

# 이산 Daubechies 웨이브릿 변환을 이용한 송전선로의 고장검출

## A Study on Fault Detection for Transmission Line using Discrete Daubechies Wavelet Transform

이 경 민\* · 박 철 원†

(Kyung-Min Lee · Chul-Won Park)

**Abstract** - This paper presents a Daubechies wavelet-based fault detection method for fault identification in transmission lines. After the Daubechies wavelet coefficients are calculated, the proposed algorithm has been implemented difference equation using C language. We have modeled a 154kV transmission line using the ATPDraw software and have acquired test data. In order to evaluate effects of DC offset, simulations carried out while varying an inception angle of the voltage 0°, 45°, 90°. For performance evaluation, fault distance was varied. As we can see from the off-line simulation, the proposed algorithm shows rapid and accurate fault detection. Also we can see the proposed algorithm is not affected by the fault inception angle change.

**Key Words** : ATPDraw, Daubechies wavelet, DC offset, Fault detection, Fault identification, Transmission line

### 1. 서 론

송전선로는 발전소와 부하 사이에 전력을 전달하는 전력시스템의 매우 중요한 설비이다. 송전선로는 외부에 노출되어 있고 개폐가 빈번하기 때문에, 고장이 발생할 위험이 많다. 송전선로의 고장으로 인한 정전과 사고 확대를 방지하기 위해서, 보호장치는 고장검출과 고장위치 파악을 통하여 가능한 신속하고 정확하게 고장이 발생한 부분을 건전한 계통으로 분리해야한다[1, 2].

국내의 고장검출에 관한 연구로는 저임피던스 고장(LIF:low impedance fault)검출을 위한 최적 마더웨이브릿 선정과 시스템 식별(system identification)을 위한 웨이브릿 변환(WT:Wavelet Transform) 연구가 이루어졌다[3, 4]. 또 웨이브릿 변환을 이용한 디지털 거리 계산 알고리즘이 발표되었고 웨이브릿 변환을 이용한 고임피던스 지락사고(HIGF:high impedance ground fault)의 검출방법에 관한 특허가 출원되었다[5, 6]. 그리고 도비시(Daubechies) 웨이브릿 변환을 이용한 변압기의 여자돌입과 내부 권선고장 판별논리 기법과 웨이브릿을 이용한 신호 분석에 관한 연구와 전력계통 고장기록장치로부터 얻어진 선로의 전류데이터를 이용한 고장전류 판별(fault current discrimination)과 웨이브릿 기법을 이용한 리커시브 실시간 고장점 표정 시스템 연구가 이루어졌다[7-10]. 최근에는 광역 보호를 위한 웨이브릿 single value를 사용한 고장검출 및 분류를

위한 알고리즘이 제시되었다[11].

해외의 고장검출에 관한 연구로는 웨이브릿 변환을 이용한 송전선로의 고임피던스 아크고장의 고장검출기법과 웨이브릿 변환과 ANN에 기반한 송전선로의 고장검출 및 분류가 제시되었다[12-14]. 또 웨이브릿 계수 에너지의 실시간 분석에 기반한 고장 과도상태 검출과 웨이브릿에 기반한 송전선로의 고장검출과 분류가 발표되었다[15].

한편, 송전선로에서 고장이 발생한 과도상태 신호는 비정적 신호(nonstationary signal)이기 때문에, 고장난 과도신호는 웨이브릿 변환을 이용하면 제대로 분석을 할 수 있고 고장이 판별될 수 있다[16, 17].

본 논문은 송전선로에서의 고장을 식별하기 위하여 이산 Daubechies 웨이브릿(DWT:Discrete Wavelet Transform) 기반의 고장검출 기법을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 Daubechies 웨이브릿 계수를 이용한 차분방정식으로 통해 C언어로 구현되었다. 또 오프-라인 시험을 위하여 전자과도해석프로그램인 ATPdraw 버전을 이용하여 154kV의 송전선로를 모델링한 후 시험용 데이터를 수집하였다. 다양한 조건에서의 오프-라인 시험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능평가를 기술하고자 한다.

### 2. 이산 Daubechies 웨이브릿 변환에 의한 고장검출

푸리에 기법은 대상 신호를 주파수 영역으로 변환할 때 시간 영역에 관한 정보들이 손실되는 반면, 웨이브릿 변환은 가변 크기 영역(variable-sized regions)을 가진 기법으로서 더 정확한 저주파수 정보를 원할 때에는 긴 시간 간격을 사용하고, 고주파수 정보를 원할 때에는 짧은 구간을 사용한다. 웨이브릿 변환은 이러한 특성으로 인하여 비정적인 과도신호에 대한 국부적인 영역의 분석에 유리하다[16]. 본 논문에서는 송전선로의 불평형 고장을 검출하기 위하여 이산 Daubechies 웨이브릿 변환을 적용하였다.

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

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Korea.

접수일자 : 2017년 2월 6일

최종완료 : 2017년 2월 21일

### 2.1 MRA 과정에 의한 대상 신호의 분해

웨이브릿 함수는 대상 신호를 저주파 대역필터를 통해 상세계수(detail coefficient)와 고주파 대역필터를 통해 근사계수(approximation coefficient)를 생성한다. 그림 1은 MRA(Multi-Resolution Analysis)의 과정이다. 그림 1과 같이 다운 샘플링(down sampling)에 의한 MRA기법을 통해 대상 신호를 여러 레벨로 분해(decomposition) 함으로써 분석하였다[16, 17].

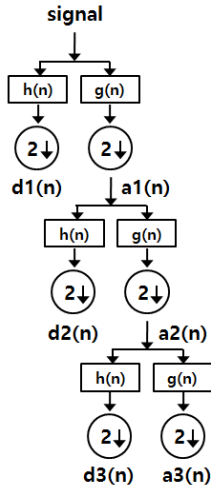


그림 1 MRA 과정  
Fig. 1 Process of MRA

### 2.2 이산 Daubechies 웨이브릿 계수에 의한 차분방정식

모든 범위에서 웨이브릿 계수를 계산하는 것은 연산부담이 크기 때문에 본 논문에서는 Mallat이 제시한 고속 웨이브릿 알고리즘을 사용하였다. 원형(mother) 웨이브릿은 Daubechies로 선정된 후, 차수(order)와 레벨(level)을 가변하면서 이산 Daubechies 웨이브릿 계수를 구할 수 있다 [16]. 이때 A상 전류용 웨이브릿 Daubechies 2(db2)의 저주파 대역필터에 의한 상세계수와 고주파 대역필터에 의한 근사계수 계산용 차분방정식은 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다[1].

$$\begin{aligned}
 i_A(k)_{db2-d} = & -0.12940952255092145 i_A(2k) \\
 & + 0.22414386804185735 i_A(2k-1) \\
 & + 0.836516303737469 i_A(2k-2) \\
 & + 0.48296291314469025 i_A(2k-3)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 i_A(k)_{db2-a} = & -0.48296291314469025 i_A(2k) \\
 & + 0.836516303737469 i_A(2k-1) \\
 & - 0.22414386804185735 i_A(2k-2) \\
 & - 0.12940952255092145 i_A(2k-3)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $i_A(k)_{db2-d}$ 는 A상 전류의 db2에 의한 상세계수값,  $i_A(k)_{db2-a}$ 는 A상 전류의 db2에 의한 근사계수값,  $k$ 는 샘플 번호이다.

### 2.3 고장검출 알고리즘

본 논문의 고장검출은 각 이동 윈도우내 평균치의 변화에 기반 하였다. 즉, 고장검출은 Daubechies 4(db4)의 상세계수(d1) 성분의 이동 윈도우방식에 따른 평균치로 선정하였다. 상세계수의 특징을 분석한 결과를 고려하여 본 논문에서는 임계치  $\epsilon = 0.035$ 를 적용하였다[1].

## 3. 사례연구

### 3.1 송전선로 모델링

본 논문에서 제시한 이산 Daubechies 웨이브릿 변환을 이용한 송전선로 고장검출기법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 2와 같이 ATPDraw를 이용하여 양전원 단거리 송전선로를 모델링 한 후, 고장 시뮬레이션을 수행하여 고장 데이터를 수집하였다. 이 송전선로 모델의 전원 전압은 154kV이고, 선로 길이는 13.036km인 국내 실제통을 대상으로 하였다 [1, 2].

고장의 종류는 사고빈도가 가장 높은 A상 1선 지락사고와 AB상 단락사고를 대상으로 하였고 한주기당 샘플링주파수는 7,680Hz(128 s/c)로 선정하였다. 제시한 기법의 성능을 평가하기 위하여 고장거리는 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%로 가변하였고, 직류오프셋의 영향을 검토하기 위하여 고장발생각은 A상전압기준 0°, 45°, 90°으로 고장발생시각이 각각50.00ms, 52.08ms, 54.17ms인 고장상황을 모의하였다. 단, CT 포화는 고려하지 않았다[1, 2].

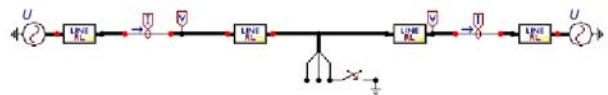


그림 2 ATPDraw에 의한 송전선로 모델  
Fig. 2. Transmission line model using ATPDraw

### 3.2 시뮬레이션 및 결과

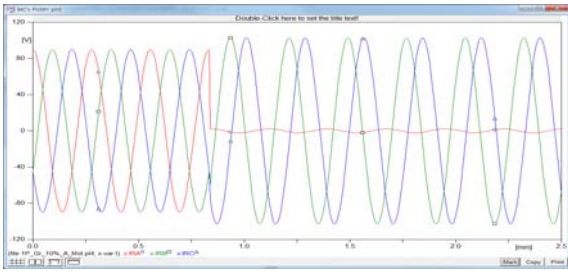
#### 3.2.1 ATPDraw 시뮬레이션

그림 3은 1.3046km 지점에서 A상 지락고장이 발생하였을 경우, 고장 시각에 따른 3상 전압과 3상 전류신호를 나타낸다. 그림 3과 같이 고장이 발생 후 A상 전압이 작아지며 3상 전압은 불평형이 된다. 또 A상 전류가 커지면서 3상 전류는 불평형이 되고 전압위상각이 90°에 가까울수록 직류오프셋 성분이 많이 포함되는 것을 알 수 있다.

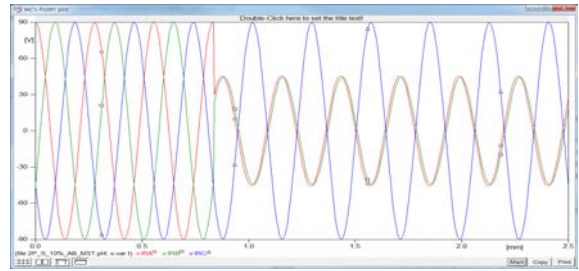
그림 4는 1.3046km 지점에서 AB상 단락고장이 발생하였을 경우, 고장 시각에 따른 3상 전압과 3상 전류신호를 나타낸다. 그림 4와 같이 고장이 발생 후 A, B상 전압이 작아지며 3상 전압은 불평형이 된다. 또 A, B상 전류가 커지면서 3상 전류는 불평형이 되고 전압위상각이 90°에 가까울수록 직류오프셋 성분이 많이 포함되는 것을 알 수 있다.

#### 3.2.2 오프-라인 고장검출 시뮬레이션

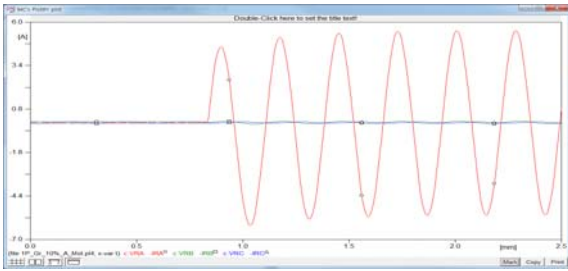
고장을 검출하기 위하여 7,680Hz로 샘플링된 고장전류 신호는 이산 웨이브릿 변환을 거치게 된다. 본 논문에서



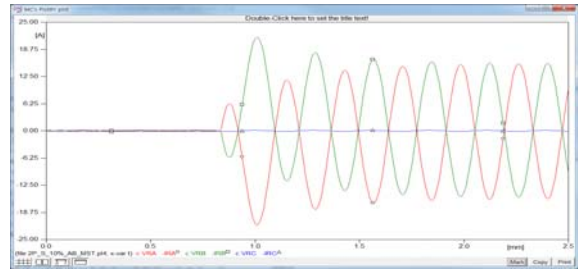
(a) 3상 전압 (전압위상각 0°)



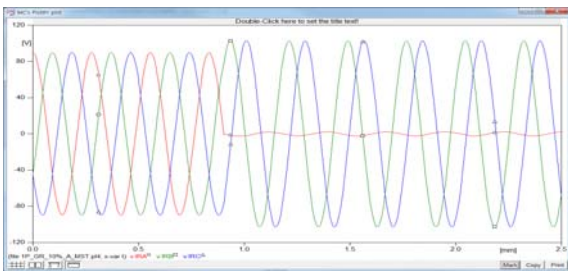
(a) 3상 전압 (전압위상각 0°)



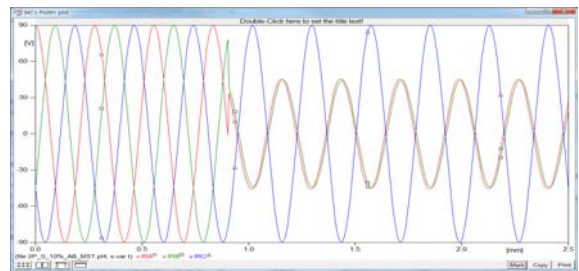
(b) 3상 전류 (전압위상각 0°)



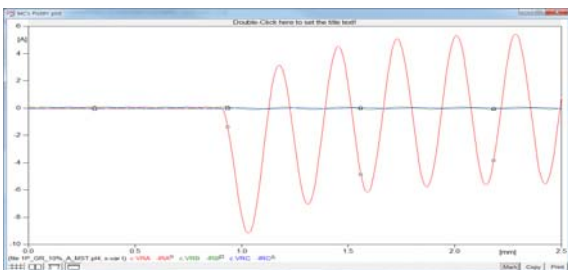
(b) 3상 전류 (전압위상각 0°)



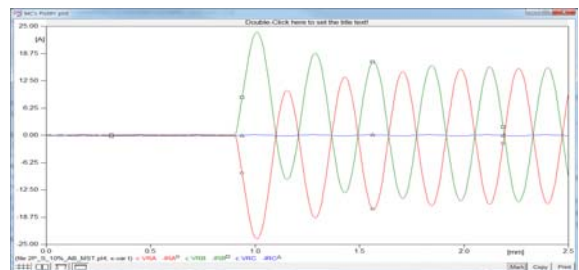
(c) 3상 전압 (전압위상각 90°)



(c) 3상 전압 (전압위상각 90°)



(d) 3상 전류 (전압위상각 90°)



(d) 3상 전류 (전압위상각 90°)

그림 3 3상 전압 및 3상 전류 (A상 지락고장)

Fig. 3 Three phase voltage and current signals (A phase to ground fault)

는 계산량을 감소하기 위하여 2개중의 하나를 취하여 DWT에 의해 각각 저주파 대역필터와 고주파 대역필터를 통과하도록 하였다. 첫 번째 단계에서, 원 신호는 2분의 1 주파수 영역으로 나뉘고, 두 개의 저주파 대역필터와 고주파 대역필터로 보내어진다. 그 후, 신호들이 정의된 수준으로 분해될 때까지, 동일한 절차가 반복 수행된다. 이에 따라 본 논문에서 DWT된 전류의 상세계수 신호들은, 60Hz~DC(a5) 레벨의 주파수 영역내의 근사 신호뿐만 아

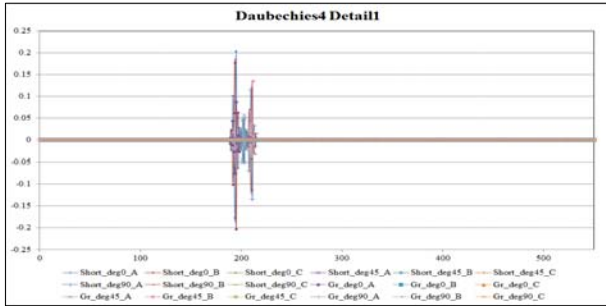
그림 4 3상 전압 및 3상 전류 (AB phase 단락고장)

Fig. 4 Three phase voltage and current signals (AB phase to short)

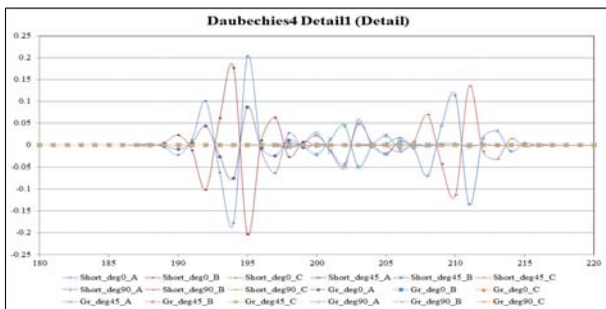
니라, d1에서 1,920Hz~960Hz의 주파수 영역과 d2에서 960Hz~480Hz의 주파수 영역과 d3에서 480Hz~240Hz의 주파수 영역과 d4에서 240Hz~120Hz의 주파수 영역과 d5에서 120Hz~60Hz의 주파수 영역을 포함하는 것을 얻었다.

그림 5는 1회선 송전선로 1.3046km 지점에서 A상 지락고장, AB상 단락고장이 발생하였을 경우, 차분방정식으로 변환된 이산 Daubechies 웨이블릿 변환에 의한 상세계수 d1값을 나타낸다. 고장발생각과 고장의 종류에 따라

Daubechies 4 상세계수 d1값의 값이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) 각 고장 종류별 Daubechies 4의 d1 값



(b) 각 고장 종류별 Daubechies 4의 d1 값의 확대

그림 5 이산 웨이브릿 변환에 의한 상세계수 d1값  
Fig. 5 Detail 1(d1) of discrete Wavelet Daubechies 4

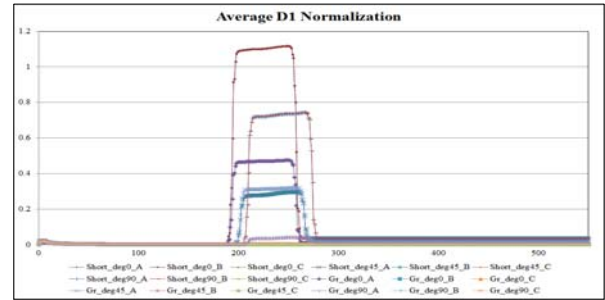
본 논문에서는 고장을 검출하기 위하여 평균값 절대치의 정규화를 이용하였다. 즉, d1의 절대값을 취한 후 이동창(moving window) 방법을 통하여 평균을 구한 값에 정규화(normalization)을 하였다. 그림 6은 각 고장 종류별 평균값 절대치의 정규화를 나타낸다. 그림 6으로부터, 지락고장의 경우 고장상인 A상 값이 크게 증가하는 것을 알 수 있고, 단락고장의 경우 고장상인 A상, B상의 값이 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 7은 각 고장별 카운트(count) 수를 나타낸다. 그림 7과 같이, d1의 평균값이 임계치를 넘었을 경우 카운트가 올라가게 되고 이 카운트를 통하여 고장이 어느 상에서 발생하였는지 알 수 있었다. 모든 시물레이션의 경우 (고장종류(2) × 전압위상각(3) × 고장거리(9)=54가지)에서, 제시한 이산 웨이브릿 고장검출 알고리즘에 의한 고장검출이 정확하게 이루어 졌다[1, 2].

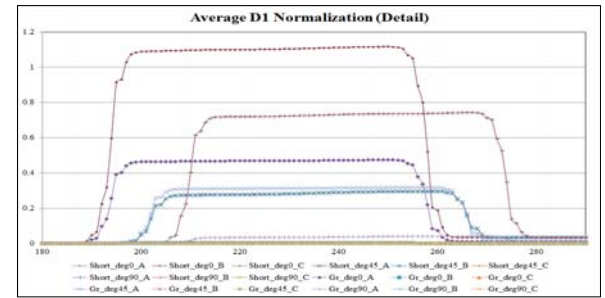
표 1은 본 연구에서 수행된 고장조건에 따른 고장 검출속도를 나타낸다. 표 1로부터 고장발생각이 90°에 가까울수록 고장거리가 길어질수록 고장검출속도가 느려졌고, 지락사고 보다는 단락사고가 다소 고장검출속도가 늦어지는 경향을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 송전선로에서의 고장을 검출하기 위하여 이산 Daubechies 웨이브릿 기반의 고장검출 기법을 제시하



(a) 각 고장 종류별 절대값 평균치의 정규화



(b) 각 고장 종류별 절대값 평균치의 정규화의 확대

그림 6 평균값 절대치의 정규화

Fig. 6 Normalization of absolute of average value

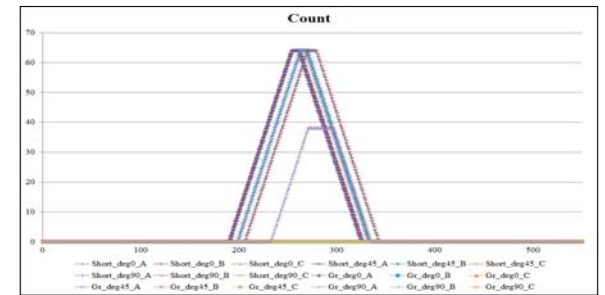


그림 7 고장 종류에 따른 카운트 수

Fig. 7 Number of count according to faults type

표 1 고장 조건에 따른 고장 검출속도

Table 1 Fault detection speed according to faults condition

고장발생각	고장거리	고장종류	
		A상 지락고장 [sec]	AB상 단락고장 [sec]
0°	10%	0.053122	0.053122
	50%	0.053122	0.053122
	90%	0.053122	0.053122
45°	10%	0.055726	0.055726
	50%	0.055726	0.055726
	90%	0.055726	0.055726
90°	10%	0.057288	0.057288
	50%	0.057288	0.057288
	90%	0.057288	0.057548

었다. 제안된 알고리즘은 Daubechies 웨이블릿 계수를 이용한 차분방정식형태로 변환하여 C 언어에 의해 간결하게 구현되었다. ATPdraw 소프트웨어를 이용하여 154kV의 송전선로를 모델링한 후 시험용 데이터를 수집하여 오프-라인 시험을 수행하였다. 오프-라인 시뮬레이션 결과, A상 지락고장의 경우에는 최소한 0.053122[sec]에서 최대한 0.057288[sec]에서 고장이 검출되었고, AB 단락과고장의 경우에는 최소한 0.053122[sec]에서 최대한 0.057548[sec]에서 고장이 검출되었다. 제안된 알고리즘은 신속하고 정확한 고장검출을 나타내었고 고장발생각의 가변에도 크게 영향을 받지 않았다.

추후 HIF 인 ARC 고장을 대상으로 종래의 기법과 비교분석할 예정이다.

### 감사의 글

이 논문은 2015년도 (사)한국산업기술진흥협회 학연공동 기업부설연구소 연계 후속 연구개발 지원사업의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

### References

- [1] C.W. Park, K.D. Yoon et al., "Development of Fault Locator for T/L using Synchophasor", Final Report for Ministry of Science, ICT and Future Planning, pp. 1~90, 2015. 12.
- [2] Test Report, TTA(Telecommunications Technology Association), BT-A-15-0616, pp. 11~18. 2015. 12.
- [3] S.H. Byun, C.H. Kim, I.D. Kim, K.N. Han, "Selection of Mother Wavelet for Low Impedance Fault Detection", *1997 KIEE Summer Conference*, pp. 1012~1014, 1997. 7.
- [4] D.O. Kim, Y.S. Lee, J.C. Kwon, B.H. Seo, "A Study of Wavelet Theory for System Identification", *1998 KIEE Summer Conference*, pp. 635~637, 1998. 7.
- [5] S.H. Kang, J.H. Lee, S.R. Nam, J.K. Park, "A Digital Distance Relaying Algorithm using a Wavelet Transformation", *Trans. on KIEE*, vol. 48A, no. 10, pp. 1215~1221, 1999. 10.
- [6] J.H. Lee, "High Impedance Fault Detection Method using Wavelet Transformation", *The Korean Intellectual Property Office, Patent Publication* 1999-0079070, pp. 1~12, 1999. 11.
- [7] C.W. Park, M.H. Kwon, M.C. Shin, "A Daubechies Wavelet Transform Based Criterion Logic Scheme for Discrimination Between Inter-Turn Faults and Magnetizing in Transform", *Trans. on KIEE*, vol. 50A, no. 5, pp. 211~217, 2001. 5.
- [8] S.B. Bae, J.G. Ryu, N.H. Kim, "A Study on Signal Analysis using Wavelet", *2005 KIEE Autumn Conference*, pp. 1~4, 2005. 11.
- [9] J.T. Lee, J.W. Jeong, "Faults Current Discrimination of Power System Using Wavelet Transform", *Journal of KIEE*, vol. 21, no. 3, pp. 75~81, 2007. 3.
- [10] S.W. Lee, B.N. Ha, "Recursive Real Time Fault Locator with Wavelet method", *Trans. on KIEE*, vol. 57, no. 9, pp. 1522~1530, 2008. 9.
- [11] J.W. Lee, W.K. Kim, Y.S. Oh, H.C. Seo, W.H. Jang, Y.S. Kim, C.W. Park, C.H. Kim, "Algorithm for Fault Detection and Classification Using Wavelet Singular Value Decomposition for Wide-Area Protection", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 729~739, 2015. 5.
- [12] C.H. Kim, H. Kim, Y.H. Ko, S.H. Byun, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, "A Novel Fault-Detection Technique of High-Impedance Arching Faults in Transmission Lines Using the Wavelet Transform", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 921~929, 2002. 10.
- [13] K.M. Silva, B.A. Souza, N.S. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 2058~2063, 2006. 10.
- [14] Flavio B. Costa, "Fault-Induced Transient Detection Based on Real-Time Analysis of Wavelet Coefficient Energy", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 140~153, 2014. 2.
- [15] Yellaji Allipilli, G.Narasimha Rao, "Detection and Classification of Faults in Transmission Lines Based on Wavelets", 2015 International Conference on Electrical, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 978-1-4799-7678-2/15/, 2015.
- [16] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, "Wavelet Toolbox User's Guide R2015b", The Mathworks Inc., pp. 1~700, 2015.
- [17] Bhuvnesh Rathore, Abdul Gafoor Shaik, "Fault Detection and Classification on Transmission Line using Wavelet Based Alienation Algorithm", *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - ASIA*, pp. 1~6, 2015.

## 저 자 소 개



### 이 경 민 (李 炘 啟)

1990년 4월 3일생. 2014년 국립강릉원주대학교 전기공학과 졸업, 2017년 2월 국립강릉원주대학교 대학원 전기공학과 석사과정수료. 2016년 국립강릉원주대학교 대학원 전기공학과 교육조교. 2017년 국립강릉원주대학교 산학협력단 연구원.

Lab : 033-760-8796

Fax : 033-760-8781

E-mail : point2529@naver.com



### 박 철 원 (朴 哲 圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박), 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원, 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원, 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사, 1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수, 2007년~현재 국립강릉원주대학교 전기공학과 정교수, 2010년~현재 사단법인 전력계통보호제어연구회 이사, 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사, 2012년~2014년 대한전기학회 논문지 P권 편집위원장, 2015년~현재 대한전기학회 평의원, 현재 한국조명전기설비학회 논문지 편집위원, 전력기술부문회 학술위원장, 전력계통 보호 및 자동화 연구회 위원장.

Lab : 033-760-8786, 8796

Fax : 033-760-8781

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr