# 배터리와 초고용량 커패시터의 충·방전 시 역률에 관한 연구

김현정 · 장재훈 · 유지윤
고려대학교 전기공학과

# A Study on the Charging/Discharging Power Factor of Battery and Supercapacitor

Hyunjung Kim · Jaehoon Jang · Jiyoon Yoo
Department of Electrical Engineering, Korea University

ABSTRACT

최근 계속되는 유가 상승과 화석에너지의 고갈 문제, 그리고 환경에 대한 관심 증가로 인해 자동차의 연비 개선 및 배기가스 저감을 위한 친환경 저연비 자동차 기술이 요구되고 있다. 이들 중 하이브리드 차량은 화학적 에너지 저장 장치에 차량 감속 시 회생 제동을 통해 전기 에너지를 저장하고 가속 시 이 에너지를 다시 사용함으로써 연비 개선과 배기가스 저감 효과를 가져 올 수 있다. 이를 위하여 회생 제동 시에 발생하는 에너지를 저장하기 위해 배터리 또는 초고용량 커패시터가 사용된다. 본 논문에서는 두 에너지 저장 장치의 특성을 전기적인 등가회로 모델로 표현하고 주파수 응답을 통해 온도와 SOC에 따른 각각의 회로 정수를 산출할 뿐 아니라 이 때 주파수 변화에 따른 전압과 전류의 위상차와 역률에 관하여 알아보고자한다.

## 1. 서론

자동차의 내연기관에서 발생하는 배출가스로 인한 환경오염은 심각한 대기오염 및 지구 온실화의 원인 중의 하나로 지목되고 있다. 따라서 기존의 내연기관에 비해 연비가 높으면서 배출가스를 획기적으로 감소시킬 수 있는 친환경적인 자동차 기술 개발을 필요로 하고 있다. 친환경자동차의 종류는 전기자동차(EV), 연료전지 차(FCV), 하이브리드 자동차(HEV)등등이 있으며 그 중 상업적으로 기술적으로 타당성이 증명된 것은 하이브리드 자동차이다. 이 때 하이브리드 자동차의 핵심 구성요소의 하나인 에너지 저장 장치는 하이브리드 자동차의 성능을 결정짓는 요소로서 중요한 부분이다. 이 중 가장 일반적인 에너지 저장장치로는 배터리와 초고용량 커패시터가 있다. 이러한 에너지 저장장치를 이용하는 자동차의 경우 시스템 전압을 높여 전류의 양을 줄임으로써 손실 전력을 최소화 하여 효율을 높이고 출력을 향상시키기 위해서 에너지 저장장치와 인버터 사이에 양방향 DC-DC 컨버터를 추가시킨 토폴로지를 사용하게 된다. 그림1은 컨버터를 추가시킨 토폴로지이다.

본 논문에서는 배터리와 초고용량 커패시터소자에 대해 전원으로서의 성능과 특성을 파악하기 위해 전기 회로적 접근을 통한 회로 정수 산출과 주파수에 따른 전압과 전류 사이의 위상차와 역률을 알아보고자한다. SOC와 온도에 따른 회로정수와 주파수에 따른 역률은 두 에너지 저장 장치를 효율적으로 운용하기 위한 중요한 자료가 될 뿐 아니라 DC-DC 컨버터를 추가하는 토폴로지에서 컨버터의 스위칭 주파수를 결정하는데 있어 중요한 토대가 될 것이다.

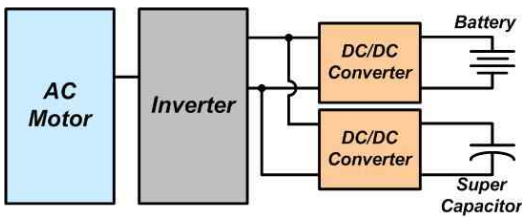


그림 1 에너지 저장 장치를 사용하는 토폴로지

## 2. 배터리와 초고용량 커패시터의 특성 분석

### 2.1 등가회로 모델

에너지 저장 장치의 특성을 모델화하는 방법은 전기적 등가회로를 구성하여 2차 전달함수로 표현하고 직류 및 교류를 인가하여 주파수 응답을 측정해 이를 토대로 작성한 bode plot으로부터 회로 정수를 산출하는 것이다. 제안한 배터리의 모델은 그림2와 같이 기존의 모델과 달리 인덕턴스 성분을 고려하고 있다. 이는 HEV용 배터리가 DC-DC 컨버터를 통해 입력을 받는 시스템으로 되어있기 때문에 고주파 영역을 무시할 수 없기 때문이다. 다음 식(1)은 제안한 모델의 전달함수이다.

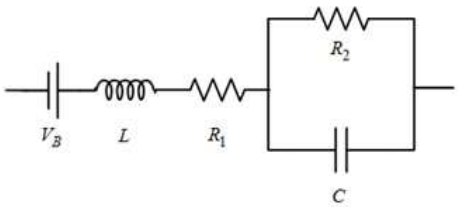


그림 2 제안한 등가회로 모델

$$G(s) = \frac{CR_2 s + 1}{LCR_2 s^2 + (L + CR_1 R_2)s + R_1 + R_2} \quad (1)$$

### 2.2 배터리 회로정수 산출

배터리의 온도를 0~50℃중 특정 온도로 유지하고 SOC를 변화시켜가면서 각각의 주파수 응답을 통해 전압과 전류 파형의 magnitude와 위상을 얻어 bode plot을 그리고 수치해석법을

이용하여 시정수를 이끌어 내어 회로정수를 산출해낸다. 다음은 1C-rate 충·방전 시 25℃에서 SOC에 따른 위상곡선과 온도에 대해 변화하는 각각의 SOC에서의 회로정수 값을 나타낸 그래프다.

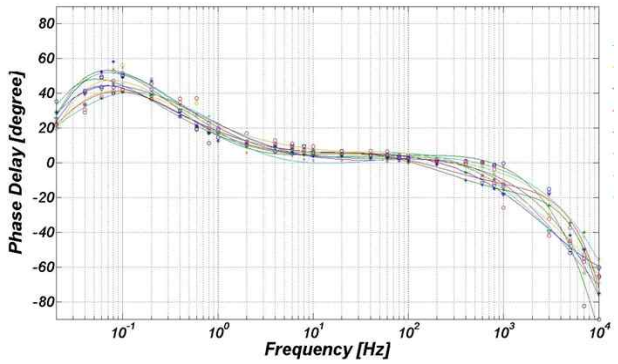


그림 3 리튬이온 배터리 주파수 응답 위상곡선

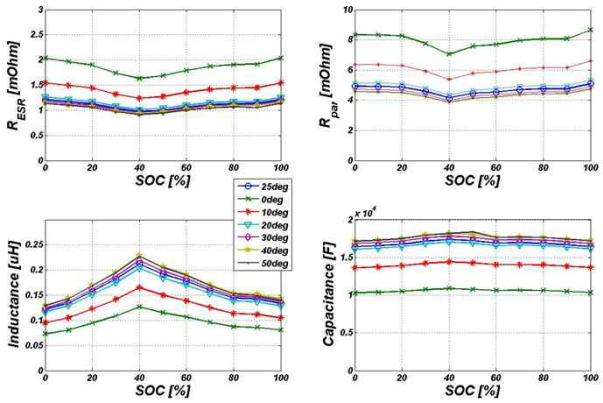


그림 4 온도와 SOC에 따른 회로정수 변화

그림4에 따르면 25℃의 경우와 변화추이는 비슷함을 확인할 수 있다. 다만 온도에 따라 감소하는 다른 회로 정수와 달리 커패시턴스는 온도에 따라 증가함을 보였다. 또한 상온 이상의 온도에서는 온도 증가에 대해서 상대적으로 작은 회로 정수 변화를 보였다.

### 2.3 초고용량 커패시터 회로정수 산출

초고용량 커패시터 또한 25℃의 일정한 온도로 유지하고 SOC를 1.5~2.7 $V$로 변화시켜가면서 각각의 SOC에 해당하는 주파수 응답을 측정하여 위상을 얻어 bode plot을 그렸다.

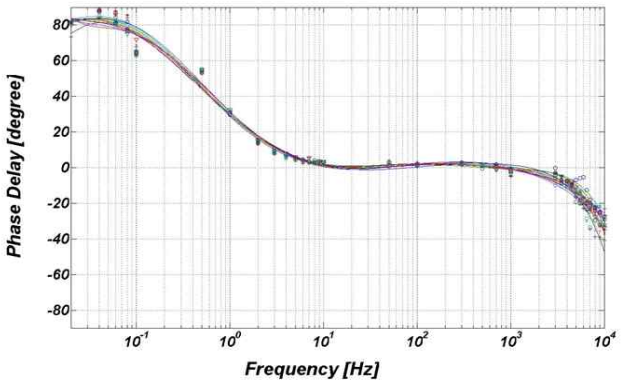


그림 5 초고용량 커패시터의 주파수 응답 위상곡선

초고용량 커패시터는 온도에 따른 회로정수 및 충전 용량 등의 변화를 보이긴 하지만 0℃이하로 떨어지는 저온특성을 제외하고는 배터리에 비해 상대적으로 변화가 적었다. 그리고 회로정수 $R_1$과$L$은 SOC에 무관하게 거의 일정한 값이며 그 크기가 배터리에 비해 매우 작았기 때문에 변화 추이를 살펴보는 것이 상대적으로 무의미했다. 반면에 $R_2$와$C$는 SOC가 증가함에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

## 3. 역률 분석

### 3.1 전압 전류의 위상차

제안한 등가회로 모델은 커패시턴스와 인덕턴스를 포함하고 있기 때문에 교류입력이 들어오게 되면 전압과 전류사이에 위상차가 생기게 된다. 그러나 회로 정수를 보면 알 수 있듯이 인덕턴스 성분이 매우 적기 때문에 인덕턴스 성분을 포함하고 있어도 저주파 영역에선 시스템에 미치는 영향이 미비하다. 그러나 주파수가 높아질수록 어드미턴스를 떨어뜨리는 특징을 가지고 있고 전압과 전류사이의 위상차 또한 증가함을 확인할 수 있었다. 이 때 생기는 전압과 전류 사이에 생기는 위상차는 무효 전력이 생기는 원인이 되어 시스템의 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 이러한 위상차를 역률각(Power factor angle)이라고도 하며 이 각의 코사인 값을 역률(Power factor)이라고 한다. 다음 식은 무효전력과 역률을 나타낸다.

$$P = VI\cos\phi \qquad (2)$$
$$pf = \cos\phi$$

### 3.2 배터리 역률

실험을 통해서 얻은 회로 정수와 0.01Hz~100kHz의 주파수를 등가회로모델의 2차 전달함수식에 넣어 phase를 구하면 무효 전력을 구할 수 있고 무효전력으로 부터 역률을 계산해 낼 수 있다. 배터리의 경우 역률이 1이 되는 즉 전압과 전류의 위상차가 생기지 않는 주파수 영역은 0.1Hz~100Hz이고 이때의 주파수를 공진주파수라고 한다. 반면에 주파수가 증가하면 증가할수록 전압과 전류의 위상차가 커져 역률이 급격하게 떨어진다. 또한 주파수가 1kHz~10kHz영역은 SOC에 따른 회로정수의 영향을 받아 SOC와 온도에 따라서도 역률이 변화하는 것도 확인 할 수 있다.

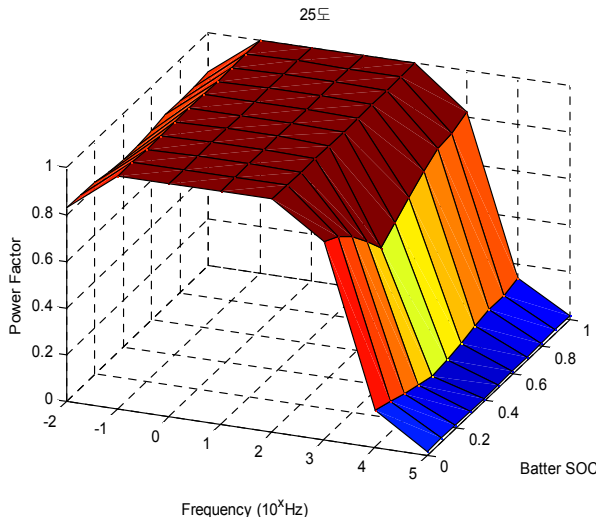


그림 5 배터리의 주파수와 SOC에 따른 역률

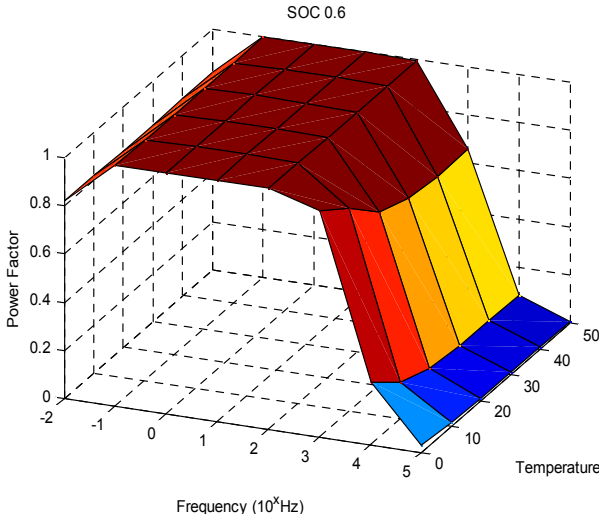


그림 6 배터리의 주파수와 온도에 따른 역률

### 3.3 초고용량 커패시터 역률

초고용량 커패시터 또한 배터리와 같은 방법으로 회로정수와 주파수를 전달함수에 넣어서 계산하면 주파수에 따른 전압과 전류의 위상차와 역률을 구할 수 있다. 초고용량 커패시터의 경우 1Hz~100Hz에서 역률이 1이 되며 역시 주파수가 증가하면 증가할수록 역률이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

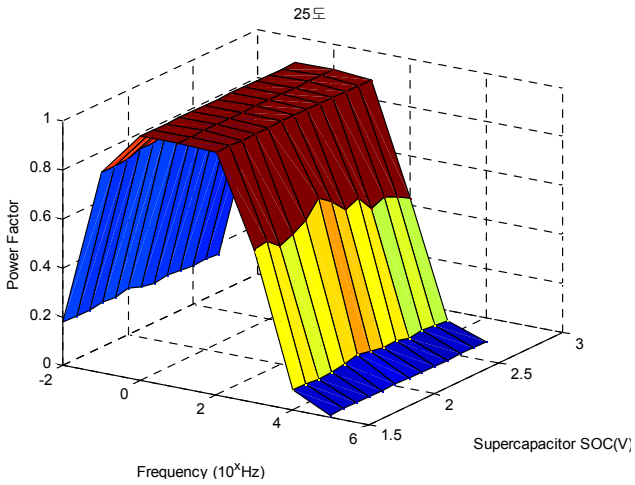


그림 7 초고용량 커패시터의 주파수와 SOC에 따른 역률

## 4. 결론

배터리와 초고용량 커패시터의 경우 내부 등가회로에 커패시턴스와 인덕턴스 성분을 가지고 있기 때문에 교류 입력이 들어올 경우에는 주파수에 따라 전압과 전류의 위상차로 인한 무효전력이 생긴다. 게다가 HEV에 사용되는 배터리와 초고용량 커패시터의 경우는 DC-DC컨버터를 통해 입력을 받는 시스템으로, 컨버터의 스위칭 주파수에 따라 배터리와 초고용량 커패시터의 역률이 결정되기 때문에 컨버터의 스위칭 주파수는 시스템의 효율을 결정하는데 있어서 중요한 요소이다. 배터리와 초고용량 커패시터 자체의 효율을 생각한다면 위상차가 0이 되는 즉 역률이 1이 되는 영역의 주파수를 사용하여 컨버터를 스위칭하게 되면 좋을 것이다. 하지만 실제 HEV에서 사용되는 DC-DC컨버터는 컨버터 자체의 효율 상 스위칭 주파수가 수 kHz 이상으로 역률이 1이 되는 공진 주파수 영역의 주파수로는 사용하지 않는다. 이는 DC-DC컨버터의 스위칭 주파수를 감소시키면 고조파를 함유한 왜곡된 전류가 입력 단에 나타나게 되고, 스위칭 주파수를 증가시키면 스위칭 동작 빈도가 늘어나 그 동작에 따른 스위칭 손실의 증가로 컨버터 자체의 효율이 떨어지게 되기 때문이다. 따라서 DC-DC컨버터는 적절한 범위의 스위칭 주파수를 선택해야한다.

본 논문에서 구한 배터리와 초고용량 커패시터의 SOC와 온도에 따른 회로정수와 주파수에 따른 역률은 두 에너지 저장장치를 효율적으로 운용하기 위한 중요한 자료가 될 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] Hyong joon Park, "Establishment of equivalent circuit model for the battery utilized for EV/HEV" 2006.

[2] Hampson.N.A et al., "The impedence of electrical storage cells", Jounal of applied electrochemistry, pp. 3-11, 1980.

[3] H. Gualous, "Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature", Journal of Power sources, Vol. 123,pp.86-93 ,2003

[4] Jonghoon Kim, "The state of charge estimation employing empirical parameters measurements for various temperatures ", Proceedings of the IEEE, 2009

[5] R.Kotz, "Temperature behavior and impedance fundamentals of supercapacitors", Journal of Power sources, Vol. 154 ,pp.550-555 ,2006