शोध पत्र/Research Paper

ई-गतिशीलता : विद्युत वाहन मोटर प्रौद्योगिकियों का तुलनात्मक अध्ययन

E-mobility : Comparative Study of Electric Vehicle Motor Technologies

मयंक[1], प्रीति[2] एवं संजय सिंह राठौड़[3]

Mayank[1], Preeti[2] and Sanjay S. Rathore[3]

[1]B.Tech. student, Shri Vishwakarma Skill University, Palwal, Haryana

[2]Skill Assistant Professor (EE), Shri Vishwakarma Skill University, Palwal, Haryana

[3]Skill Associate Professor (ME), Shri Vishwakarma Skill University, Palwal, Haryana

[1]23UGBMS02106@svsu.ac.in, [2]preeti@svsu.ac.in, [3]sanjay.singh@svsu.ac.in

https://doi.org/10.5281/zenodo.18556479

सारांश

स्वच्छ ऊर्जा से चलने वाली एक ऐसी दुनिया की कल्पना कीजिए, जहाँ कारें बिना धुआँ छोड़े चलती रहें। यही वह सपना है जो शोधकर्ताओं को आंतरिक दहन (IC) इंजनों की जगह नए तरीके विकसित करने के लिए प्रेरित कर रहा है। हालाँकि संकर इंजन एक शानदार शुरुआत हैं, लेकिन पर्यावरण पर वास्तविक प्रभाव डालने के लिए एक अधिक प्रभावी समाधान की आवश्यकता है। विद्युत वाहन (EV) दहन इंजन की अवधारणा को पूरी तरह से त्याग देते हैं और शून्य-उत्सर्जन वाली सवारी के लिए पूरी तरह से विद्युत मोटर पर निर्भर रहते हैं। हालाँकि, दक्षता, किफ़ायतीपन और मज़बूती का एक बेहतरीन मिश्रण, विद्युत मोटर की चुनौती अभी भी मौजूद है। अभियंता और शोधकर्ता विद्युत मोटर तकनीक के क्षेत्र में व्यापक रूप से शोध कर रहे हैं।

यह शोध पत्र विद्युत वाहनों (EV) में प्रयुक्त विद्युत मोटरों की दुनिया का विश्लेषण करता है, जिसमें विभिन्न प्रकार की विद्युत मोटरों जैसे ब्रशयुक्त दिष्ट धारा (BDC) मोटर, ब्रशमुक्त दिष्ट धारा (BLDC) मोटर, प्रेरण मोटर, स्थायी चुंबक तुल्यकालिक मोटर (PMSM), परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर (SRM) और संकर मोटरों (HM) की तुलना की गई है, जो लागत, दक्षता, शक्ति घनत्व और अनुप्रयोग आवश्यकताओं जैसे कारकों के आधार पर विभिन्न लाभ और व्यापार-नापसंद प्रदान करती हैं।

Abstract

Imagine a world powered by clean energy, where cars glide silently without spewing fumes. That's the dream driving researchers to develop new ways to replace internal combustion (IC) engines. While hybrids are a fantastic starting point, a more potent solution is needed to have a real environmental impact. Electric vehicles (EVs) ditch the whole idea of combustion engine, relying solely on electric motors for a zero-emission ride. However, under the hood, the challenge of electric motor which is perfect blend of efficiency, affordability, and toughness still exists. Electrical engineers and researchers are extensively conducting research in the field of electrical motor technology.

This research paper analyse the world of electric motors used in the electrical vehicles (EVs) comparing different types of electrical motors such as Brushed Direct Current (BDC) motors, Brushless Direct Current (BLDC) motors, induction motors, permanent magnet synchronous motors (PMSM), switched reluctance motors (SRM) and hybrid motors offering different advantages and trade-offs depending on factors such as cost, efficiency, power density, and application requirements.

मुख्य शब्द: विद्युत वाहन, ब्रशमुक्त दिष्ट धारा मोटर, विद्युत मोटर, आंतरिक दहन इंजन, पर्यावरण।
Key Words: Electric Vehicle, BLDC motor, Electric Motor, Internal Combustion Engine, Environment.

परिचय

जैसे-जैसे वैश्विक स्वचालित उद्योग पर्यावरणीय स्थिरता की ओर बढ़ रहा है, विद्युत वाहन (EVs) हरितगृह गैस उत्सर्जन को कम करने और जलवायु परिवर्तन का मुकाबला करने के लिए एक प्रमुख समाधान के रूप में उभर रहे हैं। यह परिवर्तन सीमित और पर्यावरण के लिए हानिकारक जीवाश्म ईंधनों से दूर जाने की आवश्यकता से प्रेरित है। पारंपरिक आंतरिक दहन (IC) इंजन लंबे समय से प्रमुख प्रौद्योगिकी रहे हैं, लेकिन उनके उच्च उत्सर्जन और गैर-नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों पर निर्भरता अब स्थायी भविष्य के लिए व्यवहार्य नहीं है।[1]

शोधकर्ताओं और अभियंताओं ने विद्युत मोटरों पर आधारित वाहनों पर ध्यान केंद्रित किया है। ये मोटर उच्च दक्षता और कम पर्यावरणीय प्रभाव प्रदान करती हैं। हालाँकि, चुनौती इस बात की है कि विद्युत वाहनों के लिए सबसे अच्छा विद्युत मोटर चुनें, जो लागत, दक्षता, शक्ति घनत्व और स्थायित्व का संतुलन बनाए। यह शोध पत्र विभिन्न प्रकार की विद्युत मोटर प्रौद्योगिकियों की तुलना करता है और मौजूदा साहित्य की समीक्षा करते हुए प्रत्येक मोटर प्रकार के प्रमुख प्रदर्शन कारकों को उजागर करता है।

विद्युत मोटर प्रौद्योगिकी पर वर्तमान साहित्य का ध्यान दक्षता को अनुकूलित, लागत को कम और प्रदर्शन में सुधार करने पर है। शोध से पता चलता है कि मोटर का प्रकार विद्युत वाहनों के समग्र प्रदर्शन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है।[2]सबसे अधिक चर्चा किए गए मोटर्स में ब्रशयुक्त दिष्ट धारा (BDC) मोटर, ब्रशमुक्त दिष्ट धारा (BLDC) मोटर, प्रेरण मोटर, स्थायी चुंबक तुल्यकालिक मोटर (PMSM), परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर (SRM) और संकरमोटर्स शामिल हैं।

ब्रशयुक्त दिष्ट धारा मोटर्स को उनके सरल डिजाइन और कम लागत के कारण व्यापक रूप से उपयोग किया गया है, लेकिन उनके साथ जुड़े नुकसान जैसे सीमित दक्षता और नियमित रखरखाव ने उन्हें आधुनिक विद्युत वाहनों के लिए कम उपयुक्त बना दिया है।[3] वहीं, ब्रशमुक्त दिष्ट धारा मोटर्स में अधिक दक्षता, विश्वसनीयता और दीर्घ सेवा अवधि सर्विस लाइफ के कारण विद्युत वाहन डिज़ाइन में तेजी से लोकप्रिय हो रहे हैं। ब्रशमुक्त दिष्ट धारा मोटर्स प्रदर्शन के मापदंड जैसे दक्षता और शक्ति घनत्व में ब्रशयुक्त दिष्ट धारा मोटर्स से बेहतर हैं।[4]

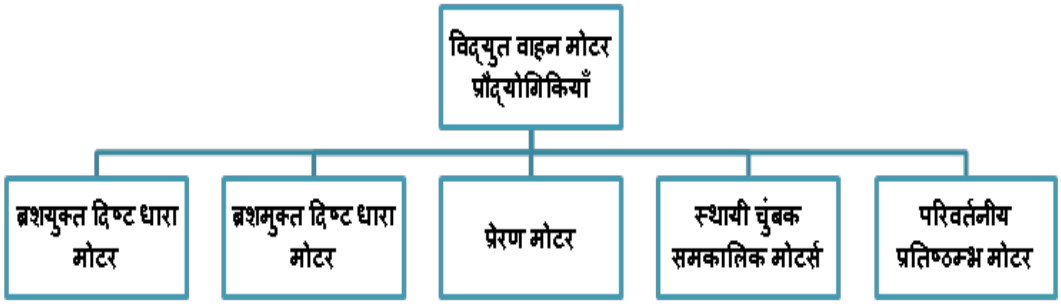
प्रेरण मोटर्स का विभिन्न औद्योगिक अनुप्रयोगों में लंबे समय से उपयोग किया जा रहा है, जिसमें विद्युत वाहन भी शामिल हैं। इसका मुख्य कारण मोटर्स की कठोरता और स्थायी चुंबकों की आवश्यकता न होना है। हालांकि, प्रेरण मोटर्स आमतौर पर कम गति पर कम कुशल होते हैं।[5] दूसरी ओर, स्थायी चुंबक समकालिक मोटर्स (PMSM), विशेष रूप से उच्च-प्रदर्शन विद्युत वाहन में, उच्च दक्षता प्रदान करते हैं।लेकिन वे दुर्लभ पृथ्वी तत्वों पर निर्भर हैं, जिससे उनकी लागत बढ़ जाती है।[6]

हाल ही में परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर्स (SRM) पर हुए शोध से पता चलता है कि वे स्थायी चुंबक समकालिक मोटर्स और प्रेरण मोटर्स का एक संभावित विकल्प हो सकते हैं। परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ अपनी सरल निर्माण, उच्च विश्वसनीयता और कम लागत के लिए जाने जाते हैं, लेकिन उनके साथ जुड़े शोर और टॉर्क तरंग मुद्दों के कारण उनका व्यापक उपयोग सीमित है।[7] हाल के वर्षों में, संकर मोटर्स, जो विभिन्न प्रकार की मोटर्स की विशेषताओं को जोड़ते हैं, की भी खोज की गई है, लेकिन ये समाधान अधिक जटिलता और लागत में वृद्धि करते हैं।[8] उपरोक्त को ध्यान में रखते हुए, इस शोध पत्र के अगले अनुभागों में विद्युत वाहनों में प्रयोग होने वाली विभिन्न मोटर प्रौद्योगिकियों का तुलनात्मक विश्लेषण प्रस्तुत किया गया है।

विद्युत वाहन मोटर प्रौद्योगिकियाँ

ब्रशयुक्त दिष्ट धारा मोटर : ब्रशयुक्त दिष्ट धारा मोटर विद्युत वाहनों में उपयोग किए जाने वाले शुरुआती मोटर्स में से एक हैं। इन मोटर्स में विद्युत धारा ब्रश के माध्यम से रोटर वाइंडिंग्स तक पहुंचती है, जिससे टॉर्क उत्पन्न होता है। इस मोटर प्रकार की लागत कम है और इसे नियंत्रित करना आसान है। लेकिन इसकी यांत्रिक

संरचना समय के साथ क्षीण हो जाती है, जिससे नियमित रखरखाव की आवश्यकता होती है। इसके अलावा, ब्रशयुक्त दिष्ट धारा मोटर्स की दक्षता अन्य मोटर प्रौद्योगिकियों की तुलना में कम है, जो उन्हें आधुनिक विद्युत वाहनों के लिए कम उपयुक्त बनाता है।[9]



चित्र 1. विद्युत वाहनों के लिए उपयोग की जाने वाली विभिन्न मोटर तकनीक

ब्रशमुक्त दिष्ट धारा मोटर : ब्रशमुक्त दिष्ट धारा मोटर, ब्रशयुक्त दिष्ट धारा का उन्नत रूप हैं, जिसमें ब्रश की आवश्यकता को विद्युत संगणन द्वारा समाप्त कर दिया गया है। इससे दक्षता, विश्वसनीयता और सर्विस लाइफ में काफी वृद्धि होती है। BLDC मोटर्स में उच्च शक्ति घनत्व होता है, जिससे वे सीमित जगह विद्युत वाहनों के लिए आदर्श मोटर है। हालाँकि, ब्रशमुक्त दिष्ट धारा मोटर्स की उच्च लागत, इलेक्ट्रॉनिक नियंत्रण इकाइयों की आवश्यकता के कारण, उन्हें सस्ते विद्युत वाहन मॉडलों में व्यापक रूप से अपनाने में बाधा उत्पन्न कर सकती है।[10]

प्रेरण मोटर : प्रेरण मोटर मुख्य रूप से अपनी मजबूत निर्माण और दुर्लभ भू-सामग्री पर निर्भरता न होने के कारण विद्युत वाहनों में एक लोकप्रिय विकल्प हैं। ये मोटर्स विद्युत चुम्बकीय प्रेरण का उपयोग करके टॉर्क उत्पन्न करते हैं, जिससे वे अत्यधिक विश्वसनीय और कम रखरखाव वाले होते हैं। हालाँकि, प्रेरण मोटर्स कम गति पर कम कुशल होते हैं, और उनका डिज़ाइन अधिक जटिल होता है, जिससे उनका शक्ति घनत्व ब्रशमुक्त दिष्ट धारा और स्थायी चुंबक समकालिक मोटर की तुलना में थोडा कम होता है।[11] प्रेरण मोटर्स का उपयोग टेस्ला मॉडल एस जैसे उच्च स्तरीय विद्युत वाहन मॉडलों में किया गया है।[12]

स्थायी चुंबक समकालिक मोटर : स्थायी चुंबक समकालिक मोटर प्रौद्योगिकियों में सबसे उच्च दक्षता स्तर जैसे कि उच्च गति पर प्रदर्शन प्रदान करते हैं, जिससे वे उच्च-प्रदर्शन विद्युत वाहनों के लिए पसंदीदा मोटर माने जाते हैं। इनका मुख्य नुकसान यह है कि ये स्थायी चुंबकों पर निर्भर होते हैं, जो दुर्लभ भू-सामग्री से बने होते हैं, जिससे स्थायी चुंबक समकालिक मोटर्स की लागत अधिक हो जाती है और आपूर्ति श्रृंखला में रुकावटों का सामना करना पड़ता है। इन सीमाओं के बावजूद, स्थायी चुंबक समकालिक मोटर्स का टॉर्क घनत्व और दक्षता के मामले में बेहतर प्रदर्शन उन्हें उत्कृष्ट विद्युत वाहनों में अनिवार्य बना देता है।[13]

परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर : परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर अपेक्षाकृत एक नई तकनीक हैं जिन्हें विद्युत वाहन अनुप्रयोगों के लिए खोजा जा रहा है। परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर अपने सरल अभिकल्पना के लिए जाने जाते हैं, जिसमें रोटर और स्टेटर में वाइंडिंग्स या स्थायी चुंबक नहीं होते हैं। इस सरलता के कारण निर्माण लागत कम हो जाती है और विश्वसनीयता बढ़ जाती है। हालाँकि, परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर से जुड़े टॉर्क रिपल और ध्वनिक शोर मुख्य बाधाएं हैं, जिन्हें व्यापक रूप से अपनाने से पहले हल करने की आवश्यकता है। शोधकर्ताओं ने इन समस्याओं को कम करने और परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ मोटर की लागत और स्थायित्व लाभों को बनाए रखने पर काम किया है।[14]

संकर मोटर : संकर मोटर दो या अधिक मोटर प्रकारों के सर्वोत्तम पहलुओं को जोड़ते हैं, जैसे कि ब्रशमुक्त दिष्ट धारा मोटर और प्रेरण मोटर। ये प्रणाली विद्युत वाहन प्रदर्शन को अनुकूलित करने के लिए अभिकल्पित किए गए हैं, जिसमें दक्षता और टॉर्क वितरण में सुधार किया गया है। हालाँकि, संकर मोटर्स की जटिलता और उच्च लागत ने उनके व्यापक उपयोग में बाधाएं उत्पन्न की हैं। जैसे-जैसे शोध और विकास प्रगति कर रहा है, संकर मोटर्स निकट भविष्य में विद्युत वाहनों के लिए एक व्यवहार्य विकल्प हो सकते हैं।[15]

विभिन्न मोटर प्रौद्योगिकियों के उपरोक्त विवरण के आधार पर, यह निष्कर्ष निकाला जा सकता है कि मोटर्स के चयन को प्रभावित करने वाले मुख्य कारक निम्नलिखित हैं:

i) प्रदर्शन: टॉर्क, शक्ति और दक्षता

ii) लागत: प्रारंभिक लागत, निर्माण और रखरखाव

iii) विश्वसनीयता: दोष सहनशीलता, स्थायित्व, और परिचालन की स्थिति

iv) नियंत्रणीयता: गति, टॉर्क और पुनर्योजी विभंजन क्षमताएं

प्रदर्शन तुलना

तालिका 1. मोटर्स की प्रमुख विशेषताएँ और प्रदर्शन मापदंड

मोटर प्रकार	दक्षता	लागत	शक्ति घनत्व	अनुप्रयोग उपयुक्तता
ब्रशयुक्त दिष्ट धारा	कम	कम	कम	आधुनिक विद्युत वाहनों में सीमित उपयोग
ब्रशमुक्त दिष्ट धारा	उच्च	मध्यम	उच्च	छोटे विद्युत वाहनों में व्यापक रूप से उपयोग किया जाता है
प्रेरण	मध्यम	मध्यम	मध्यम	मजबूत, उच्च-प्रदर्शन विद्युत वाहनों के लिए उपयुक्त
स्थायी चुंबक समकालिक	बहुत उच्च	उच्च	उच्च	उत्कृष्ट प्रीमियम विद्युत वाहनों, उच्च प्रदर्शन
परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ	मध्यम	कम	मध्यम	उभरती हुई तकनीक, लागत और स्थायित्व में आशाजनक
संकर	उच्च	उच्च	उच्च	जटिल, विकासाधीन

विभिन्न मोटर प्रौद्योगिकियों में लागत, दक्षता, शक्ति घनत्व और अनुप्रयोग-विशिष्ट आवश्यकताओं के संदर्भ में कुछ समझौते होते हैं।[16-21] इस शोध पत्र में चर्चा की गई मोटर्स की प्रमुख विशेषताएँ और प्रदर्शन मापदंडों का सारांश तालिका 1 में दिया गया है। यह तालिका विभिन्न मोटर्स के प्रदर्शन और उनके उपयुक्त अनुप्रयोगों के बीच तुलना को दर्शाती है।

निष्कर्ष

विद्युत वाहनों के लिए मोटर प्रौद्योगिकी का चयन मुख्य रूप से विशिष्ट अनुप्रयोग और प्रदर्शन आवश्यकताओं पर निर्भर करता है। ब्रशमुक्त दिष्ट धारा और स्थायी चुंबक समकालिक मोटर वर्तमान में उच्च दक्षता और शक्ति घनत्व के कारण विद्युत वाहन अभिकल्पना में सबसे लोकप्रिय हैं, जबकि प्रेरण मोटर और परिवर्तनीय प्रतिष्ठम्भ लागत और विश्वसनीयता के मामले में अनूठे लाभ प्रदान करते हैं। संकर मोटर में महत्वपूर्ण संभावनाएं हैं, लेकिन जटिलता

और लागत से जुड़ी समस्याओं को हल करने के लिए और अनुसंधान की आवश्यकता है।

जैसे-जैसे विद्युत वाहनों की मांग बढ़ती जा रही है, मोटर प्रौद्योगिकियों में सुधार के लिए निरंतर शोध, एक स्थायी और ऊर्जा-कुशल भविष्य प्राप्त करने के लिए महत्वपूर्ण होगा। प्रत्येक मोटर प्रकार की अपनी एक खूबी है, और मोटर का इष्टतम विकल्प इस पर निर्भर करेगा कि दक्षता, लागत, या स्थायित्व में से किस आवश्यकता को प्राथमिकता दी जा रही है।

सन्दर्भ

1. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design. John Wiley & Sons, (2002).
2. Z. Zhang, L. Zhen, and Z. Ping, "Comparative study of various electric motor technologies for electric vehicles," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 1, pp. 203–212, Jan. (2015).
3. M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, 2nd ed. CRC Press, (2009).
4. A. Hughes and B. Drury, Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications, 5th ed. Newnes, (2019).
5. D. I. Jones and D. G. Gilbert, "Efficiency and performance of induction motors for electric vehicle applications," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 14, no. 4, pp. 1497–1503, Dec. (1999).
6. C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," Proc. IEEE, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, Feb. (2002).
7. P. C. Sen, "Switched reluctance motor drives for electric vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 1, pp. 158–165, Feb. (2002).
8. K. Rajashekara, "Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies," IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 1, no. 1, pp. 3–10, Mar. (2013).
9. J. F. Gieras, Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications, 3rd ed. CRC Press, (2010).
10. A. Emadi, Y. Gao, and S. S. Williamson, "Power electronics for electric vehicles," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 3, pp. 567–577, May (2006).
11. M. G. Say, Alternating Current Machines, 5th ed. Longman Scientific & Technical, (1990).
12. "Tesla Model S," Tesla Inc., Palo Alto, CA, (2012).
13. J. M. Miller, "Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 3, pp. 756–767, May (2006).
14. W. M. Arshad, "Switched reluctance motors for electric vehicles: A potential alternative," Proc. IEEE, vol. 88, no. 6, pp. 1047–1058, Jun. (2020).
15. J. M. Miller, A. Emadi, and B. Fahimi, "Hybrid motor drives for electric vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 7, pp. 2927–2938, Jul. (2011).
16. D. A. Howey, P. Mitcheson, and P. Taylor, "Electric Vehicle Motor Technologies and Performance Comparison," Tech. Rep. EML-2017-01, Energy Futures Lab., Imperial College London, U.K., (2017).
17. Y. Chen, L. Wu, and Y. Li, "Comparative Analysis of Electric Vehicle Motor Technologies: A Review," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 56, no. 2, pp. 1594-1606, Mar.-Apr. (2020).
18. A. Smith, "Electric Motors: Which Technology Leads the Way?" Electr. Vehicle World, vol. 23, no. 4, pp. 34-37, Apr. (2020).
19. H. L. Parker, "Comparative Study of Electric Vehicle Motor Technologies," Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., Stanford Univ., Stanford, CA, USA, (2021).
20. Y. Yang, S. Cao, Y. Zhao, and L. Li, "Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles," Automotive Innovation, vol. 4, no. 1, pp. 1-12, Mar. (2023).
21. A. El-Refaie, "The Future of Electric Vehicle Technology: Reducing Dependence on Heavy Rare-Earth Materials," Marquette Today, Dec. (2023).

❐