

Diterima : 5 Maret 2024

Direvisi : 14 April 2024

Online : 16 April 2024

Edisi : 28 Juni 2024

## **Analisis Arus Motor DC pada Kereta Rel Listrik JR205 Berdasarkan Pengujian Lapangan (Studi pada PT. Kereta Commuter Indonesia Balai Yasa Manggarai dan Depo Krl Depok)**

Muhammad Fauzan Ihsani\*, Readysal Monantun, Suyitno

*Universitas Negeri Jakarta, Jl.R.Mangun Muka, No.11, Rawamangun, East Jakarta 13220, Indonesia*

\*Email: [fauzan.ihsani@gmail.com](mailto:fauzan.ihsani@gmail.com)

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik arus input motor DC pada kereta rel listrik JR 205 berdasarkan hasil pengujian lapangan menggunakan alat Hioki HiCorder. Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan data sekunder yang diperoleh dari pengukuran arus selama operasi KRL. Data dianalisis secara statistik dengan menghitung rata-rata arus pada tiap notch operasi dan menghitung daya rata-rata motor menggunakan tegangan konstan 375 V sebagai parameter input, dengan rumus  $P=V \times I$ . Hasil analisis menunjukkan adanya variasi pola arus yang signifikan pada masing-masing notch, yang mencerminkan dinamika konsumsi energi motor DC selama operasi. Perhitungan daya rata-rata juga mengungkapkan kesesuaian antara nilai yang diukur dengan spesifikasi teknis motor, memberikan gambaran tentang performa dan kestabilan operasional motor. Berdasarkan temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa analisis pola arus motor DC melalui pengujian lapangan memberikan informasi komprehensif mengenai perilaku konsumsi energi motor dalam kondisi operasi riil, yang selanjutnya dapat dijadikan acuan untuk pengembangan sistem traksi yang lebih efisien pada KRL. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya peningkatan kinerja dan keandalan sistem penggerak pada transportasi rel listrik.

**Kata-kunci:** arus motor DC, hioki HiCorder, KRL JR 205

### **Abstract**

*This study aims to analyze the characteristics of the input current of the DC motor in the JR 205 electric commuter train based on field test results using the Hioki HiCorder. The research method employed is descriptive quantitative, utilizing secondary data obtained from current measurements during train operations. The data are statistically analyzed by calculating the average current for each operational notch and determining the average motor power using a constant voltage of 375 V as the input parameter, according to the formula  $P=V \times I$ . The analysis reveals significant variations in the current patterns across different notches, reflecting the dynamic energy*

*consumption behavior of the DC motor during operation. The calculation of average power also demonstrates consistency between the measured values and the technical specifications of the motor, providing insights into the performance and operational stability of the motor. Based on these findings, it can be concluded that analyzing the DC motor's current patterns through field testing provides comprehensive information about the motor's energy consumption behavior under real operating conditions, which can serve as a basis for developing a more efficient traction system for commuter trains. This study is expected to contribute to enhancing the performance and reliability of propulsion systems in electric rail transportation*

**Keywords:** DC motor current, hioki HiCorder, JR 205 commuter train

## **Pendahuluan**

Transportasi publik memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung mobilitas masyarakat, khususnya di wilayah perkotaan yang padat (Lättman & Otsuka, 2024) seperti Jabodetabek. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan moda transportasi yang cepat, aman, dan efisien, kereta api menjadi salah satu pilihan utama yang terus mengalami perkembangan baik dari sisi infrastruktur maupun teknologi (Laiton-Bonadiez et al., 2022). Salah satu moda transportasi berbasis rel yang banyak digunakan di wilayah ini adalah Kereta Rel Listrik (KRL) (D'Achiardi et al., 2022). Angkutan berbasis rel menjadi solusi transportasi jangka panjang yang menjanjikan, baik untuk angkutan penumpang maupun barang, karena keunggulan kapasitas besar dan jalur operasional yang steril dari hambatan lalu lintas (Bulková et al., 2022). Efektivitas dan efisiensi sistem ini menjadikannya pilihan utama di kota-kota besar. Kereta Rel Listrik (KRL) merupakan sistem transportasi yang menggunakan tenaga listrik sebagai penggerak utamanya (Wang et al., 2021). KRL terdiri dari beberapa jenis unit seperti kereta trailer berkabin masinis (Tc), kereta trailer (T), dan kereta bermotor (M) yang dilengkapi motor listrik pada gardan rodanya. Penyusunan jenis-jenis kereta ini dalam satu rangkaian bertujuan untuk menghasilkan pembagian tenaga yang optimal serta efisiensi dalam pengoperasian.

Dalam kurun waktu 10 tahun terakhir, perkembangan dunia perkeretaapian di Indonesia khususnya Jabodetabek berkembang cukup pesat ke arah yang lebih baik. Mulai dari dihapusnya KRL Ekonomi oleh PT. Kereta Api Indonesia yang kemudian digantikan oleh KRL bekas dari Jepang yang kondisinya lebih baik. Kemudian mulai beroperasinya MRT Jakarta dari Lebak Bulus sampai Bundaran HI, lalu LRT Jakarta dari Velodrome hingga Pegangsaan Dua. Hingga yang paling terbaru adalah LRT Jabodebek. Angkutan berbasis rel juga dapat dijadikan prospek jangka panjang baik untuk angkutan barang maupun manusia (Krishna et al., 2022). Karena kapasitasnya yang besar dan jalurnya yang steril dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi baik dalam mengangkut barang maupun penumpang (Wu et al., 2022). Kereta Rel Listrik (KRL) merupakan kereta yang menggunakan listrik sebagai sumber tenaga dan penggeraknya (Popovich et al., 2021). Ada beberapa jenis kereta yang menggunakan listrik sebagai sumber tenaganya, seperti lokomotif listrik yang digunakan untuk kebutuhan kargo dan Electric Multiple Unit (EMU) yang digunakan untuk mengangkut penumpang (Meng et al., 2023; Ma et al., 2023). KRL menggunakan penggerak motor listrik yang terletak di gardan rodanya. Dalam satu rangkaian KRL ada beberapa jenis kereta, yaitu kereta trailer berkabin masinis (Tc), kereta trailer (T), dan kereta berpengerak motor listrik (M). Dari ketiga jenis kereta tersebut disusun dalam sebuah rangkaian agar pembagian tenaga optimal dan efisien ketika beroperasi.

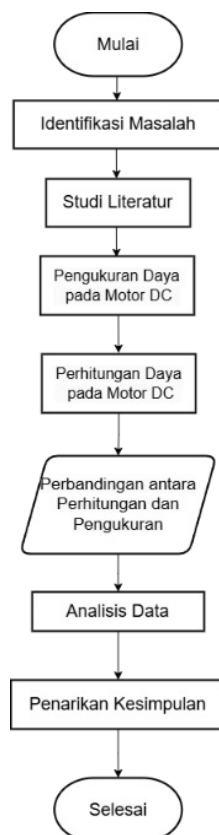
JR 205 merupakan kereta berjenis Electric Multiple Unit yang tidak memerlukan lokomotif karena penggeraknya berupa motor listrik ada pada as roda rangkaian kereta (Mahmoudi et al., 2023). Rangkaian keretanya juga merupakan sebuah rangkaian semi permanen dan tidak boleh sembarangan dibongkar dan ditukar dengan rangkaian lain. Masing-masing kereta berpengerak terdapat empat buah motor listrik dengan jenis motor DC (Liu et al., 2024). Untuk memberi tenaga listrik ke motor DC, digunakan rheostat sebagai sumbernya sekaligus sebagai pengatur kecepatan motor DC (Kim & Ahn, 2020). Rheostat berada pada kereta M1, yang menyalurkan listrik ke motor DC yang terdapat di kereta M1 dan M1'. Loss energy pada motor listrik dapat disebabkan dari tegangan output pada motor listrik berbeda dari tegangan input sehingga daya yang dikeluarkan akan lebih kecil dari yang seharusnya, kemudian beban yang dihela oleh motor listrik untuk menggerakkan kereta, dan lain-lain (Shao et al.,

2020; Kumar et al., 2023). Loss energy ini dapat mengakibatkan kecepatan kereta lebih lambat dari yang seharusnya dan dapat berpengaruh ke performa saat kereta beroperasi. Dapat juga berakibat pada keterlambatan perjalanan kereta dan mengganggu perjalanan.

JR 205 menggunakan motor DC sebanyak 16 buah pada satu rangkaian kereta. Dengan tipe MT61 dengan Toyo Denki sebagai produsennya, dan memiliki power output sebesar 105 kW. Setiap bulan, setidaknya ada satu rangkaian kereta yang dilakukan perawatan rutin tahunan. Perawatan ini meliputi inspeksi underframe, bogie, roda, sistem propulsi, pengecatan komponen-komponen underframe, hingga dilakukan pengujian operasi kereta di lintas secara langsung. Pada pengujian ini pula diukur besaran arus yang masuk ke motor DC yang berperan sebagai penggerak kereta. Pengukuran ini dilakukan untuk memastikan komponen penggerak kereta berfungsi normal sebelum kereta kembali beroperasi melayani penumpang. Pada penelitian kali ini penulis akan meneliti dan menjelaskan mengenai hasil pengujian EKG yang dilakukan oleh Depo KRL Depok setelah perawatan tahunan KRL. Peneliti juga akan menjelaskan mengenai sistem kerja propulsi rheostat pada KRL JR 205. Sumber data untuk analisa dari penelitian ini adalah, data besaran arus input pada motor traksi yang didapatkan dari pengukuran ketika kereta diuji setelah selesai melaksanakan perawatan tiap 24 atau 48 bulan.

## Metode

Metode penelitian adalah cara yang digunakan oleh peneliti dalam mengumpulkan data penelitian. Metode yang digunakan pada penelitian kali ini adalah metode deskriptif kuantitatif. Deskriptif kuantitatif adalah metode penelitian yang bertujuan untuk mendeskripsikan suatu fenomena, keadaan, atau variabel yang ada secara numerik melalui pengumpulan dan analisis data kuantitatif. Tujuan utama dari metode penelitian ini adalah memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai aspek-aspek tertentu dari subjek penelitian berdasarkan data yang dikumpulkan.



**Gambar 1.** Diagram alir penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis hasil pengukuran arus input motor traksi pada rangkaian KRL JR 205 setelah dilakukan perawatan tahunan. Pengambilan data dilakukan di Depo KRL Depok, yang merupakan salah satu fasilitas pemeliharaan utama untuk armada KRL Commuter Line di wilayah Jabodetabek. Instrumen utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah Hioki Memory HiCORDER MR8880, yaitu alat perekam data multikanal yang digunakan untuk merekam arus input yang masuk ke motor DC pada saat pengujian kereta berjalan. Spesifikasi penggunaan alat adalah sebagai berikut:

1. Jumlah kanal yang digunakan: 4 kanal (masing-masing terhubung ke kabel input motor)
2. Sampel data: diambil dalam mode real-time dengan kecepatan pengambilan sampel 1 MS/s
3. Sumber daya: alat digunakan dalam mode portabel dengan baterai internal
4. Penyimpanan data: hasil pengukuran disimpan pada SD card dan kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Hioki Logger Utility



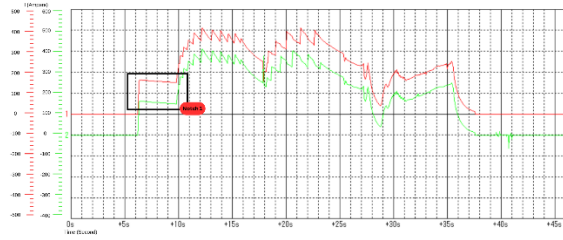
**Gambar 2.** Hioki HiCorder

## Hasil dan Pembahasan

Pengukuran dilakukan pada KRL JR 205 menggunakan alat Hioki HiCORDER. Fungsi dari alat ini adalah untuk mengukur arus yang masuk ke motor DC yang berfungsi untuk menjalankan kereta. Ketika pengujian kereta, kecepatan kereta yang diatur pada master controller pada kabin masinis, dinaikkan notchnya satu per satu. Dimulai dari notch 1 yang terendah hingga notch 5 yang tertinggi.

### Notch 1

Pada posisi notch 1, kereta memulai fase powering atau akselerasi awal dari kondisi diam (idle). Berdasarkan pengukuran menggunakan Hioki MR8880, diketahui bahwa fase powering berlangsung selama sekitar 5 detik sebelum masinis menaikkan notch ke level berikutnya. Dalam periode ini, arus input ke motor DC menunjukkan lonjakan awal yang signifikan karena motor memerlukan daya besar untuk mengatasi inersia rangkaian kereta. Hal ini merupakan karakteristik umum dari motor DC ketika diberi tegangan penuh pada kecepatan rendah. Arus puncak yang muncul saat powering di notch 1 sangat penting untuk dianalisis, karena pada titik ini terjadi arus start (starting current) yang merupakan salah satu sumber terbesar dari loss energy bila tidak dikelola dengan baik. Pada pengukuran ini, terdapat dua grafik dengan jenis yang sama. Yang membedakan adalah warna pada grafik yang mana warna merah menunjukkan arus pada kereta M1, dan warna hijau menunjukkan arus pada kereta M2.



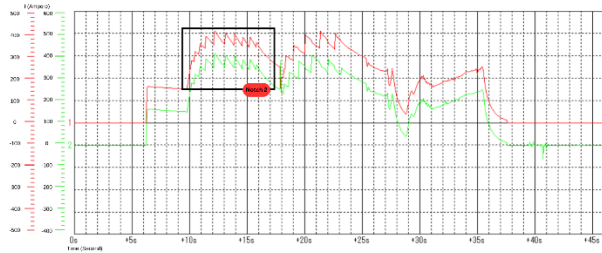
**Gambar 3.** Hasil Pengukuran Notch 1

Pada notch 1, powering berlangsung selama kurang lebih 5 detik, sebelum notch dinaikkan oleh masinis melalui *master controller* pada kabin masinis. Hasil pengukuran pada notch 1, bahwa besaran arus dan daya yang mengalir ketika kereta *powering*, adalah sebagai berikut :

**Tabel 1.** Hasil Pengukuran Notch 1

Arus (I)		Daya (W)	
M1	M2	M1	M2
160	160	60000	60000

## Notch 2



**Gambar 4.** Hasil Pengukuran Notch 2

Pada notch 2, *powering* berlangsung selama kurang lebih 16 detik, sebelum notch dinaikkan kembali oleh masinis melalui *master controller*. Setelah tahap awal, posisi *master controller* ke notch 2, di mana fase *powering* berlangsung lebih lama, yaitu sekitar 16 detik. Ini merupakan tahapan akselerasi menengah di mana kereta sudah mulai memperoleh momentum, namun masih berada pada kecepatan rendah hingga sedang. Pada posisi ini, rheostat mulai menurunkan resistansi sehingga arus ke motor DC meningkat secara bertahap, tetapi dalam level yang lebih stabil dibandingkan notch 1. Peningkatan waktu *powering* di notch 2 menjadi penting untuk menjaga akselerasi yang halus dan mencegah lonjakan arus berlebih. Dalam pengamatan, arus input mengalami fluktuasi ringan yang mencerminkan beban kerja motor dalam fase akselerasi kontinu. Daya input yang dicatat selama notch ini menunjukkan tren meningkat secara linier, sejalan dengan penurunan resistansi pada sistem rheostat. Hasil pengukuran pada notch 2 bahwa arus dan daya yang mengalir pada kereta M1 dan M2 ketika *powering* adalah sebagai berikut:

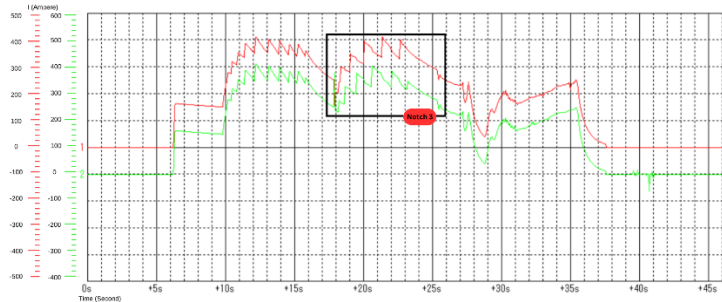
**Tabel 2.** Hasil Pengukuran Notch 2

No.	Arus (I)		Daya (W)	
	M1	M2	M1	M2
1.	280	280	105500	105000
2.	320	320	120000	120000
3.	360	350	135000	131250
4.	380	380	142500	142500
5.	410	410	153750	153750
6.	400	400	150000	150000
7.	400	390	150000	146250

8.	370	380	138750	142500
9.	370	380	138750	142500
10.	360	360	135000	135000
11.	300	300	112500	112500

Maka dari itu, rata-rata arus pada notch 1 sebesar 359.09 A dan rata-rata dayanya sebesar 134659.09 W.

### Notch 3



**Gambar 5.** Hasil Pengukuran Notch 3

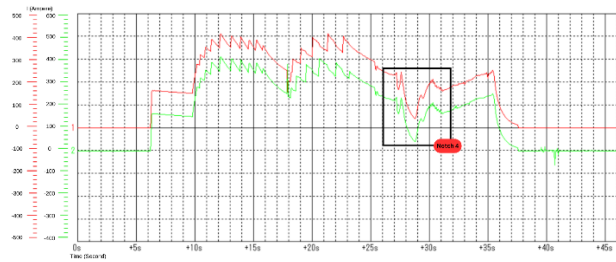
Pada notch 3, *powering* berlangsung selama kurang lebih 8 detik, sebelum notch dinaikkan kembali oleh masinis melalui *master controller*. Pada notch 3, *powering* berlangsung selama sekitar 8 detik, lebih singkat dari notch 2 namun cukup untuk meningkatkan kecepatan ke tingkatan menengah. Pada titik ini, motor traksi bekerja pada kondisi yang mendekati efisiensi optimal karena kereta telah memperoleh kecepatan yang cukup untuk mengurangi beban torsi yang tinggi di awal. Data pengukuran menunjukkan bahwa arus cenderung mulai menurun secara perlahan karena beban akselerasi sudah mulai stabil. Namun, daya input tetap cukup tinggi karena kecepatan meningkat. Rheostat berperan besar dalam menyesuaikan jumlah arus yang diberikan agar motor tidak mengalami *overheating*. Dalam kondisi ini, sistem menunjukkan performa yang baik dengan kurva arus yang relatif stabil dan tidak terdapat anomali berarti, yang menandakan tidak ada kejanggalan pada sistem propulsi pasca perawatan. Hasil pengukuran pada notch 3 bahwa arus dan daya yang mengalir pada kereta M1 dan M2 ketika *powering* adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.** Hasil Pengukuran Notch 3

No.	Arus (I)		Daya (W)	
	M1	M2	M1	M2
1.	240	260	90000	97500
2.	300	240	112500	90000
3.	280	320	105000	120000
4.	340	300	127500	112500
5.	310	380	116250	142500
6.	400	320	150000	120000
7.	320	400	120000	150000
8.	410	320	153750	120000
9.	315	380	118125	142500
10.	400	320	150000	120000
11.	360	340	135000	127500

Maka dari itu, rata-rata arus pada notch 1 sebesar 334.09 A dan rata-rata dayanya sebesar 123664.77 W.

## Notch 4



**Gambar 6.** Hasil Pengukuran Notch 4

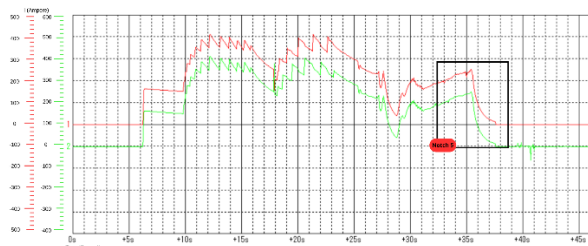
Pada notch 4, *powering* berlangsung selama kurang lebih 4 detik, sebelum notch dinaikkan kembali oleh masinis melalui *master controller*. Perpindahan ke notch 4 berlangsung singkat, yaitu hanya sekitar 4 detik. Pada tahap ini, kereta hampir mencapai kecepatan operasi normal. Karena beban akselerasi sudah sangat rendah dan kecepatan sudah tinggi, arus yang dibutuhkan oleh motor DC pun relatif lebih kecil. Pengukuran menunjukkan adanya penurunan arus input yang cukup signifikan dibanding notch sebelumnya, tetapi daya yang digunakan masih dalam batas optimal. Proses akselerasi pada notch 4 umumnya hanya digunakan untuk menyempurnakan kecepatan kereta agar mencapai titik *cruising speed*. Durasi yang singkat juga menunjukkan bahwa masinis hanya perlu sedikit penyesuaian pada kecepatan kereta, sebelum kembali melakukan perubahan notch ke level berikutnya atau ke posisi netral. Hasil pengukuran pada notch 4 bahwa arus dan daya yang mengalir pada kereta M1 dan M2 ketika *powering* adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.** Hasil Pengukuran Notch 4

No.	Arus (I)		Daya (W)	
	M1	M2	M1	M2
1.	250	220	93750	82500
2.	255	220	95625	82500
3.	140	120	52500	45000
4.	200	200	75000	75000

Maka dari itu, rata-rata arus pada notch 1 sebesar 200,62 A dan rata-rata dayanya sebesar 75234.37 W.

## Notch 5



**Gambar 7.** Hasil Pengukuran Notch 5

Pada notch 5, *powering* berlangsung selama kurang lebih 5 detik, sebelum notch kembali diposisikan netral oleh masinis melalui *master controller*. Terakhir, pada notch 5, *powering* berlangsung sekitar 5 detik sebelum *master controller* kembali diposisikan netral oleh masinis. Posisi ini umumnya digunakan sebagai tahap akhir dari akselerasi, sebelum kereta memasuki kecepatan

jelajah (*cruising*) dan daya tidak lagi diberikan secara aktif ke motor. Pengukuran menunjukkan bahwa arus input mulai menurun hingga mendekati nol seiring transisi ke netral, menandakan bahwa sistem propulsi memasuki fase tanpa beban aktif. Motor DC tetap berputar karena inersia dari kecepatan kereta, dan energi yang digunakan mulai berkurang drastis. Analisis terhadap data arus di notch 5 penting untuk memastikan bahwa transisi dari keadaan aktif ke pasif (*coasting*) berjalan mulus tanpa lonjakan arus atau pemutusan mendadak yang bisa merusak sistem kelistrikan. Hasil pengukuran pada notch 5 bahwa arus dan daya yang mengalir pada kereta M1 dan M2 ketika *powering* adalah sebagai berikut:

**Tabel 5.** Hasil Pengukuran Notch 5

Arus (I)		Daya (W)	
M1	M2	M1	M2
250	250	93750	93750

Maka dari itu, rata-rata arus pada notch 5 sebesar 250 A dan rata-rata dayanya sebesar 93750 W.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai yaitu cara kerja sistem propulsi JR 205 adalah menggunakan rheostat sebagai pengatur arus yang masuk ke motor DC yang juga berperan sebagai pengatur kecepatan motor DC yang menggerakkan KRL. Pada proses tersebut terdapat lima tahap *powering* JR 205 ketika beroperasi, dengan tiap notch melalui sistem rheostat secara bertahap. Kemudian menghasilkan hasil dari pengujian yang dilakukan yaitu perhitungan rata-rata arus dan daya pada motor DC dengan besaran rata-rata arus sebesar 260,76 A dan rata-rata daya sebesar 97461,64 W

## References

- Bulková, Z., Gašparík, J., Mašek, J., & Zitrický, V. (2022). Analytical Procedures for the Evaluation of Infrastructural Measures for Increasing the Capacity of Railway Lines. *Sustainability*, *14*(21), 14430. <https://doi.org/10.3390/su142114430>
- D'Achiardi, D., Annaswamy, A. M., Mazumder, S. K., & Pilo, E. (2022). Transactive Control of Electric Railways Using Dynamic Market Mechanisms. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *31*(2), 748–760. <https://doi.org/10.1109/tcst.2022.3202171>
- Kim, S.-K., & Ahn, C. K. (2020). DC Motor Speed Regulator via Active Damping Injection and Angular Acceleration Estimation Techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, *8*(3), 641–647. <https://doi.org/10.1109/jas.2020.1003548>
- Krishna, V. V., Wu, Q., Hossein-Nia, S., Spiriyagin, M., & Stichel, S. (2022). Long freight trains & long-term rail surface damage – a systems perspective. *Vehicle System Dynamics*, *61*(6), 1–24. <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2085584>
- Kumar, R., Sah, B., & Kumar, P. (2023). Stray Loss Formulation for Inverter-Driven Induction Motors for a Wide Range of Switching Frequency and Motor's Loading. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *71*(3), 2385–2394. <https://doi.org/10.1109/tie.2023.3269484>
- Laiton-Bonadiez, C., Branch-Bedoya, J. W., Zapata-Cortes, J., Paipa-Sanabria, E., & Arango-Serna, M. (2022). Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review. *Sensors*, *22*(7), 2491. <https://doi.org/10.3390/s22072491>
- Lättman, K., & Otsuka, N. (2024). Sustainable Development of Urban Mobility through Active Travel and Public Transport. *Sustainability*, *16*(2), 534. <https://doi.org/10.3390/su16020534>
- Liu, Y., Lyu, X., Chang, M., & Yang, Q. (2024). Low-frequency oscillation of train-network system considering traction power supply mode. *Railway Engineering Science*, *32*(2), 244–256. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00328-y>

- Ma, J., Liu, X., Hu, J., Fei, J., Zhao, G., & Zhu, Z. (2023). Stator ITSC Fault Diagnosis of EMU Asynchronous Traction Motor Based on apFFT Time-Shift Phase Difference Spectrum Correction and SVM. *Energies*, *16*(15), 5612–5612. <https://doi.org/10.3390/en16155612>
- Mahmoudi, A., Soong, W. L., & Chiba, A. (2023). Guest Editorial Design and Optimisation of Electric Motors for Transport Electrification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *59*(2), 1240–1241. <https://doi.org/10.1109/tia.2023.3237517>
- Meng, X., Zhang, Q., Hu, G., Zhang, G., Zhang, Y., Liu, F., & Liu, Z. (2023). Multi-vehicle accessed railway vehicle-grid system stability analysis and optimization based on OLTC. *Control Engineering Practice*, *141*, 105693. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105693>
- Popovich, N. D., Rajagopal, D., Tasar, E., & Phadke, A. (2021). Economic, environmental and grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric. *Nature Energy*, *6*(11), 1017–1025. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00915-5>
- Shao, L., Karci, A. E. H., Tavernini, D., Sorniotti, A., & Cheng, M. (2020). Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review. *IEEE Access*, *8*, 116900–116913. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2993235>
- Wang, X., Tang, T., Su, S., Yin, J., Gao, Z., & Lv, N. (2021). An integrated energy-efficient train operation approach based on the space-time-speed network methodology. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, *150*, 102323–102323. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102323>
- Wu, Y., Yuan, Z., Xiao, Q., & Yang, D. (2022). Customized bus scheme design of large transport terminals with jointly optimization of departure time, vehicle allocation and routing. *IET Intelligent Transport Systems*, *17*(1), 85–101. <https://doi.org/10.1049/itr2.12240>

