

동적 시정수 기반 고성능 절연 저항 계산 기법

손기범¹ · 홍종필^{2*}

Dynamic Time Constant Based High-Performance Insulation Resistance Calculation Method

Gi-Beom Son¹ · Jong-Phil Hong^{2*}

¹Graduate Student, Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28664 Korea

^{2*}Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28664 Korea

요 약

본 논문에서는 IT 접지 시스템의 감전 및 화재사고 방지를 위한 새로운 절연 저항 계산 기법을 소개한다. 최근 신재생 에너지와 에너지 저장 장치의 확대 보급으로 태양광 발전 시장이 급속하게 성장하고 있으나 절연이 파괴되어 화재사고가 빈번히 발생함에 따라 IT 접지 방식에도 절연 저항 상태를 감시하는 장치가 필수적으로 요구되고 있다. 제안하는 절연 저항 계산 기법은 기존의 고정된 시정수 곱 계수 기반의 알고리즘에 비해 절연 임피던스의 조건에 따라 동적 시정수 곱 계수를 적용함으로써 넓은 절연 저항 범위에서 빠른 응답 시간과 높은 정확도를 갖는다. 제안하는 동적 시정수 기반 절연 저항 계산 기법은 기존의 방법에 비해 최대 응답 시간은 39.29초, 오차율은 20.11%를 개선시키는 효과를 보였다.

ABSTRACT

This paper presents a new insulation resistance calculation technique to prevent electric shock and fire accidents due to the dielectric breakdown in the primary insulation section of the IT ground system. The solar power generation market is growing rapidly due to the recent expansion of renewable energy and energy storage systems, but as the insulation is destroyed and fire accidents frequently occur, a device for monitoring the insulation resistance state is indispensable to the IT grounding method. Compared to the conventional algorithm that use a method of multiplying a time constant to a fixed coefficient, the proposed insulation resistance calculation method has a fast response time and high accuracy over a wide insulation resistance range by applying a different coefficient according to the values of the insulation impedance. The proposed dynamic time constant based insulation resistance calculation technique reduces the response time by up to 39.29 seconds and improves the error rate by 20.11%, compared to the conventional method.

키워드 : 정확도, 동적, 절연 저항, 응답 시간, 시정수

Keywords : Accuracy, Dynamic, Insulation Resistance, Response Time, Time constant

Received 15 July 2020, Revised 21 July 2020, Accepted 22 July 2020

* Corresponding Author Jong-Phil Hong(E-mail:jphong@chungbuk.ac.kr, Tel:+82-43-261-2419)

Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28664 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.8.1058>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

IT 접지방식은 동작 중에 전력선의 한쪽이 접지가 되는 사고가 발생하더라도 계통의 연속적 운전이 가능하다는 장점으로 인해 다양한 응용분야에서 널리 사용되고 있다[1-3]. 하지만 IT 접지방식은 이상적으로 무한대의 임피던스 값을 가져야 할 절연 임피던스가 외부환경에 의해 절연 저항이 매우 작아져 1선 지락이 발생하는 문제가 여전히 존재한다. 최근 신재생 에너지와 에너지 저장 장치의 확대 보급으로 태양광 발전 시장이 급속하게 성장하고 있으나 절연이 파괴되어 화재사고가 빈번히 발생함에 따라 IT 접지 방식에도 절연 저항 상태를 감시하는 장치가 필수적으로 요구되고 있다[4-8].

그림 1은 절연 감시 장치를 보여주고 있다. 절연 감시 장치는 절연 저항(R_e)과 절연 커패시터(C_e)로 구성된 절연 임피던스(Z_e) 내의 절연 저항을 실시간으로 모니터링 하면서, 절연 저항이 작아지면 알람을 울리고 스위칭 릴레이를 통해 계통을 개방시킴으로써 지락과 화재를 미연에 방지하는 기능을 한다. 절연 감시 장치는 전력선(L1, L2)과 접지 사이에 형성되는 절연 임피던스(Z_e)를 통해 전력선과 접지 사이에 회로를 형성한다. 그림 1에서 절연 감시 장치는 전력선에 신호를 인가하기 위한 신호 발생기(Signal Generator), 절연 감시 장치를 전력선의 높은 전압으로부터 보호하고 생성된 신호를 전력선에 인가하기 위해 연결된 신호 커플러(Signal Coupler), 절연 임피던스를 통과하여 돌아오는 신호를 검출하는 신호 검출기(Signal Detector), 그리고 검출된 신호로부터 절연 저항을 계산하는 신호 처리부(Signal Processor)로 구성 되어 있다. 신호 처리부는 신호 검출기로부터 입력 받은 신호를 기반으로 절연 저항 계산 알고리즘을 통해 값을 측정하는데 기존의 정적 시정수 기반의 절연 저항 계산 알고리즘은 절연 저항이 작은 경우 응답 시간이 느리고, 반대의 경우 계산 오차가 커지는 문제가 존재한다[9].

본 논문에서는 정상 상태 도달 시간의 정밀한 예측을 위해 시정수 곱계수를 상황에 최적화하여 동적으로 결정함으로써, 빠른 응답 시간을 보이면서도 동시에 높은 정확도를 갖는 절연 저항 계산 기법을 제안한다.

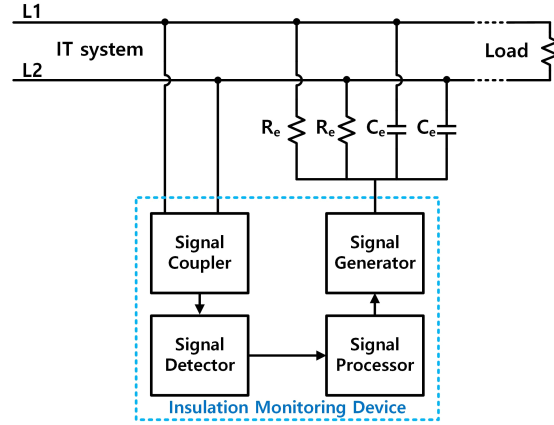


Fig. 1 Insulation Monitoring Device at IT earthing system

II. 고정된 시정수를 사용하는 기존의 절연 저항 계산 알고리즘

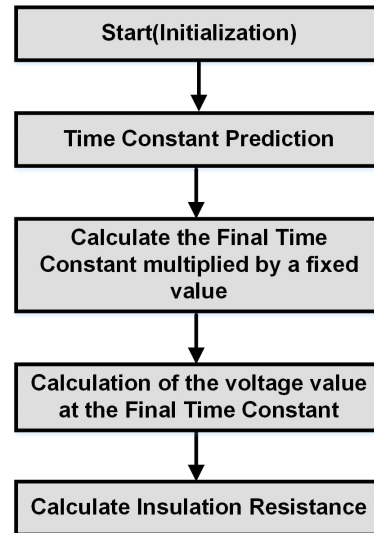


Fig. 2 Conventional fixed time constant based insulation resistance calculation algorithm

그림 2는 기존의 고정된 시정수 기반 절연 저항 계산 알고리즘을 보여준다. 주입된 신호의 초기 값으로부터 정상 상태에 이르기까지 또는 신호의 극성이 반전되는 경우 전압차로 인한 서지(Surge) 현상으로 인해 일시적으로 불안정한 상태가 되고, 전압이 다시 안정화되기까지 일정 시간이 경과해야 한다. 정확한 절연 저항 값을

계산하기 위해서는 검출된 신호의 정상 상태를 찾고 이때의 전압을 감지하여 절연 저항 값을 계산해야 한다. 그림 2의 기존 방법은 초기 일정시간 대략적인 시정수를 예측하고 고정된 곱 계수를 예측된 시정수에 곱하여 정상 상태의 최종 시정수를 산출하고 전압 값을 계산한다.

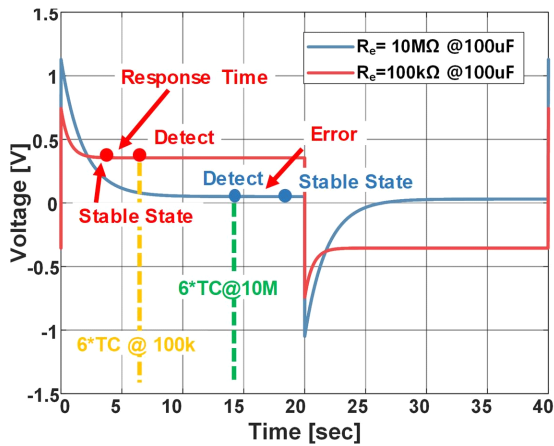


Fig. 3 Insulation resistance is 100 kΩ (Red line) and 10 MΩ (Blue line), the steady state determination method using the conventional method

그림 3은 절연 저항이 작거나(100kΩ) 큰 (10MΩ) 두 경우에 정상 상태의 99% 시점인 6배의 고정된 시정수를 사용하여 절연 저항을 계산하는 기존의 방법을 도시한 그림이다. 절연 저항이 작은 경우 안정화 시점보다 늦게 계산이 되므로 시간을 낭비하게 되고, 절연 저항이 큰 경우 안정화되기 전에 계산되어 오차율이 커진다. 절연 저항 계산의 오차율을 줄이기 위해 큰 값의 고정된 곱 계수를 사용할 경우 절연 저항이 작아 지락사고 또는 화재가 발생할 때 검출이 늦고 연산 량이 많이 전력소모가 큰 문제가 있다. 반면에 빠른 응답 시간을 위해 곱 계수를 작게 설정하는 경우 큰 절연 저항의 계산 오차율이 커지는 문제가 발생한다.

그림 4와 그림 5는 3배, 5배, 7배의 곱 계수를 적용한 기존 고정된 시정수 절연 저항 계산 방법의 응답 시간과 오차율을 보여준다. 그림 4는 그림 1의 절연 임피던스에서 기생 커패시턴스가 10uF과 100uF 일 때, 최소 10kΩ으로부터 최대 10MΩ의 절연저항 사이의 범위에서 시뮬레이션 하였다. 3배의 곱 계수를 적용한 경우 모든 절연 저항 측정 범위에서 가장 빠른 응답 시간을 보이고 있지만 오차율은 다른 두 경우에 비해 크고 특히

절연 저항 값이 커질수록 악화되는 경향을 보인다. 반면에 7배의 곱 계수를 적용한 경우 모든 절연 저항 측정 범위 내에서 가장 낮은 오차율을 보이지만, 응답 시간은 가장 길게 나타나고 특히 지락사고나 화재가 발생하는 절연 저항이 작은 경우 다른 두 경우에 비해 최대 18초 늦게 검출되는 문제를 보인다.

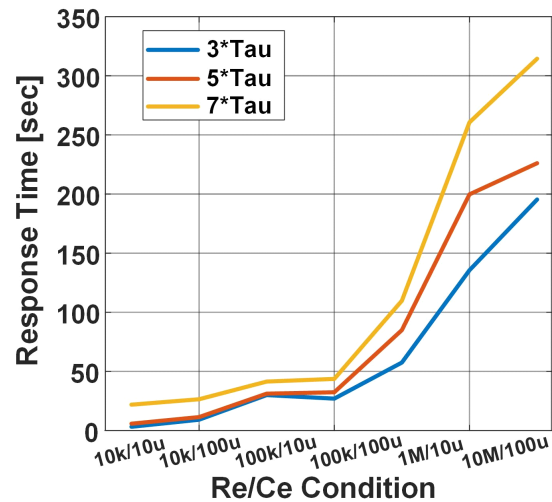


Fig. 4 Response time simulation result when applying 3 times, 5 times, and 7 times coefficients in the conventional insulation resistance calculation method

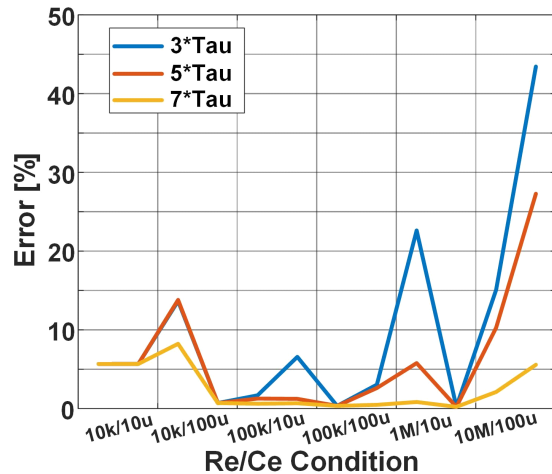


Fig. 5 Error simulation result when applying 3 times, 5 times, and 7 times coefficients in the conventional insulation resistance calculation method

III. 동적 시정수를 적용한 새로운 절연 저항 계산 알고리즘

2장에서 분석한 바와 같이 기존의 고정된 시정수 기반의 절연 저항 계산 방법으로는 모든 측정 범위에서 빠른 응답 시간과 높은 정확성을 동시에 얻기 힘든 문제가 있다. 지락사고 및 화재에 신속히 대응하면서 동시에 국제 규격인 15% 이내 오차율을 만족하려면 빠른 응답 시간을 위해 절연 저항이 작은 값에서 작은 곱 계수를, 높은 정확성을 갖기 위해 큰 절연 저항 값에서는 큰 곱 계수를 설정하도록 능동적으로 곱 계수를 변화시킬 수 있으면 기존의 문제점을 해결할 수 있다.[10]

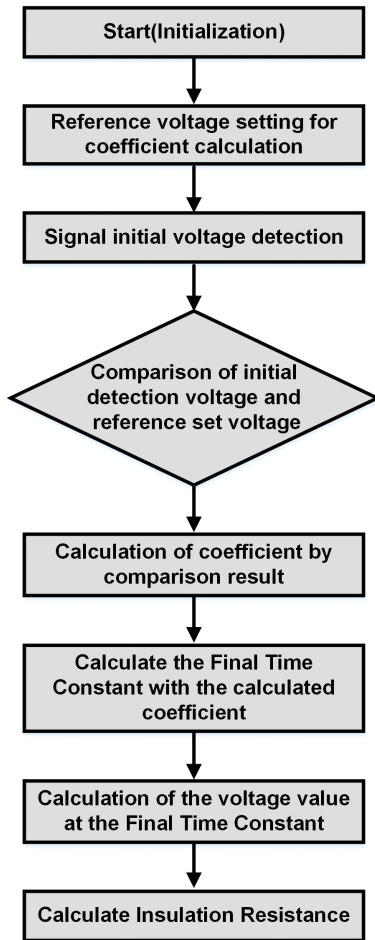


Fig. 6 Proposed dynamic time constant based insulation resistance calculation algorithm

신호 검출기에서 검출되는 신호의 초기 전압 크기는 절연 저항과 검출 저항 값에 비례하며, 정상 상태의 전압 크기는 반비례한다. 그 결과 절연 저항 값이 작은 경우 정상 상태까지 전압의 변화가 작아서 정상 상태에 이르는 시간이 짧고 반대의 경우 전압 변화가 크기 때문에 정상 상태에 이르는 시간이 길다. 이러한 특성을 이용하여 본 논문에서는 초기 전압 값이 작은 경우 즉 절연 저항 값이 작을 때는 작은 곱 계수를, 초기 전압 값이 큰 경우 즉 절연 저항 값이 클 때는 큰 곱 계수를 선정하여 정상 상태의 최종 시정수를 계산하는 새로운 동적 시정수 기반 절연 저항 계산 방법을 적용하였다.

그림 6은 본 논문에서 제안하는 동적 시정수 기반 절연 저항 계산 알고리즘을 보여준다. 초기화 단계를 통해 알고리즘을 초기화 한 후, 검출된 신호의 초기 전압 크기에 근거하여 최적의 시정수의 곱 계수를 산출한다. 초기 전압의 절대 값이 작은 경우 전압변화가 적어 정상 상태에 이르는 시간이 짧기 때문에 작은 곱 계수를 선정하고, 초기 전압의 절대 값이 큰 경우 전압변화가 크므로 큰 곱 계수를 선택한다.

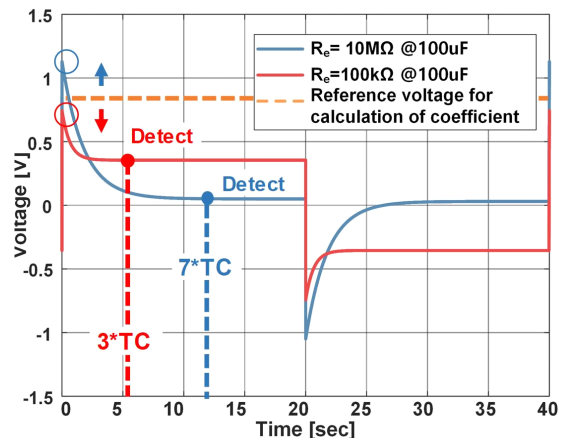


Fig. 7 Steady state determination when applying the proposed dynamic time constant based insulation resistance algorithm

그림 7은 제안하는 동적 시정수 기반 절연 저항 계산 알고리즘 적용 시 정상 상태를 판별하는 방법을 시뮬레이션 하여 도시한 그림이다. 그림 7은 절연 임피던스의 기생 커패시턴스가 100uF이고 절연 저항이 100kΩ, 10MΩ 두 경우에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7에서는 초기 전압의 기준 전압 값을 0.8V로 설정하고 초기

전압이 기준 전압 값 이하이면 곱 계수 3을 산출하고, 이
 상이면 곱 계수 7을 산출하여 각각 시정수의 3배, 7배되
 는 시점에서의 정상 상태 전압을 이용하여 절연 저항 계
 산을 한다. 따라서 상대적으로 정상 상태에 빠르게 도달
 하는 절연 저항 값이 작은 경우 작은 곱 계수 (3배)에 근
 거하여 산출된 정상 상태 초입에서 절연 저항 계산이 종
 료되므로 응답 시간을 단축할 수 있다. 반면에 상대적으
 로 정상 상태에 느리게 도달하는 절연 저항 값이 큰 경
 우 큰 곱 계수 (7배)에 근거하여 최종 시정수를 설정하
 고 정상 상태 근처에서 연산을 시작하므로 측정 절연 저
 항의 정확도를 높일 수 있다.

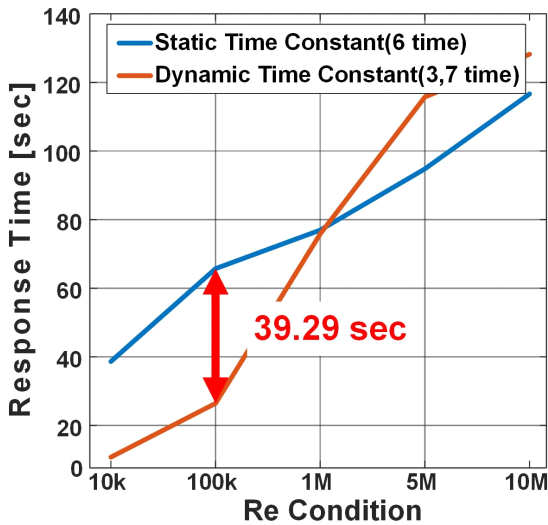


Fig. 8 Response time simulation result comparison of the conventional fixed time constant based(Blue line) and proposed dynamic time constant based(Red line) insulation resistance calculation algorithm

그림 8은 절연 임피던스의 기생 커패시턴스가 100uF 일 때 최소 10kΩ부터 최대 10MΩ 절연 저항 범위에서 기존의 고정된 시정수 기반 및 제안하는 동적 시정수 기반 절연 저항 계산 알고리즘 적용의 응답 시간을 시뮬레이션 한 그림이다. 기존의 방법은 최소 40초에서 최대 110초가 소요된 반면 제안하는 방법은 최소 10초에서 최대 130초가 소요되었다. 지락 및 화재가 발생하는 절연 저항 값이 작은 100kΩ 이하 영역에서 제안된 동적 시정수 기반의 측정 기법의 응답 시간이(10초~25초) 기존의 측정 방법(40초~65초)에 비해 빠르며 최대 39.29초 단축시킴을 확인하였다.

그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 기존의 고정된 시정수 기반 및 제안하는 동적 시정수 기반 절연 저항 계산 알고리즘의 오차율을 시뮬레이션 한 그림이다. 절연 저항 값이 1MΩ 이상의 큰 영역에서 기존의 방법은 계산 오차율이 3%에서 22%로 급격히 악화되지만, 제안된 방법의 경우 전 영역에서 5% 이내의 매우 낮은 오차율을 보이고 있고 최대 20.11%의 오차율 개선 효과를 확인하였다.

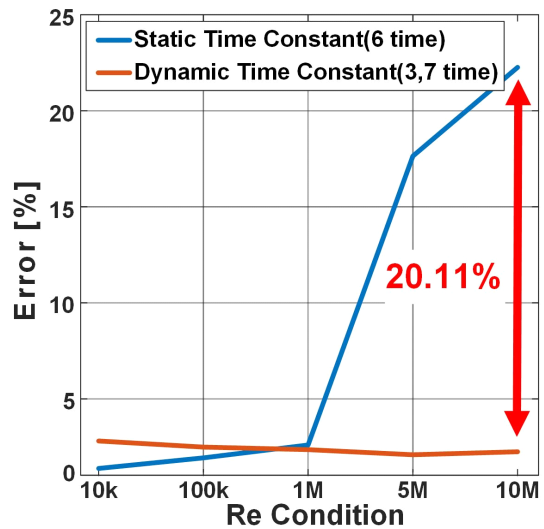


Fig. 9 Error simulation result comparison of the conventional fixed time constant based(Blue line) and proposed dynamic time constant based(Red line) insulation resistance calculation algorithm

그림 8에서 절연 저항 값이 1MΩ 이상 큰 경우 비록 기존의 방법에 비해 제안된 기법의 응답 시간이 약간 더 오래 소요되나 지락 또는 화재사고가 발생하지 않는 영역이므로 오차율의 개선 효과가 더 크다.

IV. 결 론

본 논문에서는 IT 접시시스템에서 절연파괴에 의한 지락 및 화재사고 방지를 위한 새로운 절연 저항 계산 기법을 제안하였다. 제안하는 절연 저항 계산 기법은 검출된 신호의 초기 전압 크기로부터 경우에 따라 상이한 최적의 곱 계수를 적용하고 이를 기반으로 절연 저항을 계산하는 시점을 산출함으로써 빠른 응답 시간을 보이

면서도 동시에 높은 정확도를 갖는다. 제안하는 동적 시정수 기반 절연 저항 계산 방법은 절연 임피던스가 작은 경우 작은 곱 계수를 적용하여 응답 시간을 단축시키고, 절연 임피던스가 큰 경우 큰 곱 계수를 적용하여 오차율을 향상시킬 수 있다. 시뮬레이션 결과 제안된 기법이 기존의 방법에 비해 지락 및 화재사고 감지를 위한 응답 시간은 최대 39.29초, 오차율은 20.11% 향상됨을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2020R1A6A1A12047945)

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2018R1D1A1B07042607)

REFERENCES

[1] K. Engelen, E. L. Shun, P. Vermeyen, I. Pardon, R. D’hulst, J. Driesen, and R. Belmans, “The feasibility of small-scale residential DC distribution systems,” *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*, pp. 2618-2623, Nov. 2006.

[2] IEC International Standard, IEC 60364-4-41, Ed.5, Low-voltage electrical Installations - Part 4-41: Protection for safety-Protection against electric shock, TC64/1489/ FDIS, 2005.

[3] H. I. Han, J. G. Yang, and Y. H. Kang, “Study on the Regulation of Earth Resistnace for Communications Facilities,” *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 724-730, Apr. 2006.

[4] D. Salomonsson, and A. Sannino, “Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads,” *Power Delivery, IEEE Transactions*, vol. 22. pp. 1620-1627, Jul. 2010.

[5] K. Hirose, T. Tanaka, T. Babasaki, S. Person, O. Foucault, B. J. Sonnenberg, and M. Szpek, “Grounding concept considerations and recommendations for 400V DC distribution system,” *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International*. pp. 1-8, Oct. 2011.

[6] J. H. Jeon, “Automatic abstraction and fault tolerance in cortical microarchitectures,” in *Proceeding of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 30(1)*, pp. 48-52, 2016.

[7] Korean Agency for Technology and Standards, “Technical Regulations for Electrical and Telecommunication Products and Components,” KC 60364-4-41, 2015.

[8] A. Verma, M. M. Tripathi, K. G. Upadhyay, H.-J. Kim, A Review Article on Green Energy Forecasting, *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, vol.6, no.11, pp. 637-647, Nov. 2016.

[9] S. H. Jang, P. J. Kim, and J. P. Hong, IMD(Insulation Monitoring Device) provides adaptive tuning based on time constant prediction and method for controlling thereof, KR Patent 10-2019-0178611, to LS Electric, 2019.

[10] Korean Agency for Technology and Standards, “Technical Regulations for Electrical and Telecommunication Products and Components,” KC 60364-4-41, 2015.



손기범(Gi-Beom Son)

2019년 충북대학교 전기공학부 학사 졸업.
2019년 3월~현재 충북대학교 전기공학부 석사 과정
※관심분야: 전력 계통의 절연 임피던스 계산 장치 및 시스템, 물리적 복제 불가능 정보 보안 인증 SoC



홍종필(Jong-Phil Hong)

2005년 한국항공대학교 항공전자공학과 학사 졸업
2007년 KAIST 정보통신공학과 석사 졸업
2010년 KAIST 정보통신공학과 박사 졸업
2010년 3월~2012년 8월 삼성전자 시스템 LSI 사업부 책임 연구원
2012년 9월~현재 충북대학교 전자정보대학 부교수
※관심분야: 서브테라헤르츠 집적회로, 하드웨어 기반 경량 보안인증 시스템, 경량 웨어러블 생체 신호 습득 시스템