

Recursive Least Squares (RLS)를 이용한 EV 차량 운행 종료 시 커패시턴스 추정

박태원, 조영훈, 마웅식, 남명준
 건국대학교 전력전자연구실

Capacitance Estimation when Shutting Down the Engine using Recursive Least Squares (RLS) Method

Taewon Park, Younghoon Cho, WoongSik Ma, MyungJoon Nam
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 방전 시 3상 인버터의 DC-link 커패시터의 RLS(재귀 최소 자승법)를 기반으로 한 커패시턴스 추정을 제안한다. 온라인 DC 링크 커패시턴스 추정은 배터리를 DC 전압으로 사용하는 전기자동차에 적용이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 방전 시 커패시턴스 추정을 제안한다. 제안된 방법은 추가 센서가 필요 없이 추정이 가능하다. 방전 전류를 스위칭 상태에 따라 계산함에 따라 보다 정확한 추정이 가능하고 RLS(Recursive Least Squares) 알고리즘을 통해 추정 오차를 줄일 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 정확도를 검증하였다.

1. 서론

전기자동차의 직류링크 커패시터는 배터리 전류 리플을 감소하는 역할을 하고 있다 뿐만 아니라 전압 평 활 역할, 전기자동차의 회생제동 시 출력 단 커패시터의 역할도 하므로 전기차의 안정적인 주행에 필수적인 소자라고 할 수 있다. 하지만 커패시터는 수명이 존재하는 소자이므로 시간이 지남에 따라 커패시터 용량이 감소하게 되고 일정 수준 이상 감소하게 되면 전기자동차의 안정적인 주행을 위해 교체가 필요하다. 이러한 커패시터의 교체시기 파악을 위해 커패시턴스 용량 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 리플주파수를 이용해 입출력 전력 차로 커패시턴스를 추정하는 방식^{[1][2]}은 인버터의 효율을 무시하고 ESR, ESL 성분의 전력손실 또한 무시하기 때문에 보다 정확한 추정을 위해 차량 운행 종료 시 커패시턴스를 추정을 제안한다. 본 논문의 추정방식은 커패시터의 방전전류를 3상 전류 센서를 통해 구간별로 계산하고 추정의 정확도를 높이기 위해 RLS 알고리즘을 활용하였다.

2. 본론

2.1절 커패시터의 전압 방전 시 전류 모델링

커패시터의 전압 방전 시 커패시터의 전류를 I_{cap} 이라고 하면 I_{cap} 은 식 (1)과 같이 계산 될 수 있다.

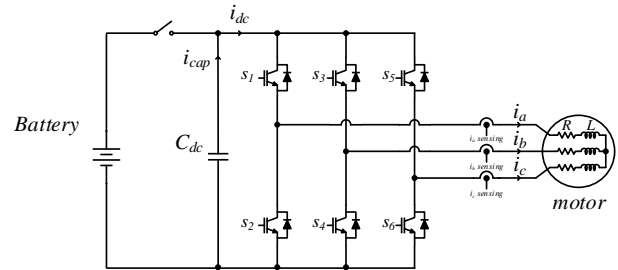


그림1 운행 종료 시 3상 인버터 시스템
 Fig.1 Three-phase inverter system shutdown

전류 I_{cap} 를 정확히 계산하는 것이 커패시터 추정의 정확도와 밀접하게 관련되어 있다. 본 논문에서 제안하는 I_{ca} 의 계산 방식은 방전 시 d 축 전류를 인가하여 전류 지령에 따른 duty 지령의 크기 비교를 통해 각 스위칭 구간 별로 전류의 크기를 계산한다. 그림 1에서 보는 것과 같이 차량 운행 종료 시에는 $I_{cap} = I_{dc}$ 와 같이 때문에 스위칭 상태에 따른 I_{cap} 은 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$I_{cap} = C \cdot \frac{dv}{dt} \tag{1}$$

$$I_{cap} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \tag{2}$$

그림 2에서와 같이 Duty 지령과 그 상의 전류를 큰 순서대로 Duty_L, Duty_M, Duty_S, i_L , i_M , i_S 라고 하면 I_{cap} 의 전류 경로에 따른 구간을 방전 저항으로 방전하는 구간을 포함하여 총 3가지로 나누어 정리 할 수 있다. 각 구간 별로 I_{cap} 을 계산하면 식 3과 같이 정의 할 수 있다. 우변의 제일 마지막 항은 인버터 쪽으로의 전류패스가 없을 때 I_{cap} 을 계산하는 항으로 커패시터 전압과 방전저항을 나눔으로써 간단하게 계산 할 수 있다.

$$I_{cap} = (Duty_L - Duty_M) \cdot i_L + (Duty_M - Duty_S) \cdot i_M + Duty_S \cdot \frac{V_{dc}}{R_{dc}} \tag{3}$$

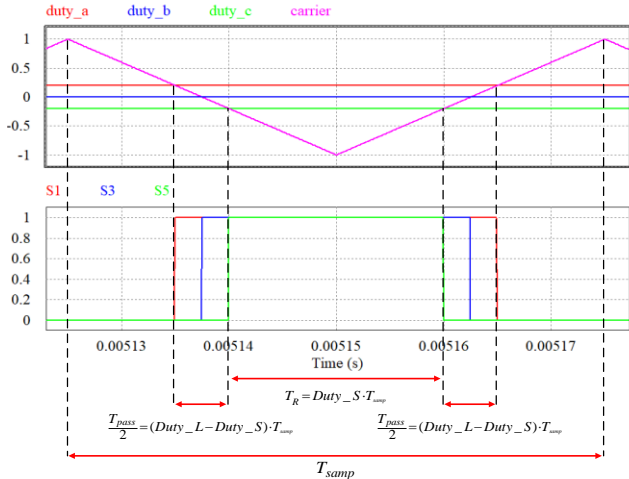


그림 2 duty 지령 비교를 통한 I_{cap} 계산
Fig.2 Calculation for I_{cap} through duty command comparison

2.2절 RLS 알고리즘

RLS 알고리즘은 입력 신호에 관련된 가중 선형 최소 제곱 비용 함수를 재귀적으로 최소화하는 계수를 찾는 적응 필터 알고리즘이다. 식 (4)의 과정을 통해 반복적으로 수행하며 가중치 및 공분산을 최적화한다. 가중치 및 공분산을 최적화함으로써 RLS 알고리즘은 중간에 노이즈 성분이 인가되어도 추정하고자 하는 값이 크게 변하지 않고 최종 파라미터 값으로 수렴한다. 따라서 측정오차가 많은 환경에서 RLS 알고리즘을 이용한 파라미터의 추정은 더 높은 정확도를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y(k) &= \phi(k)^T \cdot w(k) + \zeta(k) \\
 e(k) &= y(k) - \phi(k)^T \cdot w(k-1) \\
 K(k) &= \frac{p(k-1) \cdot \phi(k)}{\lambda + \phi(k)^T \cdot p(k-1) \cdot \phi(k)} \\
 w(k) &= w(k-1) + K(k) \cdot e(k) \\
 p(k) &= \frac{1}{\lambda} (p(k-1) - K(k) \cdot \phi(k)^T \cdot p(k-1))
 \end{aligned} \quad (4)$$

2.3절 모의 실험

표 1 시뮬레이션에서 사용된 PMSM의 파라미터

Table 1 Parameters of the PMSM used in Simulation

파라미터	값
V_{dc}	280V
C_{dc}	280 μ F
R_{dc}	78.6k Ω
R_s	0.0017 Ω
L_d, L_q	490 μ H
극 수	8극

제안하는 직류 링크 커패시턴스 추정의 적합성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션의 PMSM 모터의 제정 수는 표 1과 같고 차량 운행 종료시를 가정하여 커패시터의 초기전압은 200V로 설정하였고 q 축 전류 지령은 0, d 축 전류 지령은 10A으로 하여 방전하도록 하였다. 차량

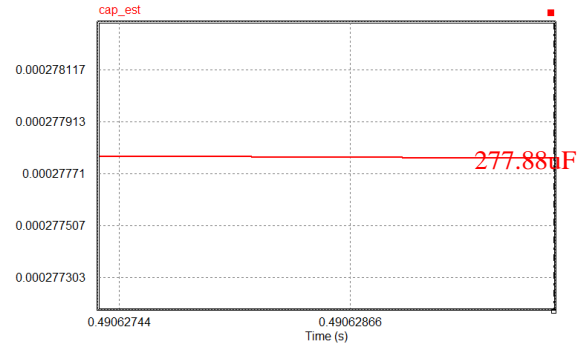


그림 3 커패시턴스 추정 결과 파형
Fig.3 Capacitance estimation result waveform

정지 시 모터의 전기각은 무작위로 되도록 설정하여 전기자동차 주행 어떤 회전각에서도 추정이 가능함을 확인하였다. RLS 적용하지 않은 커패시턴스 추정 오차는 약 5%이고 RLS 알고리즘을 적용한 커패시턴스 추정 오차는 약 2%로 RLS 알고리즘을 적용한 커패시턴스 추정이 더 높은 정확도를 보임을 확인할 수 있다. 그림 3의 시뮬레이션 결과 파형은 전기각이 30도 일 때의 결과 파형이고 아주 작은 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 전기자동차의 운행 종료 시 직류 링크 커패시턴스 추정 방식을 제안하였다. d 축 전류 인가 시 3상 Duty 지령의 크기 비교를 통하여 3상 전류 센서를 통해 커패시터의 전압 방전 시 전류를 계산하였다. 또한 추정의 정확도를 높이기 위해 RLS 알고리즘을 적용하여 신뢰도를 향상시키도록 하였다. 제안하는 방식의 커패시턴스 추정을 모의실험을 통해 검증하였고 RLS 알고리즘을 적용한 경우 모든 회전 자 위치각에서의 추정 오차가 RLS알고리즘을 적용하였을 때 5%에서 2%까지 줄어드는 결과를 확인하였다.

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2021R1A5A1031868)과 2023년도 정부(한국산업기술평가관리원)의 초 안전 주행플랫폼 핵심기술 개발사업 다중안전 설계기반 멀티 구동모터 AWD 시스템 기술 개발과제의 지원을 받아 수행하였음

참고 문헌

[1] B. Zhou, G. Wang, R. Gao, G. Zhang, N. Zhao and D. Xu, "Online Estimation of DC-Link Capacitance for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Reduced DC-Link Capacitor," IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-5.

[2] N. Zhao, R. Gao, G. Wang, D. Ding, G. Zhang and D. Xu, "Online Estimation Method of DC-Link Capacitors for Reduced DC-Link Capacitance IPMSM Drives," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 11, pp. 12196-12201, Nov. 2021,