

# EMTP를 이용한 저압 DC 배전시스템 해석

김창환<영남대학교 석사과정> · 박건우<(주)케이디파워 책임연구원> · 이상봉<영남대학교 교수>

## 1. 직류배전시스템 구성

그림 1은 직류 배전 시스템의 전체 구성도이다. 모듈은 각각 AC/DC 전력 변환 모듈 1개, ESS 모듈 1개, PV 모듈 2개로 구성되어 있다. AC/DC 전력 변환 모듈은 3상 양방향 AC/DC PWM 컨버터와 양

방향 DC/DC 컨버터 및 축전지로 구성되어 있으며, PV 모듈은 2종(BIPV, Roof-Top PV)의 태양 전지 어레이와 이를 DC-BUS와 연계하기 위한 DC/DC 컨버터로 구성되어 있다. 그리고 ESS 모듈은 ESS용 리튬-폴리머 배터리와 DC-BUS와 배터리 사이의 양방향 전력 조류를 위한 양방향 DC/DC 컨버터로 구

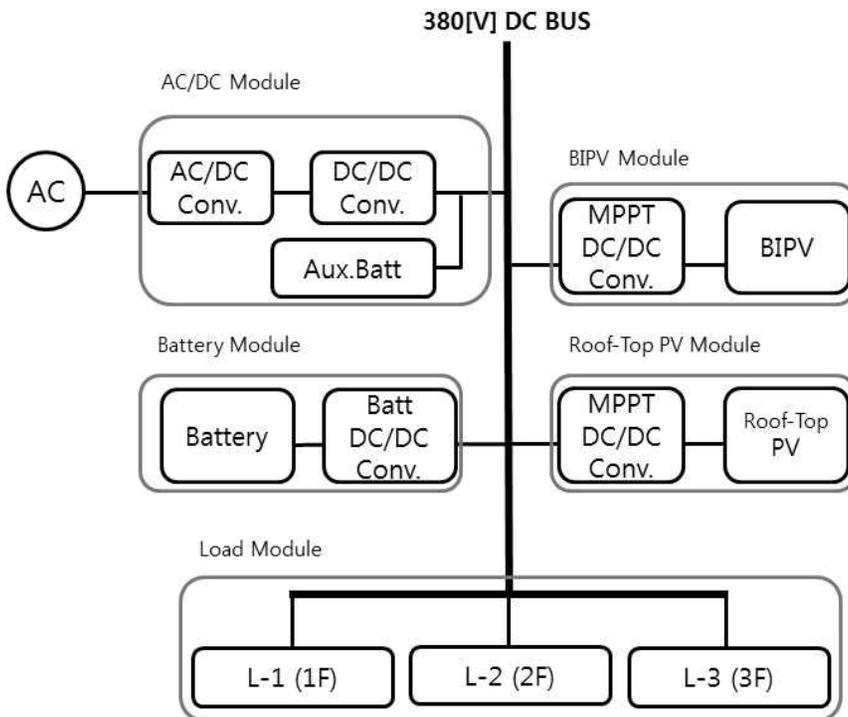


그림 1. 직류 배전 시스템의 구성 모듈

성되어 있다.

## 2. 해석을 위한 EMTP 모델링

직류 배전 시스템을 구성하고 있는 주요 모듈을 열거하면 다음과 같다.

1. AC/DC 전력 변환 모듈 부
2. DC/DC 전력 변환 모듈 부
3. ESS 모듈 부
4. 태양광 모듈 부
5. 부하 모듈 부

이중에서, 1번, 3번에 관한 모델링 방법과 결과를 기술하고자 한다.

### 2.1 해석을 위한 EMTP 모델링

#### 2.1.1 AC/DC 전력 변환 모듈

그림 2는 EMTP로 구현된 AC-DC 모듈부를 나타낸다. 컨트롤러 부는 PLL, 전압 제어기, 전류 제어기를 하나의 모델 안에 구현하여 전압 지령을 생성하며, SVPWM 부는 전압 지령이 인가되는 시간을 정의하여 스위칭 패턴을 생성하기 위한 부분이며, 마지막으로 Gate 부는 스위칭 정보를 전달받아 스위치를 ON, OFF 하도록 명령하는 부분이다.

그림 3은 위상 제어이론을 바탕으로 위상각 추종을 위한 PI 제어기 구현 내용이며, 3상 전원을 정지 좌표계 변환과 동기 좌표계 변환을 과정을 통하여 전원

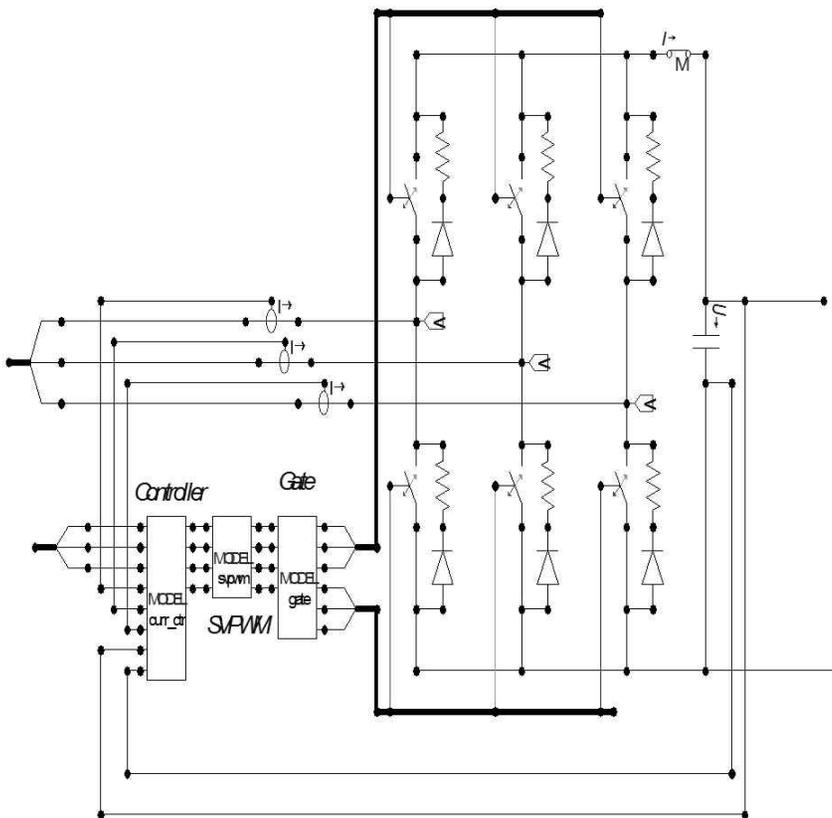


그림 2. AC/DC SVPWM 모듈

특집: DC 배전 현황과 기술 동향

```

Text Editor
File Edit Character Done Help
-----PLL-----
-----PLL-----
-----PLL-----
-- phase detector
if PLLont*timesep>ts_pll then
--all pass filter
--input-> vas,vbs,vcs, output => 90deg shift
vas:=(va-vb)
vbs:=(vb-vc)
vcs:=(vc-va)
--clarke transformation
alpha:=(vcs-vbs)/sqrt(3)
beta:=vas
--park's transformation
vd:=alpha*cos(angle)+beta*sin(angle)
vq:=-alpha*sin(angle)+beta*cos(angle)
-- low pass filter
-- input => vde, output => vde_low
vd_lpf:=(2-wc_low)/(2+wc_low)*preval(vd_lpf)+wc_low/(wc_low+2)*(vd+preval(vd))
vq_lpf:=(2-wc_low)/(2+wc_low)*preval(vq_lpf)+wc_low/(wc_low+2)*(vq+preval(vq))
-- phase detector(PI control)
-- input => vd_lpf, output => theta
ph_err:=vd_ref-vd_lpf
ph_pgt:=kp_ph*ph_err
ph_ict:=ph_ict+ki_ph*ph_err*ts_pll
pi_ph:=ph_pgt+ph_ict
if pi_ph>2*pi*60.2 then
pi_ph:=2*pi*60.2
elseif pi_ph<-2*pi*60.2 then
pi_ph:=-2*pi*60.2
endif
angle:=angle+(pi_ph)*ts_pll
if angle>pi then
angle:=angle-2*pi
elseif angle<(-pi) then
angle:=angle+2*pi
endif
PLLont:=0
endif
PLLont:=PLLont+1
1:1
    
```

그림 3. 위상각 추정을 위한 MODELS

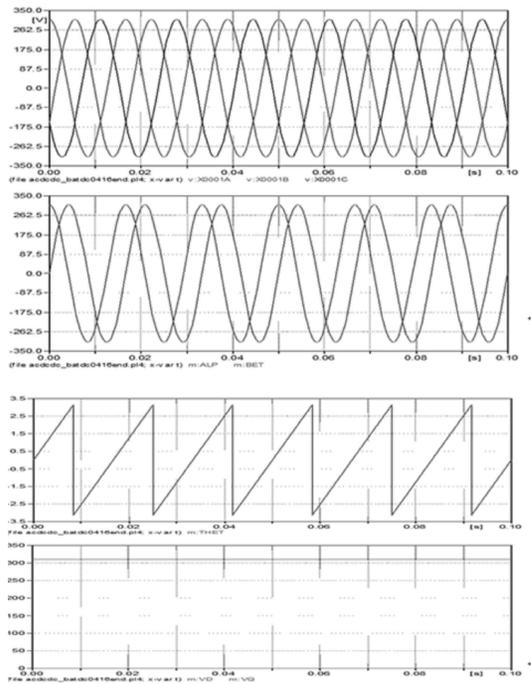


그림 4. EMTF에서의 위상각 추종 결과 파형

의 위상각을 추종하는 일련의 과정을 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 PLL을 통하여 추종된 계통 위상각은 전류 및 전압이 (-)에서 (+)가 되는 시점에서 거의 정

```

Text Editor
File Edit Character Done Help
MODEL: svpwm

INPUT va_ref,vb_ref,vc_ref,Vcvsc
OUTPUT tga,tgb,tgc,seq

VAR
swcut,ts_ssw,ts,tsb,tc,
tmax,tmin,teff,tzero,toffs,
tga,tgb,tgc,seq

INIT
swcut:=0
ts_ssw:=1e-4
ts:=0
ttr:=0
tc:=0
tmax:=0
tmin:=0
teff:=0
tzero:=0
toffs:=0
tga:=0
tgb:=0
tgc:=0
seq:=1
ENDINIT

EXEC
-----AV PWM-----
1:1
            
```

MODEL: svpwm

Attributes

| NODE   | PHASE | NAME   |
|--------|-------|--------|
| va_ref | 1     | ××0115 |
| vb_ref | 1     | ××0116 |
| vc_ref | 1     | ××0117 |
| Vcvsc  | 1     | ××0118 |
| tga    | 1     | ××0106 |
| tgb    | 1     | ××0107 |
| tgc    | 1     | ××0108 |
| seq    | 1     | ××0109 |

Order: 0 Label:

Comment:

Models: Library

Model: svpwm Edit Use As: svpwmw1 Record

Hide  Protect

Edit definitions OK Cancel Help

그림 5. 스위칭 패턴 생성을 위한 SVPWM MODEL

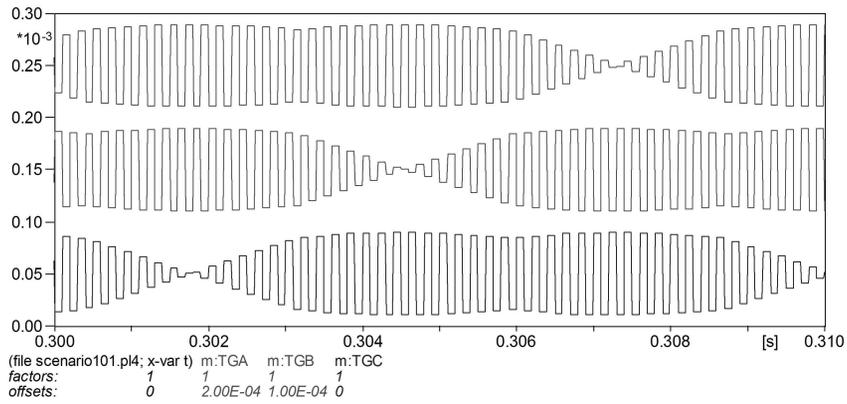


그림 6. Tga,Tgb,Tgc 출력 파형

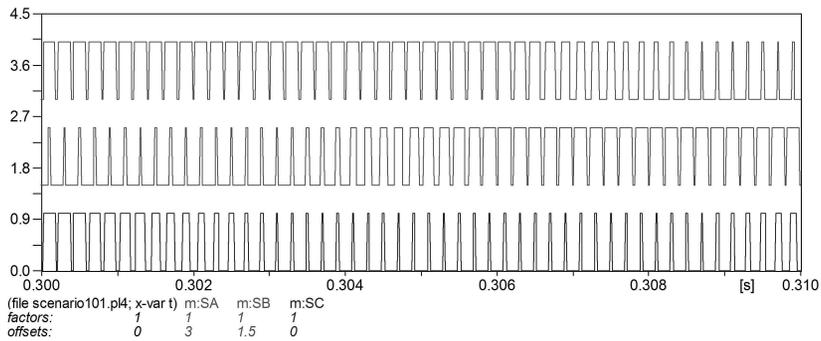


그림 7. 각 상 스위치 On, Off 상태

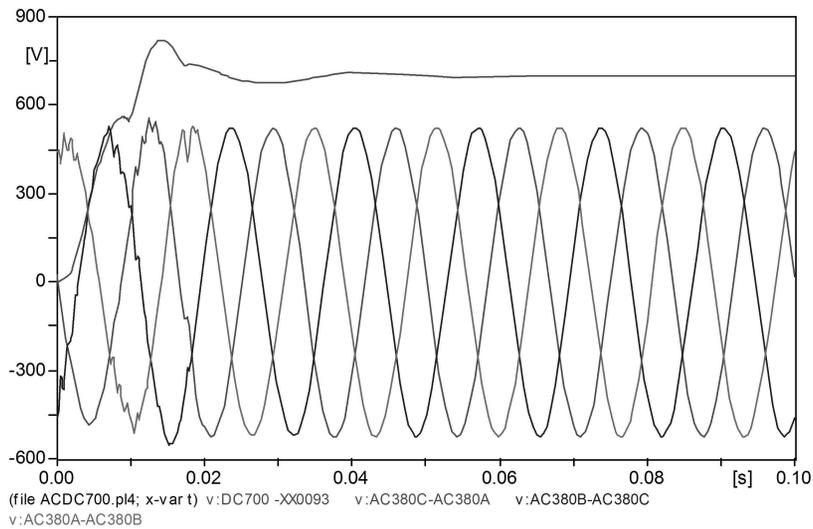


그림 8. AC/DC 컨버터의 입·출력 파형

확하게 교차하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 스위칭 패턴 생성을 위한 Min-Max PWM 방식 구현을 나타내며, Tga,Tgb,Tgc 및 각 상의 스위치 On, Off 지령은 그림 6, 7과 같이 출력 된다.

앞서 생성된 스위칭 패턴을 이용하여 교류 전압 380Vrms를 직류 전압 700VDC로 변환하도록 설정 하였으며, 최종 출력 파형은 그림 8과 같다. 약 0.06s에서 DC-Link 전압이 700VDC로 유지되는 것을 볼 수 있다.

### 2.1.2 ESS 모듈

ESS의 기본적 설비로 배터리를 이용하였으며 EMTP의 MODELS를 이용하여 SOC 계산부, 방전 전압 계산부, 충전 전압 계산부, 출력 전압 계산부, 배터리 전압 계산부 등으로 모델링하였다.

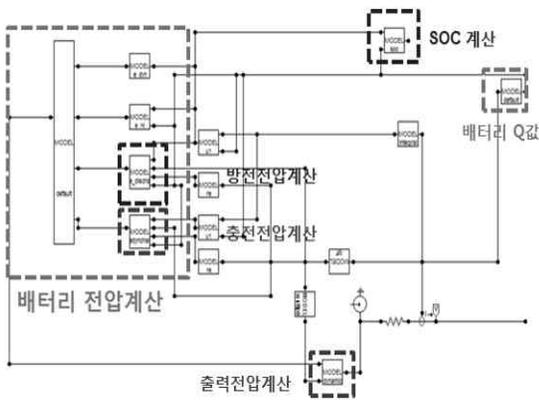


그림 9. EMTP 배터리 모듈

EMTP 상에서 구현된 배터리 모델은 다음의 항목을 가정한 뒤 도출되었다.

1. 내부 저항은 충·방전 중에 일정하며, 전류의 크기에 따라 변하지 않음
2. 모델의 파라미터는 방전 특성으로부터 추론되었으며, 충전 시에 방전 특성과 같음

3. 배터리 용량은 전류의 크기에 변화 없이 일정함

4. 온도 영향을 받지 않음

5. 배터리 자가 방전은 나타나지 않음

6. 배터리 메모리 현상은 없음

그림 10은 배터리 소자의 모듈 사양 입력 창이다.

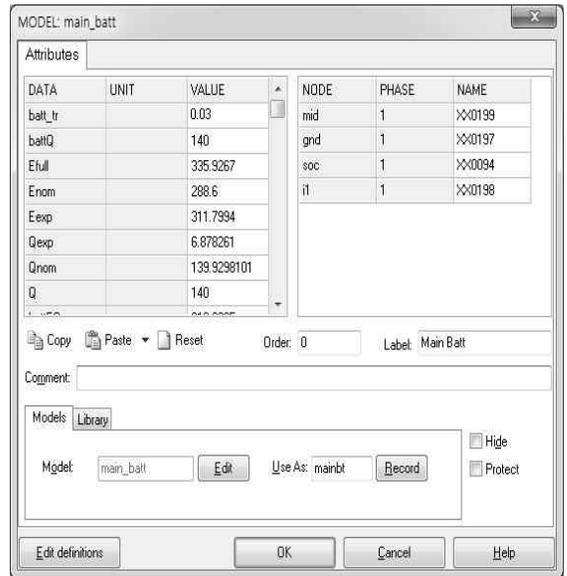


그림 10. 배터리 파라미터 입력 창

EMTP로 구현한 배터리 모델의 동작 특성을 확인하기 위하여 초기 SOC가 100%일 때 부하를 연결하여 150A를 방전시켰을 경우를 모의하였다.

그림 11은 방전 시 배터리 동작 전압, SOC, 배터리 사용량 결과 파형을 나타낸다. Exponential area에서는 배터리 전압이 SOC 100% (335.9267V)에서 311.7994V가 될 때까지 지수적으로 감소되는 것을 확인할 수 있었으며, Nominal area에서는 실제 배터리 동작 전압을 나타내며 배터리 전압이 288.6V가 될 때까지 조금씩 감소되는 것을 확인하였다. 또한 nominal 전압 이후로는 급격하게 배터리 전압이 떨어지는 것을 확인하였다. 이는 그림 12의 MATLAB 방전 특성 곡선과 일치하는 결과이다.

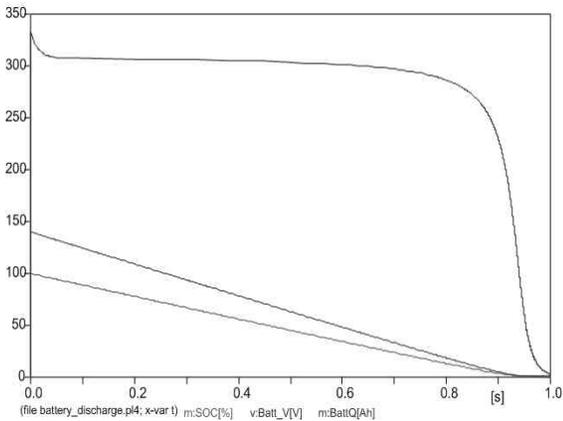


그림 11. 배터리 모델 방전 특성 곡선

100%(335.9267V)가 될 때까지 지수적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

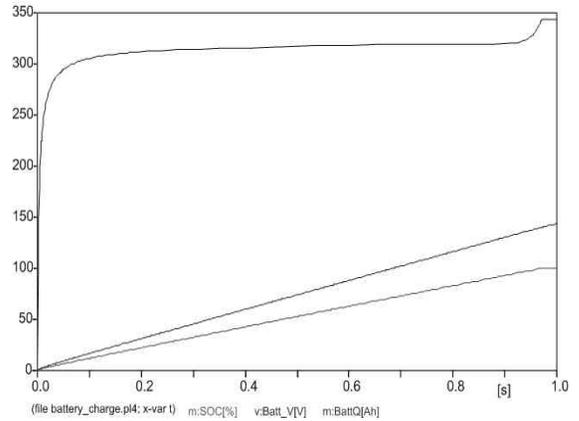


그림 13. 배터리 모델 충전 특성 곡선

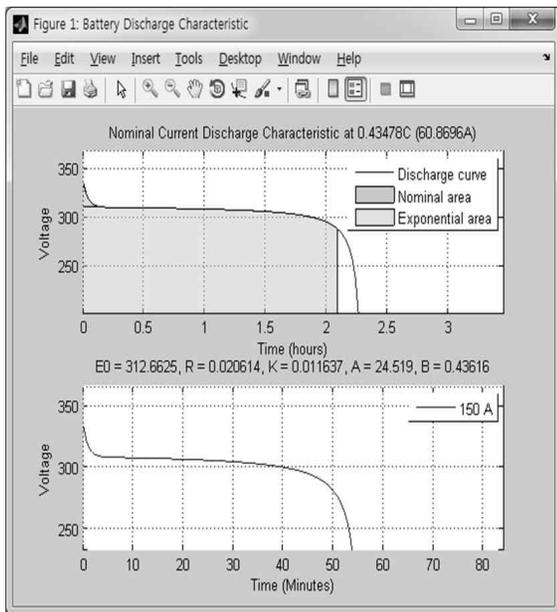


그림 12. Matlab 배터리 방전 특성 곡선

그림 13은 충전 시 배터리 동작 전압, SOC, 배터리 사용량 결과 파형을 나타낸다. nominal 전압 이전까지는 급격하게 배터리 전압이 충전되며, Nominal area에서는 실제 배터리 동작 전압을 나타내며 배터리 전압이 331.7994V가 될 때까지 조금씩 증가하는 것을 확인하였다. 또한 Exponential area에서는 배터리 전압이 331.7994V에서 SOC

### 3. EMTP를 이용한 배전계통 해석

DC배전 운전은 ESS 충, 방전을 포함한 여러 가지의 운전 모드로 동작 할 수 있으며, 여기서는 그림 14와 같이 AC/DC 전력 변환 모듈과 배터리 모듈이 동작하여 배터리를 충전하는 모드에 대하여 결과를 나타 내었다.

AC/DC 전력 변환 모듈은 계통의 전력을 DC-BUS에 공급하기 위하여 3상 양방향 AC/DC PWM 컨버터를 통하여 계통의 380Vrms 전압을 700Vdc의 전압으로 변환하고, 양방향 DC/DC 컨버터를 통하여 700Vdc 전압을 배전 전압 380Vdc로 변환한다.

또한, 배터리 모듈은 DC-BUS의 전압을 이용하여 배터리를 충전한다. 충전은 양방향 ESS 컨버터를 통해 진행되며, CC-CV 제어 알고리즘을 적용하여 150A의 전류로 초기 충전 후 SOC가 70%에 다다른 배터리 측 전압을 320V 정전압으로 충전한다. 이론상 CC 제어 알고리즘의 경우 일정 전류로 충전 시에 시간이 지남에 따라 2차측 전압 또한 점차 증가하

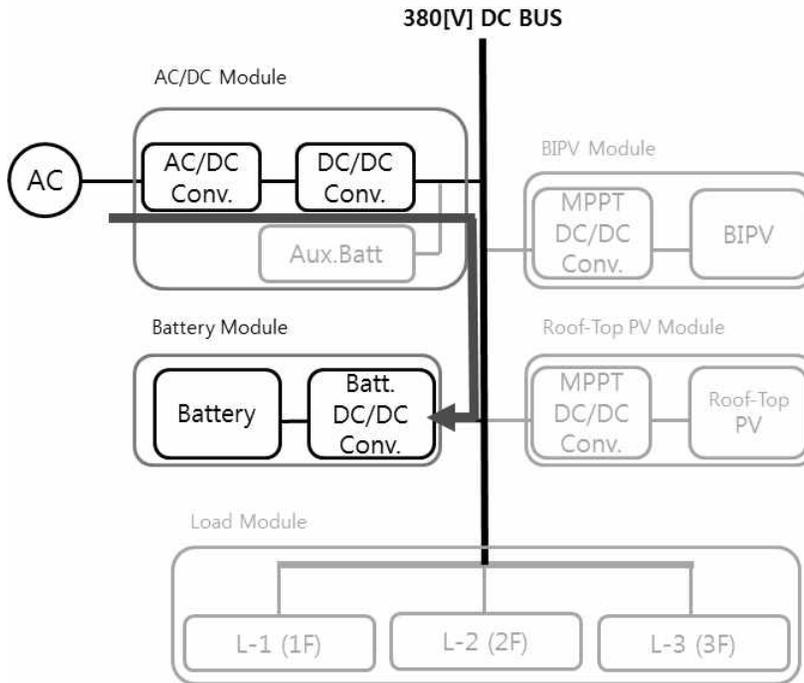


그림 14. 운전 모드

는 추세를 보인다. 그러나 EMTP 프로그램은 모의 시간의 한계로 인해 짧은 시간만을 모의할 수 있으므로 SOC 계산 시 1h를 1s로 가정하였다. 따라서 CC 충전 동안의 2차측 전압 상승량에는 한계가 발생하게 되므로 365V의 정전압이 아닌 320V의 정전압으로 충전토록 설계하였다.

그림 15는 AC/DC 모듈부에 의해 380VDC의 배전 전압으로 변환하며, 0.15s부터 배터리 DC/DC 컨버터가 동작하여 충전이 시작되며 초기 충전 시 배터리 DC/DC 컨버터가 CC 모드로 동작하여 배터리 측 DC-Link 전압(BATT\_P-BATT\_N)이 상승됨을 알 수 있다.

그림 16은 출력 전류 및 SOC, 배터리 사용 가능 용량(BattQ)을 나타낸 파형으로서 0.15s부터 CC 모드로 동작하여 150A의 전류로 배터리를 충전시키며 SOC가 70%가 되는 0.84s에서 모드 전환이 이루어진다. 이후 CV 모드로 충전하게 되므로 배터리 충

전 전류 또한 서서히 감소됨을 확인할 수 있다. 충전 말기에는 SOC가 95%가 되는 1.1s에 배터리를 컨버터로부터 분리하여 과충전을 방지하는 것을 확인할 수 있으며, 최종적으로 SOC 95% 및 배터리 사용 가능 용량 133Ah로 충전이 종료됨을 확인할 수 있다.

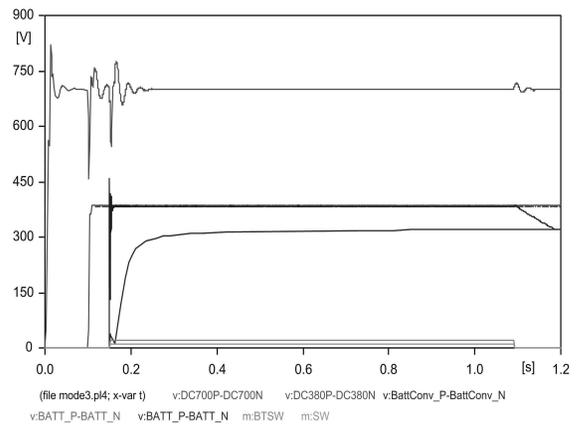


그림 15. 운전 모드 출력 전압 파형

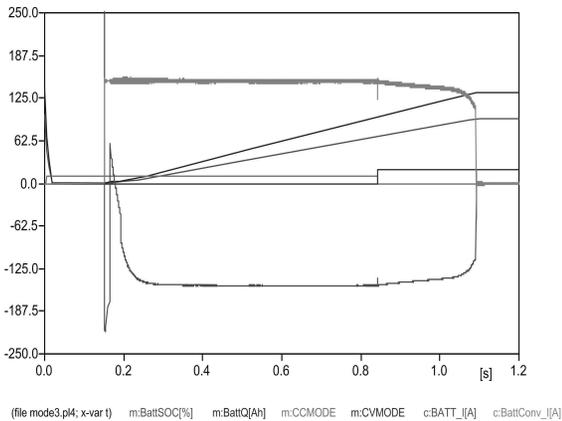


그림 16. 운전 모드 출력 전류 파형

#### 4. 맺음말

DC배전의 계통 적용을 위해서는 보다 정확한 모의 연구가 필요하며, 이를 통한 정확한 분석 후에 실 계통의 DC 배전 적용이 이루어져야 할 것이다. 현재 활발하게 진행되는 DC 관련 연구에 EMTP를 이용한 일부 해석방법을 기술, 소개하였으며 기타 계통 해석 프로그램과 비교하여 앞으로의 연구에 많은 도움이 되길 기원해 본다.

#### ◇ 저 자 소개 ◇



김창환(金蒼煥)

2013년 영남대학교 전기공학과 졸업.  
2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



박건우(朴乾禱)

2007년 8월 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학부 대학원 졸업(전공 : 전력 계통). 2007년 9월~현재 (주)케이디 파워 융합연구소 책임연구원 재직 중.



이상봉(李相奉)

1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012년~현재 영남대학교 전기공학과 교수.