

직류 비접지계통에서 절연저항측정장치(IMD)를 이용한 사고검출 알고리즘

김기영, 이후동, 태동현, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

Algorithm of Detecting Ground Fault by Using Insulation Monitoring Device(IMD) in Ungrounded DC System

Ki-Young Kim, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근 신재생에너지 및 분산전원의 급속한 보급과 직류부하의 증가로 인하여 직류급전에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 대한 보호협조방식에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 직류급전방식을 사용하는 기존의 직류 부하망과 도시철도 등은 비접지방식인 IT 접지 시스템으로서 지락고장발생 시 고장전류의 경로가 없고, 정상상태 전류에 비하여 큰 차이가 발생하지 않기 때문에 지락고장검출이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 절연저항측정장치(IMD : Insulation Monitoring Device)를 직류 비접지계통의 보호기기로 활용하기 위하여, IMD의 검출원리를 정식화한다. 이를 바탕으로 IMD의 신호주입방식에 의한 출력 값을 웨이블릿변환기법으로 분석하여, 사고검출을 신속하고, 정확하게 판단할 수 있는 검출알고리즘을 제안한다. 또한, 상용전력 계통해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 직류 비접지계통과 IMD를 모델링하고, MATLAB을 이용한 웨이블릿변환 수치해석모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 직류 비접지 계통의 지락사고를 해석한 결과, 본 논문에서 제안한 IMD의 사고검출 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

Abstract Recently, the protection coordination method of DC systems has been presented because renewable energy and distributed resources are being installed and operated in distribution systems. On the other hand, it is difficult to detect ground faults because there is no significant difference compared to a steady-state current in ungrounded IT systems, such as DC load networks and urban railways. Therefore, this paper formulates the detection principle of IMD (Insulation Monitoring Device) to use it as a protection coordination device in a DC system. Based on the signal injection method of IMD, which is analyzed by a wavelet transform, this paper presents an algorithm of detecting ground faults in a DC system in a fast and accurate manner. In addition, this paper modeled an IMD and an ungrounded DC system using the PSCAD/EMTDC S/W and performed numerical analysis of a wavelet transform with the Matlab S/W. The simulation results of a ground fault case in an ungrounded DC system showed that the proposed algorithm and modeling are useful and practical tools for detecting a ground fault in a DC system.

Keywords : Detection Algorithm, Insulation Monitoring Device(IMD), MATLAB, Protection Device, PSCAD/EMTDC, Ungrounded DC System

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20206910100090)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received June 26, 2020

Accepted September 4, 2020

Revised July 21, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

최근 신재생에너지 및 분산전원의 급속한 보급과 직류 부하의 증가로 인하여 직류급전에 대한 관심이 높아지고 있으며, 기존의 교류계통을 직류계통으로 변환하기 위한 연구 및 실증이 활발히 이루어지고 있다[1-5]. 이미 국내에서는 서거차도 등과 같은 도서지역에 마이크로그리드 구축 사업을 통하여, 저압직류계통(LVDC)을 실증한 사례가 있으며, 경전철과 같은 도시전철에서도 직류급전계통을 운영하고 있다. 한편 다수의 직류급전계통에서는 사고전류가 적고, 한 상만 지락 시 지속적인 전원공급이 가능한 장점으로 인하여, 비접지방식인 IT 접지방식을 적용하고 있다. 그러나 이러한 비접지 직류계통은 지락고장 발생 시 고장전류의 경로가 없고, 정상상태 전류에 비하여 큰 차이가 발생하지 않기 때문에 지락고장검출이 어려운 실정이다[6-9]. 따라서 본 논문에서는 직류 비접지계통의 지락사고 보호기기로서 절연저항측정장치(IMD : Insulation Monitoring Device)를 적용하기 위하여, IMD의 사고검출원리 및 기존계통에서 적용사례를 분석한다. 또한, IMD의 신호주입방식에 의한 출력 값을 웨이블릿변환기법으로 분석하여, 사고검출을 신속하고, 정확하게 판단할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 한편, 상용 계통해석 프로그램인 PSCAD /EMTDC를 이용하여, 직류 비접지계통과 IMD를 모델링하고, MATLAB을 이용한 웨이블릿변환 수치해석모델링을 수행한다. 이를 통해 직류 비접지계통 지락사고를 시뮬레이션하고, 그 결과를 수치 해석하여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 유효함을 확인한다. 또한, 신호주입방식의 IMD의 모델링 및 시뮬레이션 분석을 통하여, IMD보호기기의 특성을 분석하고 직류 비접지계통의 적절한 보호협조방안을 제안한다.

2. IMD의 보호방식 및 사고검출 특성 분석

2.1 IMD의 보호방식

현재, IMD방식의 보호기기는 발전소 및 제철소의 주요 직류제어전원회로 및 저압직류배전계통 등에 널리 적용되고 있다. 일반적으로 비접지 직류계통의 절연저항을 측정하여, 지락사고를 감시하는 IMD방식의 보호기기는 Fig. 1과 같이 전력선과 대지 사이에 펄스전원(직류전압)을 인가하여, 절연저항을 감시하는 방식이다.

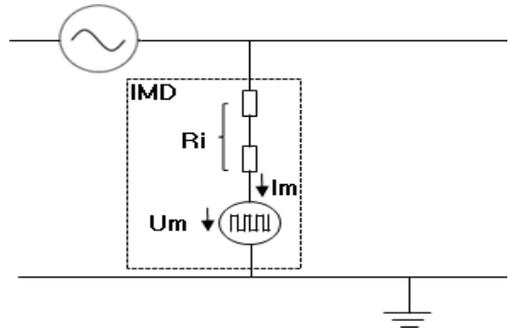


Fig. 1. Protection method of IMD

또한, 계통에 주입하는 펄스신호는 스위칭소자 혹은 신호발생기를 이용하여 직류전압을 인가하며, 각 스위칭 모드에 따른 전류를 측정하여, 식 (1)과 같이 절연저항(RF)을 계산할 수 있다.

$$I_m = \frac{U_m}{R_i + R_m + R_F} \quad (1)$$

여기서, I_m 은 DC 측정전류, U_m 은 DC 측정전압, R_i 는 IMD 내부저항, R_m 은 IMD 측정저항, R_F 는 계통의 총 절연저항

한편, 직류전압을 인가한 절연체에는 순간적인 충전전류가 흐르게 되고, Fig. 2와 같이 이 값은 차츰 감소하여 일정한 누설전류 값으로 수렴한다. 여기서, 직류전압을 인가한 순간에 흐르는 충전전류를 순간 충전전류라 하며, 이 전류가 일정한 누설전류로 수렴할 때까지 흐르는 과도전류를 흡수전류라 한다. 따라서 정확한 절연저항을 측정하기 위해서는 누설전류를 순간 충전전류의 안정구간에서 측정하는 것이 중요하며, 안정구간까지의 방전시간을 고려하면 Fig. 2와 같이 일정 계측시간 t_g 가 소요된다.

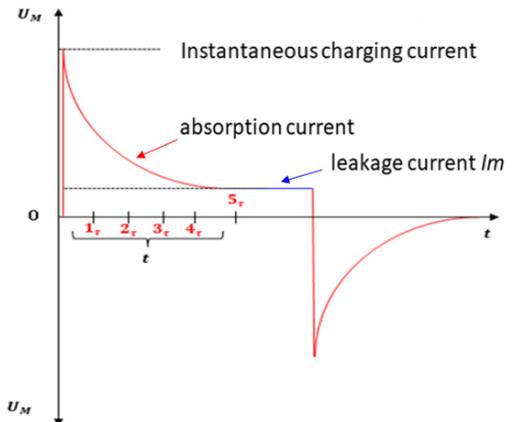


Fig. 2. Measurement time interval of IMD

상기 그림에서 U_M 을 계측전압으로 가정할 경우, 계측전압은 각 펄스 동안에 계통 누설캐패시턴스로 충·방전되며, 그 충·방전 시간 t 는 그림과 같이 5τ 이다. 여기서 τ 는 식 (2), 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 t 에 관한 식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$t = 5\tau \tag{2}$$

$$\tau = \frac{R_i \times R_E}{R_i + R_E} \times C_E \tag{3}$$

$$t = 5 \times \frac{R_i \times R_E}{R_i + R_E} \times C_E \tag{4}$$

상기의 식 (4)에 Table 1의 일반적인 계통변수를 적용하여 계산하면, 식 (5)와 같이 약 3.5[s] 정도의 시간이 소요됨을 확인할 수 있다. 즉, IMD방식의 보호기기는 지락사고를 검출하기 위하여, 최소한 4[s] 정도 소요됨을 알 수 있다.

Table 1. Application values of IMD

변수	적용 값
R_i	120[kΩ]
R_E	200[kΩ]
C_e	10[μF]

$$t = 5 \times \frac{120k \times 200k}{120k + 200k} \times 10 = 3.75 [s] \tag{5}$$

2.2 IMD의 신호주입방식을 이용한 지락사고 검출특성

IEC61557은 IT시스템 환경에서 IMD를 설치하여 지락 사고를 조기에 발견하도록 규정하고 있으며, 의뢰기기에서부터 ESS에 이르기까지 다양하게 활용되고 있다. 그러나 식 (5)에서 제시한 바와 같이, IMD는 사고검출까지 일정한 시간이 소요되어, 타보호기기와의 적절한 보호협조시간을 확보하기 어려운 단점이 있다. 또한, 기존의 보호기기와 같이 명확한 정정기준이 존재하지 않고, 점검기준만 제시하고 있어, 현재 시중에 출시된 IMD를 비접지 직류계통의 보호기기로 적용하기에는 어려움이 있는 실정이다. 기존에는 직류 비접지계통과 같은 고저항 전력계통의 사고검출을 위하여, 신경회로망, 웨이블릿변환기법 등을 적용하는 방안이 연구되고 있으며, 특히 이산웨이블릿 변환기법(DWT, Discrete Wavelet Transform)기법

은 시간영역과 주파수 영역 모두에서 비정상 신호를 해석하는 수학적도구로 널리 이용되고 있다[10-11]. 즉, 시간적으로 무한한 사인곡선을 기본함수로 사용하는 푸리에변환과 달리, DWT기법은 시간적으로 한정되어있는 함수를 기본함수로 사용하며, Fig. 3과 같이 여러 모함수의 종류가 있어 응용분야에 따라 적절하게 선택해서 사용할 수 있다. 일반적으로 전력계통 고장해석에 사용하는 모함수 웨이블릿은 Daubechies, Coiflets, Haar 등이 있으며, 비접지직류계통의 사고특성을 정확하게 판단하기 위하여, 이와 유사한 특성의 고저항 지락고장검출에 적합한 모함수 웨이블릿을 선정해야 한다. 한편, 본 논문에서는 IMD의 신호주입방식을 통한 누설전류를 DWT으로 분석하여, 계통의 정상상태와 사고상태를 신속하고 정확하게 판단할 수 있는 지락사고 검출방안을 제안 한다.

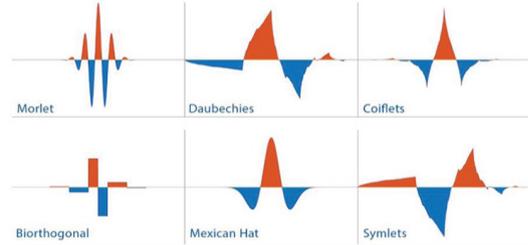


Fig. 3. Various general function of wavelet form

3. 직류 비접지계통에서의 IMD 사고검출 알고리즘

앞에서 분석한 바와 같이, 직류 비접지계통에서 지락이 발생되면, 고장전류의 경로가 없고, 정상상태 전류에 비하여 큰 차이가 발생하지 않기 때문에 지락고장 검출이 어렵게 된다. 이에 대한 방안으로, 본 논문에서는 국부적인 영역의 과도신호 분석에 유용한 웨이블릿 변환을 이용하여, 사고를 검출하는 알고리즘을 제안한다. IMD 사고검출 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[STEP 1] 사고검출에 사용할 모함수 파형(Daubechies, Haar, Bior, Sym 등) 및 모함수 파형의 차수(m)를 상정한다.

[STEP 2] 이산웨이블릿 변환(DWT) 시 적용되는 다해상도 분석(MRA : Multi- Resolution Analysis) 레벨(n)을 결정한다. 여기서 레

벨(n)은 원 신호를 얼마나 심층적으로 분석할 것인지 대한 정도를 나타낸다.

[STEP 3] 각 시간대에서 펄스 신호를 주입하고, 접지측 누설전류(Is)를 측정한다.

[STEP 4] 측정된 누설전류에 대해, Fig. 4와 같이 m 차수의 모함수 파형을 이용하여, n레벨까지 DWT 분석을 수행한다.

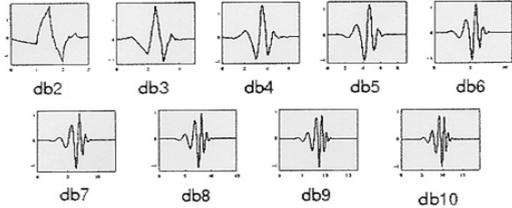


Fig. 4. Types of m order waveforms in daubechies's general function

여기서, Fig. 5와 같이 원 신호(S)에 대한 MRA를 통해, 고주파 필터(HPF)를 통과한 값은 상세계수(d)로 표현되며, 저주파 필터(LPF)를 통과한 값은 식 (6)과 같이 근사계수(a)를 포함한 값으로 나타낸다.

$$S(Is) = a_n + d_n + d_{n-1} \dots + d_1 \quad (6)$$

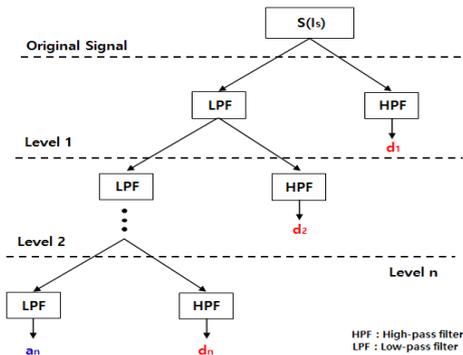


Fig. 5. Multi(n) level of wavelet filter

[STEP 5] STEP4에서 구한 DWT 상세값(d)이 특정 값(threshold) 이하이면, 지락고장이 발생하지 않은 것으로 판단하고, [STEP 3]으로 진행한다. 여기서, 특정값은 부하크기에 의한 오동작을 방지하기 위하여, 부하변동의 최대크기에 일정 여유율을 곱한 값으로 상정한다.

[STEP 6] DWT 상세값(d)이 특정값을 초과하면, 지락고장이 발생한 것으로 판단하여, 지락검출 신호를 출력하고 알고리즘을 종료한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 6과 같다.

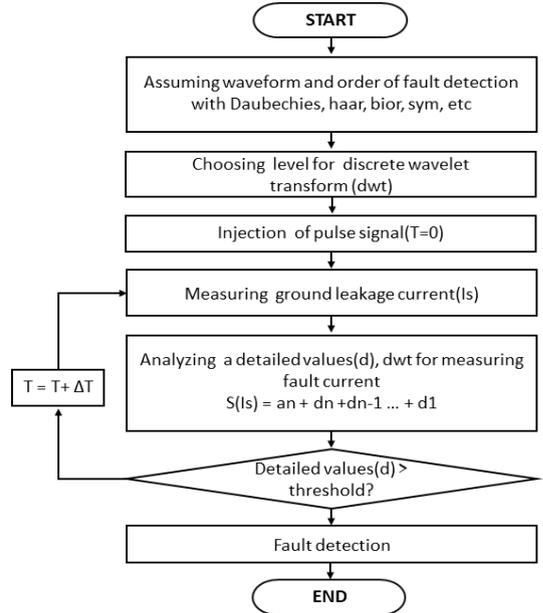


Fig. 6. Fault detection algorithm of IMD

4. 직류 비접지계통 사고특성 모델링

4.1 PSCAD/EMTDC를 이용한 직류 비접지계통 모델링

직류 비접지계통에 있어서, 지락사고 검출특성을 모의하기 위하여, 전체계통과 IMD 보호기기를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링을 수행하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 직류 비접지계통부는 A부분과 같이 AC전원부와 직류전원 공급을 위한 DC전원부, DC선로부로 구성되고, IMD보호기기는 B부분과 같이 지락사고발생기와 IMD로 구성된다. 여기서, AC전원부는 단상 220[V]의 전압원, DC전원부는 200[Vdc]의 전압원으로 모델링하며, 사고를 모의하기 위한 DC선로부는 증성선을 사용하여, Bi-pole 비접지방식으로 모델링한다. 한편, 지락사고발생기는 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 사고발생 컴포넌트를 사용하며, 계통의 특성에 따라 고장저항을 다양하게 가변시킬 수 있다.

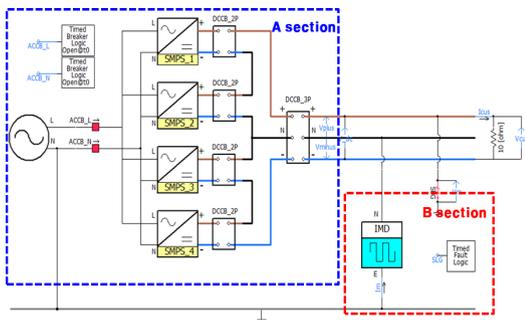


Fig. 7. Modeling of IMD for ungrounded DC system

한편, IMD의 펄스신호를 주입하는 신호발생기의 모델링을 수행하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 펄스신호의 크기는 50[V]이며, 입력주파수는 10[Hz] 신호와 1[Hz] 신호를 합성하여 직류 비접지계통에 주입된다.

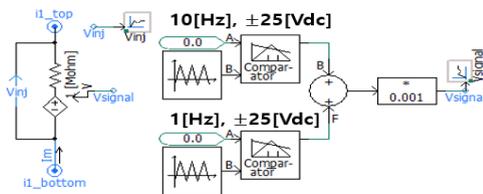


Fig. 8. Modeling of signal generator in IMD

4.2 MATLAB을 이용한 수치해석 모델링

상기의 직류 비접지계통과 IMD보호기기의 모델링을 바탕으로 출력된 전류 값의 정상상태와 사고상태를 판단하기 위하여, 본 논문에서는 이산웨이블릿변환(DWT)의 수치해석기법을 적용한다. 수치해석을 위한 모델링은 수치해석 S/W인 MATLAB을 이용하여 DWT수치해석 모델링을 수행하였으며, 상기의 DWT수치해석기법을 바탕으로, 모함수(S)를 n차 레벨로 분석하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 모함수(S)에 대한 다해상도분석(MRA)을 통해, 고주파 필터(HPF)를 통과한 값은 상세값(d)으로 정의되며, 저주파 필터(LPF)값을 통과한 값은 근사값(a)으로 정의된다.

또한, 비접지계통의 지락사고와 유사한 고저항계통을 모델링하기 위하여, 실제계의 아크 전압-전류파형의 특성을 반영하고, 이를 가장 잘 나타내는 도비시(Daubechies) 웨이블릿을 마더웨이블릿으로 적용한다. 따라서 MATLAB을 이용하여 도비시 웨이블릿을 모델링하면 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있으며, PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션파형을 MATLAB 모델링에 입력하면 직류 비접지계통의 사고특성 및 특이점을 분석할 수 있다.

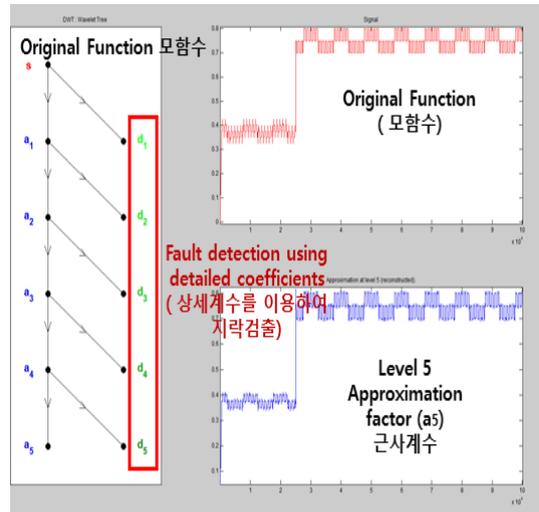


Fig. 9. Mother function with DWT

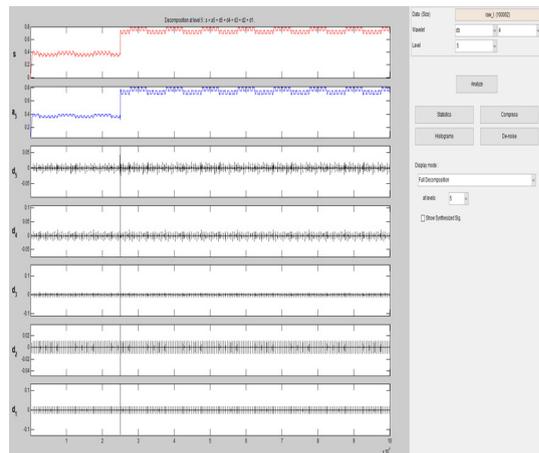


Fig. 10. Modeling of wavelet transform with Matlab

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

상기의 PSCAD/EMTDC모델링을 바탕으로 직류 비접지계통의 지락사고 검출특성을 모의하기 위하여, AC 전원부는 단상 220[V]의 전압원, DC전원부는 200[Vdc]의 전압원으로 구성된 모델계통을 상정한다. 또한, 직류 계통은 Bi-pole 비접지방식을 적용하고, 지락사고발생기는 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 사고발생 컴포넌트를 사용하며, 고장저항을 가변시켜 계통의 특성에 따라 다양한 사고조건을 모의할 수 있도록 한다. 한편, IMD는

절연저항을 상시 모니터링하기 위하여 계통에 주입하는 펄스신호를 신호발생기(Signal Injection Generator)를 이용하여 모의한다. 여기서, 신호발생기의 입력펄스 크기는 50[V]이며, 입력주파수는 10[Hz] 신호와 1[Hz] 신호를 합성하여, fig. 11과 같이 합성파형이 직류 비접지계통에 입력되도록 한다.

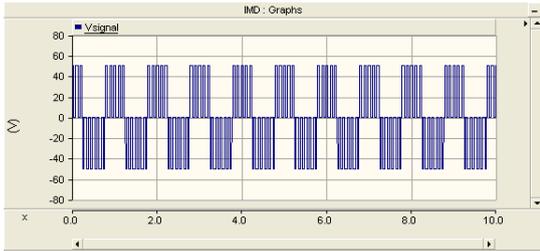


Fig. 11. Composite waveform of signal generator in IMD

또한, IMD의 신호주입방식을 통한 누설전류를 분석하여, 계통의 정상상태와 사고상태를 판단하기 위하여, MATLAB의 수치해석 모델링의 시뮬레이션 조건은 Fig. 12와 같이 상정한다. 이 그림에서와 같이, 모함수는 Daubechies(db)를 사용하고, 차수(m)는 db4를 적용하며, 분석레벨(level)은 1~5까지 가변하면서 측정전류의 신호를 분석한다.

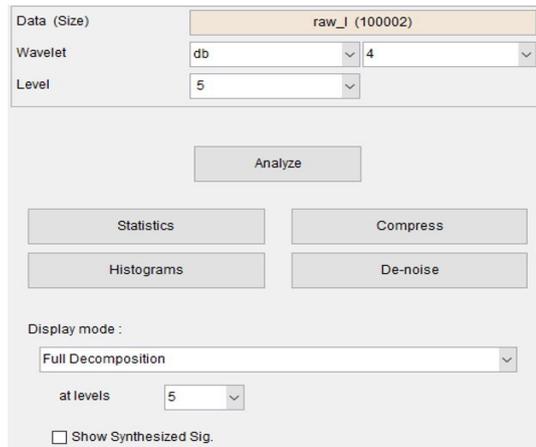


Fig. 12. Simulation conditions of numerical analysis in Matlab

5.2 PSCAD/EMTDC를 이용한 비접지 직류계통의 지락고장 특성분석

상기에서 제안한 모델링을 바탕으로, 신호주입방식의

IMD보호기기를 적용한 직류 비접지계통의 지락사고에 특성을 분석하면 Fig. 13과 같으며, 2.5[s]에서 지락고장이 발생한 모의결과를 나타낸다. 여기서 그림 13(a)는 지락고장 시의 전압 파형을 나타내고, 그림 13(b)는 전류파형을 나타낸다. 먼저, 그림 13(a)와 같이, 정상상태일 경우 전압은 약 90~110[V]이지만, 지락고장 발생 후, 전압은 0[V]로 감소함을 알 수 있다. 한편, 그림 13(b)와 같이 전류는 정상상태에서 -0.05[mA]에서 +0.05[mA] 값이지만, 전류는 0.15[mA]로 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 비접지 직류계통에서 지락사고 발생 시, 전압 값은 사고 전과 비교하여 확연히 감소하지만, 전류 값의 변화는 수[mA] 이내로 값의 변화가 미미하여 지락고장을 확실하게 검출하기 어려움을 알 수 있었다.

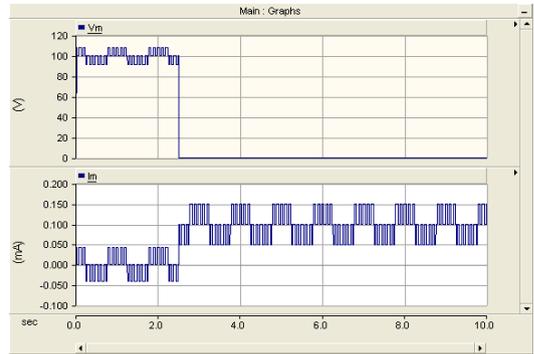


Fig. 13. Characteristics of ground faults with PSCAD/EMTDC
(a) Voltage wave(above), (b) Current wave(below)

5.3 MATLAB을 이용한 IMD의 특성분석

5.1절의 MATLAB의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 5.2절의 지락사고 시의 전류측정 값을 수치적으로 해석하면 Fig. 14와 같다. 여기서, Fig. 14의 왼쪽 그래프는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 지락사고를 분석한 결과이고, Fig. 14의 오른쪽 그래프는 이것을 MATLAB으로 수치해석기법으로 나타낸 것이다.

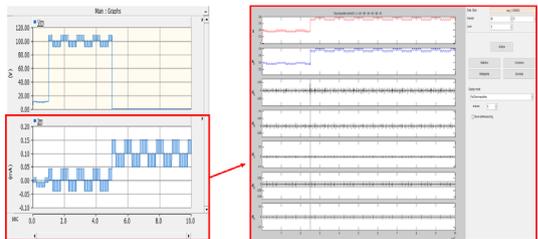


Fig. 14. Characteristics of numerical analysis with Matlab

또한, MATLAB 모델링의 Daubechies 함수를 이용하여 PSCAD/EMTDC의 사고전류를 분석하면 Fig. 15와 같다. 여기서, 상단의 그래프는 MATLAB으로 변환된 모함수를 나타내고, 하단의 그래프는 웨이블릿 필터를 통과한 근사계수(a)를 나타낸다.

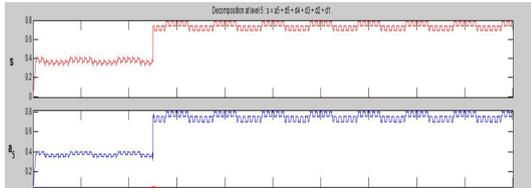


Fig. 15. Characteristics of current(s) and factor(a) by wavelet transform with Daubechies

한편, Fig. 16은 Daubechies 웨이블릿변환계수를 나타내고, 위에서부터 다섯 번째까지의 그래프(d1 ~ d5)는 상세계수를 나타낸다. 여기서, 사고가 발생한 경우, 고장 발생점에서 d4 ~ d5의 상세계수 값이 크게 변화함을 알 수 있다. 즉, d1~d3의 경우 고장 전과 후에는 각 펄스 파형과 같은 주기로 신호의 크기가 거의 변동하지 않지만, d4~d5의 경우 지락 고장이 발생하면 신호가 큰 폭으로 변동하여, 고장 전과 후의 신호를 확실하게 구별할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 Daubechies의 차수와 레벨을 가변하면서 특성을 분석하는 사고검출 알고리즘에 의하여, 지락고장을 효과적으로 검출할 수 있음을 확인하였다.

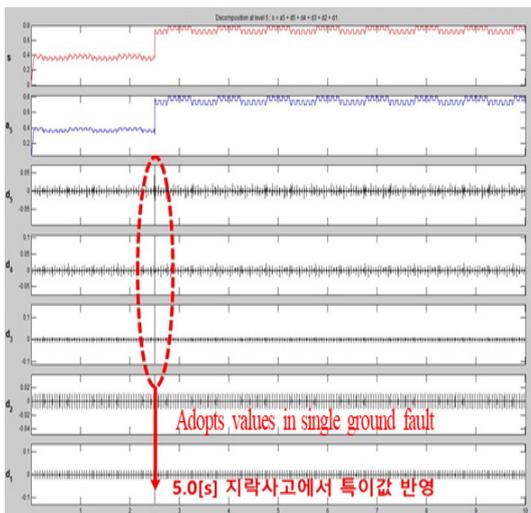


Fig. 16. Characteristics of fault current by wavelet transform with Daubechies

6. 결론

본 논문에서는 IMD의 신호주입방식에 의한 출력 값을 웨이블릿변환기법으로 분석하여, 사고검출을 신속하고, 정확하게 판단할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 한편, 상용 전력계통 해석프로그램인 PSCAD/ EMTDC를 이용하여, 직류 비접지계통과 IMD를 모델링하고, MATLAB을 이용한 웨이블릿변환 수치해석모델링 및 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) IMD의 절연저항측정 및 보호방식을 분석하기 위하여, 펄스전원 인가방식 IMD의 구조적 특성을 분석하고, IMD와 타 보호기간 보호협조 가능성을 확인하기 위하여, 각 펄스동안의 계통누설 커패시턴스 총 · 방전시간에 대한 수식을 정식화하였다. 이를 통해, IMD가 사고발생 시부터 사고를 감지하기까지 약 3.5[s]~4.0[s]의 계측시간이 소요됨을 알 수 있었다.
- (2) 비접지 직류계통의 지락사고 시, 수[mA] 이내의 미미한 사고전류 값을 확실하게 검출하기 위하여, 국부적인 영역의 과도신호 분석에 유용한 웨이블릿 변환을 이용하여, 지락사고를 검출하는 알고리즘을 제안하였다.
- (3) IMD의 사고검출 여부를 분석하기 위해 PSCAD/ EMTDC 지락사고 시뮬레이션 결과를 MATLAB에 입력하여 웨이블릿변환 신호해석기법으로 수치해석을 수행하였다. 이를 통해, IMD의 수치해석 모델링이 직류 비접지계통의 지락사고를 정확히 검출함을 확인하였으며, 본 논문에서 제시한 방식이 직류 배전계통의 보호방안으로서 유효함을 알 수 있었다.

References

- [1] J. R. Kim, "TA Study on Power Flow Analysis of DC Traction Power Supply System with PWM Rectifier", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65 No. 11, pp. 1919-1924, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.11.1919>
- [2] S. M. Lee, J. W. Kim, "The Application Method of DC Distribution in Microgrid", Journal of Energy Engineering, Vol. 25 No. 1, pp. 92-99, May, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5855/ENERGY.2015.25.1.092>
- [3] J. T. Jo., "DC Distribution Development Trend and Development of KEPCO", The Korean Institute of

Electrical Engineers Conference, pp. 31~48, April, 2018.

- [4] G. W. Park, "Status and Prospect of Low Voltage DC distribution technology", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 28, No. 6, pp. 3-8, 2014.
- [5] S. G. Song, Y. G. Kim, "Direct current(DC) distribution System Trend", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 8, 2016.
- [6] X. Y. Chen, J. X. Jin "Energy Efficiency Analysis and Energy Management of a Superconducting LVDC Network", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, Oct. 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2016.2599188>
- [7] M. Carminati, E. Ragaimi, "Considerations on DC side grounding configurations of LVDC microgrids", 2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IYCE.2015.7180739>
- [8] A. Virdag, T. Hager, R. W. Doncker, "Estimation of short-circuit currents in future LVDC microgrids", CIREN - Open Access Proceedings Journal, Vol. 2017, pp. 1098~1101, Oct, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0993>
- [9] A. Pinomaa, J. Ahola, P. Nuutinen, "Noise analysis of a power-line communication channel in an LVDC smart grid concept", 2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Jun. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISPLC.2013.6525822>
- [10] R. Sugi, D. Sundararajan, "Estimation of power quality indices using discrete wavelet transform", 2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Jan, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICACCS.2016.7586363>
- [11] J. Zhou, W. Xiong, G. Zhang, "Generalized Discrete W Transform", 2009 Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and Systems, May, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PACCS.2009.61>

김기영(Ki-Young Kim)

[정회원]



- 2011년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2015년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 동대학원 박사 과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드, DC계통보호

이후동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

태동현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

노대석(Dae-Seok Rho)

[증신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석