ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka fakulta

DOI: https://doi.org/10.26552/tech.C.2025.1.9

Systèmes de traction électrique modernes: avantages des moteurs PMSM dans le transport ferroviaire

Vladimír Samaš, Ing.*
Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,
l'Université de Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2557

Martin Bučko, Ing.
Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,
l'Université de Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2557

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing., prof. h. c.
Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,
l'Université de Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2550

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.
Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,
l'Université de Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.
Département des transports et des engins de manutention, Faculté de génie mécanique,
l'Université de Žilina,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, République slovaque.
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Modern electric traction systems: advantages of PMSM motors in railway transport

Abstract: Currently, there is a growing global emphasis on environmentally friendly transportation, with railway transport being one of the most efficient and sustainable modes of travel. This form of transport is distinguished by low rolling resistance, which leads to reduced energy consumption for both passenger and freight transport. Electric traction, widely used in railway vehicles, can be categorized as either dependent or independent. Dependent electric traction represents an environmentally friendly solution, as it eliminates the need for petroleum-based fuels and instead utilizes electricity drawn from the grid. However, this approach is truly ecological only when the electricity is generated from renewable and sustainable sources. Modern electric traction systems rely on electric motors, and this article aims to provide a detailed analysis of the application of *permanent magnet synchronous motors* (*PMSM*) in railway transport, particularly in the context of electric traction. *PMSM* motors are characterized by high efficiency and excellent controllability, making them well-suited for extensive use in railway applications. Their significant potential in this field positions them as a promising solution for future sustainable and efficient transport systems.

Keywords: electric traction, *PMSM*, electric motors, railway transport, ecology.

INTRODUCTION

Les moteurs électriques représentent une composante clé, voire la plus importante, de la traction électrique des véhicules ferroviaires. Actuellement, plusieurs technologies de propulsion électrique sont utilisées dans le transport ferroviaire, l'un des candidats prometteurs étant le moteur synchrone à aimants permanents (*PMSM*). Le développement des normes écologiques et le renforcement constant des exigences environnementales entraînent la nécessité de rechercher des solutions plus efficaces et écologiques pour la traction ferroviaire (*UIC Low Carbon Rail Challenge*) [1].

Les moteurs électriques traditionnels, utilisant des balais et des collecteurs, génèrent des particules fines en raison de l'usure mécanique de ces composants. L'usure se produit en raison du contact continu entre les balais en charbon et le collecteur sur le rotor du moteur électrique. Ce mécanisme provoque non seulement la pollution de l'environnement, mais aussi des pertes d'énergie accrues sous forme de pertes thermiques et mécaniques. Bien que les balais puissent être remplacés, l'usure du collecteur est plus grave, car cette pièce est solidement attachée au rotor, et sa dégradation réduit la durée de vie globale du moteur. La Fig. 1 montre un moteur de traction électrique à collecteur.

Fig. 1. Moteur de traction électrique à collecteur

Dans le cas de la traction indépendante, qui utilise des générateurs diesel pour produire de l'énergie électrique, des émissions de gaz à effet de serre et d'autres formes de pollution environnementale se produisent. La puissance de ces générateurs est dimensionnée en fonction des besoins énergétiques de l'ensemble de la rame, et ces besoins peuvent être réduits jusqu'à 12.96 % grâce à l'utilisation de moteurs *PMSM* décrie par l'étude de *Peng, Y* [2]. L'implémentation de moteurs PMSM permet ainsi d'utiliser des moteurs à combustion plus petits et moins polluants, réduisant non seulement la consommation énergétique du système de propulsion, mais aussi optimisant l'utilisation du carburant dans les groupes électrogènes. Le schéma de la traction indépendante est présenté sur la Fig. 2.

De plus, dans le domaine de la traction indépendante, des sources d'énergie alternatives telles que les batteries ou les piles à hydrogène sont de plus en plus explorées. Ces technologies peuvent grandement bénéficier de l'utilisation de moteurs *PMSM*, qui, grâce à leur haute efficacité, permettent d'étendre l'autonomie des véhicules et d'optimiser l'utilisation de l'énergie disponible.

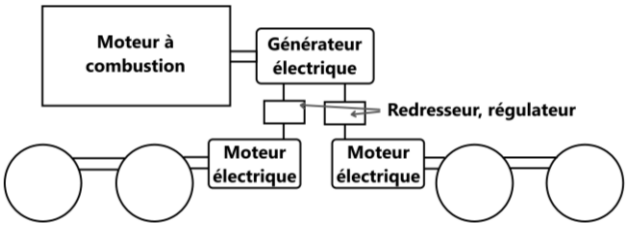

Fig. 2. Schéma de la traction indépendante

Les moteurs *PMSM* utilisent des aimants permanents sur le rotor, ce qui élimine la nécessité d'un collecteur et de balais en charbon. Cela réduit considérablement les pertes mécaniques et élimine la principale pièce sujette à l'usure par friction. Bien entendu, d'autres composants des moteurs *PMSM* sont également soumis à l'usure, mais ces derniers ont généralement une durée de vie plus longue et nécessitent moins de maintenance par rapport aux moteurs classiques. L'une des caractéristiques les plus importantes des moteurs *PMSM* est leur haute efficacité, illustrée sur la carte d'efficacité de la Fig. 3 [3].

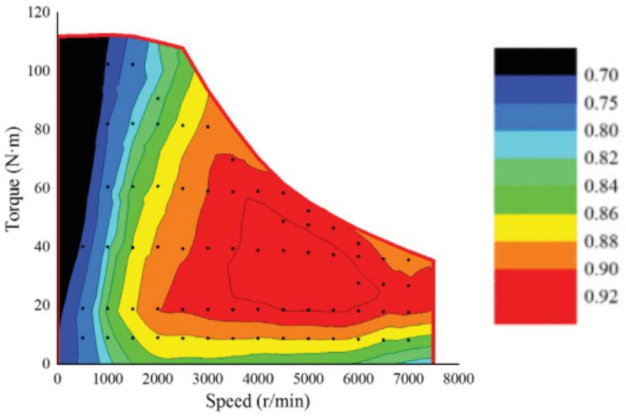

Fig. 3. Carte d'efficacité du moteur *PMSM*

Cette efficacité élevée se traduit non seulement par des pertes d'énergie réduites, mais aussi par une moindre charge thermique du moteur. La réduction des pertes thermiques permet une plus grande concentration de puissance par unité de poids, ce qui améliore le rendement spécifique. En pratique, cela signifie que les moteurs *PMSM* peuvent être plus petits et plus légers que les entraînements traditionnels pour une même puissance de traction, réduisant ainsi le poids total du véhicule ferroviaire. Un poids plus faible a un impact positif sur l'efficacité énergétique et les coûts d'exploitation des véhicules

ferroviaires, faisant des moteurs *PMSM* une solution attrayante pour le transport ferroviaire moderne et écologique.

Il existe plusieurs types de moteurs synchrones à aimants permanents (*PMSM*), qui peuvent être divisés en deux architectures principales en fonction de l'orientation du champ magnétique : les moteurs à champ magnétique radial et les moteurs à champ magnétique axial. Chacun de ces types présente des caractéristiques spécifiques, des avantages et des inconvénients, qui déterminent leur adéquation pour des applications spécifiques dans le domaine des transports, en particulier dans la traction ferroviaire.

1 MOTEURS PMSM RADIAUX

Les moteurs *PMSM* radiaux sont actuellement couramment utilisés dans le transport routier et apparaissent de plus en plus dans le transport ferroviaire. Leur fabrication est technologiquement moins exigeante, car leur conception s'inspire des moteurs électriques à courant continu plus anciens. L'un des principaux avantages de ces moteurs est leur capacité à atteindre des vitesses de rotation élevées, souvent supérieures à 20 000 tours par minute. Cette caractéristique les rend adaptés aux applications nécessitant une grande vitesse de rotation.

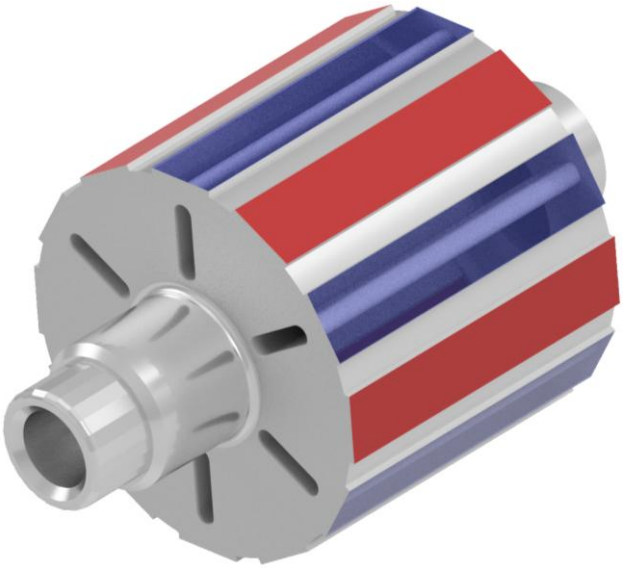

Fig. 4. Rotor d'un moteur *PMSM* radial

L'inconvénient des moteurs *PMSM* radiaux est leur capacité limitée à générer un couple élevé. Dans les cas où un couple élevé est nécessaire, il est nécessaire d'utiliser un mécanisme de transmission avec un rapport de transmission élevé, ce qui entraîne des pertes mécaniques accrues, une réduction de l'efficacité globale et une augmentation du moment d'inertie du système. Malgré ces inconvénients, les moteurs *PMSM* radiaux sont les moteurs de type *PMSM* les plus couramment utilisés dans le transport ferroviaire en raison de leurs coûts de fabrication plus bas et de la bonne disponibilité des solutions technologiques.

Du point de vue de la conception, les moteurs *PMSM* radiaux ont un rotor en forme de disque, avec des aimants permanents placés sur la surface du rotor ou encastrés dans sa structure. Le rotor tourne dans le champ magnétique créé par le stator, ce qui permet le transfert mécanique d'énergie. La Fig. 4 montre le rotor d'un moteur *PMSM* radial.

2 MOTEURS PMSM AXIAUX

Les moteurs *PMSM* axiaux représentent une technologie plus récente, dont l'application pratique dans le transport ferroviaire en est encore à un stade précoce de développement. Contrairement aux moteurs radiaux, les moteurs *PMSM* axiaux génèrent un couple beaucoup plus élevé, ce qui est obtenu grâce à un bras magnétique plus grand. Cette différence de conception permet un transfert de puissance plus efficace à faibles vitesses, ce qui est particulièrement avantageux pour les applications de traction ferroviaire, où un fort tirant est nécessaire à faibles vitesses.

Les vitesses maximales des moteurs *PMSM* axiaux sont généralement inférieures à celles des moteurs radiaux, mais grâce à leur couple élevé, leur puissance spécifique (puissance par rapport au poids du moteur) est comparable et, dans certains cas, même plus élevée. Cette caractéristique permet leur utilisation dans le transport ferroviaire avec un rapport de transmission plus faible, voire sans mécanisme de transmission.

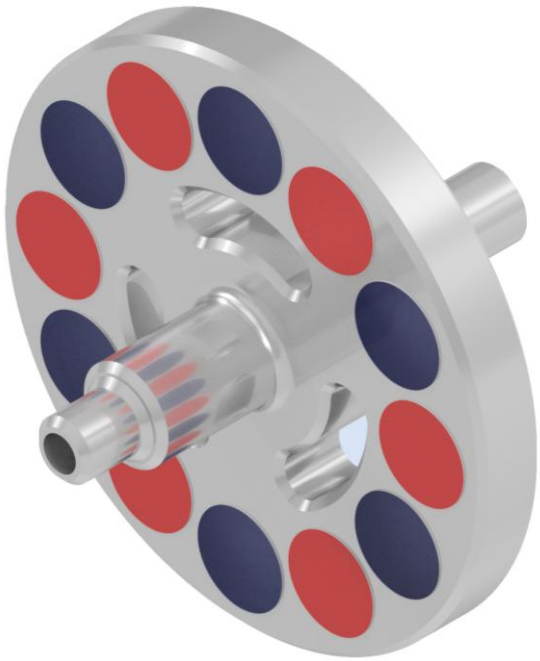

Fig. 5. Rotor d'un moteur *PMSM* axial

Dans le concept de traction directe (sans boîte de vitesses), le rotor du moteur *PMSM* axial peut être

directement intégré sue l'axe des roues du véhicule ferroviaire. Cette intégration réduit le besoin de transmissions supplémentaires, minimisant ainsi les pertes mécaniques et améliorant la fiabilité globale du système de traction. De plus, les moteurs *PMSM* axiaux sont conceptuellement plus simples à connecter entre eux par rapport aux moteurs radiaux, ce qui permet la conception de solutions modulaires.

Du point de vue de la conception, les moteurs *PMSM* axiaux ont un rotor en forme de disque, avec un champ magnétique orienté dans le sens axial (c'est-à-dire le long de l'axe du rotor). Cette conception permet une utilisation plus efficace de l'espace et améliore le refroidissement du moteur, contribuant ainsi à une meilleure efficacité. La Fig. 5 montre le rotor d'un moteur *PMSM* axial.

CONCLUSION

Cet article présente un aperçu des solutions possibles pour la traction électrique utilisant des moteurs à aimants permanents (*PMSM*). Il se concentre principalement sur les avantages de cette technologie moderne dans le transport ferroviaire, son apport à la mobilité écologique et à la réduction des émissions.

L'objectif de l'article est de démontrer que l'utilisation des moteurs *PMSM* offre une efficacité supérieure par rapport aux moteurs électriques standards et permet également une réduction significative des exigences mécaniques. Cet effet est obtenu par l'intégration directe des moteurs dans le bogie, éliminant ainsi la nécessité d'un mécanisme de transmission. Un autre avantage est la réduction du poids des moteurs et de leurs pertes thermiques en raison de leur haute efficacité, ce qui conduit à une diminution de la consommation énergétique des trains.

Selon les sources disponibles, l'utilisation des moteurs *PMSM* peut améliorer l'efficacité de 12,96 %. Cette valeur peut être encore plus élevée dans le cas des locomotives diesel-électriques, où une efficacité accrue permet l'utilisation de générateurs plus petits, réduisant ainsi le poids de la locomotive et diminuant sa consommation de carburant. L'économie d'énergie directe conduit ensuite à une réduction des émissions.

L'article compare également les moteurs *PMSM* radiaux et axiaux, et il a été présenté que les moteurs axiaux sont plus avantageux pour le transport ferroviaire. Ils offrent une meilleure efficacité, une construction plus compacte et une meilleure répartition du couple, ce qui les rend plus adaptés aux applications ferroviaires.

Remerciements

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 024ŽU-4/2024: „Prehlbovanie vedomostí študentov univerzitného štúdia v oblasti konštrukcie dopravných prostriedkov realizáciou odborných a vedeckovýskumných aktivít v odbore."

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného program Vozidlá a motory."

BIBLIOGRAPHIE

[1] GOOLAK, S. - GERLICI, J. - TKACHENKO, V. - SAPRONOVA, S. - LACK, T. - KRAVCHENKO, K. (2019): *Determination of parameters of asynchronous electric machines with asymmetrical windings of electric locomotives*. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, Vol. 21, No. 2, 24-31. DOI: 10.26552/com.c.2019.2.24-31.

[2] CRAVEN, N. (2014): *Low Carbon Rail Challenge. International Union of Railways (UIC), Fundamental Values Department, with technical support from the Sustainable Development Foundation (Raimondo Orsini, Massimo Ciuffini, Daniele Arena)*. [Online], Available at: https://uic.org/IMG/pdf/low_carbon_rail_challenge_technical_report.pdf

[3] PENG, Y. - CHEN, F. - CHEN, F. - WU, C. - WANG, Q. - HE, Z. (2024): *Energy-Efficient Train Control: A Comparative Study Based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor*. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 73, No. 11, 16148-16159. [Online], Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/10570070

[4] WU, J. - WANG, J. - GAN, C. - SUN, Q. - KONG, W. (2018): *Efficiency Optimization of PMSM Drives Using Field-Circuit Coupled FEM for EV/HEV Applications*. In: IEEE Access, 6, 15192-15201. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2813987.

[5] XU, X. - WU, S. - CHEN, Y. - ZHANG, J. - LI, G. - YAN, C. - TAN, Z. - PENG, D. (2024): *Heat dissipation design and performance optimization of high-speed train PMSM based on coupled electromagnetic-thermal field*. In: Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 61, 104904. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104904.

[6] BLANKEN, N. - PONICK, B. (2023): *Preferable PMSM rotor geometry for reduced axial flux components in the stator cor*e. In: Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 140, No. 3-4, 382-390. DOI: 10.1007/s00502-023-01137-1

[7] BOUAZIZ, O. - JAAFAR, I. - BEN AMMAR, F. (2018): *Performance analysis of radial and axial flux PMSM based on 3D FEM modeling*. In: Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, Vol. 26, No. 3, 1587-1598. DOI: 10.3906/elk-1708-68.