

트램의 동적저항모델과 선로의 온도 특성 반영을 통한 구미시 트램 전력망의 손실비용 및 접지공사 비용분석

배정석*¹, 최윤지*², 이희진**

Analysis of the Cost of Power Loss and Grounding of the Gumi City Tram Power Grid by Reflecting the Dynamic Resistance Model of Tram and the Temperature Characteristics of Tram

Jeong-Seok Bae*¹, Yun-Ji Choi*², and Hee-Jin Lee**

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2024년~2025년)

요 약

본 연구는 구미시 트램 전력망의 접지공사 비용과 손실 전력 비용 간의 최적 절충안을 제시한다. 기존 연구에서 제안된 트램 노선도를 기반으로 전력망을 재구성하고, PSPICE를 활용하여 트램 선로에 동적 저항 회로를 도입해 트램을 모델링 하였다. 또한, 대기 온도에 따른 레일, 전차선, 급전선의 저항값을 재설정하여 다양한 환경에서 시스템을 모델링하고, 시뮬레이션을 통해 접지공사가 레일 저항으로 인해 발생하는 손실 전력 감소에 미치는 영향을 분석하였다. 접지공사 지점에 따라 손실 전력이 큰 곳부터 순차적으로 2개소, 3개소, 4개소, 34개소로 시설한 경우의 손실 전력 비용을 계산하였다.

Abstract

This study proposes an optimal balancing scheme between the Gumi City tram power grid grounding construction and the cost of power loss. Using PSPICE, the tram power grid was redesigned based on the proposed route map, incorporating a dynamic resistance circuit to model the tram as a dynamic resistance system. Resistance values for the catenary wire, feeder wire, and rails were adjusted according to atmospheric temperature, and the impact of grounding work on reducing power loss caused by rail resistance was analyzed through simulation. The cost of power loss was calculated for scenarios with grounding work installed at 2, 3, 4, and 34 locations, prioritized by areas with the highest power loss.

Keywords

atmospheric temperature, cost of power loss, dynamic resistance model, grounding construction

* 국립금오공과대학교 전자공학부
- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0006-7286-2154>
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0006-2495-0299>
** 국립금오공과대학교 전자공학부 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1306-8771>

• Received: Mar. 18, 2025, Revised: May 07, 2025, Accepted: May 10, 2025
• Corresponding Author: Hee-Jin Lee
School of Electronic Engineering of Kumoh National
Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongbuk, Korea
Tel.: +82-54-478-7437, Email: jinlee@kumoh.ac.kr

1. 서 론

현재 구미시는 대중교통 서비스에 대한 시민들의 불만이 높은 상황이다. 2021년 국가통계포털(KOSIS) 조사에 따르면, 대중교통 만족도는 '만족' 24.4%, '보통' 44.1%, '불만족' 31.5%로, 불만족 비율이 상당히 높은 수준이다. 이러한 문제는 구미시의 산업 구조와 유동 인구 특성과 맞물려 더욱 심화되고 있다.

2022년 기준 구미역의 월평균 승하차 인원은 16만 명에 달하며, 국가산업 1단지에는 2,128개의 가동 기업과 81,029명의 근로자가 종사하고 있다. 특히 공단동은 구미시 전체 유동 인구 188만 명 중 6.72%에 해당하는 12만 6,364명이 이동하는 지역으로, 교통 수요가 매우 높은 곳이다. 이와 함께, 양포동과 인동동은 4만 명 이상의 인구가 거주하는 고밀도 지역으로, 출퇴근 시간대에는 국가산업 1단지와 인근 지역에서 심각한 교통 체증이 발생한다.

또한, 장곡중 인근은 다가구주택이 밀집한 지역으로 상대적으로 인구는 적지만, 교통 체증이 극심한 곳 중 하나다. 구미역 주변 역시 빈번한 정체가 발생하며, 남구미IC는 국가산업 1단지와 3단지로 연결되는 주요 국도로, 2022년 기준 고속국도 통행량의 11.5%가 이 구간을 통과할 정도로 교통량이 많다.

나아가, 2016년 교통수단별 대기오염물질 배출 지표에 따르면 전체 교통수단 중 도로 교통수단이 대기오염물질의 95.7%를 배출하는 것으로 나타났다. 이는 대기질과 지구 환경에 심각한 영향을 미치며, 도로 교통 의존도를 줄이는 것이 탄소중립 실현을 위해 필수적임을 보여준다[1].

이러한 교통 문제 해결 및 탄소중립 실현의 대안으로 트램 도입이 적절한 해법이 될 수 있다. 트램은 정시성이 높아 교통 체증 완화에 효과적이며, 시민들의 대중교통 불만을 해소하고 자가용 이용 감소에도 기여할 것으로 기대된다[2]. 특히, 2024년 개통된 대구권 광역철도와 연계한 환승 시스템이 구축되면, 구미시의 대중교통 접근성이 더욱 개선될 전망이다.

기존 연구에 따르면, 구미시의 인구 분포와 교통량 분석을 바탕으로 3개 노선으로 구성된 트램 노선은 그림 1과 같다[3].



그림 1. 트램 노선도
Fig. 1. Tram lines

이 노선들은 주요 산업단지와 거주 지역을 효과적으로 연결해 구미시 전역의 교통 효율성을 높일 것으로 예상된다.

구미시 트램은 1호선, 2호선, 3호선으로 구성되며, 각각 다음과 같은 노선을 운행한다. 1호선은 사곡역 입구에서 구미전자정보기술원 입구까지 약 14.036km, 2호선은 사곡역 입구에서 구미강동병원 입구까지 약 21.634km, 3호선은 세무서네거리에서 장곡초등학교 입구까지 약 9.279km를 운행한다. 주요 환승 지점으로는 홈플러스 구미점, 순천향대병원, 세무서네거리가 있으며, 이곳에서 트램 간 환승이 가능하다.

트램 운행 시간은 구미시 시내버스 운행 시간을 참조해 06시부터 23시 30분까지로 설정되었다. 출퇴근 시간대인 07시~09시와 17시~19시는 RH(Rush Hour), 나머지 시간은 NH(Normal Hour)로 구분된다[4].

운행 시격은 NH 시간대에는 10분, RH 시간대에는 5분으로 설정되며, 표정속도는 대전시 트램의 목표 표정속도 22.06km/h와 토론토(15km/h), 파리(17km/h)의 표정속도를 고려해 20km/h로 설정되었다[5].

트램 차량 운영 계획은 NH와 RH 시간대에 따라 다르다. NH 시간대에는 1호선 5대, 2호선 7대, 3호선 3대가 운행되며, RH 시간대에는 1호선 9대, 2호선 13대, 3호선 6대가 운행된다.

트램용 변전소는 총 4곳에 설치될 예정이며, 각각 마일스테크 정류장 인근의 한국전력 구미 변전소, 구미 전자공고 입구 정류장 인근 변전소, 1호선 및 3호선 중점에 위치한다.

본 연구는 기존 구미시 트램 관련 연구를 기반으로 시뮬레이션을 통해 개선안을 제시하며, 특히 접지공사를 통한 손실 전력 감소에 중점을 둔다. 접지공사를 통해 손실 전력을 줄일 수 있음을 입증하고, 10년 기준으로 접지공사 비용과 손실 전력 비용의 합이 최소가 되는 최적의 접지공사 개수를 도출하고자 한다.

II. 트램 전력계통도 모델링

2.1 온도 특성을 반영한 선로 모델링

본 연구에서 사용하는 트램 급전 방식은 직류급전 방식이다. 직류급전 방식이란 한전변전소에서 교류 22.9kV를 배전선로를 통해 트램용 변전소로 공급하면, 트램용 변전소에서는 변압기 및 정류기를 거친 뒤 직류(750V~1500V)로 변환해 전차선로를 통해 공급하는 방식을 말한다[6][7]. 전차선로는 트램이 이동하는 레일, 철도 차량에 전력을 공급하기 위한 전차선, 전차선과 병렬로 연결되어 전차선에 전기를 공급하는 선로인 급전선으로 구성되어 있다.

국토교통부의 철도안전법에 따르면 120km/h 이하 도시철도이면 전차선의 종류는 Cu 170mm², 급전선의 종류는 AL 510mm², 레일은 60kg/m의 wire를 사용해야 형식승인을 받을 수 있다. 따라서 20℃ 기준 직류 전기철도에서 전차선로에 적용되는 전선의 유형은 표 1과 같다.

표 1. 직류 전기철도에서 전차선로에 적용되는 전선의 유형

Table 1. Types of wires applied to catenary system

	Wire	Temperature coefficient of resistance	Resistance [Ω /km] at 20℃
Rail	60kg/m	5.0×10^{-3}	0.0148
Catenary wire	Cu 170mm ²	3.83×10^{-3}	0.1040
Feeder wire	AL 510mm ²	4.0×10^{-3}	0.0563

나아가 우리나라의 기온을 고려했을 때 여름에는 +40℃(태양광 가열 효과 포함)까지 상승하고, 겨울에는 -20℃(기온과 바람에 의한 냉각 효과 포함)까지 하락하여 온도 차가 최대 60℃에 달한다. 이에 따라 대기 온도별 단위 거리당 레일, 전차선, 급전선의 저항값을 재구성한다[8]-[12].

$$R = R_0 (1 + \alpha \times \Delta T) \quad (1)$$

식 (1)은 온도변화에 따른 저항값을 계산하는 식으로써 본 논문에서는 R 은 온도 변화에 따른 저항 [Ω], R_0 은 초기 저항 [Ω], α 는 저항 온도 계수[1/℃], ΔT 는 온도 변화(℃)로 정의한다[13][14].

식 (1)과 표 1를 통해 구한 -20℃, +20℃, +40℃ 일때의 레일, 전차선, 급전선의 단위 거리당 저항값들을 계산한 결과는 표 2와 같다.

표 2에 있는 단위 거리당 저항값에 정거장 간의 거리를 곱하여 레일, 전차선, 급전선의 저항값들을 설정하였다.

표 2. 대기 온도에 따른 레일, 전차선, 급전선의 단위 거리당 저항값

Table 2. Resistance per unit distance of rail, catenary, feeder wire depending on atmospheric temperature

	-20℃	+20℃	+40℃
Rail [Ω /km]	0.01184	0.015377	0.01776
Catenary wire [Ω /km]	0.09006	0.104	0.12392
Feeder wire [Ω /km]	0.04842	0.0563	0.06643

2.2 트램 모델링

직류 750V를 정격으로 사용하는 트램의 구동전압 범위는 500V~900V이며 기존 연구 결과의 정확도를 높이기 배전 선로에 동적 저항 회로(DC/DC Converter)를 도입하여 트램의 정격전력을 300kW로 설정한다[15][16]. 이때 동적 저항 회로(DC/DC Converter)는 PSPICE를 사용하여 ABM (ABM1/1/ABM) 및 Gain(E/ANALOG) 소자로 설계한다. 트램의 동적 저항 회로의 모델링은 그림 2와 같다.

그림 2의 동작 원리는 node_1과 node_2의 전압 차가 Gain 소자의 입력으로 들어오게 되면, Gain소자는 들어온 입력 값(V(%IN))을 ABM소자로 넘겨준다.

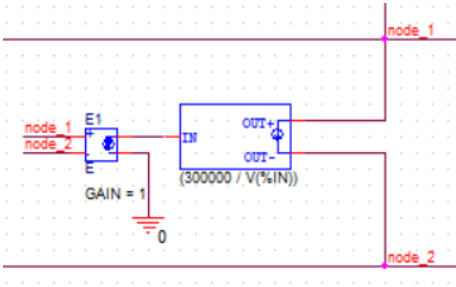


그림 2. 트램의 동적 저항 모델
Fig. 2. Dynamic resistance model of tram

이때 ABM소자는 300kW를 들어온 입력 값($V(\%IN)$)으로 나눈 값을 출력으로 한 전류를 node_1과 node_2 사이에 흘려주게 된다.

2.3 시스템 모델링

선로의 온도특성과 동적 저항 회로를 적용하여 모델링한 계통도는 아래의 그림 3, 4와 같다. 본 연구는 계통도를 토대로 시뮬레이션을 수행하였다.

III. 모의실험 통한 비용 분석

3.1 손실전력량에 따른 비용분석

본 연구에서는 구미시 시내버스 운행 시간을 참고하여, 트램 운행 시간을 06시부터 23시 30분까지로 설정하였다.

또한, 출근 시간인 07시부터 09시, 퇴근 시간인 17시부터 19시는 RH으로, 그 외의 시간은 NH로 구분하여 전력 소비 패턴에 차등을 두었다.

계절별, 시간대별 부하를 구분한 표 3을 참고하여 모의실험을 수행하였다. 또한 2024년 7월 1일부터 시행된 한국전력공사의 전기 요금표인 표 4를 참고하여, 트램의 전력 요금은 고압 A (표준 전압 3,300V~66,000V 이하), 선택Ⅲ (월 전기사용 시간 500시간 초과), 산업용 전력(을) 요금제를 기반으로 산정하였다.

표 3. 계절별, 시간대별 구분

Table 3. Classification by season and time zone

Season Time zone	Summer (6~8Month)	Spring•Autum (3~5Month, 9~10Month)	Winter (11~2 Month)
Light load	22:00~08:00	22:00~08:00	22:00~08:00
Mid load	08:00~11:00	08:00~11:00	08:00~09:00
	12:00~13:00	12:00~13:00	12:00~16:00
	18:00~22:00	18:00~22:00	19:00~22:00
Peak load	11:00~12:00	11:00~12:00	09:00~12:00
	13:00~18:00	13:00~18:00	16:00~19:00

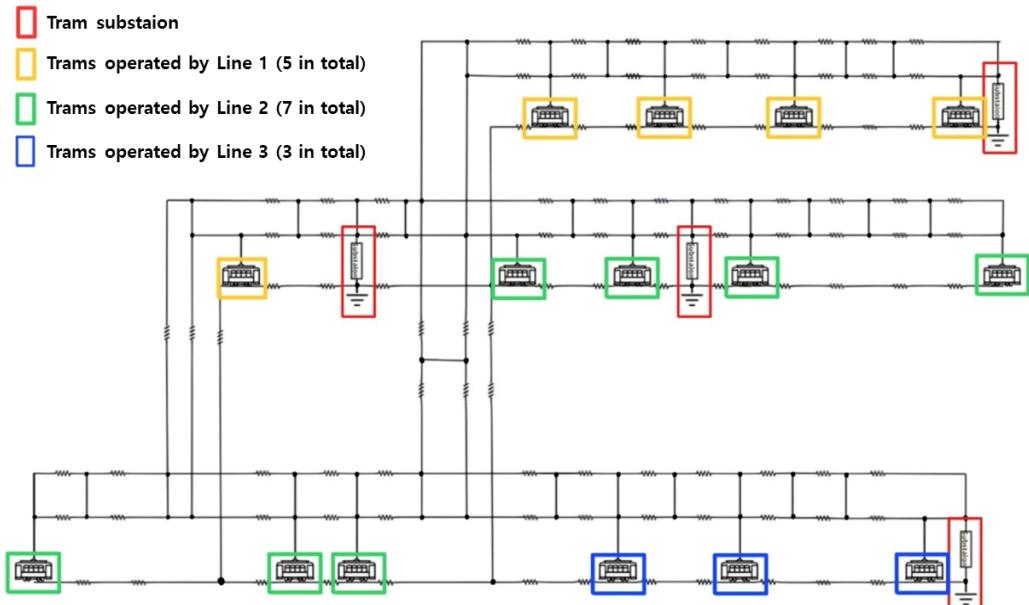


그림 3. 평시 트램 전력계통도
Fig. 3. Normal hour tram power system diagram

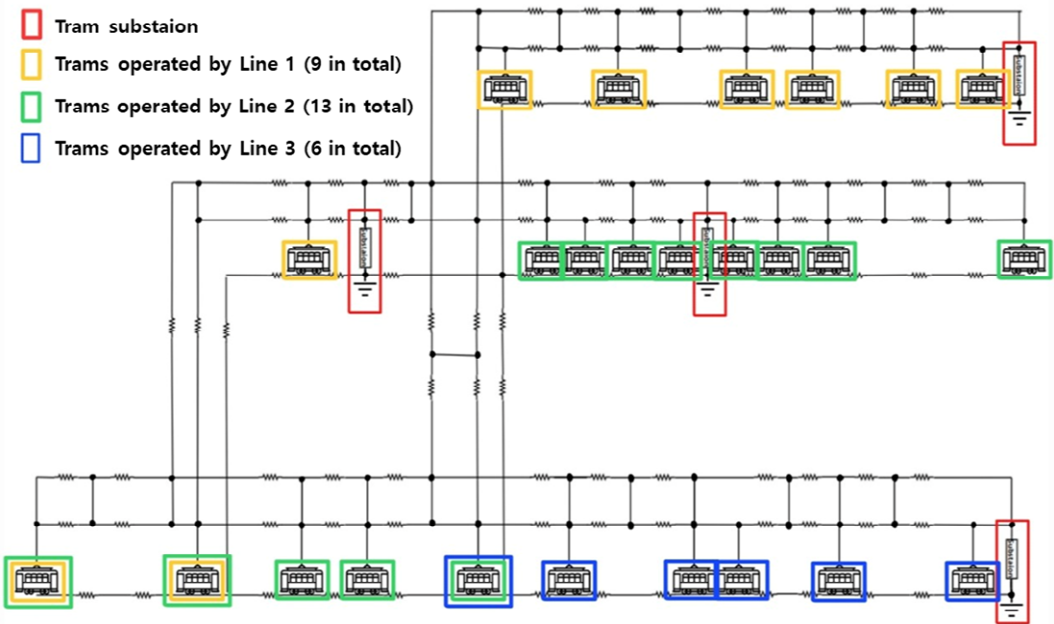


그림 4. RH 트램 전력계통도
Fig. 4. Rush hour tram power system diagram

표 4. 산업용전력(을) 전기요금표
Table 4. Industrial (B) : contract demand of 300kW or more

Type		Default rate (10X KRW/kWh)	Energy charge (KRW/kWh)			
			Time zone	Summer (6~8Month)	Spring·Autum (3~5Month, 9~10Month)	Winter (11~2Month)
High voltage A	Selection I	722	Light load	99.5	99.5	106.5
			Mid load	152.4	122.0	152.6
			Peak load	234.5	152.7	210.1
	Selection II	832	Light load	94.0	94.0	101.0
			Mid load	146.9	116.5	147.1
			Peak load	229.0	147.2	204.6
	Selection III	981	Light load	93.1	93.1	100.4
			Mid load	146.3	115.2	146.5
			Peak load	216.6	138.9	193.4

3.2 접지공사 비용을 반영한 모의실험

본 연구에서는 레일 저항으로 인해 발생하는 손실 전력을 줄이기 위해 접지공사를 도입할 것을 논의하였다. 이에 따라 접지공사 지점 수가 늘어날수록 손실 전력량이 선형적으로 반응하지 않고 비선형적으로 반응하기 때문에 4가지 Case를 설정하여 모의실험을 진행하였다. 먼저 Case 1은 과도현상을 해결하기 위한 접지공사 2개소를 시설한 것으로 시설 위치는 ‘구미길 노인복지센터’, ‘직물협업단지’

정류소 이다. Case 2는 Case 1에서 레일에서의 손실 전력이 가장 큰 구간인 ‘삼성전자 구미’ - ‘삼성육교’를 고려하여 ‘삼성전자 구미’ 정류소 위치에 접지공사를 1개소 추가하여 총 3개 접지공사를 시설하였다. Case 3은 Case 2에서 레일의 손실 전력이 가장 큰 구간을 고려하여 ‘구미전자정보기술원’정류소에 접지공사를 1개소 추가하여 총 4개 접지공사를 시설하였다. Case 4는 모든 정류소에 접지공사를 시설한 것으로 총 34개소로 설정하였다. 이렇게 접지공사 위치는 레일에서 손실 전력이 큰 구간을 고

려하여 순차적으로 적용하였다.

본 논문에서는 각 Case별 손실 전력 비용을 극명하게 비교해 보고자 한다. 이는 그림 5, 6, 7, 8과 같다.

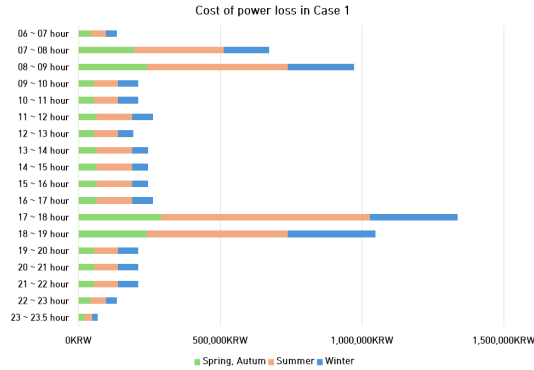


그림 5. Case 1의 손실 전력 비용
Fig. 5. Cost of power loss in Case 1

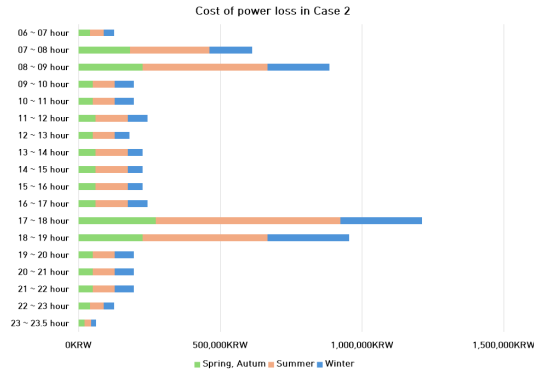


그림 6. Case 2의 손실 전력 비용
Fig. 6. Cost of power loss in Case 2

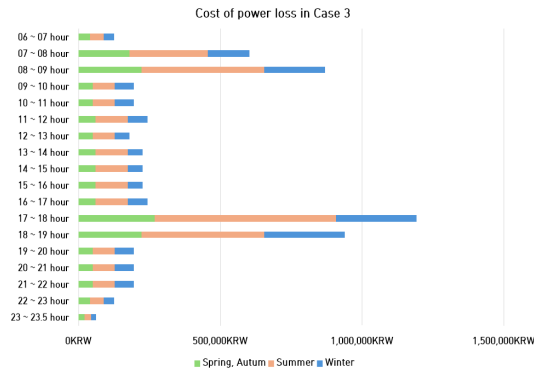


그림 7. Case 3의 손실 전력 비용
Fig. 7. Cost of power loss in Case 3

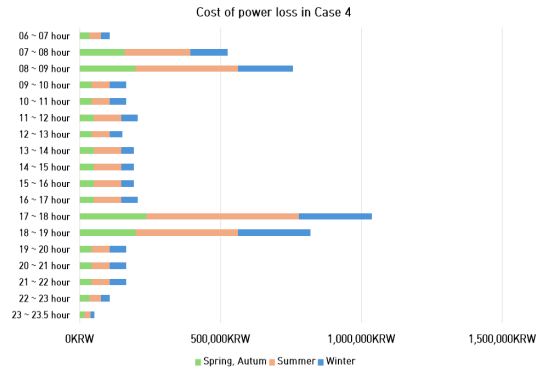


그림 8. Case 4의 손실 전력 비용
Fig. 8. Cost of power loss in Case 4

건축전기통신소방 설계 및 감리를 주요 사업으로 하는 전기설계사무소에 따르면, 접지공사 1개소당 비용은 약 650만 원으로 책정되었다. 또한, 접지공사를 통해 손실 전력을 감소시킬 수 있으나, 설치 및 유지 비용이 추가되기 때문에 경제적 효율성을 분석하기 위해 접지 설비 교체 주기를 10년으로 설정하고, 각 Case별 손실 전력 비용을 재산정하였다. 각 Case별 접지공사 비용과 10년 기준 손실 전력 비용의 합은 표 5와 같다.

표 5. 10년 기준 총 비용
Table 5. Total cost on a 10-year basis

Case	Cost of grounding [KRW]	Cost of power loss [KRW]
Case 1	13,000,000	7,868,023,746
Case 2	19,500,000	7,229,543,755
Case 3	26,000,000	7,162,816,963
Case 4	221,000,000	6,200,958,582

IV. 결론 및 기대 효과

이러한 결과에 따라, 본 연구에서는 구미시 트램 도입 시 모든 정류장에 접지공사를 적용하는 방안인 Case 4를 제안한다. Case 4는 초기 투자 비용이 높았으나, 접지공사를 통해 손실 전력을 크게 줄일 수 있어 장기적으로 가장 경제적인 선택으로 나타났다. 이를 통해 트램 시스템에서의 손실 전력을 최소화하고 에너지 효율을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Y. Choi and D. S. Song, "Improvement Measures for Promoting Carbon Neutrality Technology", The Hufs Law Research Institute, Vol. 48, No. 2, pp. 127-151, 2024. <http://doi.org/10.17257/hufslr.2024.48.2.127>.
- [2] K. R. Chung, S. K. Yoon, and Y. H. Choi, "A Study on the Development Strategies for the Light Rail Transit Industry", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 9, No. 1, pp. 95-101, Feb. 2006.
- [3] D. W. Kim, M. G. Kim, E. S. Choi, and H. J. Lee, "A Study on the Introduction Plan of the Gumi-city Tram Considering Efficiency of Power Supply", Journal of KIIT, Vol. 22, No. 6, pp. 103-112, Jun. 2024. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.6.103>.
- [4] J. H. Choi, S. B. Chung, T. H. Bae, and M. H. Myung, "Improvement of Methodology for Appraising Tram Projects Considering the Effect of Buses", KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 41, No. 1, pp. 85-91, Feb. 2021. <https://doi.org/10.2652/1Ksce.2021.41.1.0085>.
- [5] Y. G. Choi, J. S. Lee, and J. H. Baek, "Study on the Introduction of Tram Driving Qualifications", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 18, No. 2, pp. 94-104, Apr. 2015. <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.2.94>.
- [6] J. R. Kim, C. R. Park, K. J. Park, and J. U. Kim, "A Study on DC Traction Power Supply System Using PWM Converter", Journal of the Korean institute of electronic material engineers, Vol. 29, No. 4, pp. 250-254, Apr. 2016. <http://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.4.250>.
- [7] H. Shigeeda, H. Morimoto, K. Ito, T. Fujii, and N. Morishima, "Feeding-loss Reduction by Higher-voltage DC Railway Feeding System with DC-to-DC Converter", 2018 International Power Electronics Conference, Niigata, Japan, May 2018. <https://doi.org/10.23919/IPEC.2018.8507567>.
- [8] H. S. Jung, J. U. Kim, S. Y. Kwon, and H. C. Kim, "Configuration and Performance Evaluation of De-icing Overhead Catenary System in DC Traction Railway System", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 23, No. 9, pp. 864-874, Sep. 2020. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2020.23.9.864>.
- [9] H. S. Jung, J. U. Kim, and H. C. Kim, "Evaluation of temperature rising characteristics for catenary deicing system through heating test", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 70, No. 9, pp. 1398-1404, Sep. 2021. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.9.1398>.
- [10] S. J. Park, H. D. Lee, and J. H. Moon, "Applicability Evaluation of CWR-setting Temperature Criteria Based on Future Climate Change Scenarios", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 27, No. 3, pp. 175-184, Mar. 2024. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2024.27.3.175>.
- [11] B. L. Ahn and J. Lee, "A Study on Temperature Variation of Contact Wire by De-icing System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 22, No. 9, pp. 69-74, Sep. 2008.
- [12] J. W. Kim and J. D. Kim, "Voltage divider resistance for the highest resolution of thermistor temperature measurement", Journal of KIIT, Vol. 8, No. 11, pp. 55-60, Nov. 2010.
- [13] J. S. Lee and S. B. Kim, "Analysis of Active Power Losses in the Korean Power System Considering Weather-Dependent Line Resistances", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 72, No. 12, pp. 1605-1612, Dec. 2023. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2023.72.12.1605>.
- [14] A. R. Kang and J. S. Lee, "Stator Resistance Estimation for Winding Temperature Prediction of Permanent Magnet Synchronous Motors", The Transactions of the Korean Institute

of Electrical Engineers, Vol. 73, No. 3, pp. 552-558, Mar. 2024. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2024.73.3.552>.

- [15] E. Fedele, D. Iannuzzi, and A. Del Pizzo, "Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments", IET Electrical Systems in Transportation, Vol. 11, No. 4, pp. 279-309, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1049/els2.12026>.
- [16] Y. J. Han, S. G. Lee, and Y. H. Lee, "A Study on DC-DC Converter Development for LRT Wireless Power Supply", Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 23, No. 12, pp. 179-184, Dec. 2018. <https://doi.org/10.9708/jksci.2018.23.12.179>.

이 희 진 (Hee-Jin Lee)



2008년 2월 : 연세대학교
전기전자공학부(공학사)
2013년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학박사)
2015년 2월 ~ 현재 : 국립금오공과
대학교 전자공학부 교수
관심분야 : 전력시스템, 전력전자,
제어시스템, 스마트그리드

저자소개

배 정 석 (Jeong-Seok Bae)



2019년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교 전자공학부
학사과정
관심분야 : 전력시스템,
신재생에너지, 철도전력망

최 윤 지 (Yun-Ji Choi)



2020년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교 전자공학부
학사과정
관심분야 : 전력시스템,
신재생에너지