

직류 비접지계통에서 절연저항측정장치(IMD)를 이용한 사고검출 알고리즘

김기영*, 박재범*, 김미성*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:g2rkgky@ktr.or.kr

Algorithm of Ground Fault Detection using Insulation Monitoring Device in Ungrounded DC Distribution System

Ki-Young Kim*, Jae-Bum Park*,
Mi-Sung Kim*, Dae-Seok Rho*

*Korean Testing and Research Institute

요약

최근, 신재생에너지 및 분산전원의 급속한 보급과 직류부하의 증가로 인하여 직류급전에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그에 대한 접지방식 및 보호기기에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 그러나 직류급전방식을 사용하는 기존의 직류부하망과 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, 기존 계통에서의 IMD 적용사례 및 검출원리를 분석하였다. 또한, 상용전력계통해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 직류 비접지계통과 IMD를 모델링하고, 동일한 계통을 H/W 시험장치로 구현하여 직류비접지계통에서의 지락사고 특성과 IMD 동작특성을 분석하였다. 이를 통해 직류 비접지계통의 지락사고를 시뮬레이션하고, 그 결과를 분석하여 본 논문에서 제안한 방안의 유효함을 확인하였다.

1. 서론

최근 신재생에너지 및 분산전원의 급속한 보급과 직류부하의 증가로 인하여 직류급전에 대한 관심이 높아지고 있으며, 기존의 교류계통을 직류계통으로 변환하기 위한 연구 및 실증이 활발히 이루어지고 있다. 한편 다수의 직류급전계통에서는 사고전류가 적고, 한 상만 지락 시 지속적인 전원공급이 가능한 장점으로 인하여, 비접지방식인 IT 접지방식을 적용하고 있다. 그러나 이러한 비접지 직류계통은 지락고장발생 시 고장전류의 경로가 없고, 정상상태 전류에 비하여 큰 차이가 발생하지 않기 때문에 지락고장검출이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 직류 비접지계통의 지락사고 보호기기로 절연저항측정장치(IMD : Insulation Monitoring Device)를 적용하기 위하여, IMD의 사고검출원리 및 기존계통에서 적용사례를 분석한다. 또한, IMD의 절연저항감지 동작특성을 분석하여, 사고검출을 정확하게 판단할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 이를 바탕으로, PSCAD/EMTDC모델링 및 H/W시험장치구현을 통하여, 직류 비접지계통 지락사고를 시뮬레이션하고, 그 결과를 분석한 결과, 본 논문에서 제안한 사고검출 방안의 유용성을 확인하였다.

2. IMD의 보호방식 및 사고검출특성 분석

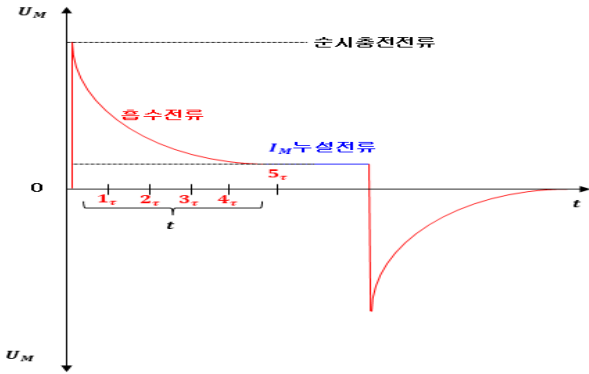
현재, IMD방식의 보호기기는 발전소 및 제철소의 주요 직류제어전원회로 및 저압직류배전계통 등에 널리 적용되고 있으며, 보호방식은 전력선과 대지사이에 펄스전원(직류전압)을 인가하여, 절연저항을 감시하는 방식이다. 또한, 계통에 주입하는 펄스신호는 스위칭소자 혹은 신호발생기를 이용하여 직류전압을 인가하며, 각 스위칭모드에 따른 전류를 측정하여, 식 (1)과 같이 절연저항(RF)을 계산할 수 있다.

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

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

한편, 직류전압을 인가한 절연체에는 순간적인 충전전류가 흐르게 되고, 그림 1과 같이 이 값은 차츰 감소하여 일정한 누설전류 값으로 수렴한다. 여기서, 직류전압을 인가한 순간에 흐르는 충전전류를 순간 충전전류라 하며, 이 전류가 일정한 누설

전류로 수렴할 때까지 흐르는 과도전류를 흡수전류라 한다. 따라서 정확한 절연저항을 측정하기 위해서는 누설전류를 순간 충전전류의 안정구간에서 측정하는 것이 중요하며, 안정구간까지의 방전시간을 고려하면 약 4[s]의 계속시간 t_g 가 소요된다.



[그림 1] IMD 보호기기 계속시간

기존에는 직류 비접지계통과 같은 고저항 전력계통의 사고 검출을 위하여, 신경회로망, 웨이블릿변환기법 등을 적용하는 방안이 연구되고 있으며, 특히 이산웨이블릿 변환기법(DWT, Discrete Wavelet Transform)기법은 시간영역과 주파수영역 모두에서 비정상 신호를 해석하는 수학적도구로 널리 이용되고 있다.

3. 직류 비접지계통에서의 IMD 사고검출 알고리즘

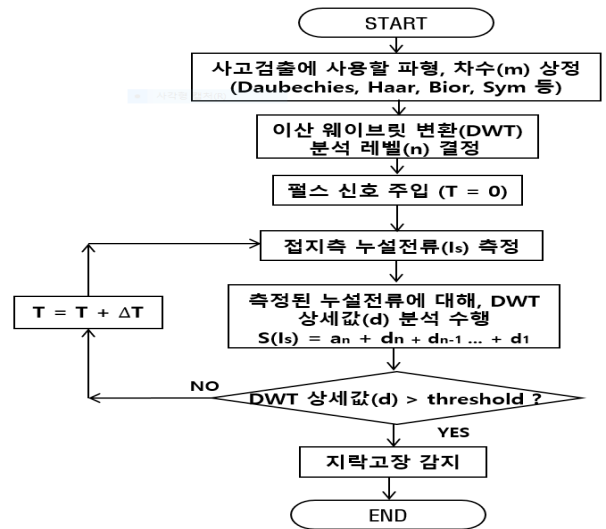
앞에서 분석한 바와 같이, 직류 비접지계통에서 지락이 발생되면, 고장전류의 경로가 없고, 정상상태 전류에 비하여 큰 차이가 발생하지 않기 때문에 지락고장 검출이 어렵게 된다. 이에 대한 방안으로, 본 논문에서는 국부적인 영역의 과도신호 분석에 유용한 웨이블릿 변환을 이용하여, 사고를 검출하는 알고리즘을 제안한다. IMD 사고검출 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

- [STEP 1] 사고검출에 사용할 모함수 파형(Daubechies, Haar, Bior 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 레벨(n)은 원 신호를 얼마나 심층적으로 분석할 것인지 대한 정도를 나타낸다.
- [STEP 3] 각 시간대에서 펄스 신호를 주입하고, 접지 측 누설전류(I_s)를 측정한다.
- [STEP 4] 측정된 누설전류에 대해, m차수의 모함수 파형을 이용하여, n레벨까지 DWT 분석을 수행한다.
- [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.

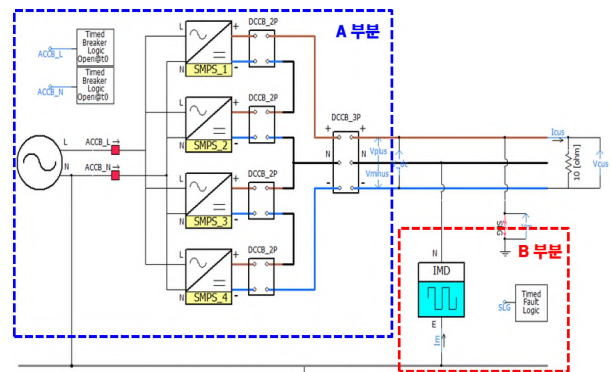
상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] IMD 사고검출 알고리즘

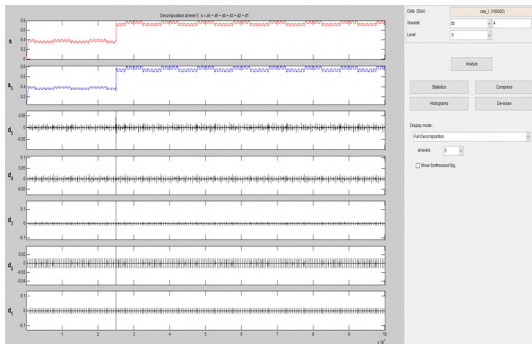
4. 직류 비접지계통 사고특성 모델링

직류 비접지계통에 있어서, 지락사고 검출특성을 모의하기 위하여, 전체계통과 IMD 보호기기를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링을 수행하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 직류 비접지계통부는 A부분과 같이 AC전원부와 직류전원 공급을 위한 DC전원부, DC선로부로 구성되고, IMD보호기기부는 B부분과 같이 지락사고발생기와 IMD로 구성된다.



[그림 3] 직류비접지계통 및 IMD 보호기기 모델링

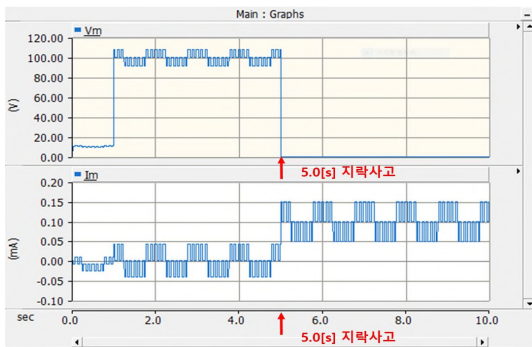
상기의 직류 비접지계통과 IMD보호기기의 모델링을 바탕으로 출력된 전류 값의 정상상태와 사고상태를 판단하기 위하여, 본 논문에서는 이산웨이블릿변환(DWT)의 수치해석기법을 적용한다. 수치해석을 위한 모델링은 수치해석 S/W인 MATLAB을 이용하여 DWT수치해석 모델링을 수행하였으며, 상기의 DWT수치해석기법을 바탕으로, 모함수(S)를 n차 레벨로 분석하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 모함수(S)에 대한 다해상도분석(MRA)을 통해, 고주파 필터(HPF)를 통과한 값은 상세값(d)으로 정의되며, 저주파 필터(LPF)값을 통과한 값은 근사값(a)으로 정의된다.



[그림 4] MATLAB을 이용한 웨이블릿변환 모델링

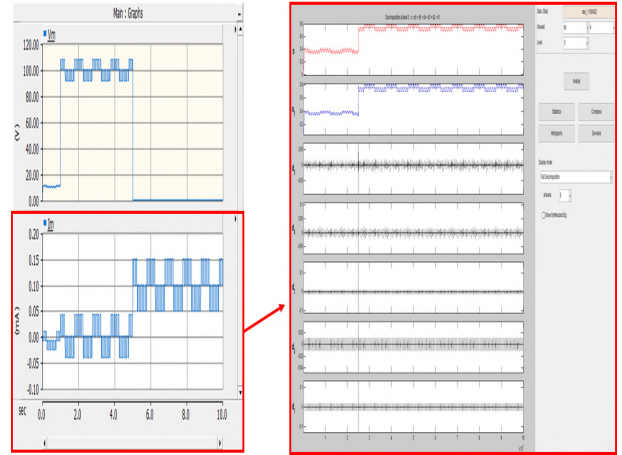
5. 시뮬레이션 결과 및 분석

상기에서 제안한 모델링을 바탕으로, 신호주입방식의 IMD 보호기기를 적용한 직류 비접지계통의 지락사고에 특성을 분석하면 그림 5와 같다. 먼저, 그림과 같이, 정상상태일 경우 전압은 약 90~110[V]이지만, 지락고장 발생 후, 전압은 0[V]로 감소함을 알 수 있다. 한편, 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.



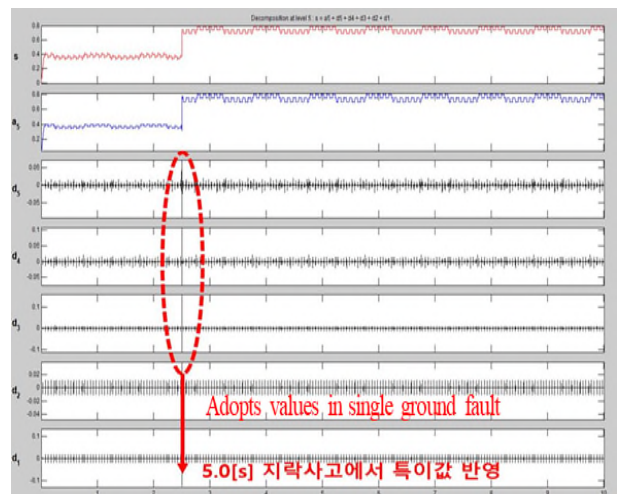
[그림 5] PSCAD/ EMTDC모델링의 시뮬레이션 결과

한편, 상기의 MATLAB 시뮬레이션 조건을 바탕으로, PSCAD/EMTDC 지락사고 시의 전류측정 값을 수치적으로 해석하면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 왼쪽 그래프는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 지락사고를 분석한 결과이고, 그림 6의 오른쪽 그래프는 이것을 MATLAB으로 수치해석기법으로 나타낸 것이다.



[그림 6] Matlab을 이용한 수치해석 시뮬레이션 결과

그림 7은 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.



[그림 7] Daubechies 웨이블릿변환에 의한 사고전류 분석결과

6. 결 론

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)로서, 관계부처에 감사드립니다.

본 논문에서는 IMD의 신호주입방식에 의한 출력 값을 웨이블릿변환기법으로 분석하여, 사고검출을 신속하고, 정확하게 판단할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 한편, 상용전력계통 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 보호기기간 보호협조 가능성을 확인하기 위하여, 각 펄스동안의 계통누설 캐패시턴스 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.

참고문헌

- [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.
- [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.
- [3] J. T. Jo., "DC Distribution Development Trend and Development of KEPCO", The Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp. 31~48, April, 2018.