

## 분산전원 모의를 위한 시뮬레이터 개발

전진홍\*, 김슬기\*\*, 안종보\*, 김응상\*\*

\*한국전기연구원 산업전기연구단, \*\*한국전기연구원 전력연구단

### Development of a Simulator for Distributed Generations

JinHong JEON\*, SeulKi KIM\*\*, JongBo AHN\*, EungSang KIM\*\*

\* Industry Applications Research Laboratory, Korea Electrotechnology Research Institute

\*\* Electric Power Research Laboratory, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 분산전원 계통을 모의하기 위한 시뮬레이터의 설계와 시험에 대한 내용을 제시하고자 한다. 제시하고자 하는 시뮬레이터는 RTDS(Real Time Digital Simulator)와 전력 증폭기(power amplifier)로 구성된다. RTDS 부분은 분산전원이 적용되는 계통의 모의와 분산전원의 전원부 모의를 위해 사용되며 전력 증폭기는 RTDS에 의해 모의된 전력 계통의 모션 전압 출력과 분산전원 전원부의 전압 출력을 증폭하기 위하여 사용된다. 시뮬레이터 구성을 위해 사용되는 RTDS의 구성과 제작된 전력 증폭기의 사양과 동작시험에 대한 결과를 제시하고자 한다. 개발된 시뮬레이터는 분산전원의 동적 및 정적 성능 평가를 위한 시험 시스템 개발에 적용될 수 있다.

적용될 수 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 분산전원의 모의

실제 분산 전원시스템은 분산전원 에너지원과 이를 계통에 연계하기 위한 계통연계모듈인 PCS로 구성된다. 이 중 분산전원 에너지원은 그 특성상 임의의 자연 조건을 재현하기가 불가능하므로 이를 RTDS에서 사용가능한 모델로 모델링하여 임의의 환경 조건을 모의하여 전원의 특성에 따른 PCS의 동작을 시험할 수 있도록 하는 시뮬레이터를 구성하는 것이 본 연구의 목적이다. 따라서 본 연구에서는 분산전원의 에너지원의 모델을 개발하고 개발된 모델을 RTDS 모델로 구현한 후 이를 실제 전력 수준으로 구현하기 위해 전력 증폭기를 RTDS와 연계하여 에너지원의 동작을 모의하는 연구를 진행하고 있다<sup>[1]</sup>. 즉 분산전원의 에너지원은 수학적 모델을 이용하고 구현된 모델을 RTDS에서 실시간으로 모의한다. 모의된 결과는 RTDS에 연결되어 있는 전력 증폭기의 입력에 반영되어 실제 분산전원 에너지원이 동작하는 것과 같은 수준의 전압과 전류가 발생되게 된다. 이러한 모의 과정이 모두 실시간으로 이루어지게 되므로 PCS의 관점에서는 실제 분산전원이 연계되어 있는 것과 같은 효과를 얻을 수 있게 된다. 전체 시스템에 대한 구성을 간략히 나타내면 그림 1과 같다.

## 1. 서 론

풍력, 태양광, 연료전지 시스템과 같은 분산전원 시스템의 전원 모듈은 온도, 습도, 일사량, 풍속, 풍향 등의 외부 자연 환경에 의해 시스템의 상태가 결정되는 시스템이다. 이러한 시스템의 동작 특성을 검토하기 위해서는 특정 조건에 해당하는 외부 환경 상태를 설정하여 주어야 한다. 온도, 습도, 일사량, 풍속, 풍향과 같은 외부 환경을 임의로 설정하기 위해서는 시험대상이 되는 시스템을 포함할 수 있는 크기와 충분한 에너지 용량을 가지는 테스트 베드나 체임버를 설계, 제작해야 한다. 이러한 시험 설비를 수십kW에서 수백kW, 심지어 수 MW에 이르는 대체 에너지 전원 시스템의 시험을 위해서 제작한다면 이는 천문학적인 비용을 수반하게 된다<sup>[1-4]</sup>. 대체 에너지 전원의 기계적이나 물성적인 평가를 위해서는 위에서 제시한 시험 설비가 필요하겠지만 대체 에너지 전원의 전기적인 특성 평가를 위해서는 위와 같은 시험 설비를 이용하지 않는 다른 방법을 사용이 가능하다<sup>[1]</sup>. 시스템의 전기적인 상태는 위의 물리, 화학적인 상태 변화보다 매우 빠르므로 전원의 수학적 근사 모델을 이용하여 전기적인 특성 평가가 가능하다<sup>[2][3]</sup>. 시스템의 상태에 따른 전기적인 특성 방정식에 의한 전원 상태에 해당하는 수학적 근사 모델을 실시간으로 모의하여 출력 특성을 실제 시스템과 유사하게 반영하는 방법을 이용하여 실제 전원이 특정 환경에서 동작하는 것과 같은 효과를 재현할 수 있다<sup>[1][2]</sup>.

본 논문에서는 분산전원 계통을 모의하기 위한 시뮬레이터의 설계와 시험에 대한 내용을 제시하고자 한다. 제시하고자 하는 시뮬레이터는 RTDS와 전력 증폭기로 구성된다. RTDS 부분은 분산전원이 적용되는 계통의 모의와 분산전원의 전원부 모의를 위해 사용되며 전력 증폭기는 RTDS에 의해 모의된 전력 계통의 모션 전압 출력과 분산전원 전원부의 전압 출력을 증폭하기 위하여 사용된다. 시뮬레이터 구성을 위해 사용되는 RTDS의 구성과 제작된 전력 증폭기의 사양과 동작시험에 대한 결과를 제시하고자 한다. 개발된 시뮬레이터는 분산전원의 동적 및 정적 성능 평가를 위한 시험 시스템 개발에

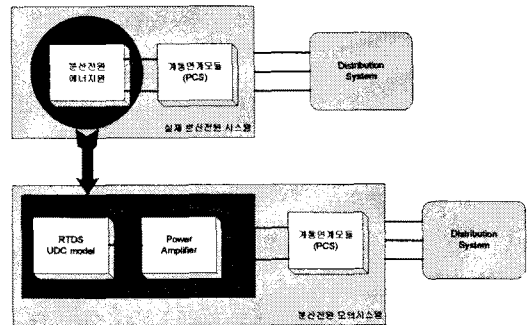


그림 1 분산 전원 모의를 위한 전체 시스템 개념도

### 2.2 분산전원 모의를 위한 RTDS 시스템 구성

그림 1에서 나타난 분산전원 모의를 위한 전체 시스템에서 RTDS는 분산전원 에너지원을 실시간으로 모의하는 기능을 하여야 한다. 따라서 이를 RTDS 시스템 중심으로 다시 고려하면 분산전원의 모델링과 실시간 모의는 UDC(user define component)로 구현된 모델의 아날로그 시뮬레이터와의 연계 운전으로 정의할 수 있으며 이를 위한 시스템 구성은 그림 2와 같다.

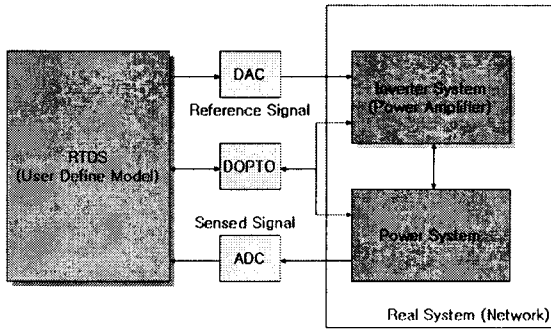


그림 2 RTDS 관점에서 고려된 시뮬레이터의 구성

그림 2에서 제시한 시스템 구성을 위해 필요한 사항들을 고려하여 현재 rack 2에 3PC card를 이용하여 실험을 위한 rack을 구성하였다. RTDS 시스템 구성에 필요한 모듈과 구성된 모습은 다음과 같다.

- RTDS 시스템 구성에 필요한 모듈
  - ✓ WIF card (O/S version 3.0088 이상) × 1
  - ✓ IRC card × 1
  - ✓ 3PC card with optic port × 4개 이상 ; 외부 interface
  - ✓ dual 3PC card × 1 개 이상 ; network solution card
  - ✓ DDAC16 card × 2 ; DA card
  - ✓ ODAC16 card × 2 ; AD card
  - ✓ 3PC card with DOPTO card × 1 ; digital I/O card
  - ✓ DOPTO Connector Card × 1 ; digital input interface
  - ✓ DOPTO Output Card × 1 ; digital output interface

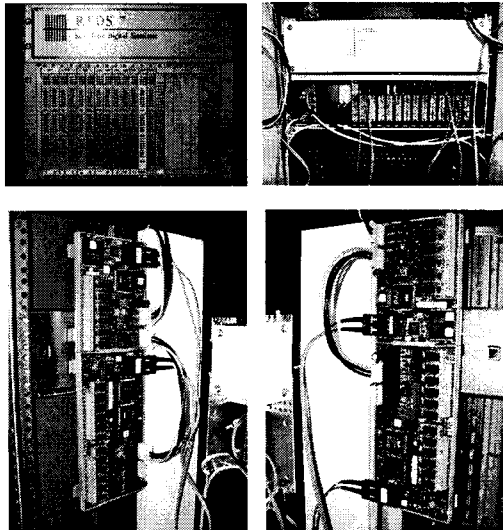


그림 3 RTDS 시뮬레이터의 구성

### 2.3 전력 증폭기의 설계

전력 증폭기는 RTDS에서 만들어진 신호를 실제 에너지를 가지는 전압 및 전류 파형을 만들어내는 기능을 한다. 따라서 필요한 에너지를 만들어 내기 위한 전원부와 입력 파형을 발생시키는 신호 구형 부분으로 구성하였으

며 이 두 부분은 dc link로 연결되어 있다. 전력 증폭기의 제어기는 시스템이 적절한 에너지를 발생시킬 수 있도록 하는 기능과 입력된 신호를 적절한 크기의 전압이나 전류로 발생시키는 기능을 한다. 시스템 전체의 구성은 그림 4와 같다.

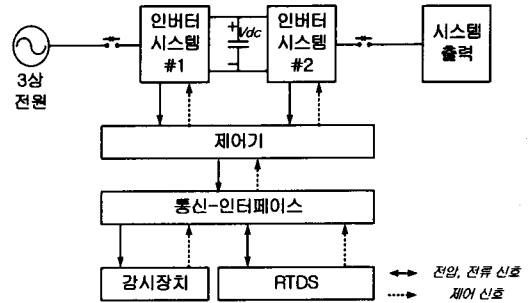


그림 4 전력 증폭기 구성도

전력 증폭기는 분산 전원의 전원 기능과 배전 전원 기능을 하도록 설계하였다. 분산 전원은 출력 전압 특성에 따라 직류형과 교류형으로 구분할 수 있으며 따라서 전력 증폭기도 직류 전압 출력을 발생하는 장치와 교류 출력을 발생하는 장치의 두 가지 유형으로 설계, 제작하였다. 제작된 전력 증폭기의 사진과 주요 사양을 살펴보면 다음과 같다.

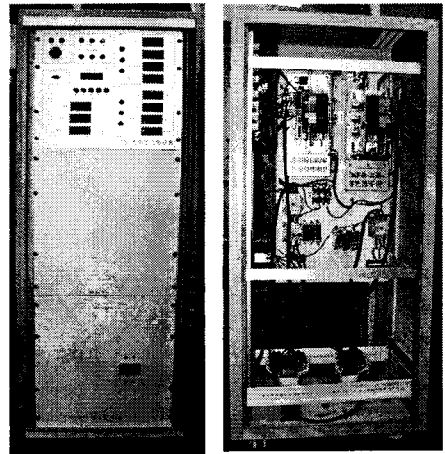


그림 5 제작된 전력 증폭기

- 제어 방식
  - ✓ 전원 회생 기능을 갖는 PWM 제어
  - ✓ RTDS 입력 신호를 추종하는 출력 전압 제어
  - ✓ 입력 측 역률 제어
  - ✓ 각 상 독립 출력이 가능할 것
- 정격 입력 전압 및 허용 변동 범위 : 교류 실효치  $380V \pm 10\%$
- 정격 입력 전압의 주파수 및 허용 변동 범위 :  $60Hz \pm 5\%$
- 입력 역률 : 정격 부하 시 0.95 이상
- 입력 전류의 왜형률 : 5% 이내
- 정격 출력 전압 : 3상 380V 각 상 독립운전 가능할 것
- 출력 전압 응답 속도 : 최대 600Hz
- 정격 출력 용량 : 50kVA
- 출력 전압 및 전류 고조파 : 정격에서 THD 1% 이하

- 과부하 내량 : 정격 출력 전류의 120%, 1분(반한시 특성)
- 사용 스위칭 소자 : IGBT

## 2.4 전압 변화에 따른 과도상태 응답 실험

이상적으로 전력 증폭기는 RTDS의 출력 신호의 변화에 동일한 출력을 발생시켜야 하지만 실제로 물리적인 특성상 이러한 응답특성을 가지는 것은 불가능하다. 따라서 제작된 시스템의 출력 특성을 파악하고 가능한 출력 특성을 만족 시키는 범위 안에서 시스템의 동작이 이루어질 수 있도록 운전하는 것이 중요하다. 이를 위해서 교류 신호의 3가지 파라미터인 크기, 위상, 주파수에 대한 과도상태 응답특성을 검토하기 위한 실험을 하였으며 그 중 위상 변화에 대한 실험 결과를 정리하여 제시하고자 한다. 각 실험에 대한 RTDS 시뮬레이션 파일과 출력, 오실로스코프를 이용한 전력 증폭기의 출력 신호 관찰을 통해 제작된 전력 증폭기의 성능을 파악하였으며 실험 결과를 통해 부족한 부분을 검토하여 성능 개선 연구가 진행 중에 있다.

### 2.4.1 위상 변화(0° > 180°)에 대한 실험 결과

전원의 위상을 0°에서 180°로 스텝으로 변화하여 전압 기준신호에 대한 전력 증폭기의 응답 특성을 관찰하였다. 이 때 전원 전압의 기준 신호는 상전압 220V, 주파수는 60Hz를 기준으로 하였다. 기준 신호의 스텝 변화에 대한 RTDS의 출력을 각각 runtime 모듈과 오실로스코프로 관찰하여 그림 6과 그림 7에 제시하였다. 제시한 결과에 나타난 바와 같이 전력 증폭기에 기준으로 인가되는 기준 전압 신호는 스텝으로 변화하고 있음을 확인할 수 있었다.

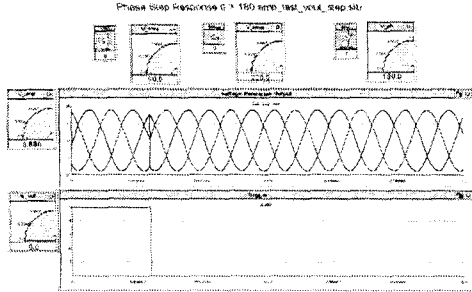


그림 6 runtime 출력 결과 (위상 0° ⇒ 180°)

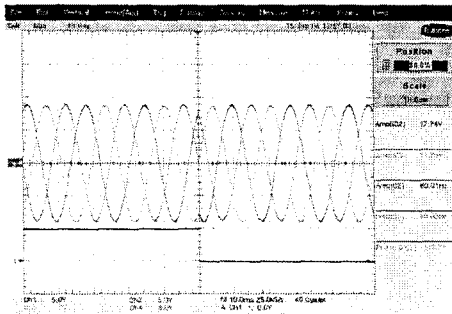


그림 7 전력 증폭기 기준 전압 신호 (위상 0° ⇒ 180°)

기준 전압 신호의 스텝 변화에 대한 전력 증폭기의 출력 특성은 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 그림 9는 그림 8의 결과 중 스텝 변화 부분의 과도 상태를 정밀하게 보기 위하여 확대한 파형이다. 전력 증폭기 실험을

위해서 20kW의 부하 모듈을 연결하였으며 그림 8과 그림 9에는 기준 전압 신호와 출력 전압 신호, 출력 전류와 트리거 신호를 나타내었다.

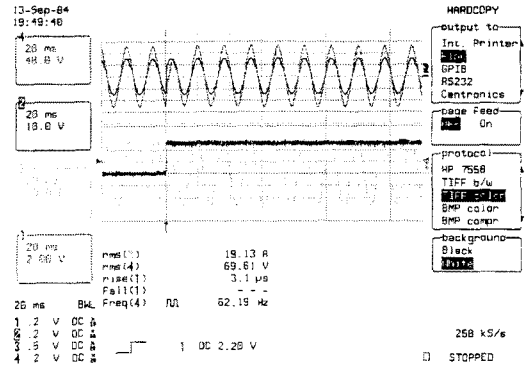


그림 8 전력 증폭기 출력 결과시스템 응답 (위상 0° ⇒ 180°)

- 위상 변화가 발생한 지점이 A상 전압의 negative peak 부분이어서 시스템의 성능을 자세히 볼 수 있음, 출력 전압 기준 신호를 반전 시켰으므로 실제 전압 신호는 negative peak에서 positive peak로 step 입력을 준 것과 같은 효과를 나타냄
- 1/4 주기 이내에 출력 신호가 입력 신호를 추종하고 있는 것을 관찰할 수 있음

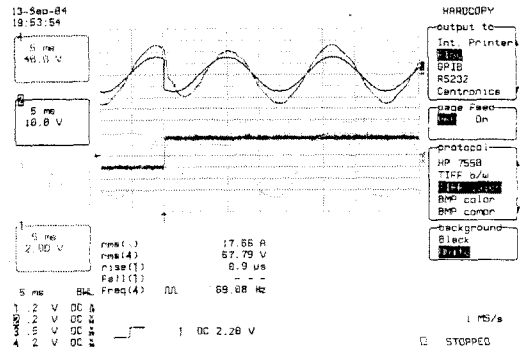


그림 9 그림 8에서 과도 상태 부분 확대

- 변화 부분을 자세히 관찰하기 위하여 다시 실험한 결과
- 위상 변화가 발생한 지점이 A상 전압의 positive peak 부분이어서 시스템의 성능을 자세히 볼 수 있음, 출력 전압 기준 신호를 반전 시켰으므로 실제 전압 신호는 positive peak에서 negative peak로 step 입력을 준 것과 같은 효과를 나타냄
- 1/2 주기 이내에 출력 신호가 입력 신호를 추종하고 있는 것을 관찰할 수 있음

### 2.5 비정상 전압에 대한 정상상태 응답특성 검토

2.4절에서는 전압의 변화에 따른 전력 증폭기의 과도상태 응답특성을 검토하였다. 이는 시스템의 상태변화에 따른 전력 증폭기의 응답 특성을 검토한 것이며 위의 실험 결과를 통해 상태의 변화에 따른 전력 증폭기의 응답 특성을 고찰하였다. 본 절에서는 전력 시스템의 비정상 상태, 즉 사고 파형과 같은 단일 주파수의 전압 신호가 아닌 여러 가지 비정상 요소들이 포함되어 있는 기준 신호에 대한 전력 증폭기의 정상상태 응답특성을 검토하고자 한다. 이를 위하여 dc offset 인가에 따른 전력 증폭

기의 응답 특성, 고조파 포함에 따른 증폭기 응답 특성, 불평형 입력 전압에 대한 응답 특성에 대한 실험을 하였으며 그 중에서 dc offset 전압의 인가에 따른 실험 결과를 제시하고자 한다. 각 실험에 대한 RTDS 시뮬레이션 파일과 출력, 오실로스코프를 이용한 전력 증폭기의 출력 신호 관찰을 통해 제작된 전력 증폭기의 성능을 파악하였으며 실험 결과를 통해 부족한 부분을 검토하여 성능 개선 연구가 진행 중에 있다.

### 2.5.1 DC Offset 전압 인가에 대한 실험 결과

지락 및 단락 사고 시에 발생하는 사고 전압의 경우 일반적으로 임의의 상에 DC offset 전압이 인가되어 있는 형태의 전압이 발생하게 된다. 따라서 이러한 전압을 모의하기 위해서는 전력 증폭기의 출력에 일정 정도의 DC offset 출력 전압 인가가 가능해야 한다. 이를 시험하기 위해 83.33ms(60Hz 기준 5주기)의 시정수를 가지는 DC offset 파형을 전압 기준 신호에 인가하여 전력 증폭기의 성능을 확인하였다. 그림 10은 실험을 위해 작성된 RTDS의 draft file이며 그림 11을 RTDS의 동작에 따른 결과를 runtime 모듈에서 관찰한 결과이다. 실험에서 dc offset은 A상에 90° 위치에서 100V 크기로 인가되었으며 증폭기 출력의 최대값 문제로 인해 전원의 전압은 0.8p.u.(선간전압 300V)로 운전하였다. 이때, 전력 증폭기는 20kW의 저항부하에 연결하여 실험하였다.

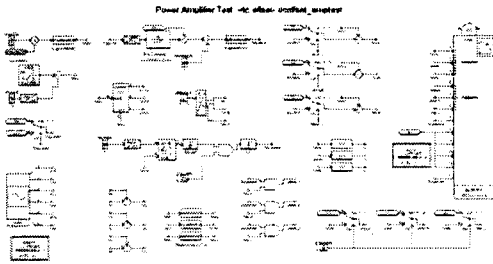


그림 10 DC offset 인가 실험을 위한 draft file

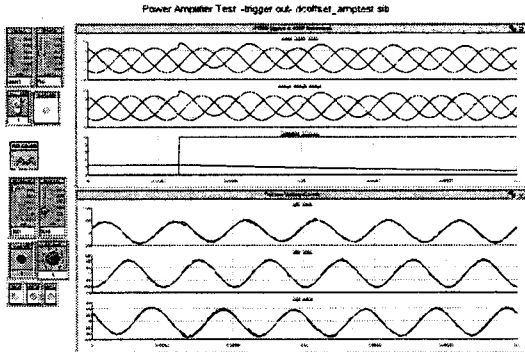


그림 11 RTDS runtime 출력(DC offset)

그림 12는 전력 증폭기의 출력 전압 제어를 위한 기준 전압 신호를 나타내며 그림 13은 전력 증폭기의 출력 전압과 전류를 오실로스코프로 관찰한 결과이다. 전력 증폭기에서 발생되고 있는 dc offset은 약간의 시지연이 존재하지만 원하는 크기의 dc offset을 충실히 출력에 반영하고 있음을 그림 13의 출력 결과를 통해 확인이 가능하며 여기서 발생하는 시지연은 시스템 물리적 특성에 기인하는 것으로 이는 향후 여러 시험에서 고려해야 할 사항으로 생각된다.

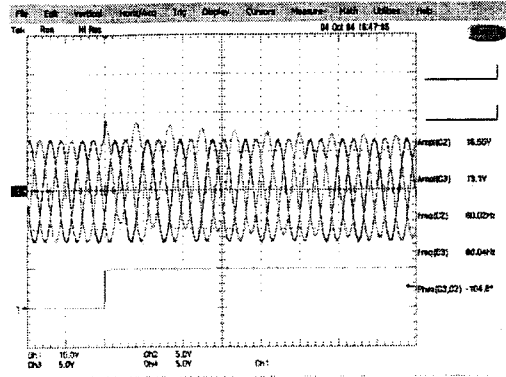


그림 12 전력 증폭기 기준 전압 신호(DC offset)

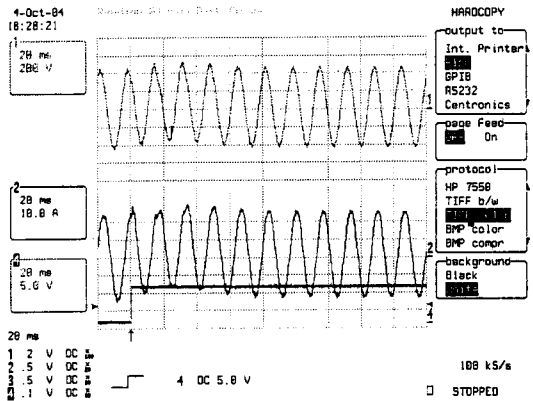


그림 13 DC offset 시험 결과(AMP 출력)

## 3. 결론

본 논문에서는 분산전원 계통을 모의하기 위한 시뮬레이터의 설계와 시험에 대한 내용을 제시하였다. 제시하고자 하는 시뮬레이터는 RTDS와 전력 증폭기로 구성되어 있다. RTDS 부분은 분산전원이 적용되는 계통의 모의와 분산전원의 전원부 모의를 위해 사용되며 전력 증폭기는 RTDS에 의해 모의된 전력 계통의 모션 전압 출력과 분산전원 전원부의 전압 출력을 증폭하기 위하여 사용하였다. 시뮬레이터 구성을 위해 사용되는 RTDS의 구성과 제작된 전력 증폭기의 사양과 동작시험에 대한 결과를 제시하고자 하였다. 개발된 시뮬레이터는 분산전원의 동적 및 정적 성능 평가를 위한 시험 시스템 개발에 적용될 수 있다. 향후 연구에서는 제작된 시뮬레이터의 기능의 수정 보완이 이루어질 예정이며 각 분산전원에 대한 모델의 개발과 RTDS를 이용한 시험 관련 연구가 진행될 예정이다.

### [참고 문헌]

1. 한국전기연구원, 신재생에너지 전원의 계통연계 시험을 위한 다이나믹 시험 모듈 개발, 1차년도 보고서, 2004년 10월
2. RTDS Technology, Real Time Digital Simulator, Hardware Manual, 2001년 6월
3. Neville Watson and Jos Arrillaga, Power Systems electromagnetic transients simulation, IEE, 2003년
4. NREL, Hardware Development of a Laboratory-Scale Microgrid, 2002년 11월