Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 18, No. 11 pp. 755-761, 2017

https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.755
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

주회로차단기 투입전원 위상제어를 위한 지능형 제어기 개발

오용국[1], 김재원[1], 류준형[2*]
[1]한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부, [2]한국철도기술연구원 고속철도연구본부

A Development of Intelligent Controller for Phase Control in Main Circuit Breaker

Yong-Kuk Oh[1], Jae-Won Kim[1], Joon-Hyoung Ryu[2*]
[1]**Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute**
[2]**High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute**

요 약 교류 철도차량에 사용되는 주회로차단기 (Main Circuit Breaker)는 전차선 전원을 차량 내 투입 또는 차단하는 기능을 한다. 일반적으로 주회로차단기는 판토그라프와 주변압기 사이에 위치하며, 주회로차단기의 동작시점에 따라 차량에 투입되는 전원의 위상이 변화하게 된다. 투입전원의 위상에 따라 차량 내 돌입전류, 서지전압 등의 형태로 차량 전기장치 내 의도하지 않은 과도현상이 야기될 수 있으므로, 주회로차단기의 동작은 전차선 전원의 위상각에 따라 능동적으로 제어되어야 한다. 하지만 주회로차단기는 동작신호 인가 이후, 실제 개폐 동작 시까지 일정하지 않은 동작지연시간이 존재한다. 따라서 동작지연시간을 예측하고, 이를 고려하여 주회로차단기를 개폐시점을 제어하는 지능형 제어기가 필요하다. 본 논문에서는 주회로차단기의 투입전원 위상 제어를 위하여 동작 메카니즘 및 동작 지연요소를 분석하였다. 그리고 차단기 및 구성품 별 반복동작시험을 통하여 동작 지연시간을 분석하고, 이를 예측하기 위한 이동평균 (Moving Average) 알고리즘을 제안하였다. 또한 지능형 제어기 개발 및 제작을 통하여 제안된 알고리즘을 구현하였으며, 주회로차단기와의 연동시험을 통하여 알고리즘의 성능을 검증하였다.

Abstract In railways powered by AC power, the main circuit breaker (MCB) is used for supplying the electric power to the catenary of the vehicle. Generally, the main circuit breaker is located between the pantograph and the main transformer, and the phase of the power applied to the vehicle changes according to the operation timing of the main circuit breaker. The operation of the main circuit breaker should be actively controlled according to the phase of the power source, since the phase of the power causes unintended transient states in the vehicle's electrical system in the form of an inrush current and surge voltage. However, the MCB has a delay time when it operates which is not constant. Therefore, an intelligent controller is needed to predict the operation delay time and control the opening and closing of the MCB.

Keywords : AC Railways, Delay Time, Main Circuit Breaker(MCB), Phase Control, Transient State

1. 서론

철도차량에 사용되는 주회로차단기(Main Circuit Breaker, MCB)는 판토그라프를 통하여 집전된 전차선 전원을 차량 내 투입 또는 차단을 하는 전기장치이다. 교류 철도차량의 경우 직류 철도차량과 달리, 주회로차단

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음.
*Corresponding Author : Joon-Hyoung Ryu(Korea Railroad Research Institute)
Tel: +82-31-460-5519 email: jhryu@krri.re.kr
Received October 10, 2017 Revised October 18, 2017
Accepted November 3, 2017 Published November 30, 2017

기의 동작시점에 따라 차량에 공급되는 전차선 전원의 위상각 차이가 발생하며, 위상각에 따라 돌입전류, 서지 전압 등의 형태로 차량 전기계통 내 의도하지 않은 과도 현상이 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 주회로차단기의 동작시점은 전차선 전원의 위상각에 따라 능동적으로 제어가 가능해야 한다. 하지만 현재 차량에 적용되는 주회로차단기는 기관사의 개폐 신호에 따라 수동적으로 동작하도록 구성되어 있어 위상각 제어가 불가하다. 또한 차단기 내에 존재하는 전기적/기계적 동작지연요소로 인하여 개폐신호 인가 후 실제 차단기 동작이 완료하는 시점까지 동작지연 시간이 발생한다. 따라서 차량 내 투입전원의 위상각 제어를 위해서는 전차선 전원의 위상 검지와 주회로차단기의 동작특성을 고려하여 동작시점을 판단하는 지능형 제어기가 필요하다.

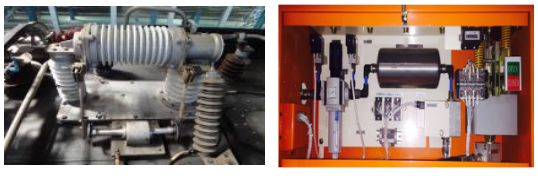


Fig. 1. MCB for KTX-Sanchun

고압 전원에 대한 차단기 위상 개폐제어는 송배전 분야에 적용된 사례가 존재하나[1-7], 철도차량 분야에는 적용된 사례가 없다. 본 논문에서는 교류철도차량에 적용되는 주회로차단기의 동작특성 분석을 통하여 동작지연요소에 대하여 분석하고, 투입전원 위상각 제어를 위한 알고리즘 구현 및 모의시험을 통하여 관련 기술을 검증한다.

2. 본론

2.1 주회로차단기 시스템 구성 및 동작특성

2.1.1 주회로차단기 시스템 구성

주회로차단기는 외부 전기적 입력 처리를 위한 전기부, 주회로차단기를 구동시키는 공압부, 그리고 실제 개폐 동작이 이뤄지는 기구부로 구성된다.

(1) 전기부

주회로차단기 투입신호가 인가되면 차량 상시전원이 계전기를 거쳐 공압회로를 제어하는 공압밸브를 동작시킨다. 계전기는 전원이 인가되면 내부 코일이 여자되어 스위치가 이동하여 동작한다. 따라서 정상상태에서도 코일 여자시간 및 스위치 동작으로 인한 동작지연시간이 발생하며, 여자전원(차량 상시전원)의 크기에 따라서도 동작지연시간의 차이가 발생한다. KTX-산천의 경우 주회로차단기 투입 시, 다수의 계전기가 순차적으로 동작하여 수십 ms의 동작지연시간이 발생한다.

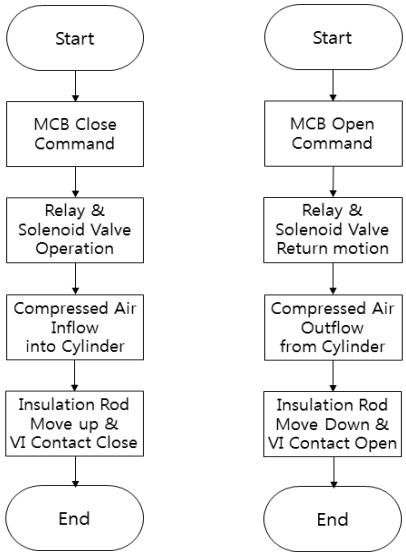
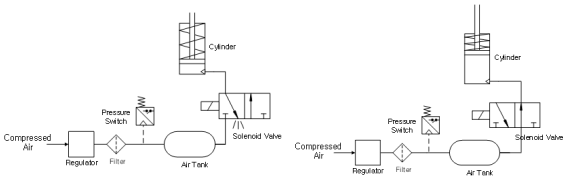


Fig. 2. Operation Mechanism of MCB

(2) 공압부

차량 내 보조공기압축기로부터 공급되는 압축공기는 공압회로 내 레귤레이터를 통하여 주회로차단기의 동작에 적합한 압력으로 조정된다. 레귤레이터를 거친 압축공기는 공기탱크를 지나, 공압밸브 앞단으로 공급된다. 이때 전기부의 동작으로 공압밸브가 개방되면, 실린더로 압축공기가 전달되어 접촉부 기구부를 움직여 주회로차단기가 투입된다. 반대로 계전기 및 공압밸브의 전원공급이 중단되면, 공압밸브는 원위치로 복귀하며 배기밸브를 통하여 실린더 내 압축공기는 외부로 토출되어 차단기를 차단시키게 된다. 공압부 내 압축공기는 주회로차단기 동작신호와 상관없이 상시 공압밸브 앞단까지 전달되어 있으며, 레귤레이터와 공기탱크를 이용하여 상시 적정 공기압이 유지되기 때문에 차단기의 동작지연을 유발시키지 않는다. 단, 계전기를 거친 제어신호가 공압밸브를 동작시키므로 동작지연 요소는 존재하나, 전기부 계전기에 의한 지연보다는 적다.



(a) MCB Open State (b) MCB Close State

Fig. 3. Pneumatic Circuit of MCB

(3) 기구부

실린더 내로 유입된 압축공기는 실린더 내부 피스톤과 기구적으로 연결된 절연로드를 상승시킨다. 그리고 절연로드의 수직운동을 수평운동으로 변환하는 트립레버를 거쳐 진공 인터럽트 접점이 움직이며 주회로차단기 양단이 통전된다. 이때 실린더 내부 피스톤이 정지상태에서 상승위치 도달 시까지 기계적 운동으로 인한 시간 지연이 발생한다. 또한 진공 인터럽트 접점도 반복동작에 의한 물리적인 충격으로 통전부가 마모될 수 있으며, 이러한 현상도 동작시간 지연요소로 고려될 수 있다.

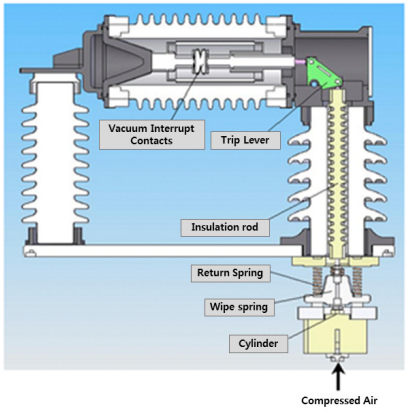


Fig. 4. Moving part of MCB

2.1.2 주회로차단기 동작특성 분석

주회로차단기는 개방 시에, AC 25kV의 고압이 양단에 인가되어 있으며, 투입신호가 인가되면 접점이 밀착되지 않더라도 절연파괴로 인한 아크 발생으로 전류가 통전될 수 있다. 이러한 아크 발생 현상을 분석하고 예측하는 것은 어렵지만, 무부하 상태에서 동작시간 및 시간지연 편차를 통계적으로 분석한다면 주회로차단기의 기계적인 동작특성을 확인할 수 있다. 이를 위하여 반복동작시험을 통한 주회로차단기의 구성품 별 동작시간을 분석하였다.

시험결과 주회로차단기의 동작지연시간은 113 ms에서 116ms 사이이다. 지연시간의 편차는 약 3 ms이며, 이는 60Hz 교류신호에서 약 65°의 위상편차를 의미한다. 히스토그램 분석결과 동작지연시간 분포는 정규분포(normal distribution)의 형태를 갖는 것을 확인할 수 있다. 만약 동작지연시간이 일정하면 해당 동작지연시간을 보상하여 주회로차단기 동작신호를 인가하면 된다. 하지만 동작지연시간의 편차가 존재하므로 투입 위상각을 제어하기 위해서는 별도의 제어알고리즘이 요구된다.

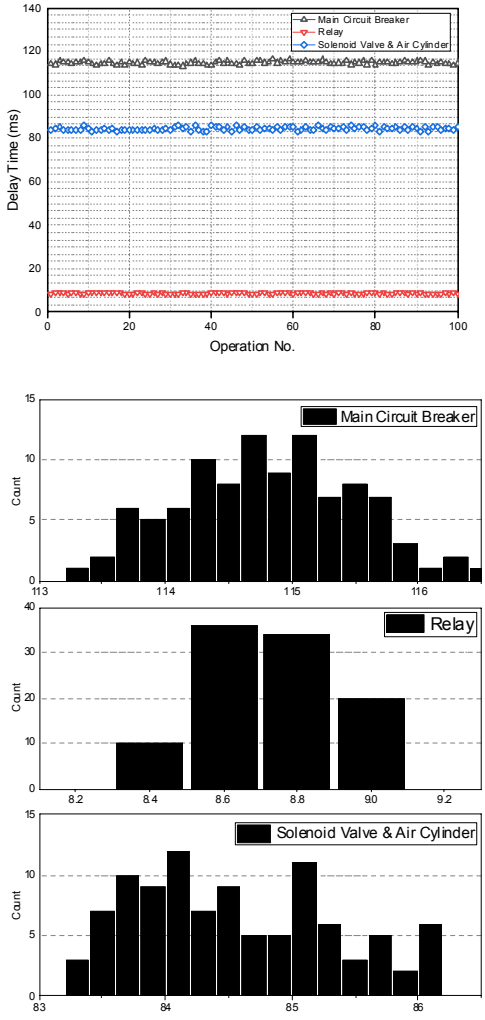


Fig. 5. Operating delay time of MCB and components

2.2 주회로차단기용 제어기 개발

2.2.1 제어기 사양 및 구성

주회로차단기의 투입전원 위상각 제어를 위하여 아래와 같이 제어기를 개발하였다.

Table 1. Specification of controller for MCB

Item	Specification
Operating Voltage	Nominal DC 24V (Operation Range : 24V-30V)
Measurement Resolution	12 bit
Sampling Rage	128 sample / 1 cycle
External Communication	Modbus-RTU
Operating Temperature	0℃ - 50℃ (Indoor Type)

제어기는 센싱부, 제어부, 전원부, 운영부, 구동부로 구성된다. 센싱부는 전차선 전압, 부하측 전압, 그리고 부하전류를 계측하며, 제어부는 계측된 데이터를 이용하여 전차선의 위상검지 및 차단기의 투입/차단 시점을 결정한다. 전원부는 차량 상시전원을 제어기 내부에서 사용 가능한 전압으로 변환해주는 기능을 한다. 이때 철도차량 내 상시전원은 차량 종류에 따라 상이하므로, 제어기 외부에 별도의 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 장착하여 해당 부품 교체만으로 다양한 철도차량에 적용할 수 있도록 하였다. 운영부는 각종 버튼조작 및 제어기 상태를 LCD 또는 LED로 표출하는 기능을 수행하며, 외부통신을 통하여 차량 제어기와 인터페이스가 가능토록 한다. 구동부는 제어부로부터 수신한 차단기 동작신호를 주회로차단기에 인가하는 기능을 한다. 이때 동작신호는 차량 상시전원을 bypass 시킴으로서 주회로차단기에 인가되며, 전원부와 같이 차량 종류에 따라 상시전원의 크기가 상이하여 구동부에 적용되는 소자의 사양이 달라질 수 있으므로, 변경이 용이하도록 제작하였다.

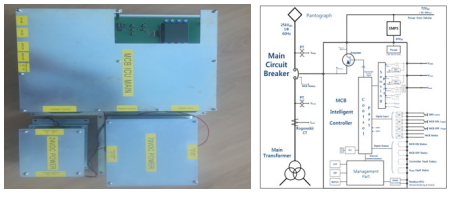


Fig. 6. Controller and Control Block Diagram for MCB

2.2.2 주회로차단기 제어 알고리즘

주회로차단기 동작신호 인가이후 실제 개폐 시까지는 지연시간이 존재하므로, 투입 전원의 위상제어를 위해서는 지연시간을 고려하여 동작신호를 인가해야 한다. 하지만 지연시간이 일정하지 않고 편차(Δt)가 존재하므로 정확히 원하는 위상각에서 주회로차단기의 동작은 불가능하다. 따라서 동작을 희망하는 위상각을 기준으로 허용오차 이내로 동작하도록 제어목표로 삼아야 하며, 허용오차는 Δt에 비례한다.

본 연구에서는 주회로차단기의 차단시점 결정을 위하여 이동평균(Moving average, MA) 기법을 적용하였다. 이동평균 기법은 moving window의 크기를 N이라고 할 때, 이전 N회의 주회로차단기의 동작지연 시간을 평균하여 다음 개폐시점의 지연시간을 예측한다. 이때 이전 동작지연시간에 대하여 weighting factor, α_i 를 식(1)과 같이 적용할 수 있으며, k번째 동작지연시간에 대한 예측치는 아래와 같다.

$$\hat{t}_{k,delay} = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i t_{k-i} \quad (\sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i = 1)$$

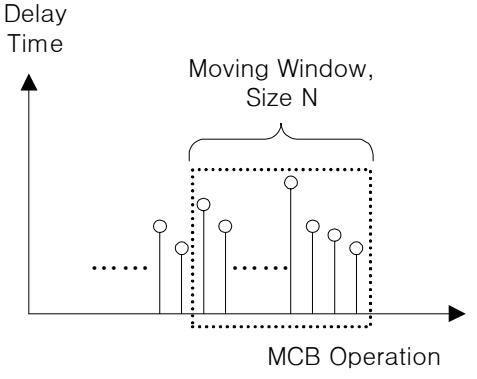


Fig. 7. Moving average algorithm of MCB

2.3 시험평가

제어기의 성능검증을 위하여 주회로차단기 연동시험을 수행하였다. 전차선 전압을 모사하기 위하여 모의시험기를 이용하여 AC 100V, 60Hz 교류전압을 발생시켰으며, 목표 위상각은 90°로 설정하였다.

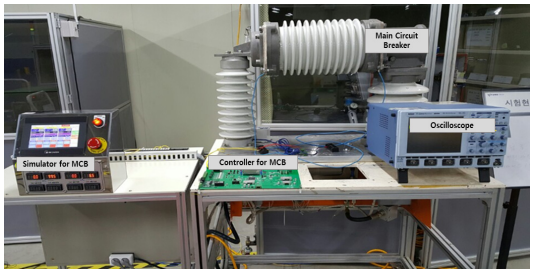


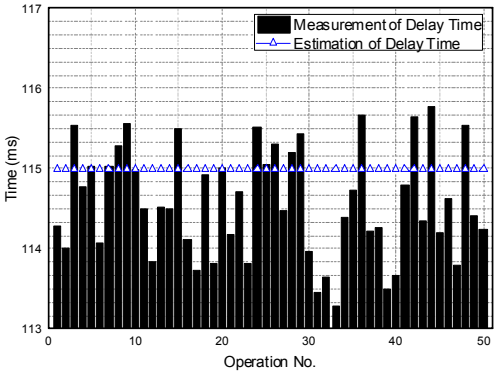
Fig. 8. Test view of controller with MCB

이동평균 알고리즘의 효과를 검증하기 위하여 우선 알고리즘을 미 적용 후 동작시험을 시행하였다. 결과는 그림 9와 같으며, 동작지연시간 편차에 의하여 투입 위상각이 설정 위상각(90°)에 집중되어 있지 않고 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 허용오차를 ± 20°로 가정한 경우 제어 정확도는 약 72 % 수준이다.

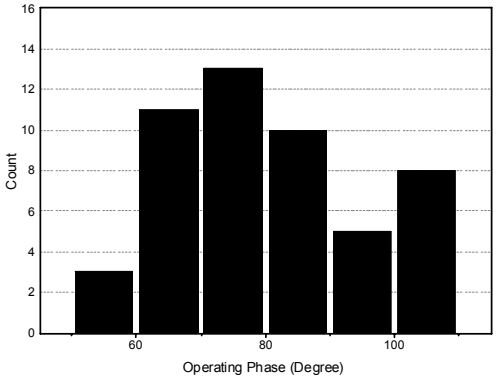
이동평균 알고리즘을 적용한 경우 시험결과는 그림 10과 같다. 이때, moving window의 크기, N은 50이며, 허용오차를 ± 20°로 가정한 경우, 제어 정확도는 약 86 % 수준이다. 그림 9와 비교하여 동작 위상각이 상대적으로 목표 위상각에 집중되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이동평균 알고리즘의 적용으로 정확도가 향상됨을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 주회로차단기의 투입 위상각을 제어하

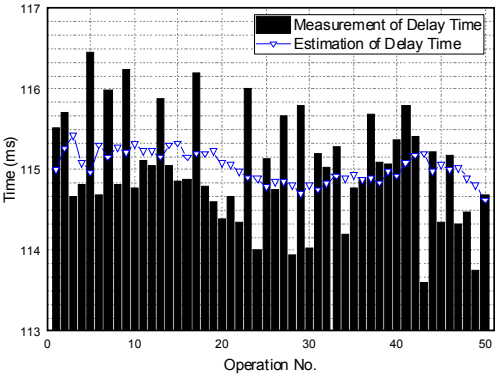


(a) Delay time of MCB Operation

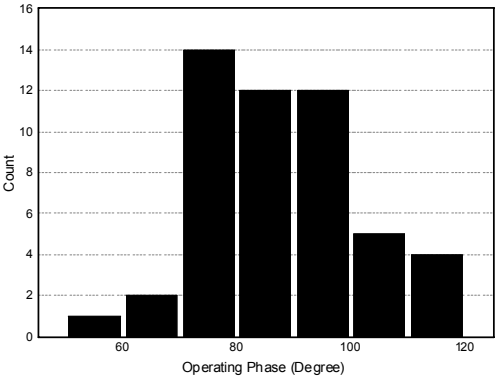


(b) Histogram of MCB Operating phase

Fig. 9. Test results of MCB phase control without MA algorithm



(a) Delay time of MCB Operation



(b) Histogram of MCB Operating phase

Fig. 10. Test results of MCB phase control with MA algorithm

기 위하여 동작특성을 분석하고 제어알고리즘과 제어기를 개발하였다. 철도차량의 상시전원과 상관없이 적용할 수 있도록 제어기의 모듈을 구성하였으며, 높은 정밀도로 위상각 계측이 가능하도록 하였다. 또한 이동평균 알고리즘을 적용하여 위상각 제어의 정확성을 향상시켰으며, 이를 주회로차단기 연동시험을 통하여 검증하였다.

주회로차단기의 위상각 제어성능은 차단기의 동작편차의 크기에 의해 결정된다. 따라서 동작지연시간의 편차가 크게 발생한 경우에는 위상제어의 정확도가 감소하며, 이를 방지하기 위해서는 주회로차단기의 동작편차를 감소시키도록 구성품 단계에서의 부품 선정이 필요하다.

본 연구에서 개발된 제어기를 교류 철도차량에 적용할 경우 차량에 발생하는 전기적 과도현상의 저감이 가능하며, 철도차량의 운행안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다. 향후에는 본 연구의 내용을 바탕으로 주회로차단기의 동작에 영향을 주는 외부환경(구동전원, 외기온도 등)에 대한 추가분석 등을 통하여 위상각 제어의 정확도를 향상시킬 예정이다.

References

[1] E. R. Laboreo, C. Sagues, S. Llorente, “A New Model of Electromechanical Relays for Predicting the Motion and Electromagnetic Dynamics”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 52, no. 3, pp. 2545-2553, 2016.
DOI: https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2518120

[2] J. Liu, G. M. Huang, Z. Ma, “Optimizing the Arcing Time for Smart Circuit Breakers Using Synchronous Phase Control”, *IECON 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3347~3352, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675296

[3] J. Qu, Q. Wang, Z. Liu, H. Zhao, X. Li, “Influences of Closing Phase Angle and Frequency on Electrodynamic Stability of Air Circuit Breaker”, *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, vol. 6, no. 2, pp. 249-255, 2016.
DOI: https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2511180

[4] F. Zhang, Y. Lv, X. Duan, M. Liao, J. Zou, “Investigation on Phasing Controlled Vacuum Circuit Breaker for Switching Overvoltage of 110kV Power System”, *27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, vol. 2, pp. 1-4, 2016.
DOI: https://doi.org/10.1109/DEIV.2016.7763986

[5] H. Kohyama, K. Wada, H. Ito, M. Hidaka, S. Billings, T. Sugiyama, H. Yamamoto, "Development of 550kV and 362kV Synchronous Switching Gas Circuit Breakers", *IEEE/PES*, vol. 1, pp. 597-602, 2001.
DOI: https://doi.org/10.1109/TDC.2001.971301

[6] S. H. Chang, "Transient Characteristics by Transformer Impedance at the time of Opening the Main Circuit Breaker on the Electric Railway Vehicle", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 5, pp. 719-725, 2014.
DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.5.719

[7] C. H. Cho, J. B. Lee, B. W. Min, Y. S. Kim, “A study on controlled switching device for high voltage circuit breaker”, KIEE conference, pp. 541-542, 2015.

[8] D. H. Kim, Y. P Kim, J. K. Kim, S. J. Lee, J. L. Kwon, J. F. Moon, “Development of Controlled Switching Device for High Voltage Circuit Breakers (I)", KIEE conference, pp. 563-565, 2004.

[9] D. H. Shin, “Development of ICT based smart railway safety system”, Korea Railroad Research Institute report, pp. 27-78, 2016.

오 용 국(Yong-Kuk Oh) **[정회원]**

- 2005년 2월 : 한양대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업 (학사)
- 2007년 2월 : 한양대학교 전기공학과 졸업 (석사)
- 2017년 2월 : 한양대학교 전기공학과 수료 (박사)
- 2010년 10월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
하이브리드 시스템 제어, 전기철도차량, 제어이론

김 재 원(Jae-Won Kim) **[정회원]**

- 2006년 2월 : 고려대학교 전기전파공학부 졸업 (학사)
- 2008년 2월 : 고려대학교 전자전기공학과 졸업 (석사)
- 2015년 2월 : 고려대학교 전자전기공학과 수료 (박사)
- 2011년 10월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
전기철도 급전시스템 해석, 전기장치 신뢰성 평가, 급속충전 저장기술

류 준 형(Joon-Hyoung Ryu) **[정회원]**

- 1997년 2월 : 아주대학교 제어계측공학과 졸업 (학사)
- 1999년 2월 : 아주대학교 제어계측공학과 졸업 (석사)
- 2005년 8월 : 아주대학교 전자공학과 졸업 (박사)
- 2005년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
추진제어용 및 보조전원용 전력변환장치, 에너지저장 시스템, 수소연료전지, 전기철도차량, RAMS