

# 城市轨道交通用次级分段磁通切换永磁直线电机逆变回馈控制系统研究

马 畔<sup>1</sup>, 徐琼璟<sup>1</sup>, 张若微<sup>1</sup>, 端凌立<sup>1</sup>, 张 瑶<sup>1</sup>, 张汀荟<sup>1</sup>,  
王昱婷<sup>1</sup>, 朱 瑛<sup>2\*</sup>

(1. 南京电力设计研究院有限公司, 江苏南京 210012;  
2. 河海大学 电气与动力工程学院, 江苏南京 211100)

## Research on Inverter Feedback Control System for Permanent Magnet Linear Motor with Secondary Segmented Flux Switching for Urban Rail Transit Applications

MA Bin<sup>1</sup>, XU Qiongjing<sup>1</sup>, ZHANG Ruowei<sup>1</sup>, DUAN Lingli<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>,  
ZHANG Tinghui<sup>1</sup>, WANG Yuting<sup>1</sup>, ZHU Ying<sup>2\*</sup>

(1. Nanjing Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China;  
2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** [Objective] The secondary segmented flux-switching permanent magnet linear motor (Sseg-FSPMLM), which combines high efficiency with low cost, is well-suited for traction systems in urban rail transit. This paper investigates the applicability of the Sseg-FSPMLM under the condition of compatibility with existing traction and inverter feedback topologies, with the aim of evaluating its potential for practical engineering applications. [Methods] Firstly, using Guangzhou Metro Line 4 as a case study, a comparative analysis of the linear induction motor (LIM) and the Sseg-FSPMLM was conducted, focusing on motor efficiency and operational costs. Subsequently, without modifying the existing traction power supply system or inverter regeneration topology, an integrated simulation model was developed. This model incorporated the urban rail traction load, the regenerative energy storage device, and the grid interface. Finally, based on key parameter designs, the performance of the Sseg-FSPMLM-based inverter regeneration system was tested and evaluated. [Results] Under equivalent thrust requirements, the Sseg-FSPMLM achieved a 20%

improvement in efficiency compared to the LIM, along with a 34% reduction in material costs. Simulations performed using the developed inverter regeneration model demonstrated a total recovered energy of  $9.23 \times 10^5$  J, accounted for 43.74% of the kinetic energy present before braking. [Conclusion] When the Sseg-FSPMLM is deployed as a traction motor in existing systems, no structural modification to the inverter regeneration topology is required. By solely re-optimizing the electrical parameters, the dynamic performance and stability of the regenerative braking energy feedback system can be effectively ensured. This verifies the feasibility of directly integrating the Sseg-FSPMLM into current rail transit infrastructure.

**Key words:** secondary segmented flux-switching permanent magnet linear motor; urban rail transit; inverter feedback; linear induction motor

**摘要:**【目的】次级分段磁通切换永磁直线电机(Sseg-FSPMLM)兼具高效率与低成本优势,适用于城市轨道交通牵引系统。本文旨在评估Sseg-FSPMLM在兼容现有轨道交通牵引及逆变回馈拓扑结构条件下的适用性,以探讨其在实际工程中的应用前景。【方法】首先,以广州地铁4号线为背景,对直线感应电机(LIM)与Sseg-FSPMLM的效率和使用成本进行了对比分析。然后,在不改变既有牵引供电系统与逆变回馈拓扑结构的前提下,构建了包含城市轨道交通牵引负载、储能回馈装置及电网接口

基金项目:国网江苏省电力有限公司省管产业科技项目(JC2024108)

Supported by the State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.  
Provincial Management Industry Science and Technology Project  
(JC2024108)

的一体化仿真模型。最后,结合关键参数设计,对基于 Sseg-FSPMLM 的逆变回馈系统效能进行了测试与评估。【结果】在同等推力需求下,Sseg-FSPMLM 的效率较 LIM 提升 20%,且可节省 34% 的材料成本。基于建立的逆变回馈仿真模型,系统总计回收能量  $9.23 \times 10^5$  J, 总储能比例达制动前动能的 43.74%。【结论】将 Sseg-FSPMLM 作为牵引电机并应用于现有系统时,无需结构性改造逆变回馈拓扑,仅通过重新设计电气参数即可保障再生制动能量回馈系统的动态性能与稳定性,验证了 Sseg-FSPMLM 在现有轨道交通系统中直接应用的可行性。

**关键词:** 次级分段磁通切换永磁直线电机; 城市轨道交通; 逆变回馈; 直线感应电机

## 0 引言

随着我国城镇化进程不断加快,城市人口密度持续上升,公共交通系统面临巨大压力。城市轨道交通作为缓解城市交通拥堵、降低环境污染及提高出行效率的有效手段,近年来得到迅猛发展,并逐步迈入智能化、绿色化阶段<sup>[1-3]</sup>。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》中提出,要建设智能、安全、高效、绿色的城市交通网络,以实现可持续发展目标<sup>[4]</sup>。在此背景下,城市轨道交通系统的节能降耗问题成为当前研究热点,列车牵引电机的具体选型以及列车运行过程中所产生的再生制动能量的回收与利用,逐渐成为提升系统能效的关键问题<sup>[5-7]</sup>。

现有轨道交通系统牵引电机以直线感应电机 (Linear Induction Motor, LIM) 为主,但低效率与低功率因数的缺点制约了其进一步的推广应用。因此,研究高效率、高功率因数、低成本的城市轨道交通用直线电机及其低能耗控制技术,不仅具有重要科学意义,而且具有重大经济和使用价值。

近年来,磁通切换永磁直线电机得到国内外学者的广泛关注。在实际线路应用尺寸约束下,与 LIM、开关磁阻电机等轨道交通常用牵引电机相比,磁通切换永磁直线电机具有显著的效率优势<sup>[8-9]</sup>。进一步地,成本更低的次级分段磁通切换永磁直线电机 (Secondary Segmented Flux-Switching Permanent Magnet Linear Motor, Sseg-FSPMLM) 被提出<sup>[10]</sup>。

城市列车在频繁起动与制动过程中,牵引电机作为能量转换核心,既是动力源也是能量回馈

源。当列车制动时,电机处于发电状态,其动能可转化为电能。如果未能及时吸收或利用这些电能,牵引供电系统中的直流母线电压将迅速升高,易超出设备允许电压范围,威胁系统安全<sup>[11]</sup>。三相全桥电压型逆变器是当前主流的能量回馈电路结构,其控制灵活、结构成熟、能效高、损耗低且适应性强,可通过脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术实现直流向交流的高效转换<sup>[12-13]</sup>,适合在轨道交通系统推广使用<sup>[14-15]</sup>。但在实际工程中,要实现高质量的并网运行,还需解决并网控制策略、滤波器设计<sup>[16-17]</sup>、锁相同步与回馈切换逻辑等多个关键技术问题<sup>[18]</sup>。

在上述背景下,Sseg-FSPMLM 能否在不降低系统牵引功能、不改变系统拓扑结构且不影响能量回馈效率的基础上,直接替代现有牵引电机是值得研究的。因此,本文以城市轨道交通为背景<sup>[19]</sup>,建立包含列车牵引系统、逆变回馈装置、LCL 滤波器及升压变压器的牵引供电-电机驱动-能量回馈一体化仿真模型。

首先,以广州地铁 4 号线作为对比标准,定性定量对比了现用 LIM 与 Sseg-FSPMLM;其次,考虑实际运行工况,搭建了基于 Sseg-FSPMLM 的一体化仿真模型,对系统牵引功能进行仿真分析,对系统逆变回馈功能进行控制策略分析、对拓扑元件电气参数选取原则进行阐述;然后,对系统逆变回馈控制结果进行详细分析;最后总结全文。

## 1 Sseg-FSPMLM 特性分析

LIM 虽然具备成本与维护优势,但在大气隙下其低效率、低功率因数问题更为突出。永磁同步直线电机性能指标优异,却因高昂的造价与维护成本,难以在长距离轨道交通中大规模应用。开关磁阻与同步磁阻类电机结构简单、可靠性高,但普遍存在推力波动大、推力密度低等局限。为兼顾长距离驱动场景下效率与成本的双重需求,磁通切换永磁直线电机受到广泛关注。为进一步提高经济性,本文采用图 1 所示的 Sseg-FSPMLM,该电机采用无齿槽分段导磁块作为次级,大幅降



图 1 Sseg-FSPMLM 结构

Fig. 1 Sseg-FSPMLM structure

低材料与铺设成本,其永磁体与电枢绕组均集成于初级动子,便于车载集成。

当前,关于 Sseg-FSPMLM 的研究主要集中于小气隙运行条件,缺乏面向轨道交通牵引系统的针对性分析。为验证该电机在大气隙轨道交通场景下的适用性与性能优势,本文结合广州地铁 4 号线的实际工况与空间约束,开展了 Sseg-FSPMLM 与 LIM 的静态性能对比分析。

Sseg-FSPMLM 永磁磁链及反电势波形如图 2 所示。图中,Sseg-FSPMLM 的反电势与磁链波形具有较高的正弦度,表明该电机适用于无刷交流控制系统,有利于实现低谐波、高精度的牵引控制。

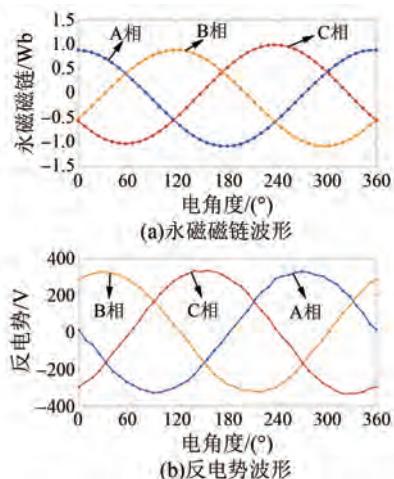


图 2 Sseg-FSPMLM 永磁磁链及反电势波形

Fig. 2 Permanent magnet flux linkage and back-electromotive force waveforms of the Sseg-FSPMLM

在相同的推力需求下,Sseg-FSPMLM 与 LIM 的性能参数对比如表 1 所示。表 1 中,不论是在 33 km/h 的基速点还是在 60 km/h 的典型速点,Sseg-FSPMLM 的效率均为 LIM 的 1.2 倍,展现出显著的能效优势。

表 1 LIM 与 Sseg-FSPMLM 性能参数对比

Tab. 1 The performance parameters comparison of LIM and Sseg-FSPMLM

电磁特性	LIM	Sseg-FSPMLM	LIM	Sseg-FSPMLM
速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	33	33	60	60
推力 $T_{avg}/kN$	21.688 4	21.655 7	9.55	9.537
视在功率/kVA	550.96	1 003.904 3	334.3	334.18
效率 $\eta/\%$	68.96	89.9	75.39	95.186

除效率外,成本控制亦是轨道交通系统的重要考量。以广州地铁实际运营编组为例,共计 30 辆列车,其中每列 4 节车厢,每节搭配 2 台电机。对两类电机作成本汇总,结果如表 2 所示。

表 2 LIM 与 Sseg-FSPMLM 成本对比

Tab. 2 The cost comparison of LIM and Sseg-FSPMLM

参数名称	LIM	Sseg-FSPMLM
初级总成本/千元	9 015.36	7 382.4
次级总成本/千元	50 418	31 800

由表 2 可知,使用 Sseg-FSPMLM 可以节省 34% 的材料成本,具有一定的经济优势。综上所述,在轨道交通背景下,相较于 LIM, Sseg-FSPMLM 兼具高效率与低成本的优势,十分适合在长距离轨道交通中应用。

## 2 Sseg-FSPMLM 牵引及其逆变回馈控制

### 2.1 Sseg-FSPMLM 牵引控制

为准确评估 Sseg-FSPMLM 在实际轨道交通工况下的适用性,本文综合考虑电压等级、列车质量和运行阻力等实际工况,在 Matlab/Simulink 中搭建了完整的系统仿真模型。

轨道交通列车系统的主要架构如图 3 所示,其中牵引变压器、24 脉冲整流装置和列车组构成牵引能量流动路径,三相全桥 DC/AC 逆变器与升压变压器构成回馈能量流动路径。该系统架构的核心为列车组,本文对其进行了详细的建模分析。

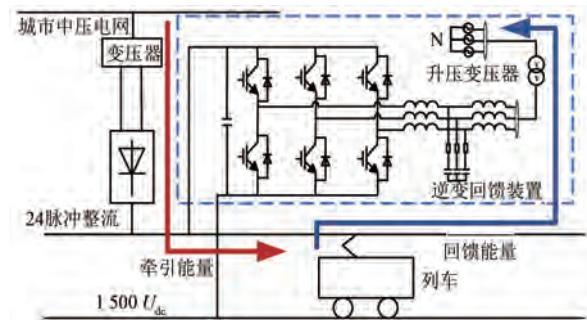


图 3 轨道交通列车系统架构

Fig. 3 Subway train system architecture

列车组建模分为两个部分:其一为牵引电机建模,列车组使用的 Sseg-FSPMLM 的运行机理,具体建模参考文献 [20-22];其二为运行阻力建模,为简化仿真,研究首先拟合了列车基本运行阻

力,并通过总质量与电机配置数计算出单电机的平均负载阻力,进而通过单电机仿真分析反映整车实际运营性能。模型以广州地铁 4 号线为实例,列车空重 120 吨,标准载客(918 人)下总重 175.08 吨,平均运营速度为 50 km/h,其基本运行阻力采用式(1)的拟合函数求解。

$$f_{\text{abs}} = (c_1 + c_2 v + c_3 v^2) Mg / 1000 \quad (1)$$

式中: $f_{\text{abs}}$  为列车基本运行阻力; $v$  为车辆运行的实际速度; $M$  为列车实际总质量; $g$  取 9.8 N/kg; $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$  为相关的经验常数,在工程中计算方法为

$$\begin{cases} c_1 = 0.653 + 13.27 n_a / M \\ c_2 = 0.01428 \\ c_3 = [0.004694 + 0.00066(n_t + n_m - 1)] A / M \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n_a$  为列车轴数,取值 16; $A$  为列车车头面积,取值 10.2; $n_t$ 、 $n_m$  分别为动车、拖车数量。

基于上述仿真模型,首先研究不考虑能量回馈时 Sseg-FSPMLM 在实际工况下的牵引性能,单列车运行工况仿真如图 4 所示。

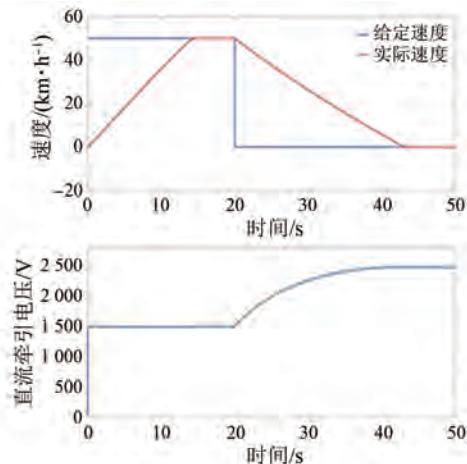


图 4 单列车运行速度及直流牵引电压波形

Fig. 4 Single-train operating speed and DC traction voltage waveforms

由图 4 可知,单列车在第 14.4 s 跟踪上给定速度,直流牵引电压在列车电动运行阶段稳定于 1 500 V 附近;第 20 s 时控制系统开始制动,第 43.16 s 停止运行,耗时 23.16 s,电压峰值 2 475 V。

此外,考虑到轨道交通系统中多辆列车采用同一套直流牵引供电系统驱动运行的情况颇为常见,本文对两列车组同时运行工况进行了研究,以

一组列车制动、一组列车起动为例,其仿真结果如图 5 所示。

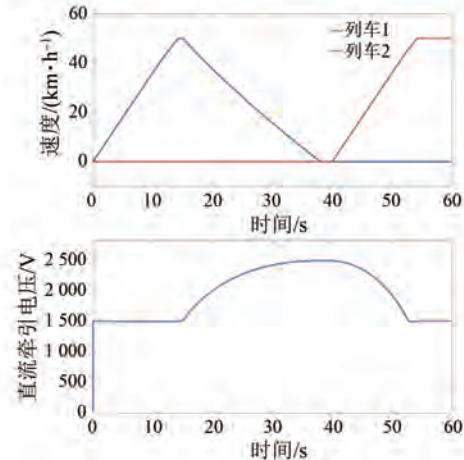


图 5 双列车运行速度及直流牵引电压波形

Fig. 5 The speed and DC traction voltage waveforms of dual train operation

由图 5 可知,第一辆列车起动后于第 14 s 跟踪上给定速度,在第 15 s 开始制动,38.16 s 停止,直流牵引电压从稳态的 1 500 V 上升到 2 475 V;第二辆列车第 40 s 起动后加速运行,需要从储能电容中吸收能量,吸收能量后电压回落至 1 500 V。

综上,以 Sseg-FSPMLM 作为系统牵引电机,在单列车和多列车工况下均能良好完成牵引任务。但未考虑能量回馈时,制动期间储能电容电压会升至 2 475 V,远超供电系统要求的 1 000~1 800 V 的范围。

## 2.2 Sseg-FSPMLM 逆变回馈控制

电机在制动过程直流牵引电压升高且超过了最大可承受电压范围。为确保系统的稳定运行,需要对列车制动能量进行合理管理。

针对轨道交通系统,逆变回馈储能型方案因其成熟的技术、较高的可靠性、良好的经济性以及长期运行的稳定特性被广泛应用。为了适配大部分轨道线路配置,选择逆变回馈储能作为本文的制动能量处理方案。逆变回馈拓扑结构主要包括三相全桥逆变器、直流侧/交流侧 LCL 滤波装置。

### 2.2.1 参数设计原则

逆变回馈拓扑中的电气参数直接决定能量回馈系统的稳定性、动态响应速度及电能质量,在牵

引电机类型变更后,需进行针对性的设计与优化。

### (1) 直流侧储能电容设计

直流侧储能电容设计需权衡电压稳定性与动态响应速度<sup>[23-24]</sup>。基于轨道交通系统的牵引供电特性与回馈策略,本文选定 1 F 的电容值。

### (2) 交流侧电感设计

交流侧电感参数设计需平衡低谐波(大电感)与高动态响应(小电感),其总值  $L$ (逆变桥侧电感  $L_1$ +网侧电感  $L_g$ )需满足式(3)。 $L_1$  与  $L_g$  的比值通常为 2:1 至 7:1。

$$\begin{cases} L \geq T_s \left( \frac{2}{3} U_{de} + U_{sm} \right) \\ L \leq \frac{U_{de} U_{sm} \cos \theta}{\omega P_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_s$  为系统开关周期; $U_{sm}$ 、 $\omega$  和  $\theta$  分别为交流侧电压最大值、角速度和相位角; $P_1$  为逆变器额定功率。

### (3) LCL 滤波器设计与优化

相较于传统 LC 滤波结构,LCL 滤波器在大功率应用中具备更优的谐波抑制能力,特别适用于轨道交通等对并网电能质量要求较高的场景。LCL 设计需兼顾滤波与稳定性:首先电感压降控制在交流额定电压的 10% 以内;其次谐振频率  $f_{res}$  设于电网基波与开关频率的中频段,由式(4)计算,其中滤波器电容  $C_1$  及相关电感参数决定了谐振频点位置。

在理想状态下,三相自感和互感可以表示为

$$\begin{cases} f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_g}{L_1 L_g C_1}} \\ 10f_1 < f_{res} < \frac{f_{sw}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_1$  为绝缘栅双极型晶体管的开关频率; $f_{sw}$  为电网频率。

此外,滤波器的设计还应控制逆变器输出的无功功率占额定值的比例不超过 5%,以此限制高频谐波的传递路径,并确保满足式(5):

$$C \leq \frac{\lambda P}{6\pi f_1 E_M^2}$$

$$X_C = (0.1 \sim 0.2) X_{Lg} \quad (5)$$

式中: $P$  为有功功率额定值; $E_M$  为电网的相电压; $X_C$ 、 $X_{Lg}$  分别为滤波电容阻抗、网侧电感阻抗; $\lambda$  为

基波无功和有功功率的比值。

为进一步抑制系统在谐振频点可能出现的过冲或振荡,应在电容两端并联阻尼电阻  $R_d$ 。该阻值一般设为电容在谐振频点阻抗的 1/3,以达到有效阻尼而不过度引入损耗的目的。

### 2.2.2 并网控制策略

逆变器并网控制主要分为直接和间接电流控制两类。直接电流控制因其响应快、结构简单,在工程应用中被广泛采用<sup>[25-28]</sup>,因此本文选用此策略。

为满足并网要求,逆变器需在单位功率因数模式下稳定运行,确保输出电流与电网电压同频同相。在忽略高频分量影响的理想条件下,并网电流可由式(6)描述:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $L$  为滤波器电感; $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  和  $u_{ga}$ 、 $u_{gb}$ 、 $u_{gc}$  分别为网侧三相电流和三相电压。

整理式(6)可得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

基于空间矢量控制策略,系统通过分别调控  $dq$  轴电流实现并网有功与无功分量的解耦控制。首先,通过锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)实时追踪电网电压相位与频率,并同步检测 A、C 相电流,经坐标变换获得  $i_d$ 、 $i_q$  分量。电流环输出经反变换生成  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ ,再由空间矢量调制模块计算各桥臂占空比,驱动逆变器开关管动作,完成并网控制<sup>[29-30]</sup>,原理如图 6 所示。

## 3 逆变回馈控制仿真分析

结合广州地铁 4 号线牵引供电系统的典型参数,本文在仿真模型中设定逆变器侧电感  $L_1$  为 6 mH、电网侧电感  $L_g$  为 1 mH、LCL 滤波器的电容和阻尼电阻分别为 25 uF 和 2 Ω,以满足地铁线路对并网电流质量的要求。此外,考虑到广州地铁 4 号线牵引供电采用中压交流电网,升压变压器原边与副边电压分别设定为 380 V/35 kV,实现制动再生能量与城市中压电网之间的有效传输与交

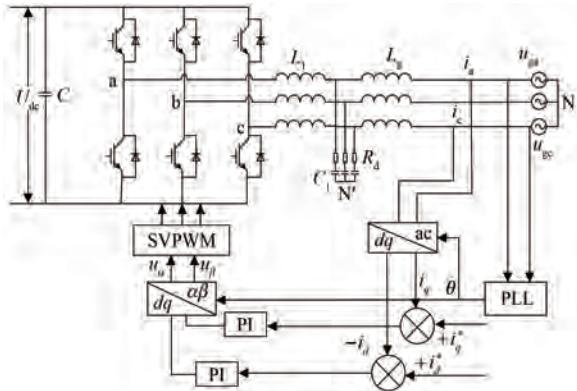


图 6 三相并网控制原理框图

Fig. 6 Three-phase grid-connected control principle block diagram

换,贴近实际运行环境下的电压等级与系统特性。

单列车从静止状态起动至制动全过程的运行特性如图 7 所示。

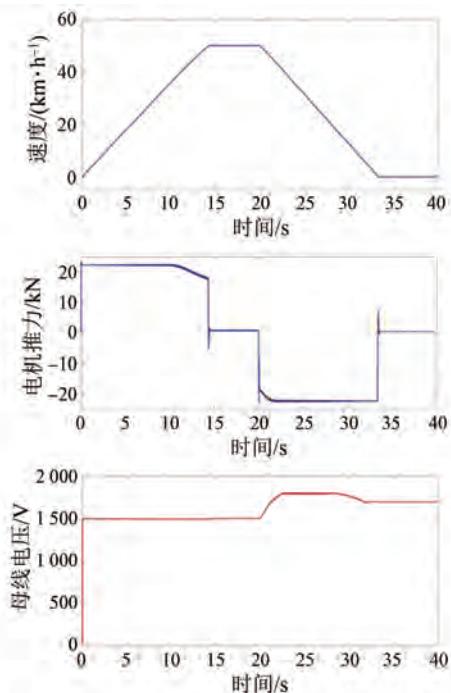


图 7 列车速度、电机推力及母线电压波形

Fig. 7 Train speed, motor thrust and DC traction voltage waveforms

由图 7 可知,列车从起步加速至 50 km/h 用时 14.4 s,在第 20 s 系统触发制动指令,第 33.4 s 列车完全停止。在加速过程中,电机在超过额定速度(33 km/h)后进入弱磁控制区,通过调节  $d$  轴电流来维持高速运行,此时推力从 22.5 kN 略微下降至 18 kN。

制动开始后,牵引电机进入发电状态,向直流母线反馈能量。直流母线电压从 1 500 V 开始上升,第 21.12 s 达到 1 680 V,逆变器起动,将部分能量回馈至电网。电压继续上升并在 23.6 s 达到 1 800 V,电阻能耗模块投入,协同限制电压超限。

随着列车速度逐渐降低,回馈功率减少,电压也逐步下降。在第 27.9 s,电压降至 1 680 V 以下,逆变器停止运行,此时列车速度为 20.52 km/h。系统进入自然耗散阶段,列车剩余动能主要由运行阻力、电机内部电阻等消耗。最终,列车在第 33.4 s 完全停止,电压稳定在 1 680 V 附近。与未考虑能量回馈的仿真相比,电压得到了有效控制,避免了超限风险。

升压前并网电压、电流波形如图 8 所示。

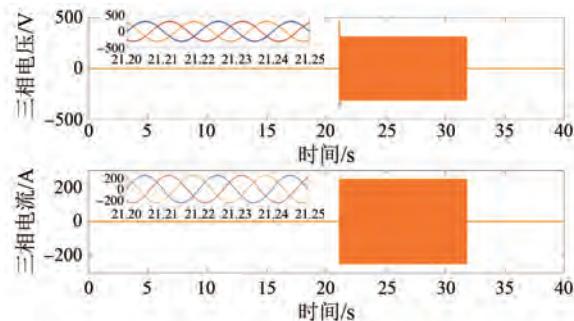


图 8 升压前并网电压、电流波形

Fig. 8 Voltage and current waveforms before boost and grid-connected

由图 8 可知,0~21.12 s 内,直流牵引电压始终低于 1 680 V,逆变并网回路未起动,对应测得的相电压与相电流均为零。系统设定升压前变压器的电流参考值  $i_d$  为 250 A。当牵引电压在第 21.12 s 超过 1 680 V 阈值后,断路器闭合,逆变器进入并网状态。在第 21.2 s 时,并网电流成功跟踪  $i_d$ ,耗时 0.08 s,显示出良好的电流响应性能。

图 8 显示,相电压峰值为 311 V,相电流峰值为 250 A,系统在稳态下的跟踪误差极小,电压与电流波形同频同相,且均呈现良好的正弦特性,表明逆变器输出电流与电网电压同步性良好,满足并网运行要求。

在列车制动过程中,若将回馈能量直接注入至 380 V 低压交流电网中,可能引发并网电流过大,进而对低压电网的稳定性造成冲击。为解决

这一问题,在逆变主电路中引入了原副边电压为380 V/35 kV的升压变压器,将能量回馈至城市中压35 kV交流电网。在相同回馈功率条件下,升压后并网电流显著减小,有效降低了对电网的瞬态冲击。

升压后并网电压、电流波形如图9所示。图中,升压后相电压峰值达到28.577 kV,并网电流峰值为2.71 A,相较于低压并网情形,电流大幅下降,而回馈功率保持不变。局部波形图(21.2~21.24 s)进一步展示了电压与电流的同步性,波形保持良好的正弦特性,验证了系统在升压并网条件下的稳定性与电能质量。

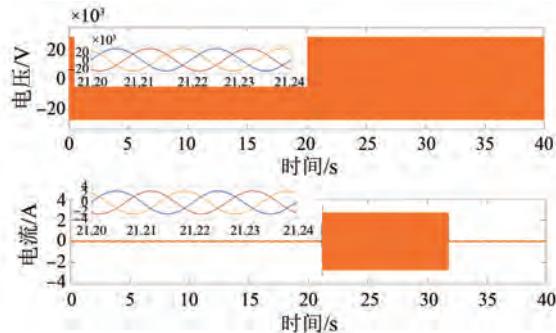


图9 升压后并网电压、电流波形

Fig. 9 Voltage and current waveforms after boost and grid-connected

经过升压变压器的A相电流一个周期的谐波分析结果如图10所示。图中,A相总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)为1.4%。通过PLL实现的同步控制使三相电压与电流保持同相位,满足并网条件。同时,B相与C相的谐波分析结果也表明电流质量良好,谐波含量分别为1.73%和1.32%,均远低于并网标准规定的5%上限,验证了系统良好的滤波性能与并网电能质量。

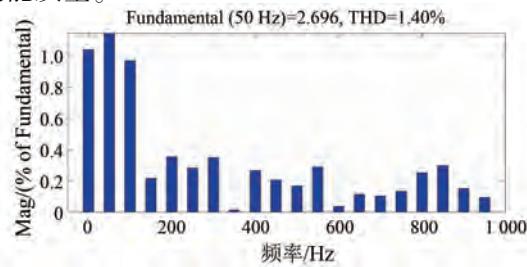


图10 升压后并网A相电流谐波分析

Fig. 10 Harmonic analysis of phase-A current after boost and grid-connected

此外,本文在逆变回馈模块中集成了有功功率计算单元,模块起动后电网吸收的有功功率迅速上升,如图11所示。

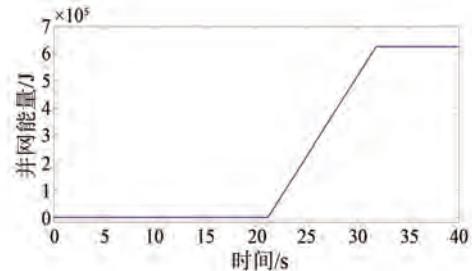


图11 逆变模块开启后吸收的有功功率波形

Fig. 11 Active power absorption waveform after inverter module activation

图11显示并网电流稳定后,电网吸收的有功能量最终稳定在 $6.37 \times 10^5$  J。列车制动过程中,储能电容电压从1 500 V上升至1 680 V,储存能量为 $2.86 \times 10^5$  J,两部分共计储存能量为 $9.23 \times 10^5$  J。相比列车制动前后的总动能消耗 $2.11 \times 10^6$  J,储能比例达43.74%。该模型以1:8比例缩小模拟广州地铁4号线,换算后仿真再生制动能量为 $7.384 \times 10^6$  J,折合有效吸收储存能量2.05 kWh。

#### 4 结语

本文面向城市轨道交通,研究了基于Sseg-FSPMLM的逆变回馈系统。首先,通过对比分析可知,Sseg-FSPMLM相较于LIM,效率提升了20%,成本降低了34%。然后,基于广州地铁4号线实际参数,构建了涵盖交流电网、牵引供电、列车驱动与逆变回馈的一体化仿真模型,牵引工况仿真结果验证了Sseg-FSPMLM具备良好的动态性能与系统兼容性。最后,在维持既有逆变回馈拓扑结构不变的前提下,基于Sseg-FSPMLM的列车系统,仅通过重新设计电气参数可实现制动能量的稳定回馈与高效利用,其中直流牵引电压稳定控制在1 800 V安全限值内,系统储存能量达 $9.23 \times 10^5$  J,储能比例为43.74%,并网电流谐波含量低于5%。本研究验证了Sseg-FSPMLM在现有轨道交通系统中直接应用的可行性,为轨道交通牵引电机的选型与再生制动能量的高效利用提供了可行的技术路径。

## 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 作者贡献

马斌、徐琼璟、张若微进行了方案设计、内容总结与论文撰写, 端凌立、张瑶进行了试验研究, 张汀荟、王昱婷、朱瑛参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Ma Bin, Xu Qiongjing and Zhang Ruowei. The experiment was conducted by Duan Lingli and Zhang Yao. The manuscript was revised by Zhang Tinghui, Wang Yuting and Zhu Ying. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

## 参考文献

- [ 1 ] 蔡芳, 王峰, 江巧逢. 城市轨道交通节能措施研究[J]. 铁道车辆, 2023, 61(3): 102-108.
- [ 2 ] 吕锦琦. 城轨交通再生制动能量回馈系统研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [ 3 ] LAN L F. Energy-saving and voltage regulation effect improvement of supercapacitor energy storage systems in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [ 4 ] WU Q Q, LIU Y S. Research on integrated management of railway engineering survey and design project [C] // 2016 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences, Sydney, 2016.
- [ 5 ] 张晶. 车载超级电容储能式有轨电车能量管理策
- 略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- ZHANG J. Research on energy management strategy of vehicle mounted supercapacitors energy storage tram [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [ 6 ] 刘向飞. 城市轨道交通逆变回馈系统装置控制研究[J]. 中国科技信息, 2018, (16): 85-87.
- LIU X F. Research on control of inverter feedback system device for urban rail transit [J]. China Science and Technology Information, 2018, (16): 85-87.
- [ 7 ] 金辉, 李鲲鹏, 易韵岚. 城轨列车再生制动能量回馈系统研究[J]. 机车电传动, 2015, (4): 64-67+75.
- JIN H, LI K P, YI Y L. Study of urban rail train renewable braking energy feedback system [J]. Electric Drive for Locomotive, 2015, (4): 64-67+75.
- [ 8 ] CAO R W, SU E C, LU M H. Comparative study of permanent magnet assisted linear switched reluctance motor and linear flux switching permanent magnet motor for railway transportation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.
- [ 9 ] CAO R W, LU M H, JIANG N, et al. Comparison between linear induction motor and linear flux-switching permanent-magnet motor for railway transportation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9394-9405.
- [ 10 ] 曹瑞武, 苏恩超, 张学. 轨道交通用次级分段型直线磁通切换永磁电机研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1001-1012.
- CAO R W, SU E C, ZHANG X. Investigation of linear flux-switching permanent magnet motor with segmented secondary for rail transit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1001-1012.
- [ 11 ] PENG J X, HU Y H, YU T X, et al. Optimization of gear shifting strategy for hybrid electric vehicles on the process of braking [J]. IFAC- Papers Online, 2021, 54(10): 253-257.
- [ 12 ] 郭诚. 微网逆变器的双模式变换控制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- GUO C. Research on dual mode conversion control of microgrid inverter [D]. Huai'nan: Anhui University of Science and Technology, 2016.

- [13] HISAR C, BALTA G, SEFA I, et al. Sliding mode-based active damping control of LCL-filtered three-phase PWM rectifier [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2025, 50: 17845-17862.
- [14] 王创, 景妍妍. 基于自抗扰控制的双向DC-DC变换器并联均流控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 94-99+110.  
WANG C, JING Y Y. Parallel current sharing control of bidirectional DC-DC converter based on active disturbance rejection control [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47 (5): 94-99+110.
- [15] 王冰冰. 并网光伏电站 LVRT 特性对升压变压器继电保护的影响[J]. 电工电气, 2019, (8): 11-16.  
WANG B B. Influence of grid-connected photovoltaic station with low voltage ride-through capability on step-up transformer relay protection [J]. Electrical Engineering, 2019, (8): 11-16.
- [16] 夏正亚. 并网逆变器 LCL 滤波器参数设计综述[J]. 科技创新与应用, 2018, (33): 94-95.  
XIA Z Y. Overview of LCL filter parameter design for grid connected inverters [J]. Technological Innovation and Application, 2018, (33): 94-95.
- [17] 冯家铨, 陈堂贤. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的参数设计方法[J]. 电力科学与工程, 2019, 35 (2): 44-49.  
FENG J Q, CHEN T X. Design method of LCL filter for three-phase grid-connected inverter [J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(2): 44-49.
- [18] 李庆来, 方晓春, 杨中平, 等. 直线感应电机在轨道交通中的应用与控制技术综述[J]. 微特电机, 2021, 49(8): 39-47.  
LI Q L, FANG X C, YANG Z P, et al. Review of the application and control technology in the linear induction motor for the rail transit [J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(8): 39-47.
- [19] 肖华, 王龙, 吴云飞. 既有地铁线路牵引节能优化策略研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46 (6): 62-67.  
XIAO H, WANG L, WU Y F. Research on traction energy saving optimization strategy of existing subway lines [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2023, 46(6): 62-67.
- [20] ZHANG W M, CAO R W. Research on regenerative braking energy feedback control of rail transit using linear flux switching permanent motor [C]// 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference, Hefei, 2023.  
GUO L, ZHANG Y C, CAO R W. Characteristic analysis of flux-switching permanent magnet linear motor with segmented and discontinuous secondary [C]// 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.
- [21] JIANG Z W, QIU L H, CAO R W. Optimization of secondary segmented flux-switching linear motor designed for urban rail transit [C]// 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.
- [22] SINGLA P, BOORA S, SINGHAL P. Design and simulation of super-capacitor battery energy storage system with energy management system [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 2025, 1-6.
- [23] 马耀东, 刘晓晖, 陆学文. 一种基于超级电容的新型再生制动能量回收装置在地铁牵引供电系统中的应用[J]. 机电信息, 2017, (18): 30-31.  
MA Y D, LIU X H, LU X W. Application of a novel regenerative braking energy recovery device based on supercapacitors in subway traction power supply system [J]. Mechanical and Electrical Information, 2017, (18): 30-31.
- [24] 耿昊翔, 王维俊, 唐帅, 等. 基于无锁相环的虚拟同步发电机离并网切换控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(9): 90-95.  
GENG H X, WANG W J, TANG S, et al. Research on off-grid/on-grid switching control strategy of virtual synchronous generator without PLL [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(9): 90-95.
- [25] 刘志坚, 王伟铭, 骆军, 等. 基于 MPC 的虚拟同步双馈风机并网系统次同步振荡抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 75-84.  
LIU Z J, WANG W M, LUO J, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for virtual synchronous DFIG grid-connected systems based on MPC [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 75-84.
- [26] 钱佳钰, 赵虎府, 刘文泉, 等. 直流微电网并离网协调控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51 (9): 11-23.  
QIAN J Y, ZHAO H F, LIU W Q, et al. Coordinated

- control strategy for DC microgrid grid-connected and off-grid [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 11-23.
- [28] 谢宝平, 曾江, 刘佩, 等. 基于改进一阶 LADRC 光伏逆变器母线电压控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 1-11.  
XIE B P, ZENG J, LIU P, et al. Bus voltage control of photovoltaic inverter based on improved first-order LADRC [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 1-11.
- [29] 李靓. 基于直接电流控制的并网逆变技术研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013.  
LI L. Research of grid-connected inverter technology based on direct current control [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2013.
- [30] 朱晓亮, 胡雪峰, 龚春英, 等. 空间矢量直接电流控制三相并网逆变器的研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(1): 23-25.  
ZHU X L, HU X F, GONG C Y, et al. Research on three phase grid-connected inverter based on space vector PWM current control [J]. Power Electronics, 2010, 44(1): 23-25.

---

收稿日期:2025-07-10

收到修改稿日期:2025-10-01

作者简介:

马 磐(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网保护及综合能源控制和轨道交通牵引供电系统控制,allen\_0001@126.com;

\*通信作者:朱 瑛(1987-),女,博士,教授,研究方向为新能源并网控制及新型永磁电机控制,yingzhu@hhu.edu.cn。