

SKRIPSI

ANALISIS PEMBEBANAN TRANSFORMATOR GARDU TRAKSI BERDASARKAN DATA ARUS DAN TEGANGAN *HIGH SPEED CIRCUIT BREAKER* (HSCB) PADA SISTEM PENYALURAN DAYA LRT SUMATERA SELATAN



Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Program
Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang

Dipersiapkan dan Disusun Oleh
M. GEMPAR WAHYU ALAM
132023087P

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PALEMBANG
2026**

SKRIPSI

**ANALISIS PEMBEBANAN TRANSFORMATOR GARDU TRAKSI
BERDASARKAN DATA ARUS DAN TEGANGAN *HIGH SPEED CIRCUIT
BREAKER* (HSCB) PADA SISTEM PENYALURAN DAYA LRT SUMATERA
SELATAN**



Merupakan syarat untuk memperoleh gelar sarjana
Telah dipertahankan di depan dewan penguji
24 Agustus 2026

Dipersiapkan dan Disusun Oleh
M. GEMPAR WAHYU ALAM

Susunan Dewan Penguji

Pembimbing 1

Taufik Bartlian, S.T., M.Eng
NIDN. 0218017202

Pembimbing 2

Asri Indah Lestari, S.T., M.T
NIDN. 0230129701

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik



H.A. Junaedi, M.T
NIDN. 0202026502

Penguji 1

Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs
NIDN. 0207038101

Penguji 2

Dr. Wiwin A. Oktaviani, S.T., M.Sc
NIDN. 0002107302

Menyetujui
Ketua Program Studi Teknik Elektro



Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs
NIDN. 0207038101

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan di dalam daftar pustaka.

Palembang, 24 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan



M. Gempar Wahyu Alam

Catatan:

Pernyataan harus di tanda tangan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya jumlah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **ANALISIS PEMBEBANAN TRANSFORMATOR GARDU TRAKSI BERDASARKAN DATA ARUS DAN TEGANGAN *HIGH SPEED CIRCUIT BREAKER* (HSCB) PADA SISTEM PENYALURAN DAYA LRT SUMATERA SELATAN** yang disusun guna untuk syarat mendapatkan gelar sarjana pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.

Pada kesempatan ini penulis secara khusus mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada,

1. Bapak Taufik Barlian, S.T., M.Eng, selaku Pembimbing I
2. Ibu Asri Indah Lestari, S.T., MT, selaku Pembimbing II

Dan tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih kepada,

1. Bapak Prof. Dr. Abid Djazuli, S.E.,M.M, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Palembang
2. Bapak Ir. A. Junaidi, M.T, Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang
3. Bapak Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs, Selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang
4. Bapak Muhammad Hurairah, S.T., M.T, selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang
5. Bapak dan Ibu Staf Dosen pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang
6. Bapak dan Ibu Staf Tata Usaha Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang

7. Rekan-rekan Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Palembang

Yang telah banyak membantu penulis baik secara moril maupun material dalam menyelesaikan skripsi ini, semoga amal baik yang diberikan kepada penulis mendapatkan imbalan yang sesuai dari Allah SWT. Penulis menyadari penulisan skripsi ini jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran dari pembaca akan penulis terima sangat senang hati. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis sendiri dan umumnya bagi rekan-rekan pembaca di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.

Palembang, 24 Agustus 2026
Penulis,

M. Gempar Wahyu Alam

ABSTRAK

Sistem penyaluran daya pada Light Rail Transit (LRT) membutuhkan transformator gardu traksi yang mampu menyediakan daya secara kontinu sesuai perubahan kebutuhan beban kereta. Perubahan pola operasi, khususnya pada periode *rush hour*, dapat menyebabkan fluktuasi arus dan tegangan yang memengaruhi tingkat pembebanan Rectifier Transformer (RTR). Oleh karena itu, diperlukan analisis pembebanan berdasarkan data operasi aktual untuk mengetahui kondisi pemanfaatan kapasitas transformator dan memastikan keandalan sistem penyaluran daya LRT Sumatera Selatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik arus dan tegangan berdasarkan data High Speed Circuit Breaker (HSCB), menentukan tingkat pembebanan RTR, serta mengevaluasi kondisi pembebanan transformator terhadap kapasitas nominalnya. Penelitian menggunakan metode kuantitatif deskriptif dengan data sekunder berupa rekaman arus dan tegangan HSCB yang diperoleh dari sistem *data logger* pada Gardu Traksi Punti Kayu. Data dianalisis melalui pengelompokan kondisi operasi *off-peak* dan *rush hour*, perhitungan daya, serta persentase pembebanan terhadap kapasitas nominal RTR sebesar 3.520 kVA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus rata-rata pada kondisi *off-peak* sebesar 46,36 A dengan tegangan rata-rata 796,38 V, sedangkan pada kondisi *rush hour* arus rata-rata meningkat menjadi 220,53 A dengan tegangan rata-rata 786,06 V. Arus maksimum kondisi operasi tercatat sebesar 1.247 A, sedangkan daya puncak yang diperoleh sebesar 929,02 kVA dengan persentase pembebanan maksimum sebesar 26,39%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa RTR masih beroperasi di bawah kapasitas nominal dan belum mengalami kondisi *overload*, dengan kapasitas cadangan sebesar 73,61%. Dengan demikian, data HSCB dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kuantitatif terhadap pembebanan RTR berdasarkan kondisi operasi aktual. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode pengamatan yang lebih panjang serta menambahkan parameter temperatur transformator, faktor daya, daya aktif, daya reaktif, dan kualitas daya untuk memperoleh evaluasi kondisi RTR yang lebih komprehensif.

Kata kunci: Pembebanan Transformator; Rectifier Transformer; High Speed Circuit Breaker; Gardu Traksi; LRT Sumatera Selatan.

ABSTRACT

The power supply system of Light Rail Transit (LRT) requires traction substations equipped with transformers capable of continuously supplying power in accordance with variations in train load demand. Changes in operating patterns, particularly during *rush hours*, can cause fluctuations in current and voltage, which affect the loading level of the Rectifier Transformer (RTR). Therefore, a loading analysis based on actual operating data is required to determine the utilization of transformer capacity and ensure the reliability of the South Sumatra LRT power supply system. This study aims to analyze current and voltage characteristics based on High Speed Circuit Breaker (HSCB) data, determine the loading level of the RTR, and evaluate the transformer loading condition relative to its rated capacity. A descriptive quantitative method was employed using secondary data consisting of HSCB current and voltage recordings obtained from the data logger system at Punti Kayu Traction Substation. The data were analyzed by classifying operating conditions into *off-peak* and *rush-hour* periods, calculating power, and determining the percentage of transformer loading based on the RTR rated capacity of 3,520 kVA. The results show that the average current during the *off-peak* condition was 46.36 A, with an average voltage of 796.38 V, while during the *rush-hour* condition, the average current increased to 220.53 A, accompanied by a decrease in the average voltage to 786.06 V. The maximum operating current was recorded at 1,247 A, while the peak power reached 929.02 kVA, corresponding to a maximum loading percentage of 26.39%. These results indicate that the RTR operated below its rated capacity and did not experience an overload condition, with a remaining capacity margin of 73.61%. Therefore, HSCB data can be utilized as a quantitative basis for evaluating RTR loading under actual operating conditions. Future research is recommended to employ a longer observation period and incorporate additional parameters, including transformer temperature, power factor, active power, reactive power, and power quality, to provide a more comprehensive assessment of RTR operating conditions.

Keywords: Transformer Loading; Rectifier Transformer; High Speed Circuit Breaker; Traction Substation; South Sumatra LRT.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN.....	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR.....	iv
A B S T R A K	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Sistematika Penulisan.....	4
 BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1. Sistem Penyaluran Daya LRT	5
2.1.1. Sistem Catu Daya LRT	7
2.1.2. Gardu Traksi	9
2.2. Transformator	12
2.2.1. Prinsip Kerja Transformator	13
2.2.2. Transformator Gardu Traksi.....	13
2.2.3. Kapasitas dan Karakteristik Transformator	16
2.3. Penyearah (Rectifier).....	17
2.4. Pembebanan Transformator.....	19
2.4.1. Konsep Pembebanan Transformator	21
2.4.2. Perhitungan Daya dan Persentase Beban.....	22
2.4.3. Perhitungan Voltage Drop Saat Akselerasi	24
2.4.4. Dampak Pembebanan Berlebih.....	25
2.5. High Speed Circuit Breaker (HSCB)	26
2.5.1. Pemanfaatan Data HSCB dalam Analisis Pembebanan Transformator.....	28
 BAB 3 METODE PENELITIAN	 30
3.1. Tempat dan Waktu	30
3.2. Flowchart Program	30
3.3. Data yang Diperlukan.....	31
3.4. Tahapan Pengolahan Data	32
3.5. Teknik Analisis Data.....	32
 BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	 34
4.1. Data Penelitian.....	34
4.1.1. Profil Lokasi Penelitian	34
4.1.2. <i>One Line Diagram (Single Line)</i>	35

4.1.3. Spesifikasi dan Transformator Penelitian	38
4.1.4. Data Arus dan Tegangan High Speed Circuit Breaker (HSCB)	43
4.1.5. Karakteristik Data Arus dan Tegangan HSCB	44
4.1.5.1. Tampilan grafik profil arus (I) dan tegangan (V) jam lengang (<i>off-Peak</i>)	44
4.1.5.2. Tampilan grafik profil arus (I) dan tegangan (V) pada Jam Sibuk (<i>Rush Hour</i>)	45
4.2. Perhitungan Konsumsi Daya Substation	46
4.2.1. Perhitungan Daya aktif sisi DC (P_{DC})	46
4.2.2. Perhitungan Rugi-Rugi Daya Pada Perangkat Rectifier	47
4.2.3. Daya Aktif Sisi Sekunder AC Transformator (P_{AC})	47
4.2.4. Perhitungan Daya Semu AC Transformator (S_{AC})	47
4.2.5. Persentase Pembebanan Transformator (%loading)	47
4.3. Karakteristik Data Arus dan Tegangan HSCB	48
4.3.1. Perhitungan Jatuh Tegangan Internal Gardu	49
4.3.2. Perhitungan Tegangan Akhir Pada Busbar	49
4.3.3. Perhitungan Total Resistansi Penghantar Jalur Distribusi (R_{Line})	49
4.3.4. Perhitungan Total Resistansi Kalang Sirkuit (R_{Loop})	49
4.3.5. Perhitungan Total Jatuh Tegangan (Voltage Drop)	50
4.3.6. Perhitungan Tegangan Aktual yang diterima Kereta (V_{Train})	50
4.3.7. Perhitungan Persentase Regulasi Jatuh Tegangan (% Voltage Drop) .	50
4.4. Analisis Estimasi Pembebanan Transformator Gardu Traksi Berdasarkan Data Logger HSCB	50
4.4.1. Perhitungan Daya Beban Transformator dari MATLAB	51
4.4.2. Load Factor Transformator	52
4.4.3. Perbandingan Kapasitas Transformator Dengan Beban Operasi	52
4.4.4. Grafik Perbandingan Transformator Dari MATLAB	53
4.4.5. Analisis Kondisi Pembebanan Transformator	54
4.5. Analisis Gangguan Historis Gangguan Transformator Pada HSCB	55
4.5.1. Persentase Terhadap Rating HSCB	55
4.5.2. Daya Saat Gangguan	56
4.5.3. Dibandingkan Dengan Transformator	56
4.5.4. Analisis Teknis	56
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Flowchart Penelitian.....	20
Gambar 4. 1 One Line Diagram.....	36
Gambar 4. 2 Nameplate Transformator.....	39
Gambar 4. 3 Profil Arus (I) pada jam lengang (Off-peak hour).....	44
Gambar 4. 4 Profil Tegangan (V) pada jam lengang (Off-peak hour)	44
Gambar 4. 5 Profil Arus (I) pada Jam Sibuk (Rush Hour).....	45
Gambar 4. 6 Profil Tegangan (V) pada Jam Sibuk (Rush Hour)	45
Gambar 4. 7 Perbandingan Kapasitas Transformator	53
Gambar 4. 8 Persentase Pembebanan Transformator.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Spesifikasi Transformator LRT	40
Tabel 4.2. Potongan Log Data Historis HSCB.....	36
Tabel 4.3. Data Pada Gardu.....	49
Tabel 4.4. Data Logger melalui MATLAB	51
Tabel 4.5. Hasil Pengolahan MATLAB	51
Tabel 4.6. Hasil Pengolahan Data Berdasarkan Kapasitas Transformator	52
Tabel 4.7. Historis Gangguan Transformator Pada HSCB.....	55
Tabel 4.8. Perbandingan kondisi yang diperoleh dengan histori gangguan	55

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transportasi massal berbasis rel menjadi salah satu solusi utama dalam mewujudkan sistem transportasi perkotaan yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Seiring dengan meningkatnya mobilitas masyarakat di kawasan perkotaan, kebutuhan akan moda transportasi yang memiliki kapasitas angkut tinggi, waktu tempuh yang pasti, serta konsumsi energi yang efisien semakin meningkat. Salah satu bentuk implementasi sistem transportasi modern tersebut adalah *Light Rail Transit* (LRT) yang menggunakan tenaga listrik sebagai sumber energi penggerakannya. Menurut (Hu et al., 2024a), sistem elektrifikasi pada transportasi rel modern berkembang menuju sistem yang lebih andal, efisien, dan berbasis teknologi digital guna menjamin kontinuitas penyaluran daya serta meningkatkan keandalan operasi kereta. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa sistem penyaluran daya merupakan komponen vital yang menentukan keberhasilan operasional transportasi berbasis rel.

Transformator gardu traksi merupakan komponen utama yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan distribusi sebelum disalurkan menuju rectifier untuk dikonversi menjadi tegangan DC yang digunakan sebagai sumber tenaga kereta. Besarnya pembebanan transformator dipengaruhi oleh nilai arus dan tegangan yang berubah mengikuti pola operasi kereta, terutama saat proses akselerasi, deselerasi, maupun ketika beberapa rangkaian kereta beroperasi secara bersamaan. Pada sistem LRT Sumatera Selatan, parameter arus dan tegangan direkam oleh *High Speed Circuit Breaker* (HSCB) sebagai bagian dari sistem proteksi dan monitoring gardu traksi. Data historis yang dihasilkan HSCB memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai dasar dalam menghitung daya aktual dan persentase pembebanan transformator. Namun, hingga saat ini pemanfaatan data HSCB lebih banyak digunakan untuk kepentingan pemantauan operasi dan

proteksi, sedangkan analisis pembebanan transformator berdasarkan data tersebut masih belum banyak dilakukan secara khusus.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas sistem catu daya perkeretaapian dan transformator gardu traksi dari berbagai sudut pandang. (Hu et al., 2024a) mengkaji perkembangan sistem catu daya kereta modern yang berfokus pada peningkatan efisiensi dan digitalisasi sistem monitoring. (Li et al., 2025) mengembangkan metode berbasis data untuk mengevaluasi kinerja transformator tegangan pada sistem elektrifikasi kereta, sedangkan (Mukwata & Munda, 2022) menganalisis kinerja *High Speed Circuit Breaker (HSCB)* sebagai sistem proteksi pada jaringan traksi DC. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut belum secara spesifik memanfaatkan data historis arus dan tegangan HSCB untuk menghitung tingkat pembebanan transformator gardu traksi berdasarkan kondisi operasi aktual. Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) pada pemanfaatan data monitoring HSCB sebagai dasar evaluasi pembebanan transformator dalam sistem penyaluran daya LRT.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pembebanan transformator gardu traksi berdasarkan data arus dan tegangan yang direkam oleh *High Speed Circuit Breaker (HSCB)* pada sistem penyaluran daya LRT Sumatera Selatan. Data operasional HSCB akan digunakan untuk menghitung daya semu dan persentase pembebanan transformator, kemudian dibandingkan dengan kapasitas nominal transformator guna mengevaluasi kondisi operasinya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai tingkat pemanfaatan transformator gardu traksi berdasarkan kondisi operasi aktual, sekaligus menjadi masukan bagi pengelola LRT Sumatera Selatan dalam mendukung kegiatan pemantauan, evaluasi, dan pemeliharaan transformator secara lebih efektif. Selain memberikan kontribusi praktis, penelitian ini juga diharapkan dapat memperkaya kajian ilmiah mengenai analisis pembebanan transformator gardu traksi berbasis data monitoring pada sistem transportasi rel listrik di Indonesia.

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh harmonisa dan inspeksi gardu terhadap kinerja transformator serta keandalan sistem tenaga pada LRT. Secara khusus, tujuan penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis nilai arus dan tegangan yang direkam oleh *High Speed Circuit Breaker* (HSCB) pada Gardu Traksi LRT Sumatera Selatan sebagai data operasional sistem penyaluran daya.
2. Menghitung persentase pembebanan transformator gardu traksi berdasarkan data arus dan tegangan HSCB dengan mengacu pada kapasitas nominal transformator.
3. Menganalisis kondisi pembebanan transformator gardu traksi berdasarkan hasil perhitungan persentase pembebanan untuk mengetahui tingkat pemanfaatan kapasitas transformator pada sistem penyaluran daya LRT Sumatera Selatan.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada analisis pembebanan transformator gardu traksi pada sistem penyaluran daya LRT Sumatera Selatan berdasarkan data historis arus dan tegangan yang direkam oleh *High Speed Circuit Breaker* (HSCB). Analisis dilakukan dengan menghitung daya semu (*apparent power*) dan persentase pembebanan transformator berdasarkan kapasitas nominal transformator untuk mengevaluasi kondisi pembebanannya selama periode pengamatan. Penelitian ini hanya membahas parameter arus, tegangan, daya semu, dan persentase pembebanan transformator, serta tidak mencakup analisis kualitas daya, harmonisa, koordinasi sistem proteksi, analisis hubung singkat, maupun perancangan sistem tenaga. Pembatasan tersebut dilakukan agar penelitian memiliki ruang lingkup yang jelas, terfokus, dan mampu memberikan hasil analisis yang sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi tingkat pembebanan transformator gardu traksi berdasarkan data operasi aktual HSCB pada LRT Sumatera Selatan.

1.4. Sistematika Penulisan

Bab ini berisi uraian awal yang menjadi dasar dilakukannya penelitian. Adapun isi dari bab ini meliputi:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian mengenai pentingnya analisis pembebanan transformator gardu traksi pada sistem penyaluran daya LRT Sumatera Selatan berdasarkan data arus dan tegangan HSCB. Selain itu, bab ini memuat, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan sebagai pedoman penyusunan skripsi.

BAB 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi sistem kelistrikan LRT, gardu traksi, transformator traksi, *High Speed Circuit Breaker* (HSCB), data logger, karakteristik pembebanan transformator, fenomena *voltage drop*, serta penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar analisis dan pembahasan.

BAB 3 Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan, teknik pengumpulan data, variabel penelitian, diagram alir penelitian, serta teknik analisis data menggunakan MATLAB untuk mengolah data logger HSCB sehingga diperoleh profil arus, tegangan, daya, dan tingkat pembebanan transformator.

BAB 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan hasil pengolahan data logger HSCB berupa analisis karakteristik arus dan tegangan pada kondisi *off-peak hour* dan *rush hour*, perhitungan daya, evaluasi pembebanan transformator, *voltage drop*, serta perbandingan hasil pengukuran dengan spesifikasi nameplate transformator

BAB 5 Kesimpulan Dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil analisis penelitian mengenai kondisi pembebanan transformator dan kinerja HSCB pada gardu traksi LRT Sumatera Selatan, serta saran yang dapat dijadikan rekomendasi bagi pengelola sistem maupun sebagai acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, S. J. (2012a). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chapman, S. J. (2012b). *Electric Machinery Fundamentals*.
- Commission, I. E. (2018). *IEC 60076-1: Power transformers—Part 1: General*. IEC.
- Feng, D., Lin, S., He, Z., & Sun, X. (2017). *A technical framework of PHM and active maintenance for modern high-speed railway traction power supply systems*. 8378(June). <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1286954>
- Glover, J. D., Overbye, T. J., & Sarma, M. S. (2017). *POWER SYSTEM ANALYSIS University of Illinois*.
- Hu, H., Liu, Y., Li, Y., He, Z., Gao, S., Zhu, X., & Tao, H. (2024a). Traction power systems for electrified railways: Evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32(1). <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>
- Hu, H., Liu, Y., Li, Y., He, Z., Gao, S., Zhu, X., & Tao, H. (2024b). Traction power systems for electrified railways: Evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>
- Ieee, P., & Society, E. (2012). *IEEE Guide for Loading Mineral- Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators* (Vol. 2011, Issue March).
- Li, Z., Sun, M., Zhu, J., Luo, H., Wang, Q., Hu, H., He, Z., & Wang, K. (2025). Data-driven Measurement Performance Evaluation of Voltage Transformers in Electric Railway Traction Power Supply Systems. *Railway Engineering Science*, 33(2), 311–323. <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00364-2>
- Mukwata, W., & Munda, J. (2022). Analysis of 3 kV DC Contact Line High-Speed Circuit Breaker Unit Protection Scheme Limitations. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(1), 7–13.
- Nugraha, R. R., Priatna, E., & Nurdiansyah, R. (2025). Analisis perkiraan sisa umur transformator daya IBT II 500 MVA berdasarkan kondisi beban dan suhu pada Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV Tasikmalaya. *E-JOINT (Electronica and Electrical Journal of Innovation Technology)*, 6(1). <https://doi.org/10.35970/ejoint.v6i1.2637>

- Rojek, A. (2018). Parameters of DC high-speed circuit-breakers. *MATEC Web of Conferences*, 180, 6006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818006006>
- Staszewski, Ł., & Rebizant, W. (2025). Quantifying overload risk: A parametric comparison of IEC 60076-7 and IEEE C57.91 standards for power transformers. *Energies*, 18(24), 6469. <https://doi.org/10.3390/en18246469>
- Wildi, T. (2006). *Electrical Machines, Drives, and Power Systems Theodore Wildi Sixth Edition*.