

비접지 LVDC 배전망의 지락고장 검출을 위한 분석

Analysis for Pole to Ground Fault Detection in Ungrounded LVDC Distribution Network

박 철 원*
(Chul-Won Park)

Abstract - Recently, LVDC distribution network and DC microgrid with many advantages are being built. However, this LVDC distribution is an IT grounded or ungrounded system, and it is difficult to detect a ground fault because the fault current is small. In this paper, we propose a signal injection method for unipolar LVDC distribution network to detect ground fault in ungrounded LVDC distribution, and various analyzes were performed for ground fault detection.

Key Words : LVDC, IT ground system, Pole to ground fault, Signal injection method, Ungrounded system.

1. 서 론

최근, IDC와 같은 디지털 부하가 증가함에 따라 직류 전원의 수요 확대와 태양광 및 연료전지 등 신재생에너지원과 에너지저장장치 확대 보급이 예상되고 있다. 2006년도부터 핀란드 전력회사 Suur-Savon는 LUT와 공동으로 직류 배전(LVDC : Low Voltage Direct Current) 선로를 건설하였고, 2013년도부터 태국에서는 치앙마이 World Green City를 만들었고, 2016년 독일에서는 DC Factory of BENS 등으로 본격적인 직류배전 실증 사이트를 구축하고 있다[1, 2]. 이 저압직류 배전망 및 직류 마이크로그리드(DC Microgrid)는 전력손실을 저감할 수 있고 태양광 및 에너지저장장치 등을 전력계통에 연계할 때 용이하며 특히, 효율성, 경제성 등의 많은 장점을 갖고 있다. 이에 따라 교류 배전망과 다른 직류 배전망 및 직류 마이크로그리드의 표준화, 보호 방안 및 운용기술 개발이 한창 진행되고 있다. 한편, 한국전기협회의 2021년 1월부터 시행될 전기사업법 시행규칙 제2조에 따르면, 저압은 직류 1500V 이하, 교류 1000V이하로 개정될 예정이다[3-6].

한편에서는 관련 기업들과 함께 서가차도 DC Island 사업, 전력연구원 연구실 및 고창 실증단지 구축 등을 통해 양극형 750V 직류전압을 기반으로 저압 직류배전망 및 직류 마이크로그리드의 기술을 축적하며 구현하고 있다. 그런데 이 LVDC 배전망은 비접지(Ungrounded)인 IT(Isolated Terre) 접지 시스템으로서 지락고장발생시 고장전류의 경로가 없고, 정상상태 전류에 비하여 큰 차이가 나지 않기 때문에 지락고장을 검출하기 어렵다[7-11]. 심지어 국내의 DC Island 사업 및 고창의 LVDC 배전망 실증에서조차 ABB

및 Bender로부터 도입한 절연감시측정장치(IMD : Insulator Monitoring Device)가 적용되고 있다[12-15]. 국내에서는 직류철도와 AC 망에서 일부 관련 연구가 있었으나 저압직류 LVDC 배전망의 지락고장검출장치의 개발은 현재까지 거의 없다. 이에 따라 비접지 LVDC 배전망의 지락고장 검출장치 개발을 통해 해외에 의존된 기술 독립이 시급하다[16, 17]. 근래 비접지 LVDC 계통의 지락고장 검출을 위하여 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)과 신경회로망(Neural Network)을 적용한 기법들이 시도되고 있다[18-22].

본 논문에서는 비접지 단극형 저압직류 배전망을 대상으로 신호를 주입하는 방식을 통한 분석을 통해, 지락사고 검출의 가능성을 검토하고자 한다. 먼저, 이론적인 검토를 수행한 후, 간단한 저압 직류배전망과 제시한 신호 주입 기법(Signal Injection Method)를 PSCAD로 모델링하고 구현한 후, DWT(Discrete Wavelet Transform)를 통하여 다양한 분석을 수행하고자 한다.

2. 비접지 직류계통과 신호 주입 방식

2.1 비접지 직류 시스템

국제규격 IEC 60364-1(저압전기설비의 접지)에서는 접지계통을 전원의 접지방식(계통접지)과 수용가 전기기기의 외함 접지방식에 따라 TT(Terre Terre) 접지방식, TN(Terre Neural) 접지방식, IT 접지방식 등 3종류로 분류하고 있다[11].

그림 1은 IT 접지방식을 나타낸다. 그림 1과 같이, IT 접지방식은 가장 간단한 접지방식으로써 전원측에 접지를 하지 않고, 사용자 설비의 도전성 외함만 접지하는 방식이다. 이 방식은 대지의 접지저항이 크거나 지역적으로 접지하기가 어려운 장소에서 채택할 수 있는데, 현재 병원이나 원자력발전소, 또는 태양광 발전 등 연속적인 전력의 공급이 최우선인 분야에서 널리 사용되고 있다. 그 이유는 전원선 둘 중의 한 선이 접지되는 사고가 발생하여도 나머지 다른 선이 또 접지되기 전까지는 사고전류가 흐르지 않기 때문에

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Gangneung-Wonju National University, Korea

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2018년 7월 23일

수정일자 : 2018년 8월 6일

최종완료 : 2018년 8월 21일

전원의 공급이 연속적으로 가능하기 때문이다[1, 7, 11].

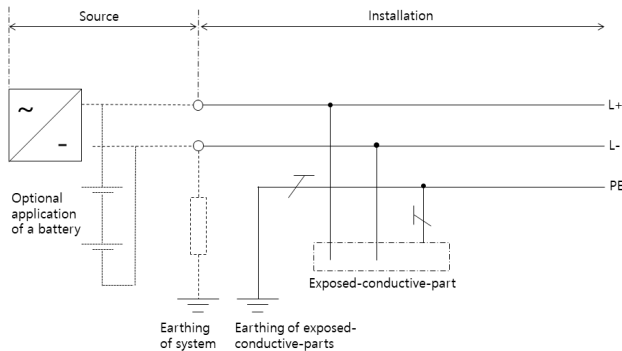


그림 1 IT 접지 방식
Fig. 1 IT ground system

2.2 신호 주입 방식

그림 2는 신호주입방식을 나타낸다. 그림 2와 같이, 진폭 -U_{max}와 +U_{max}를 갖는 직사각형 전압 펄스 파형을 극과 접지 사이에 인가한다. 이 신호 펄스의 지속시간과 크기는 LVDC 배전망에 무리가 되지 않는 범위 내에서 선정한다. 정상상태의 극과 접지사이의 전압은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[21].

$$\begin{aligned} U_{11} &= U_{1mean} - U_0, & U_{12} &= U_{1mean} + U_0 \\ U_{21} &= U_{2mean} + U_0, & U_{22} &= U_{2mean} - U_0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, U₁₁ 및 U₂₁은 각 주기의 전반부에서 접지를 향하는 각 극의 정상상태 전압이고, U₁₂ 및 U₂₂는 주기의 후반부에서의 정상상태 전압, U₀는 전압 변동의 크기를 나타낸다. 중첩 원리에 기초하여 모든 선로와 전체 네트워크의 주기적 누설 전류 변동을 결정할 수 있다.

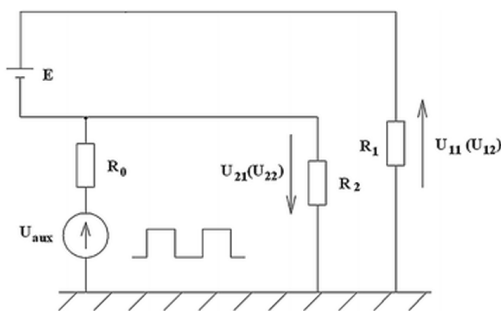


그림 2 신호 주입 방식
Fig. 2 Signal injection system

2.3 웨이블릿 변환

웨이블릿 분석을 사용하는 가장 큰 이점은 과도신호에 대한 국부화된 분석을 수행할 수 있다. 이에 따라 전력계통에서 발생하는 과도현상의 분석에 매우 적합하다. 이 웨이블릿 변환에는 근사계수(Approximation coefficient)와 상세계수

(Detail coefficient)가 있는데, 근사계수는 고차 스케일을 통해 얻어지고 신호의 저주파 성분을 나타내고 상세계수는 저차 스케일을 통해 얻어지고 고주파 성분을 나타낸다. 이산신호에 이산웨이브릿변환(DWT)을 적용하게 되는데, DWT는 다해상도 분석(MRA : Multi-Resolution Analysis)를 통해 고주파 통과필터(HPF)와 저주파 통과 필터(LPF)의 बैं크로 구현할 수 있다. 그림 3은 다중 레벨 웨이블릿 필터 बैं크를 나타낸다. 그림 3에서 원 신호는 f[n], h₁[n]은 HPF, h₀[n]은 LPF, d₁은 레벨 1에서의 상세계수, a₁은 레벨 1에서의 근사계수를 각각 나타낸다[20-22].

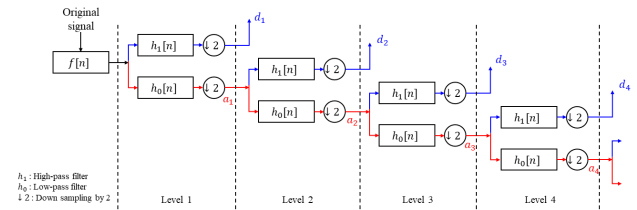


그림 3 다중 레벨 웨이블릿 필터 बैं크
Fig. 3 Multi-level wavelet filter bank

3. 신호 주입 방식에 따른 지락고장 분석

3.1 PSCAD에 의한 신호주입방식

그림 4는 비접지 단극형 LVDC 배전망에서의 신호주입방식의 개략도를 나타내고, 그림 5는 주입된 펄스 신호를 나타낸다. 본 연구에서는 PSCAD를 이용하여 신호주입방식을 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4의 신호주입발생기(Signal Injection Generator)는 10[Hz]인 tvar 신호와 1[Hz] tcons 신호를 합성한 최종 펄스 신호 sum을 이 비접지 단극형 LVDC 배전망에 주입하게 된다. 즉, 그림 5와 같이, 비접지 LVDC 배전망에 두 펄스 파형의 합성 펄스가 주입되는데, 이를 통하여 주입되는 극-접지 전압의 진동을 일으키며, 측정되는 전압과 전류를 통하여 지락고장 검출을 위한 분석을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 합성 펄스의 크기는 50[V], 주파수는 10[Hz](주기는 0.1[s]) 로 설정하였다 [13-15, 20-22].

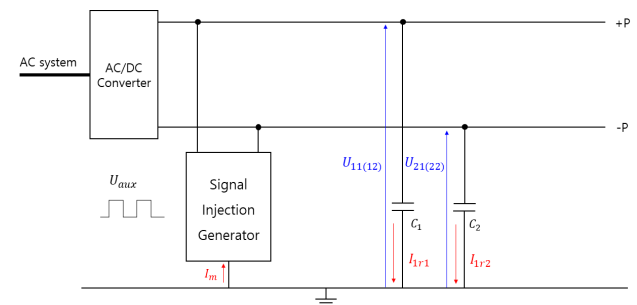


그림 4 비접지 단극형 LVDC 배전망에서의 신호 주입 방식
Fig. 4 Signal injection method in ungrounded unipolar LVDC distribution network

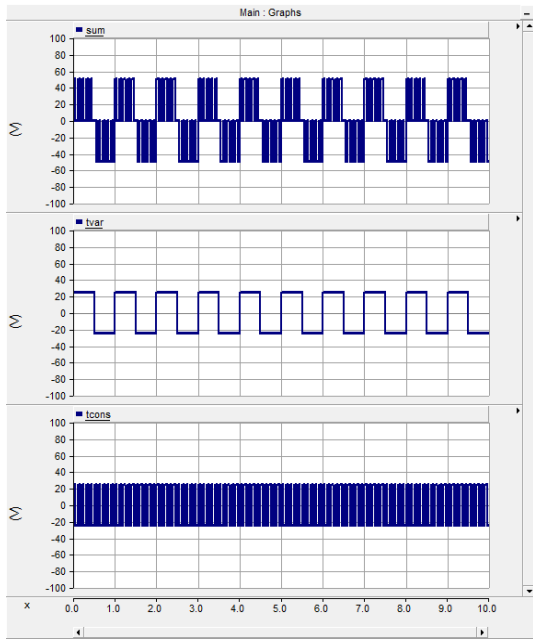


그림 5 주입된 펄스 신호
Fig. 5 Injected pulse signal

그림 6은 지락고장(pole to ground fault)이 2.5[s]에 발생하였을 경우, 측정된 극-접지 전압(U_m)과 극-접지전류(I_m)를 나타낸다. 그림 6과 같이, 정상상태일 경우, 전압은 330~430[V]를 나타내며, 전류는 -0.1~0.1[mA]가 나타내고 있다. 지락고장이 발생한 경우, 전압은 약 5[V]로 감소하며, 전류는 0.61~0.81[mA]로 증가하는 데, 지락고장 시에도 전류 변화가 미미하여 지락고장을 확실하게 검출하기 어렵다.

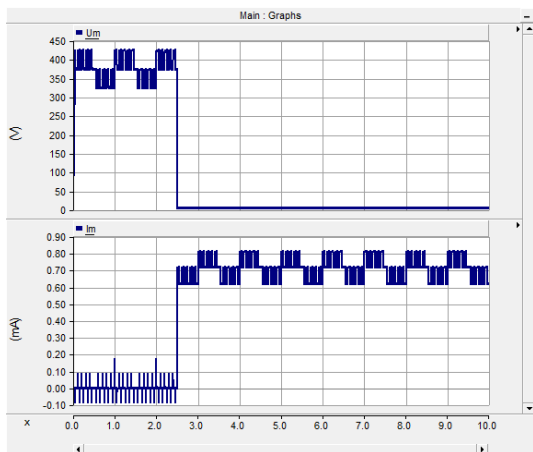


그림 6 측정된 극-접지 전압과 극-접지 전류
Fig. 6 Measured pole to ground voltage and pole to ground current

3.2 MRA를 통한 DWT의 상세 계수 분석

신호주입방식을 거치지 않은 전류 및 전압 신호는 DWT에 의한 해석을 통하여도 고장 발생을 알 수 없었다. 그런데 본 연구에서는 신호주입된 전류신호를 기술적인 연산 언어

인 MATLAB를 활용하여 MRA를 통한 DWT의 상세 계수를 분석하였다. 모 함수는 Daubechies(db)를 사용하였고, 차수는 1~8까지 가변하였고, 레벨은 1~8까지 가변하면서 측정전류의 신호를 다양하게 분석하였다. 시물레이션에서 선택한 신호의 주기당 샘플링은 128[s/c]로 샘플링 주파수는 7,680[Hz]가 된다.

그림 7은 db1에 의해 전체분해 된 측정 전류(I_m)를 나타낸다. 여기서, x축은 2[s]부터 3[s]까지 1[s] 동안의 데이터 개수 15,360를 의미한다. 그림 7과 같이, 레벨 1에서 db1의 분해 결과, 원 신호 측정 전류 $S(I_m) = a_1 + d_1$ 이 되고, a_1 은 LPF를 통과한 근사 계수이며, d_1 은 HPF를 통과한 상세 계수를 나타낸다. MRA를 반복하다가 레벨 8에서 db1의 분해 결과, 원 신호 측정 전류 $S(I_m) = a_8 + d_8 + d_7 + d_6 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1$ 이 되는데, a_8 은 LPF를 통과한 근사 계수이며, $d_1 \sim d_8$ 은 HPF를 통과한 상세 계수들을 나타낸다. 그림 7에서와 같이, DWT 변환 결과 신호는 고장 전과 후가 명확히 다르게 나타났는데, 고장 전에는 각 펄스 파형과 같은 주기로 신호의 크기가 변하지만, 고장 후에는 아무런 변화가 없는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 극-접지사이에 신호를 주입한 후, db6에 의해 전체분해 된 측정 전류를 나타낸다. 그림 8에서와 같이, 주입된 펄스 신호의 영향에 따라 고장 발생점에서 크기의 변화가 크게 나타났다. $d_1 \sim d_4$ 의 경우 고장 전과 후에는 각 펄스 파형과 같은 주기로 신호의 크기가 미세하게 변동되었다. $d_5 \sim d_8$ 의 경우 고장 전과 후의 신호가 확실하게 구별되었고, 고장 전에는 미세하게 변동하며 고장 후에는 크게 변동이 나타났으며, 고장 발생점에서 크기는 약 0.8[mA]를 보였다. Daubechies의 차수와 레벨을 가변하면서 시물레이션을 수행한 결과 측정전류의 db6의 d5값의 크기가 지락고장을 검출하는데 적절하다는 것을 알 수 있다.

부하변동과 고장저항 변동에서의 제시한 분석에 따른 지락고장 검출 가능성을 알아보기 위하여, 부하가변과 1[kΩ] ~ 500[kΩ]까지 고장저항값을 가변하면서 시험을 수행하였다. 그림 9는 고장저항이 1[kΩ]인 경우 제시한 신호주입방식을 통한 측정전류의 db6의 d5값을 나타낸다. 그림 9와 같이, 고장발생직후 신호의 최대 크기는 0.2[mA]가 나타났으며, 펄스 파형과 같은 주기로 신호의 크기가 미세하게 변동되었다.

그림 10은 고장저항이 500[kΩ]인 경우 제시한 신호주입방식을 통한 측정전류의 db6의 d5값을 나타낸다. 그림 10과 같이, 고장발생직후 신호의 최대 크기는 0.089[mA]가 나타났으며, 펄스 파형과 같은 주기로 신호의 크기가 미세하게 변동되었다.

그림 11은 2.5[s]에서 부하변동이 발생하였을 경우, 제시한 신호주입방식을 통한 측정전류의 db6의 d5값을 나타낸다. 그림 11과 같이, 부하변동직후 신호의 최대 크기는 0.01[mA]가 나타났으며, 펄스 파형과 같은 주기로 신호의 크기가 미세하게 변동된다. 부하변동이 일어난 지점에서는 신호의 변화가 없었다.

표 1은 제시한 신호주입방식을 통한 측정전류의 db6의 d5값의 분석을 나타낸다. 표 1과 같이, 부하변동과 고장저항을 1[kΩ]에서 500[kΩ]까지 가변하면서 분석한 db6의 d5값을 통해, 고장발생 시 신호값과 고장 후 미세변동되는 신호값의



그림 7 db1에 의해 분해된 측정 전류
 Fig. 7 Measured current decomposed by db1

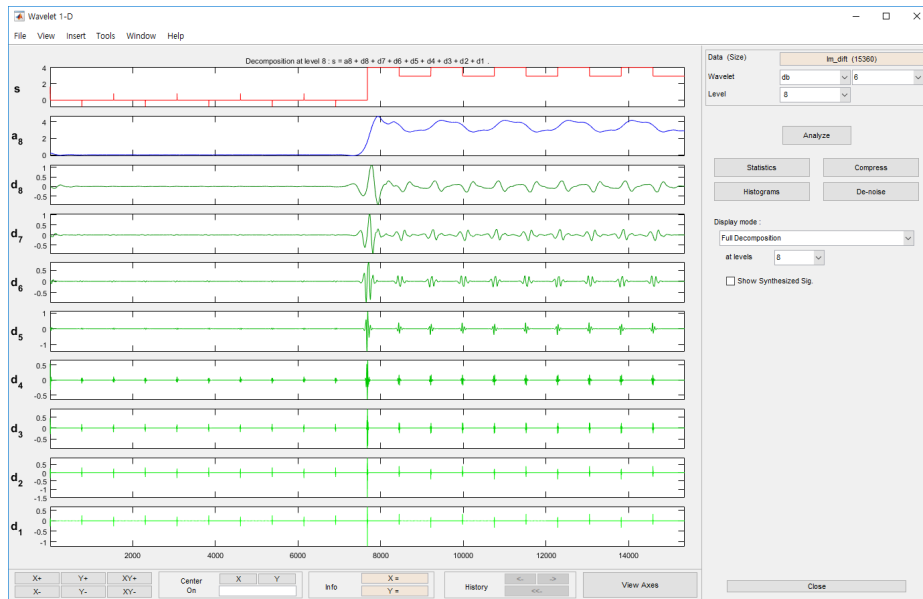


그림 8 db6에 의해 분해된 측정 전류
 Fig. 8 Measured current decomposed by db6

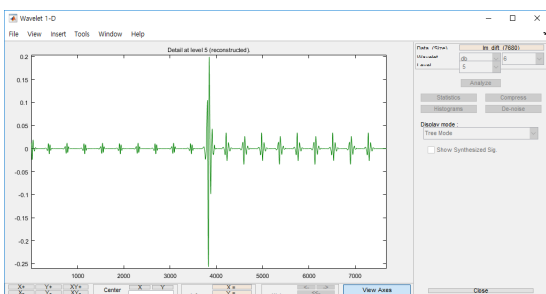


그림 9 db6의 d5 값 (고장저항 : 1[kΩ])
 Fig. 9 d5 value of db6 (fault resistance : 1[kΩ])

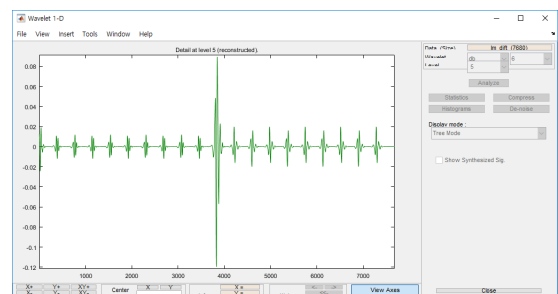


그림 10 db6의 d5 값 (고장저항 : 500[kΩ])
 Fig. 10 d5 value of db6 (fault resistance : 500[kΩ])

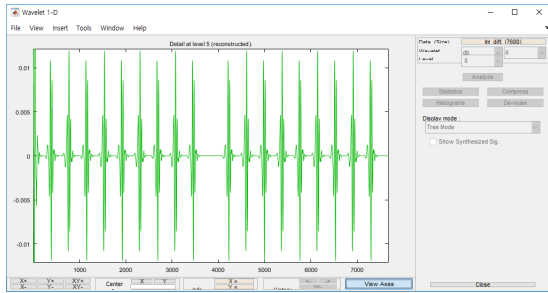


그림 11 db6의 d5 값 (부하변동)

Fig. 11 d5 value of db6 (load variation)

표 1 db6의 d5 값의 분석

Table 1 Analysis of d5 value of db6

System state	Signal value on ground fault inception [mA]	Signal value of fine fluctuation [mA]
Ground fault resistance : 1kΩ	0.2	0.035
Ground fault resistance : 10kΩ	0.196	0.032
Ground fault resistance : 50kΩ	0.177	0.03
Ground fault resistance : 100kΩ	0.165	0.028
Ground fault resistance : 250kΩ	0.122	0.023
Ground fault resistance : 500kΩ	0.089	0.019
Load variation	0	0.011

최대값을 통해, 고장저항의 최대값과 미세변동의 한계값을 알 수 있었다. 그러므로 지락고장을 판단을 할 수 있는 고장저항의 최대 임계치는, 상기 분석을 통해 1[kΩ]부터 최대 500[kΩ]까지 지락고장을 검출할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한, 정상상태에서 오동작을 방지하기 위해서는 측정된 전류의 db6의 d5 신호값을 0.05[mA]정도로 설정하면 좋을 것으로 분석되었다.

4. 결 론

비접지 LVDC 배전 계통에서의 지락사고는 고장전류의 변화가 거의 미미하고 고장전류의 경로가 없어서 검출하기 어려웠다.

본 논문에서는 비접지 저압직류 배전망을 대상으로 신호를 주입하는 전처리를 거친 후, DWT의 db6의 detail 5 분석을 통하여 지락사고 검출의 가능성을 제시하였다. DWT의 모함수 Daubechies를 사용한 지락고장의 검출 가능성을 확인하기 위하여, 부하변동과 1[kΩ]에서 500[kΩ]까지 지락고장저항을 가변하면서 시뮬레이션을 수행하였다. 다양한 분석한 결과, 제시한 방식에 의하여 지락사고 검출의 가능성에 충분한 의미가 있음을 알 수 있었다.

현재 본 아이디어에 의한 비접지 LVDC 배전망에서의 지

락고장 검출 알고리즘을 구현하고 있다.

References

- [1] C. W. Park, K. M. Lee, et al, "Ground Fault Analysis of Ungrounded DC Microgrid," *KIEE Summer conference*, pp. 482-483, 2018. 7.
- [2] J. T. Cho, "Development and implementation of DC distribution," *KIIEE Spring conference*, LVDC workshop, pp. 133-148, 2018. 5.
- [3] T. P. An et al., "Development of high-speed circuit breakers for low-voltage DC distribution system," *KEPRI Service proposal*, pp. 1-160, 2016. 6.
- [4] KapJin, "DC Distribution Technology Overview and Development Examples," pp. 1-59, 2016. 6.
- [5] Y. S. Ko, "Examples of power conversion system design and technology development suitable for DC distribution," *KapJin*, pp. 1-48, 2016. 6.
- [6] S. S. Shin, "Establishment and revision of LVDC distribution facility standards," *KIIEE Spring conference*, LVDC workshop, pp. 167-176, 2018. 5.
- [7] S. Y. Chang, "LVDC distribution technology trend," *KIIEE Spring conference*, LVDC workshop, pp. 151-164, 2018. 5.
- [8] Hyosung, "Construction of DC Grid System with Distributed Energy Resources in an island," *Service plan*, pp. 1-90, 2016. 4.
- [9] S. J. Park, S. M. Park, J. H. Lee, "DC power distribution and DC breaker technology trend," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol, 67, no. 7, pp. 27-33, 2015. 11.
- [10] H. S. Kim, S. Y. Han, H. S. Han, "Development of DC Leakage Current Sensor for Solar Power Generation System," *Trans. KIEE*, vol. 63, no. 6, pp. 828-833, Jun., 2014.
- [11] IEC 60364-1ed5.0, "Low voltage electrical installations," 2005.
- [12] Hongjoo Kim, Youngpyo Cho, Jaehan Kim, Jintae Cho, Juyong Kim, "Demonstration of the LVDC distribution system in an island," *24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, IET Journals, pp. 2215-2218, June 2017.
- [13] Bender, "ISOMETER iso1685," *Manual*, pp. 1-39, 2016. 12.
- [14] Oliver Schaefer, Karl Schepp, "Method and Device for Monitoring the insulation of ungrounded DC and AC voltage networks," *Bender, United States Patent, US9,069,025 B2*, pp. 1-19, 2015. 6.
- [15] ABB, "Insulation monitoring relays CM-IWN.4/5/6," *Data sheet*, pp. 1-20.
- [16] W. S. Lee, "Selective Ground Fault Protection Algorithm For DC Traction Systems," *Myongji University, Master's thesis*, pp. 1-27, 2012. 2.

- [17] S. H. Kim, "A Study of Leakage Detection Technology for available DC Distribution," Seoul National University of Science and Technology, *Master's thesis*, pp. 1-48, 2017. 8.
- [18] Jae-Do Park, "Ground Fault Detection and Location for Ungrounded DC Traction Power Systems," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 64, no. 12, pp. 5667-5676, 2015. 12.
- [19] Guan Shaopeng, Nai Changxin, Sun Wenyan, Dong Lu, "Direct Current Circuit model for landfill leakage detection," *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI 2009)*, pp. 2-693~2-696.
- [20] Ruijing Yang, "The Study of Locating Ground Faults in DC Microgrid Using Wavelet Transform," *University of Wisconsin-Milwaukee Master thesis*, pp. 1-75, August 2016.
- [21] Piotr Olszowiec, "Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems," *Second Edition, Springer*, pp. 1-180, 2014.
- [22] Indra Man Karmacharya, Ramakrishna Gokaraju, "Fault Location in Ungrounded Photovoltaic System Using Wavelets and ANN," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 549-559, 2018. 4.

저 자 소 개



박 철 원 (Chul-Won Park)

He was born in Korea in 1961. He received his B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, Korea, in 1988, 1990, and 1996, respectively. From 1989 to 1993 he was an associate researcher at Lucky GoldStar Industrial Systems. From 1993 to 1996, he was a senior researcher at PROCOM system and lecturer at S.K.K. University. At present, he is a professor in the Department of Electrical Engineering at Gangneung-Wonju National University, since 1997. His research interests include power IT, IED, LVDC, HVDC, Microgrid, RES, PMU, power system modeling & control, and computer application in power system. He is a member of the KIEE, and IEEE. He is president of PSPES since 2018. Dr. Park was awarded the Paper Prize of KIEE in 2010 and the Paper Prize of the KOFST in 2017.

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr