

ABSTRAK

Motor Brushless Direct Current (BLDC) banyak digunakan sebagai sistem penggerak kendaraan listrik karena memiliki efisiensi tinggi, torsi besar, serta keandalan yang baik. Namun, karakteristik kinerja motor BLDC dipengaruhi oleh kondisi operasi dinamis, seperti variasi lintasan, kecepatan kendaraan, dan beban. Sebagian besar penelitian sebelumnya masih menggunakan pengujian statis, *dynamometer* dengan beban tetap, atau simulasi, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik motor dan respons pengendalian pada kondisi operasi nyata. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik kinerja motor BLDC dan respons kontrol kecepatan menggunakan pengendali PID pada kendaraan listrik MEVi dalam berbagai kondisi operasi dinamis, serta menentukan kondisi operasi yang efisien berdasarkan peta konsumsi energi. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan kendaraan MEVi yang dilengkapi motor BLDC dan pengendali PID. Pengujian dilaksanakan pada lintasan datar, menaik, dan menurun dengan variasi kecepatan dan beban. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan *Three-Way* (ANOVA) untuk mengevaluasi pengaruh kondisi lintasan, kecepatan, dan beban terhadap kinerja motor BLDC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendali PID mampu mempertahankan kecepatan kendaraan dengan kemampuan tracking yang baik, *steady-state error* yang rendah, serta respons yang stabil pada seluruh kondisi pengujian. Kondisi lintasan terbukti menjadi faktor yang paling dominan memengaruhi kinerja motor BLDC ($\text{Partial } \eta^2 = 0,999$), diikuti oleh faktor kecepatan dan beban, dengan seluruh interaksi antar variabel signifikan secara statistik ($p < 0,001$). Analisis juga menghasilkan kurva karakteristik motor BLDC dan peta konsumsi energi yang menunjukkan kondisi operasi paling efisien pada setiap variasi lintasan. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan dalam pengembangan strategi manajemen energi, optimasi pengendalian kecepatan, dan peningkatan efisiensi pengoperasian kendaraan listrik ringan pada kondisi jalan nyata.

Kata kunci: Motor BLDC, kendali PID, kendaraan listrik, konsumsi energi, ANOVA.

ABSTRACT

Brushless Direct Current (BLDC) motors are widely employed as the propulsion system in Micro Electric Vehicles (MEVs) due to their high efficiency, high torque density, and reliable performance. However, the performance characteristics of BLDC motors are influenced by dynamic operating conditions, including variations in road profile, vehicle speed, and load. Most previous studies have primarily relied on static tests, fixed-load dynamometer experiments, or MEV simulations, which do not fully represent the motor characteristics and control performance under actual operating conditions. Therefore, this study aims to analyze the performance characteristics of a BLDC motor and the speed control response using a Proportional–Integral–Derivative (PID) controller under dynamic operating conditions of an MEV, as well as to determine the most energy-efficient operating conditions based on an energy consumption map. An experimental approach was conducted using an MEV equipped with a BLDC motor and a PID speed controller. The experiments were performed on flat, uphill, and downhill roads with various speed and load conditions. The experimental data were evaluated using a Three-Way Analysis of Variance (ANOVA) to determine the effects of road condition, vehicle speed, and load on BLDC motor performance. The results indicate that the PID controller was capable of maintaining the vehicle speed with good tracking performance, low steady-state error, and stable responses under all tested operating conditions. Road condition was identified as the most influential factor affecting BLDC motor performance ($\text{Partial } \eta^2 = 0.999$), followed by vehicle speed and load, while all interaction effects among the variables were statistically significant ($p < 0.001$). Furthermore, the analysis produced BLDC motor performance characteristic curves and an energy consumption map that identified the most energy-efficient operating regions under different road conditions. These findings provide a valuable reference for energy management strategies, speed control optimization, and improving the operational efficiency of lightweight electric vehicles under real driving conditions.

Keywords: BLDC motor, PID control, electric vehicle, energy consumption, ANOVA.