

웨이브렛 변환을 이용한 배전계통의 전력품질 외란 검출에 관한 연구

論文

54A-7-2

Power Quality Disturbance Detection in Distribution Systems Using Wavelet Transform

孫永洛[†] · 李和錫^{*} · 文景俊^{**} · 朴俊灝^{***} · 尹在暎[§] · 金鍾律^{§§} · 金슬기^{§§}
(Yeong-Rak Son · Hwa-Seok Lee · Kyeong-Jun Mun · June Ho Park · Jae-Young Yoon ·
Jong-Yul Kim · Seul-Ki Kim)

Abstract - Power quality has become concern both utilities and their customers with wide spread use of electronic and power electronic equipment. The poor quality of electric power causes malfunctions, instabilities and shorter lifetime of the load. In power system operation, power system disturbances such as faults, overvoltage, capacitor switching transients, harmonic distortion and impulses affects power quality. For diagnosing power quality problem, the causes of the disturbances should be understood before appropriate actions can be taken. In this paper we present a new approach to detect, localize, and investigate the feasibility of classifying various types of power quality disturbances. This paper deals with the use of a multi-resolution analysis by a discrete wavelet transform to detect power system disturbances such as interruption, sag, swell, transients, etc. We also proposed de-noising and threshold technique to detect power system disturbances in a noisy environment. To find the better mother wavelet for detecting disturbances, we compared the performance of the disturbance detection with the several mother wavelets such as Daubechies, Symlets, Coiflets and Biorthogonals wavelets. In our analysis, we adopt db4 wavelet as mother wavelet because it shows better results for detecting several disturbances than other mother wavelets. To show the effectiveness of the proposed method, a various case studies are simulated for the example system which is constructed by using PSCAD/EMTDC. From the simulation results, proposed method detects time points of the start and end time of the disturbances.

Key Words : Power Quality, Power System Disturbances, Wavelet Transform, De-noising, Threshold

1. 서 론

정보통신산업의 발전 및 생활수준의 향상에 따라 고품질 전력이 요구되는 정보통신기기, 정밀제어기기, 전산기기, 자동생산라인, 사무자동화기기 등이 널리 보급되어 왔다. 그러나 이러한 장비들에 오동작 등의 민감한 영향을 미치는 순간전압변동, 순간정전, 고조파, 전압불평형, 서어지, 플리커 등의 계통외란에 의한 전력품질저하는 외란의 지속시간이 짧고 국지적인 현상이 많아 전력품질의 정확한 측정, 평가 및 분석이 어려워 각 수용가의 정확한 피해내역을 파악하기가 어려울 뿐만 아니라, 이에 대한 대책을 수립하기도 쉽지 않은 상황이다. 따라서 전력품질 문제에 능동적으로 대처하기 위해 계통에서 발생하는 외란원(disturbance source)을 검출하고 이를 감쇄시킴으로써 양질의 전력을 공급할 수 있

도록 전력품질을 정확히 진단할 수 있는 기술의 필요성이 대두되고 있다[1,2].

전력계통의 외란 및 과도현상을 검출하기 위한 종래의 방법으로는 푸리에 변환, STFT(Short Time Fourier Transform) 등이 널리 이용되어 왔다. 기존의 신호처리 방법인 푸리에 변환은 원 신호를 여러 주파수의 정현파 성분으로 분해한다 [3,4]. 그러나 외란이 포함된 신호는 일반적으로 비정상(nonstationary) 또는 과도 특성을 가지고 있기 때문에 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역으로 변환할 경우 시간영역 관련정보는 소실되어 외란 발생시점을 파악할 수 없는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 시간-주파수 성분으로 분석하는 STFT가 제시되었다. 그러나 STFT를 적용하면 외란 신호의 주파수 및 발생시점을 알 수 있으나, 이는 일정한 크기의 윈도우 함수를 사용하므로 윈도우의 크기에 따른 제한된 범위의 정보만을 제공하게 된다[5]. 따라서 첨두파형과 정현파형이 동시에 존재하는 경우와 같이 고주파 대역 신호와 저주파 대역 신호가 동시에 존재하는 경우의 신호분석 시에는 적합하지 않다. 이러한 STFT의 단점을 해결하기 위해 분석영역이 가변되는 윈도우를 사용하는 새로운 방법으로서 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)이 제시되고 있다[6].

웨이브렛 변환은 영역의 크기가 가변되는 윈도우인 모함수(mother wavelet)라 불리는 웨이브렛을 확장(dilation) 및

* 교신저자, 正會員 : 三星電氣 基版事業部 主任

E-mail : yr.son@samsung.com

** 正會員 : 巨濟大學 電氣科 副教授 · 工博

*** 正會員 : 韓國原子力研究所 post-doctor · 工博

§ 正會員 : 釜山大 電子電氣情報컴퓨터工學剖 教授 · 工博

§§ 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 責任研究員 · 工博

正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 先任研究員

接受日字 : 2005年 1月 10日

最終完了 : 2005年 6月 13日

이동(translation)함으로서 기저함수군을 형성한 후 이를 사용하여 원신호를 시간 및 주파수의 국부성을 가지는 다양한 스케일의 여러 단계(levels)로 분해한다[6]. 이처럼 원 신호를 단계별로 분해함으로써 각각의 단계들은 특정한 시간대 및 특정 주파수 대역에 관하여 해석 가능한 특징을 가진다. 즉, 가변 윈도우를 도입함으로써 고주파수에서는 시간 분해 능이 좋고 저주파수에서는 주파수 분해능이 좋은 특성을 나타낸다. 따라서 파형 분석시 원신호의 기본파 성분에 대한 정보를 유지하면서 과도 성분을 검출할 수 있는 특징을 가진다.

이처럼 시간과 주파수 영역에 대하여 다중분해 특성을 가지는 웨이브렛 변환을 전력계통에 적용하기 위한 연구가 널리 진행되고 있으며, 특히 웨이브렛 변환의 특성을 적절히 활용할 수 있는 전력품질분석 문제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[7-11]. 웨이브렛 변환을 이용한 전력품질 외란검출에 관한 기존 연구로서는 고장검출 성능을 향상시키기 위해서 적절한 모함수의 선정에 관한 연구[7-9], 외란검출능력을 증대시키기 위해 de-noising기법을 도입하는 방법[10], 그리고 실시간 전력모니터링에 의한 각각의 외란현상 분석[11] 등 많은 연구가 수행되었다.

본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용한 배전계통의 전력품질 외란검출을 모의하기 위하여 분산전원이 포함되지 않은 배전계통 및 분산전원이 포함된 배전계통에 대하여 전력품질 외란현상인 interruption, sag, swell, transient 등을 발생시킨 후 이의 검출성능을 평가하였다. 또한 웨이브렛 변환의 외란검출 성능을 향상시키기 위해 시뮬레이션을 통하여 배전계통 전력품질 외란검출에 가장 적합한 모함수를 선정하였으며, 웨이브렛 변환시 임계처리 및 de-noising 방법을 적용하여 원신호에 대한 전처리 과정을 수행하였다.

제안한 방법의 효용성을 보이기 위하여 전력계통 모델링 및 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의계통 및 분산전원이 포함된 배전계통을 모의하였으며, 모의계통에 대하여 1선 지락고장, 거폐시터 개폐, 부하변동 등을 통해 전력품질 외란현상인 interruption, sag, swell, transient 등을 발생시킨 후 외란현상의 검출성능을 평가하였다. 그 결과 제안한 방법이 모의한 각각의 외란의 발생 및 소멸시점을 정확히 검출함을 확인하였다.

2. 웨이브렛 변환의 개요

퓨리에 변환은 시간영역의 신호를 주파수 영역으로 변환하거나 신호의 주파수 성분으로부터 원 신호를 복원함으로써 신호의 주파수 성분 분석이 가능하다. 그러나 비정상 신호나 시간대별로 주파수가 변화하는 변조신호의 경우 퓨리에 변환은 인접한 주파수 간의 중첩으로 신호의 대표적인 물리적 특성이 주파수상에서 표현되지 않는다. 결국 신호가 시간상에서 변화하거나 멀티 스케일 특성을 지니고 있는 경우 퓨리에 변환은 신호의 특성을 효과적으로 분석하지 못한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 일정한 크기를 가진 창함수를 퓨리에 변환과 결합시켜 창함수의 주파수에 해당하는 성분을 추출함으로써 시간 변화에 따른 주파수 특성을 분석하는 STFT가 제안되었다. STFT는 원신호에 대한 시간 변화에 따른 주파수 정보를 제공하지만 분리하고자 하는 주파

수 부근에서 정의한 창함수의 크기 즉 해상도가 한번 결정된 뒤에는 “시간-주파수” 공간에 대해 해상도 셀의 크기에 의해서 결정되는 제한된 범위의 주파수와 시간 정보만을 제공하므로 멀티스케일 함수를 해석하기 어렵다.

이러한 STFT의 단점을 보완하기 위하여 웨이브렛 변환에서는 신호를 스케일과 시간의 2차원함수로 분석하기 위한 가변적인 윈도우인 웨이브렛 기저함수(wavelet basis function)를 채택하였다. 즉 웨이브렛 변환은 신호를 웨이브렛 기저함수의 집합으로 분해한다. 이 과정에서 웨이브렛 변환에 사용되는 기저함수의 집합은 기본 웨이브렛 기저함수(mother wavelet basis function)을 시간축 방향으로 확대, 축소 및 평행 이동함으로써 구할 수 있다. 이러한 가변 윈도우를 도입한 웨이브렛 변환은 고주파수에서는 시간 분해 능이 좋고, 저주파수에서는 주파수 분해능이 좋은 특성을 나타낸다. 즉, 시간과 주파수 영역에 대해 다중분해 특성을 가지므로 기본파 성분에 대한 정보를 유지하면서 과도 성분의 정확한 위치를 검출할 수 있는 특성을 나타낸다. 이러한 웨이브렛 변환 과정에서는 원신호를 모함수에서 파생된 다양한 웨이브렛 기저함수와의 유사성을 계산한다. 따라서 웨이브렛 변환시에는 모함수를 적절히 선정함으로써 전력품질 외란 검출의 정확도를 한층 더 향상시킬 수 있으므로 적절한 모함수의 선정 과정은 필수적이다.

웨이브렛은 웨이브렛의 크기 즉 스케일을 결정하는 압축 계수(contraction coefficient)와 시간 축으로의 이동을 결정하는 전이계수(transition coefficient)로 구성된 함수의 집합체이다. 웨이브렛의 다해상도 분석 과정에서는 직교기저를 이루는 스케일 함수와 웨이브렛을 이용하여 순차적으로 하위영역으로 원신호를 사영시키는 방법이다. 이와 같은 과정을 하위 영역으로 순차적으로 확장하게 되면 원신호에 대한 두 영역에서의 공간 정보, 즉 “시간-스케일” 정보를 구할 수 있다. 이러한 다해상도 분석 과정을 통해서 원신호는 원래 신호의 정보를 그대로 유지하고 있는 근사영역(approximated space)에서의 근사계수(approximated coefficients)와 각 해상도에 해당하는 상세 영역(detail space)에서의 상세계수(detail coefficients)로 나누어진다.

전력품질 외란검출 문제에서 외란신호들은 서로 다른 많은 외란요소들을 포함하고 있다. 따라서 이러한 다해상도 분석을 사용함으로써 외란 신호는 2가지의 다른 신호, 즉 하나는 근사화된 신호, 다른 하나는 외란요소들을 포함한 상세 신호로 분해된다. 즉, 다해상도 분석을 통해 원신호로부터 외란성분을 추출할 수 있고, 개별적으로 분석할 수 있다.

최근에 웨이브렛 변환을 이용한 신호 및 영상데이터의 잡음제거에 대한 많은 방법들이 제시되어 왔으며[12], 웨이브렛 변환은 잡음제거에 있어서 효율적인 수학적 도구로 각광 받고 있다. 특히 임계처리를 이용한 잡음제거 방법은 사용하기가 간편할 뿐만 아니라 그 효과 면에서도 좋은 성능을 보인다.

본 논문에서 제안한 신호의 임계처리를 이용한 잡음제거 과정을 아래의 step 1)~step 5)에 기술하였다.

step 1) 주어진 신호를 웨이브렛 변환하여 웨이브렛 계수를 구한다.

step 2) 웨이브렛 계수에 대해 적당한 임계값을 설정하고 이

를 이용하여 임계처리 함으로서 계수의 크기를 줄이는 방법으로 원신호에 포함된 잡음을 제거한다.

- step 3) 임계처리한 웨이브렛 계수 및 근사계수에 대해 웨이브렛 역변환을 수행하여 원신호를 복원함으로써 원신호를 복원함으로서 원신호의 근사신호를 만든다.
- step 4) 근사 신호를 다시 웨이브렛 변환하여 각 레벨별로 웨이브렛 계수를 구한다.
- step 5) 각 레벨별 웨이브렛 계수를 이용하여 특정 시간대 및 특정 주파수 대역에 관하여 해석한다.

3. 웨이브렛 변환을 이용한 전력품질 외란검출

3.1 전력품질 외란

배전계통에서 전압변동 관련 전력품질 외란은 외란의 지속시간에 따라 과도현상(transients), 장시간 전압변동(long-duration voltage variations), 단시간 전압변동(short-duration voltage variations)으로 분류할 수 있다. 과도현상은 전력시스템 내의 전압 이상현상 지속시간이 0.5 사이클 미만인 경우이다. 장시간 전압 변동은 상용주파수의 전압 실효치 변동이 1분 이상 지속되는 경우로써 실효지 전압 크기가 1.1 pu 이하로 저하되는 경우인 저전압 및 무전압 상태가 1분 이상 지속되는 경우인 지속정전으로 나눌 수 있다. 단시간 전압 변동은 상용 주파수의 전압 실효치 변동 지속시간이 1분 이하인 짧은 시간동안 발생하는 경우로써, 전압의 크기에 따라 sag/dip, swell 및 interruption으로 구분할 수 있다. sag는 이상전압 지속기간이 0.5 주기에서 1분 이하의 범위를 가지며 상용 주파수 실효치 전압이 0.1~0.9 pu로 낮아지는 현상이다. swell은 이상전압 지속기간이 0.5 주기에서 1분 이하의 범위를 가지며 상용 주파수 실효치 전압이 1.1~1.8 pu로 높아지는 현상이다. interruption은 이상전압 지속기간이 1분 이하이며 상용 주파수 실효치 전압이 0.1 pu 이하로 낮아지는 현상이다.

3.2 전력품질 외란검출을 위한 웨이브렛 모함수의 선정

웨이브렛 변환을 이용한 전력품질 외란 검출에 있어 외란검출에 적합한 웨이브렛의 모함수를 선정하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 배전계통 전력품질 외란 검출에 가장 적합한 모함수를 선정하기 위하여 웨이브렛의 대표적인 모함수들을 적용하여 본 논문에서 모의한 전력품질 외란데이터를 분석한 후 각 모함수별 외란검출 성능을 상호 비교·검토하였다. 또한 외란 분석 과정에서는 원신호의 전처리 과정으로써 본 논문에서 제안한 임계처리 및 de-noising 기법을 이용하였다.

웨이브렛 모함수 선정을 위하여 PSCAD/EMTDC로 모의한 소규모 모의 계통에 대해 1선 지락, 2선 지락 및 선간단락 고장을 발생시켰다. 이때 생성된 데이터를 이용한 외란검출 과정에서, 웨이브렛 모함수인 daubechies, symlets, coiflets, biorthogonals에 대하여 각 계열별로 변경해가며 외란검출 성능을 비교하였다.

배전계통의 전력품질 외란을 검출하기 위해 모의한 소규모 모의 배전계통도는 그림 1에 나타내었으며, 예로서 1선

지락 고장에 대한 각 모함수별 웨이브렛 분석결과를 그림 2~그림 5에 나타내었다. 또한 표 1에 모함수의 변화에 따른 고장검출 성능을 비교하였다.

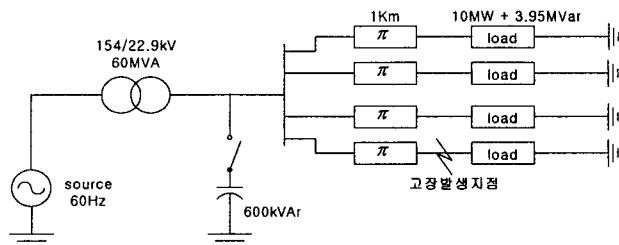


그림 1 소규모 모의 배전계통

Fig. 1 The example small-scale distribution system

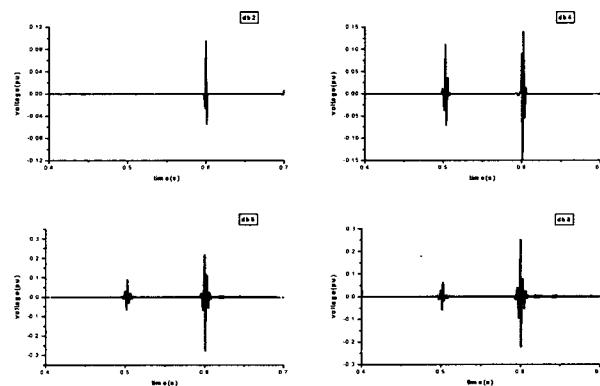


그림 2 1선 지락고장에 대한 daubechies 모함수를 이용한 외란 분석결과

Fig. 2 Wavelet analysis results with daubechies mother wavelet for single line-to-ground fault

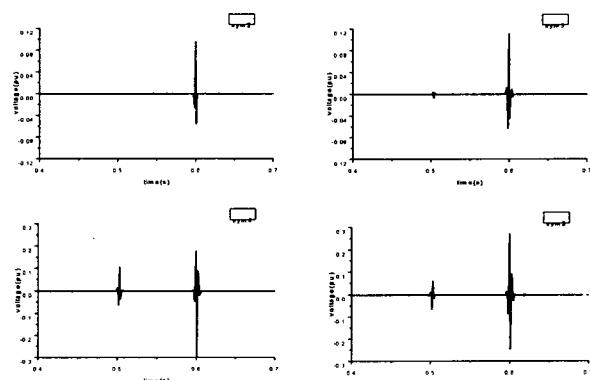


그림 3 1선 지락고장에 대한 symlets 모함수를 이용한 웨이브렛 분석결과

Fig. 3 Wavelet analysis results with symlets mother wavelet for single line-to-ground fault

표 1의 (*)표시는 해당 모함수로 외란을 분석한 결과, 외란신호에 대한 필터링 결과가 다른 모함수에 비해 비교적 우수한 성능을 나타내는 경우(외란발생시점에서 ± 0.005 초

이내에 계수값 변동이 커지는 경우)를 나타내며, (**)표시는 해당 모함수로 분석한 결과가 다른 모함수에 비해 발생하는 외란신호에 대하여 우수한 필터링 특성을 나타낼 뿐만 아니라 계수값의 크기가 다른 모함수의 분석결과보다 상당히 커서 고장 발생 시점 파악이 용이한 경우(외란발생시점의 계수값이 ± 0.065 이상인 경우)를 나타낸다. 표 1에 나타낸 것처럼 적당한 모함수의 선정여부가 외란 검출성능에 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 또한 표 1에 나타낸 바와 같이 전력품질 외란 검출성능이 우수한 모함수는 daubechies 계열에서는 db4, symlets 계열에서는 sym4, 그리고 biorthogonals 계열에서는 bior 3.1임을 확인할 수 있었다. 특히 db4는 여러 모함수 중에서 모의한 외란들에 대한 외란 검출 성능이 가장 우수한 성능을 나타낸을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 모의실험 결과를 바탕으로 db4를 배전계통 전력품질 외란 검출의 모함수로 선정하였다.

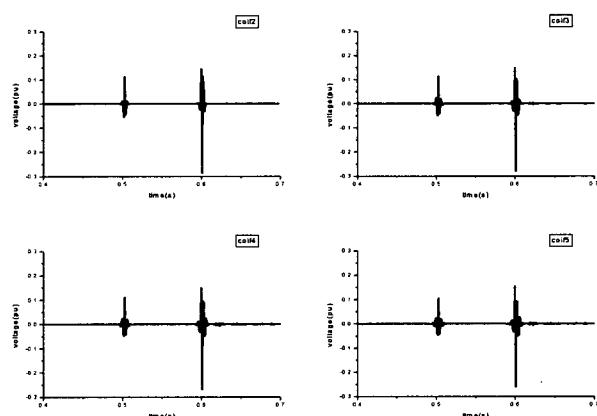


그림 4 1선 지락고장에 대한 coiflets 모함수를 이용한 웨이브렛 분석결과

Fig. 4 Wavelet analysis results with coiflets mother wavelet for single line-to-ground faults

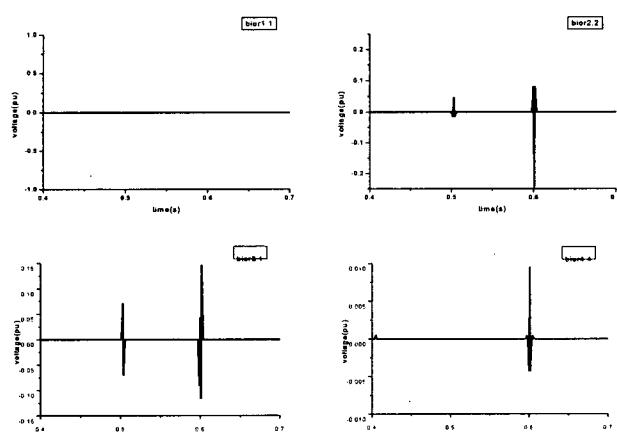


그림 5 1선 지락고장에 대한 biorthogonals 모함수를 이용한 웨이브렛 분석결과

Fig. 5 Wavelet analysis results with biorthogonals mother wavelet for single line-to-ground fault

표 1 모함수에 따른 고장검출 성능비교

Table 1 The performance of fault detection according to each mother wavelet

mother wavelet	Daubechies				Symlets				Coiflets				Biorthogonals				
계열	1	2	3	4	6	8	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
1선 지락	*	**	*	.			*	*	*	*	*	*					** *
2선 지락		*	**				*	*	*		*		*		*	*	
선간 단락		*	**	*			*	***		*	*			*		**	

4. 사례연구

본 논문에서는 분산전원이 포함되지 않은 배전 실 계통, 풍력발전 분산전원이 포함되어 있는 배전계통의 2 가지 경우에 대하여 사례연구를 수행하였다. 전절에서 구한 웨이브렛 모함수인 db4의 검출성능 테스트를 위하여 실 배전계통을 모의한 계통에서 획득한 데이터를 이용하여 모의실험을 수행하였다. 또한 태양광발전, 연료전지, 풍력발전 등과 같은 분산전원이 전력계통에 포함될 것으로 생각되므로 전력계통에 분산전원을 연계함으로써 발생할 수 있는 전력품질의 외란과 이에 대한 검출 방법을 검토하는 방안의 일환으로서 풍력발전이 포함되어 있는 모의 배전계통에 대하여 웨이브렛 변환을 적용한 외란검출을 모의하였다.

4.1 사례연구 1: 모의 배전계통 (분산전원을 포함하지 않은 경우)

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 그림 6의 분산전원이 포함되지 않은 모의 배전계통을 모델링 하여 1선 지락 고장을 발생시켜 전압 변동 지속시간이 1분 이하인 단시간 전압 변동에 해당하는 전력품질 외란인 interruption, sag, swell 현상에 해당하는 전압 파형을 획득하였다. 또한 계통 내의 커패시터를 개폐함으로써 transient 현상에 해당하는 전압 파형을 획득하였다.

일반적으로 154 kV S/S의 경우 154/22.9 kV M.Tr이 2~3 대 정도(최대 4대)가 있으며 각 M.Tr 2차측 22.9 kV 모선으로부터 3~4개 배전피더 (일반 10 MVA, 대용량 15 MVA)가 연결되어 있다. 또한 M.Tr 2차측 22.9 kV 모선의 경우는 평상시 Normal Open 상태로 운전되며, 그림 6의 모의계통은 이러한 계통구성의 일부, 즉 154 kV 모선 상위 등가계통과 M.Tr 1대, 그리고 그 이하의 배전 피더로 모의하였다. 이때 154 kV 모선 상위계통은 등가전압과 등가임피던스로 등가화 하였고, M.Tr은 154/22.9 kV 변압기, 용량 45/60 MVA, 누설임피던스 12%이며, 배전피더는 4개로 모의하였으며, 각 피더는 용량 10 MVA, CNCV 325㎹ 지중케이블, 선로길이 1 km로서 PI 등가회로로 모델링 하였다. 또한 부하는 10 MW, 3.95 MVar로 설정하였다.

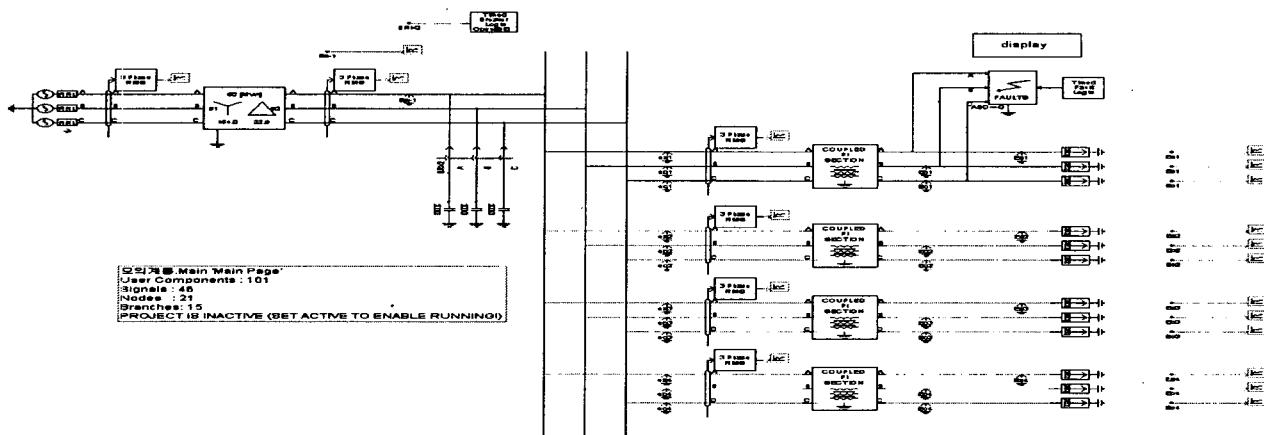


그림 6 PSCAD/EMTDC로 모의한 모의 배전계통 (분산전원이 포함되지 않은 경우)

Fig. 6 The example distribution system simulated by PSCAD/EMTDC (without distributed generators)

웨이브렛 변환을 이용한 배전계통 전력품질 외란검출 과정에서는 전절에서 고장검출 성능이 가장 우수한 특성을 보인 db4를 모함수로 선정한 후 외란파형의 웨이브렛 분석을 수행하였다. Interruption 모의에서는 1선 지락사고 발생 후 6cycle(0.1sec) 이후에 고장을 차단함으로써 해당 전압파형을 획득하였으며, 이 경우의 전압파형 및 본 논문에서 제안한 웨이브렛 변환을 통한 interruption 외란검출 결과 파형을 그림 7에 나타내었다. Interruption 모의 결과인 그림 7에서 보는 것처럼 제안한 방법이 외란발생 및 외란 소멸시간을 정확히 검출함을 확인할 수 있었다.

또한 1선 지락고장이 발생한 피더에 접속된 부하의 전압파형 및 웨이브렛 변환에 의한 외란검출 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에 나타낸 바와 같이, 1선 지락고장이 발생한 상의 전압은 고장 지속기간동안 sag현상이 지속되었으며, 다른 피더의 같은 상에서도 상전압의 sag현상이 발생함을 확인할 수 있었다. Sag 현상이 발생한 경우에도 본 논문에서 제안한 방법이 sag현상의 시작 및 소멸시점을 정확히 검출하였다.

그림 6의 모의계통에 대해 1선 지락고장을 발생시킨 경우에는 고장 피더에 접속된 부하의 건전상에서 순간적인 전압상승이 발생하였으며, 이 경우 해당 전압파형 및 웨이브렛 변환에 의한 외란검출 결과를 그림 9에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 1선 지락고장이 발생하면 1선 지락이 발생하지 않은 상의 상전압은 고장지속 기간동안 swell 현상이 지속됨을 확인할 수 있었고, 다른 피더의 동일한 상에서도 상전압의 swell 현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 상전압의 swell 현상이 발생한 경우에도 그림 9에 나타낸 바와 같이 swell 현상의 시작 및 소멸시점을 정확히 검출함을 확인하였다.

그림 10은 커패시터의 개폐시 발생한 전압파형 및 웨이브렛 변환에 의한 외란파형 분석 결과를 나타내었다. 커패시터의 개폐시간을 0.3 ~ 0.31s로 모의하여 transient 현상을 발생시켰으며, 그림 10에 나타낸 바와 같이 제안한 방법이 transient현상을 정확히 검출함을 확인하였다.

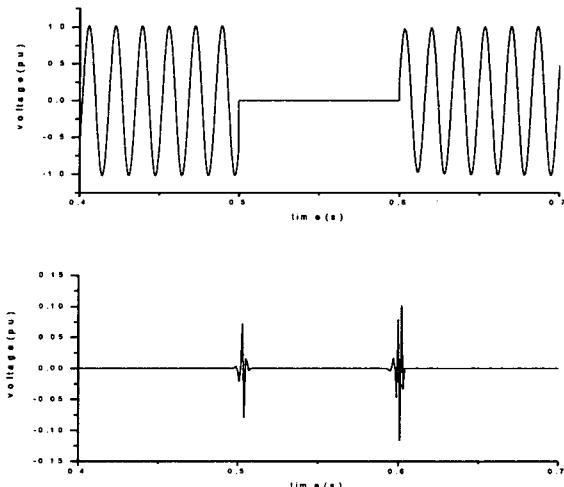


그림 7 Interruption 전압파형 및 웨이브렛 검출파형

Fig. 7 Voltage waveform of interruption and detection results using wavelet transform

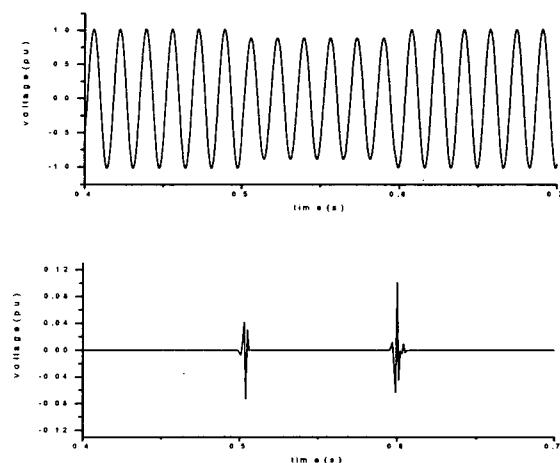


그림 8 Sag 전압파형 및 웨이브렛 검출파형

Fig. 8 Voltage waveform of sag and detection results using wavelet transform

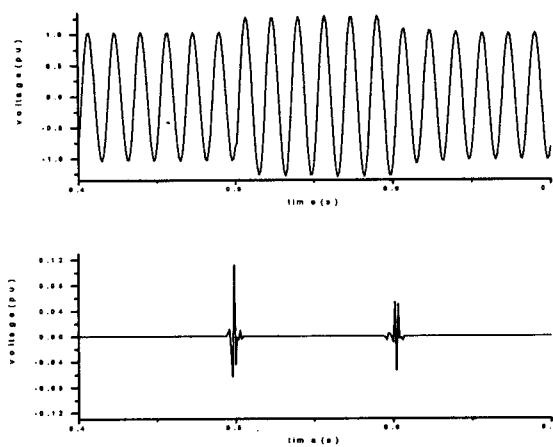


그림 9 Swell 전압파형 및 웨이브렛 검출파형

Fig. 9 Voltage waveform of swell and detection results using wavelet transform

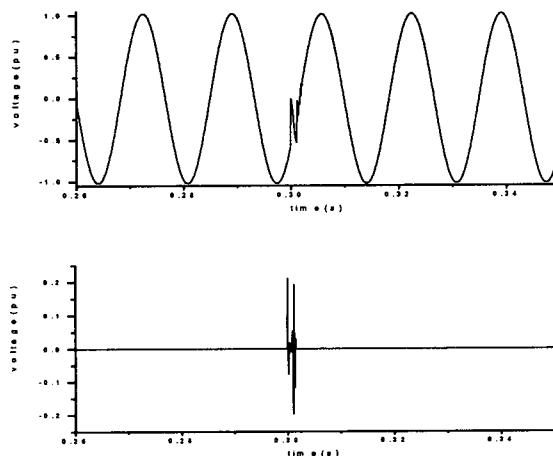


그림 10 Transient 전압파형 및 웨이브렛 검출파형

Fig. 10 Voltage waveform of transient and detection results using wavelet transform

4.2 사례연구 2: 모의 배전계통(분산전원이 포함된 경우)

최근에는 분산전원이 전력계통과 활발히 연계되고 있는 추세이므로 전력계통에 분산전원을 연계함으로써 발생할 수 있는 전력품질의 외란에 대한 검출 및 방지책을 수립함으로써 적정한 수준의 전력품질을 유지할 수 있도록 미리 대비책을 마련해야 한다. 따라서 본 논문에서는 배전계통을 포함한 전체 한전계통을 단순히 등가전원으로 등가화하였고, 또한 풍력발전기를 모델링 한 모듈, 컨버터 모듈, 그리고 변환용 변압기를 통하여 계통에 연계하는 모듈로 모의 계통을 구성하였으며 이를 그림 11에 나타내었다. 따라서 연계계통을 단순한 등가전원으로 모의한 테스트 계통에 대하여 사례 연구 1과 동일한 방법으로 interruption, sag, swell 및 transient를 발생시켰고, 본 논문에서 제안한 방법으로 외란 검출 성능을 평가하였다.

분산전원이 포함된 모의 배전계통에 대해 sag 및 swell 현상을 모의할 때, 사이리스터와 A/D converter 등으로 인한

여러 잡음 요소들이 첨가되었으며, 이를 본 논문에서 제안한 외란파형 분석 과정에서 임계처리 및 de-noising을 통해 해당 외란신호내의 잡음을 제거한 후 웨이브렛 분석을 행하였다.

Interruption 모의에서는 1선 지락사고 발생 후 6cycle 이후에 고장을 차단함으로써 해당 전압파형을 획득하였으며, 이 경우의 전압파형 및 본 논문에서 제안한 웨이브렛 변환을 통한 interruption 외란검출 결과 파형을 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 보는 것처럼 전압파형은 분산전원의 영향으로 인하여 사례연구 1과 같이 고장직후 0으로 바로 바뀌지 않음을 알 수 있다. 이러한 경우에서도 제안한 방법이 외란발생 및 외란 소멸시간을 정확히 검출하였다.

Sag 현상의 모의를 위해 부하량을 600 kW에서 0.1~0.2초 사이 동안 1200 kW로 증가시켰다. 그림 13에서는 이 경우의 sag 현상이 발생한 전압파형 및 웨이브렛 변환에 의한 외란파형 분석 결과를 나타내었다. 그림 13에 나타낸 바와 같이, 제안한 방법이 sag 현상의 시작 및 소멸시점을 정확히 검출함을 확인하였다.

또한, swell 현상을 모의하기 위해 부하량을 1200[kW]에서 0.1~0.2초 사이 동안 600[kW]로 감소시켰다. 그림 14에서는 부하를 감소시킴으로써 swell 현상이 발생한 부하단의 전압파형과 검출 결과를 나타내었다. 그림 14에 나타낸 바와 같이, 제안한 방법이 swell 현상의 시작 및 소멸시점을 정확히 검출하였다.

Transient 현상을 관찰하기 위하여 모의계통의 커패시터를 개폐할 때 전압파형을 측정하였고 이 전압파형을 이용하여 웨이브렛 변환으로 외란파형 분석을 하였다. 커패시터의 개폐시간은 0.5 ~ 0.51s로 모의하였고, 그림 15에 나타낸 바와 같이 제안한 방법이 transient 현상을 정확히 검출함을 확인하였다.

그러나 사례연구 1 및 2에서 보는 것처럼 웨이브렛 검출파형만으로는 interruption, sag, swell 및 transient를 구별하기가 어려움을 알 수 있다. 이는 오히려 원래의 전압파형을 분석하는 것이 각각의 외란들을 identification하는데 더 유리할 것으로 사료된다.

5. 결 론

웨이브렛 변환은 웨이브렛 기저함수의 확대, 축소 및 이동 과정을 통해 얻어진 가변 윈도우를 사용하여 원 신호를 단계별로 분해함으로써 특정 시간대 및 특정 주파수 대역에 관하여 신호를 해석할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 시간-주파수 분해능이 뛰어난 개선된 웨이브렛 변환을 이용한 배전계통의 전력 품질 외란검출 방안을 개발하였다. 이때 적절한 모함수 선정 방법과 원신호에 대한 전처리 과정인 임계처리 및 잡음제거 과정인 de-noising을 통하여 전력품질 외란 검출성능을 개선하였다. 웨이브렛 변환의 모함수 선정을 위하여 PSCAD/EMTDC로 모의한 소규모 배전계통에 대해 1선 지락, 2선 지락 및 선간단락고장을 모의하여 각 모함수의 외란검출 성능을 평가하였다. 그 결과 여러 모함수 중에서 전력품질 외란 검출 문제에 가장 적합한 모함수가 db4임을 확인하였고, 이를 배전계통 전력품질 외란 검출의 모함수로 선정하였다.

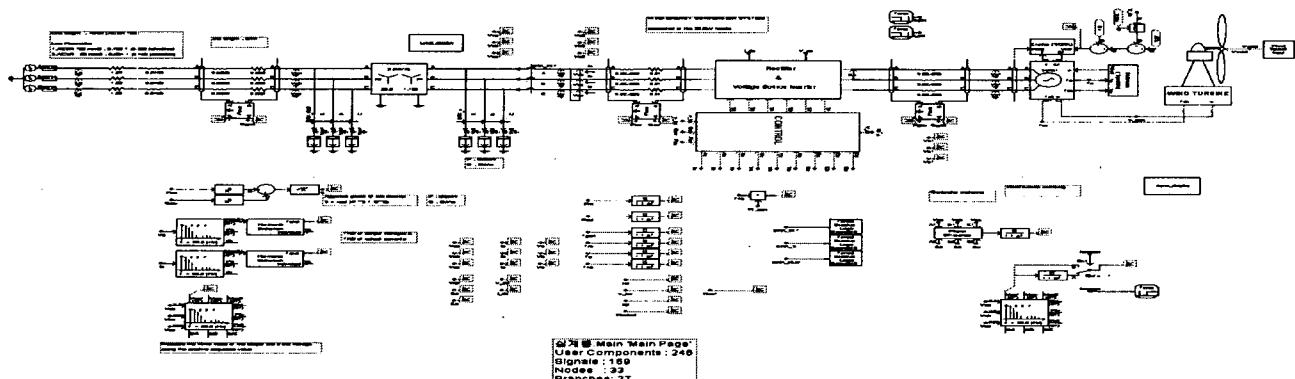


그림 11 PSCAD/EMTDC로 모의한 모의 배전계통 (분산전원이 포함된 경우)

Fig. 11 The example distribution system simulated by PSCAD/EMTDC (with distributed generators)

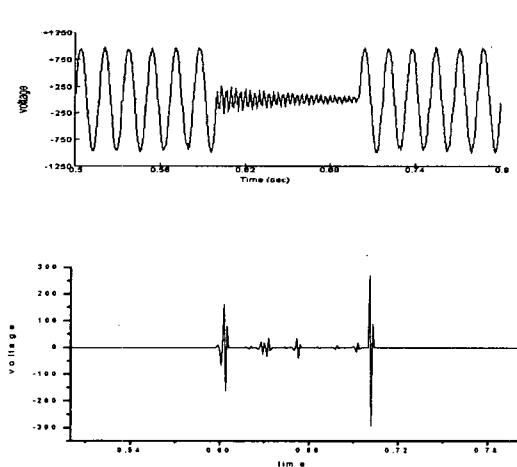


그림 12 Interruption에 따른 전압파형 및 interruption 검출파형

Fig. 12 Voltage waveform and interruption detection results

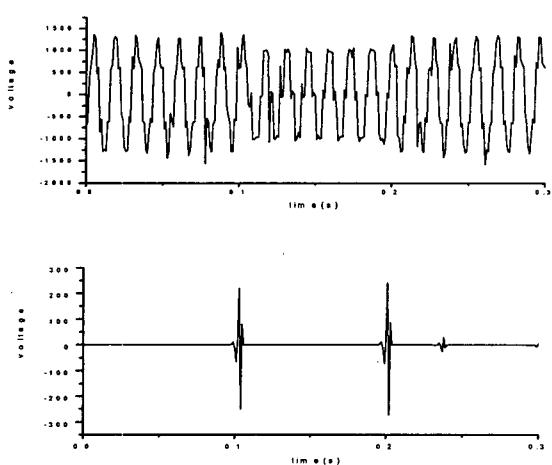


그림 13 부하량 증가에 따른 전압파형 및 sag 검출파형

Fig. 13 Voltage waveform and sag detection results in load increasing

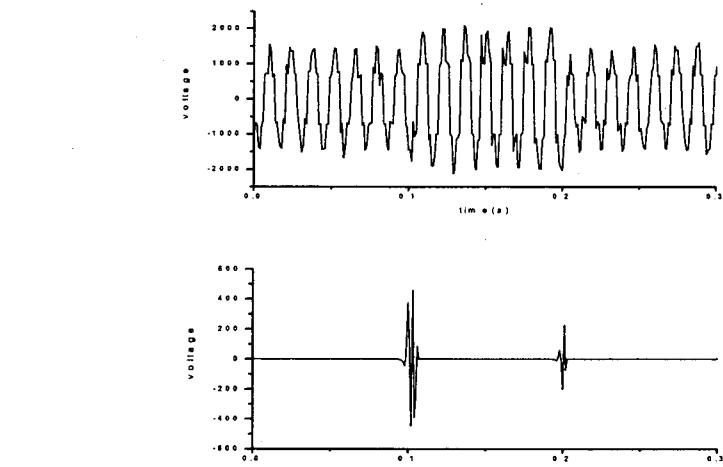


그림 14 부하량 감소에 따른 전압파형 및 swell 검출파형

Fig. 14 Voltage waveform and swell detection results in load decreasing

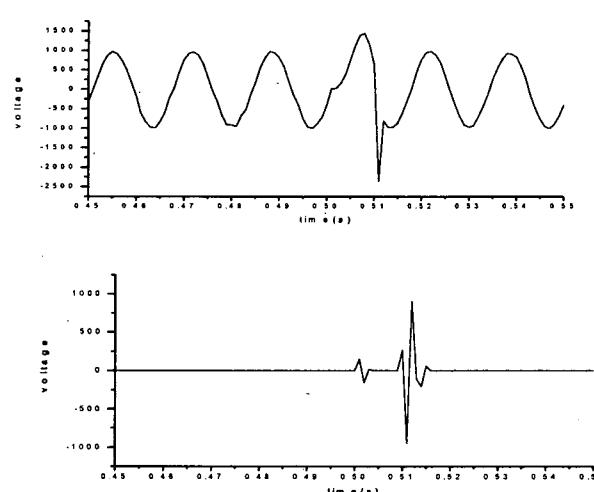


그림 15 부하량 감소에 따른 전압파형 및 swell 검출파형

Fig. 15 Voltage waveform and swell detection results in load decreasing

제안한 방법의 유용성을 보이기 위하여 분산전원이 포함되지 않은 모의계통에 대하여 1선 지락고장, 커패시터 개폐, 부하변동 등을 통해 interruption, sag, swell, transient의 전력계통 외란현상을 임의로 발생시킨 후 제안한 방법을 이용해 이를 검출함으로써 개발한 방법의 외란검출 성능을 분석하였다. 또한 분산전원이 포함된 모의 계통에 대해서도 부하를 변동시킴으로써 전압파형의 sag와 swell을 발생시킨 후 제안한 방법의 외란 검출 성능을 평가하였다. 이때 외란파형 분석 과정에서 임계처리 및 de-noising을 이용하여 발생외란신호를 전처리함으로써 외란 검출 성능을 향상시켰다.

향후 과제로는 배전계통에서 발생하는 다양한 외란들에 대해 제안한 방법의 유용성을 좀더 검토해볼 필요가 있으며, 이를 토대로 실 계통에 적용하기 위한 전력품질 외란 검출 시스템의 구축이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제(R-2002-B-044)임.

참 고 문 헌

- [1] J. Stone and A. Collinson, "Power Quality," Power Engineering Journal, pp. 58-64, April 2001.
- [2] "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality", IEEE Standard, pp. 1159-1995, November 1995.
- [3] O. Poisson, P. Rioual and M. Meunier, "Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1039-1044, July 2000.
- [4] W. A. Wilkinson and M. D. Cox, "Discrete wavelet analysis of power system transients", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 2038-2044, November 1996.
- [5] C. Parameswaran and M. Cox, "Frequency characteristics of wavelets", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, no. 3, pp. 800-804, July 2002.
- [6] A. Graps, "An introduction to wavelets", IEEE Computational Science and Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 50-61, 1995.
- [7] Chul Hwan Kim and Rag Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. I. General introduction to the wavelet transforms", Power Engineering Journal, pp. 81-87, April 2000.
- [8] Chul Hwan Kim and Rag Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. II. Examples of application to actual power system transients", Power Engineering Journal, pp. 193-202, August 2001.
- [9] 김칠환, 고영훈, "웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag

검출", 대한전기학회 논문지, 제 49권 제 9호, pp. 425-432, 2000.

- [10] A.M. Gaouda, S.H. Kanoun, M.M.A. Salama, A.Y. Chikhani, "Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 149, pp. 310-318, 2002.
- [11] Hong-Tzer Yang and Chiung-Chou Liao, "A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 16, no. 3, pp. 353-360, July 2001.
- [12] A. Chambolle, R. A. Devore, N. Lee and B. J. Lucier, "Nonlinear wavelet image processing : variational problems, compression, and noise removal through wavelet shrinkage", IEEE Trans. on Image Processing, vol. 7, no. 3, pp. 319-335, March 1998.

저 자 소 개



손 영 락 (孫 永 洛)

1977년 1월 10일생. 2003년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 삼성전기 부산사업장 기판사업부 FCBGA기술그룹(주임).

Tel : 051) 970-8027
Fax : 051) 970-8000
E-mail : yr.son@samsung.com



이 화 석 (李 和 錫)

1966년 7월 10일생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 거제대학 전기과 부교수.

Tel : 055) 680-1604
Fax : 055) 681-3993
E-mail : hslee@.koje.ac.kr



문 경 준 (文 景 俊)

1972년 10월 25일생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국원자력연구소 양성자 기반공학기술개발사업단 post-doc.

Tel : 042) 868-4663
Fax : 042) 868-8131
E-mail : kjmun@kaeri.ac.kr



박 준 호 (朴俊灝)

1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1978~1981년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.
Tel : 051) 510-2370
Fax : 051) 513-0212
E-mail : parkjh@pusan.ac.kr



윤재영 (尹在暎)

1962년 7월 30일생. 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 기술사(발송배전). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템 연구그룹장(책임연구원).
Tel : 055-280-1316
Fax : 055-280-1390
E-mail : jyoon@keri.re.kr



김종우 (金鍾律)

1974년 7월 6일생. 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템 연구그룹(선임연구원).
Tel : 055-280-1336
Fax : 055-280-1390
E-mail : jykim@keri.re.kr



김슬기 (金슬기)

1972년 5월 7일생. 1998년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000~현재 한국전기연구원 전력연구단 신재생에너지전원 연구그룹(선임연구원).
Tel : 055-280-1332
Fax : 055-280-1390
E-mail: blksheep@keri.re.kr