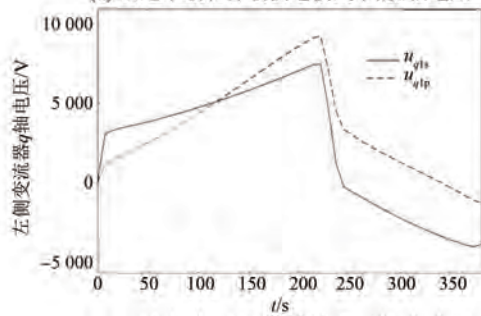
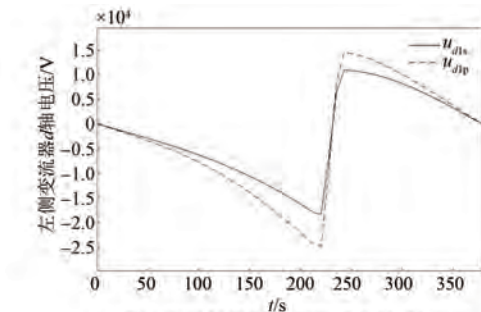


图8 不同供电模式下左侧变流器的输出电压图

当给双边串联供电模式和双边并联供电模式限制同样的电压时,结果如图9所示。左侧变流器 d - q 轴电压都在同等电压限制下,此时双边串联供电的 q 轴总电流和运行速度都大于双边并联供电模式,该结果验证了双边串联供电在不改变传统并联供电的变流器能力和绝缘的情况下,确实能提高高速磁浮列车的牵引力能力和运行速度。

4 结 语

本文针对高速磁浮列车牵引供电系统提出了一种新的双边串联供电方式,将直线同步电机串联在双边变流器上,并使输出电压幅值相等,相角相差 180° 。通过在 Simulink 中建立长定子直线

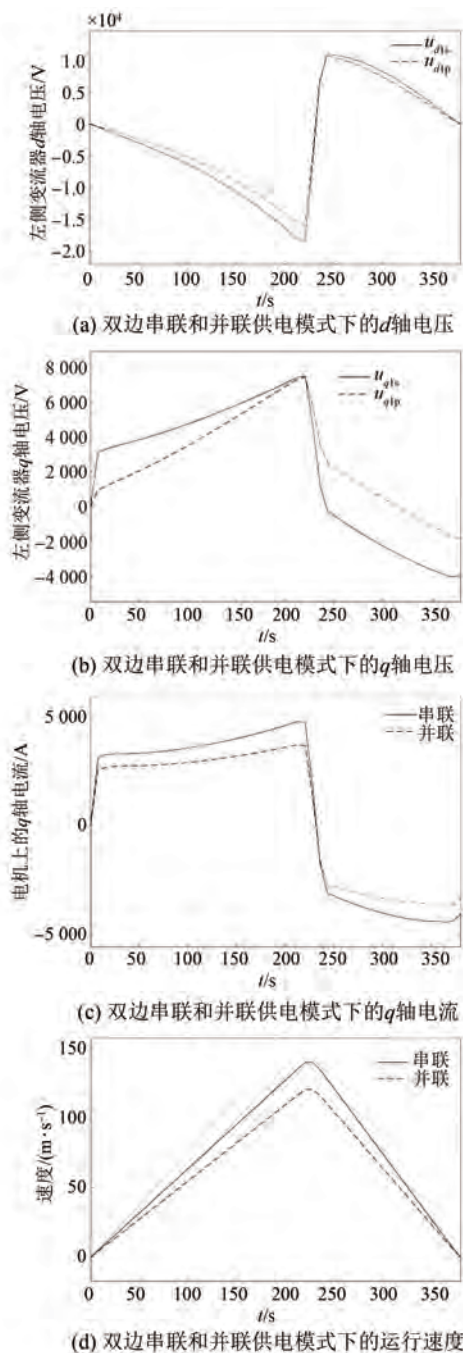


图9 在同等电压限制时不同供电模式下的曲线图

同步电机和馈线电缆模型,输入上海磁浮列车的速度曲线到并联和串联供电模式中,验证发现双边串联供电在最高速度的电压比并联供电低,且在同等电压限制时,双边串联供电的运行速度和 q 轴总电流都比并联供电高,验证了双边串联供电模式在高速磁浮列车上的优势性。

【参考文献】

- [1] 罗炜宁,王强. 磁悬浮列车未来发展与展望[J]. 硅谷, 2013, 6(5): 2.
- [2] LEE H W, KIM K C, LEE J. Review of maglev train technologies[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(7): 1917.
- [3] 邓自刚,刘宗鑫,李海涛,等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455.
- [4] 朱跃欧,荣立军,张文跃,等. 磁浮列车悬浮控制器主电路实时仿真[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 50.
- [5] 夏文杰,陈盼,周华,等. 高速磁悬浮双端并联供电模式下环流特性研究[J]. 中国铁路, 2021(1): 105.
- [6] 朱进权,葛琼璇,孙鹏琨,等. 高速磁悬浮列车在双端供电模式下的电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4937.
- [7] 吴冬华,王云飞,张志强. 换步方法对高速磁浮列车牵引特性的影响分析[J]. 机车电传动, 2020(6): 10.
- [8] ZOU Z Y, ZHENG M F, LU Q F. Modeling and simulation of traction power supply system for high-speed maglev train [J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(5): 82.
- [9] 廖志明,林国斌,赵华华. 高速磁浮列车冗余供电方法[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 52.
- [10] 刘金鑫,葛琼璇,王晓新,等. 双端供电模式下高速磁浮列车牵引控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(6): 16.
- [11] SUN P K, GE Q X, ZHAO M T, et al. Research on parameters identification strategy of high-speed maglev train in double-end power supply mode[C]// 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 2021.
- [12] WANG Z, CHEN J, CHENG M, et al. Field-oriented control and direct torque control for paralleled VSIs fed PMSM drives with variable switching frequencies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(3): 2417.
- [13] 王政,郑杨,张兵,等. 并联逆变器馈电PMSM调速系统谐波和环流控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(12): 64.