

재귀최소자승법을 이용한 슈퍼커패시터 뱅크의 커패시턴스 실시간 추정방법

조성우, 신규범, 조현식, 차한주
충남대학교

Online Capacitance Estimation of Supercapacitor Bank Using Recursive Least Square Method

Sungwoo Cho, Gyubeom Shin, Hyunsik Jo, Hanju Cha
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 재귀최소자승법을 이용한 슈퍼커패시터 뱅크의 실시간 커패시턴스 추정방법에 대해 서술하였으며, 커패시터의 수명은 초기용량에서 약 25%가 감소한 경우 수명을 다했다고 판단한다. 수명을 다한 커패시터를 사용할 경우 시스템의 성능과 안전을 보장할 수 없으므로 커패시터를 교체할 적절한 시기를 판단하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 재귀최소자승법으로 슈퍼커패시터 뱅크의 커패시턴스를 측정할 수 있는 방법을 제안하였고, 이를 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 우리나라 및 전 세계적으로 전력고갈로 인해 신재생 에너지원과 여러 가지 분산전원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 신재생 에너지 발전을 위해서는 인버터 시스템이 필수적으로 포함된다. 인버터에서 DC링크는 전압을 안정적으로 유지시키며, 슈퍼커패시터로 구성된다. 인버터가 산업 및 생활에서 사용됨에 따라 DC링크가 노화되면 시스템에 악영향을 끼칠 수 있기 때문에 잔존수명 (SOH : State of Health)을 확인하고 이를 적절한 시기에 교체를 해주는 것은 매우 중요하며, 슈퍼커패시터의 수명은 초기 용량에서 약 25%가 감소한 경우에 수명을 다했다고 판단한다. 용량을 확인하는 방법에는 임피던스를 측정해 추정하는 방법, 재귀최소자승법(Recursive Least Square Method)^{(1),(2)} 등이 있으며, 배터리 시스템에서도 여러 가지 알고리즘을 이용해 배터리의 잔량을 확인하는 연구도 활발히 진행되고 있다⁽³⁾.

본 논문에서는 슈퍼커패시터 뱅크를 DC링크로 사용하는 인버터 시스템에서 DC링크의 전압·전류를 센싱받아 이를 최소자승법을 사용하여 커패시턴스를 추정하는 알고리즘을 제안하고 이를 시뮬레이션하여 검증하였다.

2. 슈퍼커패시터 뱅크의 추정

2.1 슈퍼커패시터 뱅크 모델링

그림 1은 본 논문에서 사용된 인버터의 슈퍼커패시터 뱅크를 나타낸다. 2.7V, 360F의 슈퍼커패시터를 20개를 직렬로 연결하여 1개의 PCB 모듈로 제작하고 이를 8직렬 연결하여

400V, 2.25F의 슈퍼커패시터 뱅크를 제작하였다.

슈퍼커패시터 등가회로에서 전압과 전류의 관계는 커패시턴스로 표현할 수 있고, DC링크의 전압이 충전되어 있는 정상상태에서는 전압과 전류의 변화가 작기 때문에 임피던스를 측정하기 어렵다. 따라서 f_0 (1~30Hz)의 주기를 가지는 정현파 전류를 입력하여 임피던스를 측정한다.



그림 1 슈퍼커패시터 뱅크 (400V, 2.25F)

Fig. 1 Super Capacitor Bank (400V, 2.25F)

2.2 재귀최소자승법 알고리즘

앞 절에서 서술된 슈퍼커패시터 뱅크의 임피던스를 추정하기 위해 재귀최소자승법을 이용하였다. 그림 2은 일반적인 재귀최소자승법을 블록도로 나타낸 것이다.

인버터에서 f_0 (1~30Hz)의 성분을 가진 정현파의 DC링크전류 i_k 를 주입하면 임피던스에 의하여 위상차를 가지는 전압 V_k 가 생성된다. 실제 전압 V_k 를 추정하기 위해 슈퍼커패시터 뱅크의 모델을 사용하면 그 출력은 \hat{V}_k 이 되고, \hat{V}_k 과 V_k 가 같다면 재귀최소자승법의 알고리즘이 정상적으로 설계되었다고 할 수 있다.

이를 본 논문의 슈퍼커패시터에 적용하면 $V_k = \phi\theta$ 는 인버터 DC링크의 전압이고 $\hat{V}_k = \hat{\phi}\theta$ 는 실시간으로 인버터 DC링크의 전압을 추정하는 값이 된다. 추정 오차 $V_k - \hat{V}_k$ 을 이용하여 P_k (Covariance Matrix)를 나타내는 식 (1)과 K_k (Gain Matrix)를 나타내는 식 (2)을 구한다. P_k 과 K_k 가 0으로 수렴한다는 것은 추정 오차가 0이 되었다는 것과 같으며 이는 추정치 \hat{V}_k 가 참 값인 V_k 를 잘 추정하고 있다는 것으로 판단할 수 있다. 디지털 시스템에서 사용하는 Discontinuous Time Domain으로 변환하면 식 (3)과 같고, 이를 V_k 에 관해서 전개하면 식 (4)와 같다. 식 (4)를 그림 2과 같이 표현하면 식 (5)을 얻을 수 있으며, 추정치 임피던스는 식 (6), (7)과 같다.

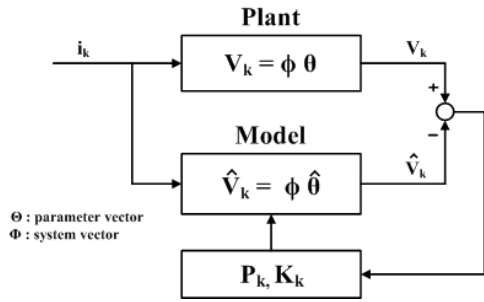


그림 2 재귀최소자승법 블록다이아그램
Fig. 2 Block diagram of Recursive Least Square

$$P(k) = (I - k_k H_k^T) P(k-1) \quad (1)$$

$$K(k) = P(k-1) H_k (\lambda + H_k^T P(k-1) H_k)^{-1} \quad (2)$$

$$\frac{V}{I} = \frac{R - \left(R + \frac{T_s}{C} \right) Z^{-1}}{1 - Z^{-1}} \quad (3)$$

$$v(k) = v(k-1) + R I(k) - \left(R - \frac{T_s}{C} \right) I(k-1) \quad (4)$$

$$\hat{V}_k = \phi \theta = [i(k) \ i(k-1) \ v(k-1)] \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \frac{T_s}{b_0 + b_1} \quad (6)$$

$$R = b_0 \quad (7)$$

2.3 시뮬레이션 결과

2.2절에서 제안한 알고리즘을 PSIM software로 시뮬레이션 하여 성능을 검증하였다. 재귀최소자승법으로 2.25F의 슈퍼커패시터 뱅크를 추정하는 시뮬레이션의 회로도도 그림 3과 같으며 0.5Hz만의 성분만을 알고리즘에 적용하기 위해서 밴드패스 필터를 추가하였다.

그림 4에서 covariance matrix인 P_{11} , P_{22} , P_{33} 가 0으로 수렴을 하면서 마찬가지로 gain matrix인 K_{11} , K_{12} , K_{13} 도 0으로 수렴한다. 이는 전압 추정치 \hat{V}_k 이 실제 값인 V_k 를 정상적으로 추정하는 것을 의미한다. 따라서 그림 5에서 파라미터 벡터인 b_0 와 b_1 도 일정한 값으로 수렴하게 되는 것을 확인할 수 있고, 식 (6), (7)을 통해서 계산된 슈퍼커패시터 뱅크의 커패시턴스는 2.07F로 재귀최소자승법을 이용하여 슈퍼커패시터 뱅크의 커패시턴스를 실시간으로 추정하는 알고리즘은 약8%의 오차범위 안에서 정상적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

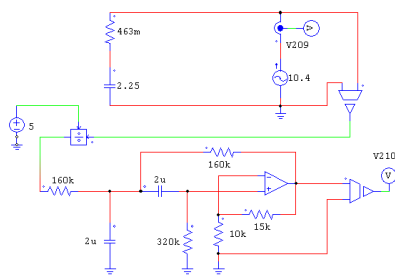


그림 3 시뮬레이션 회로도
Fig. 3 Simulation circuit

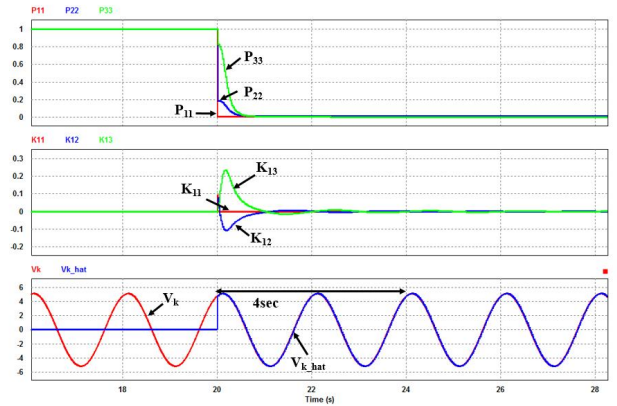


그림 4 시뮬레이션 결과파형 : P_k , K_k , V_c , $V_{\hat{k}}$
Fig. 4 Simulation waveform : P_k , K_k , V_c , $V_{\hat{k}}$

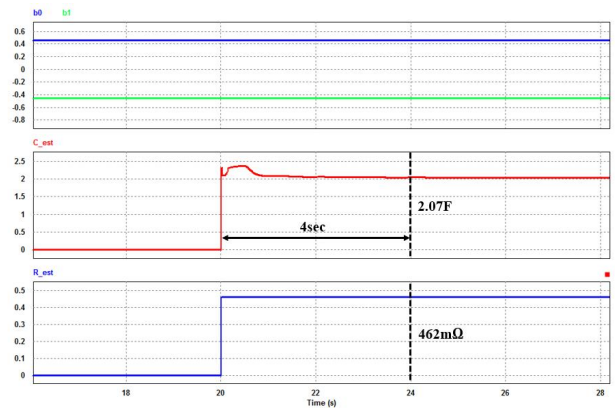


그림 5 시뮬레이션 결과파형 : b_0 , b_1 , C_{est} , R_{est}
Fig. 5 Simulation waveform : b_0 , b_1 , C_{est} , R_{est}

3. 결론

본 논문에서는 DC링크가 슈퍼커패시터로 구성된 인버터 시스템에서 재귀최소자승법을 이용한 실시간 커패시턴스 추정 방법을 서술하였다. 제안된 알고리즘이 정상적으로 동작하는 것을 PSIM으로 시뮬레이션하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Jongkyung Lee, Youngroc Kim, Hanju Cha "A New Battery parameter identification considering current, SOC and Peukert's effect for Hybrid Electric Vehicles", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE
- [2] 전용재, 이병준 "RLS(Recursive Least Square)를 이용한 전압안정도 지수 평가", 2006 대한전기학회 전력기술 부문회 추계학술대회 논문집, 2006 11, 279 281 (3 pages)
- [3] 김호기, 허상진, 강구배 "최소 자승법을 이용한 하이브리드용 리튬이온 배터리 모델링 및 특성분석", 한국자동차공학회논문집 제17권 제1호, 2009 1, 130 136 (7 pages)