

재귀 최소 제곱 알고리즘을 적용한 실시간 직류링크 커패시턴스 추정

김진수, 류제섭, 배채윤
엘에스일렉트릭

Online DC-Link Capacitance Estimation Based On RLS Algorithm

Jin Su Kim , Jae-seop Ryu , Chaeyoon Bae
LS Electric

ABSTRACT

전력변환회로에서 DC-Link 커패시터는 전력이 변환될 때 전압을 평활화 해주는 중요한 역할을 해주는 중요한 구성 요소 중 하나이다. 전력전자 분야에서 DC-Link 커패시터의 고장율은 가장 큰 비중을 차지하고 있고 이는 사용자로부터 신뢰도를 떨어뜨린다. 따라서 DC-Link 커패시터의 고장을 사전에 감지하여 진단하는 것은 사용자의 신뢰를 얻기 위한 확실한 방법이다. 본 논문에서는 전기자동차에서 사용할 수 있는 인버터 모델을 대상으로 실시간 직류링크 커패시턴스를 추정하는 방법을 제안할 것이며, 장점으로 추가적인 장비 혹은 부품을 필요로 하지 않는다. 제안하는 추정 방식은 인버터의 입력전력과 배터리 전력의 차로 구해지며 보다 정확한 결과를 얻기 위해 재귀 최소 제곱 (Recursive Least Square) 알고리즘을 사용하였다. 제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션을 사용하였다.

1. 서 론

최근 환경 규제의 강화로 전기자동차가 전력 전자의 발전으로 화석연료나 배출 가스를 줄이는데 큰 관심을 끌고 있다. 전 세계적으로 유명한 자동차 회사들은 이미 하이브리드(HEV), 플러그인 하이브리드(PHEV), 수소전기차 (FCEV), 전기자동차(EV)와 같은 친환경적인 자동차를 개발했다. 유럽 연합(EU)에서는 2035년부터 내연기관 기반의 새로운 차량 판매를 금지하는 혁신적인 합의가 이루어졌다. 전기 자동차를 구동하기 위해서는 다양한 전기 구성요소가 필요하지만 핵심적으로는 배터리, 전동 모터, 인버터, 그리고 배터리 관리 시스템(BMS)가 있다. 전력 변환 장치 중 인버터는 전기 자동차에서 중요한 구성 요소로서 배터리를 통해 전기 모터에 토크를 생성한다. 전력 전자에 사용되는 다양한 구성 요소의 고장율이 그림 1에 설명되어 있으며, 커패시터와 반도체 스위치의 고장은 인버터 손상을 초래하여 전기 자동차에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 이는 안전에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 커패시터의 고장이 발생하기 전에 사전 고장 진단을 수행하여 예방하는 것은 안전 우려와 직접적으로 관련이

있으므로 소비자들의 불안감을 해소시켜 줄 수 있는 방안 중 하나이다.

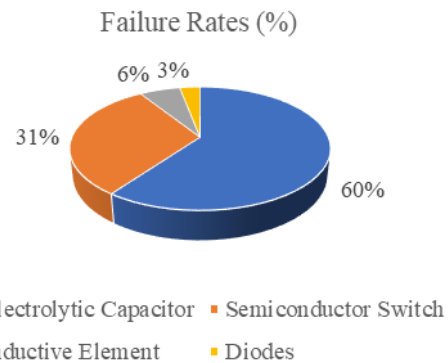


그림1 전력 전자 요소 고장 율
Fig.1 Failure rates of various components in power electronics

본 논문에서는, 전기 자동차 구동에 필요한 인버터의 실시간 직류링크 커패시턴스를 추정하는 방법에 대하여 언급할 것이다. 커패시턴스는 인버터의 입력 전력과 배터리 전력의 차를 사용하였고 보다 정확한 결과를 얻기 위해 재귀 최소 제곱 알고리즘(RLS)을 적용하였다. 본 방법은 실제 자동차에서 추가적인 장비 혹은 센싱 회로 없이 일반적으로 구동하는 상태에서 추정이 가능하다는 장점을 갖고 있다.

2. 본 문

2.1 재귀 최소 제곱(Recursive Least Square) 알고리즘

재귀 최소 제곱(RLS) 알고리즘은 주로 신호 처리 및 적응형 필터링에 사용된다. 이 알고리즘은 실시간 데이터를 기반으로 시스템 매개변수를 추정하거나 신호 처리 및 제어 시스템 내의 다양한 응용 분야에서 사용된다. RLS 알고리즘을 사용하는 주된 목적은 추정되는 시스템 매개변수 값과 실제 매개변수 값 차이의 평균 제곱 오차를 최소화하는 최적의 매개변수를 찾는 것이다. 알고리즘을 처리하는데 6단계가 존재하는데 이는 입출력 데이터 정의, 가중벡터 초기화, 실시간 데이터 수립, 실시간 데이터 계산, 데이터 예측, 가중벡터 최신화 순으로 이루어진다.

$$y(k) = \phi(k)^T \cdot w(k) \cdot \zeta(k) \quad (1)$$

수식 (1)은 RLS 알고리즘의 수식이다. RLS 알고리즘의 장점은 실제 데이터 값을 모르는 상태에서 실제 값을 추정할

수 있다는 점이 존재한다. 위 식에서 $y(k), \phi(k), \zeta(k)$ 는 각각 측정이 가능한 요소이고 $w(k)$ 는 추정하고자 하는 요소 및 가중치이다. 추정하고자 하는 값은 이득 값에 의해 구해지며 식 (2)는 이득 값 계산을 위한 식이다.

$$K(k) = \frac{p(k-1) \cdot \phi(k)}{\lambda + \phi(k)^T \cdot p(k-1) \cdot \phi(k)} \quad (2)$$

2.2 제안하는 직류링크 커패시턴스 추정 방법

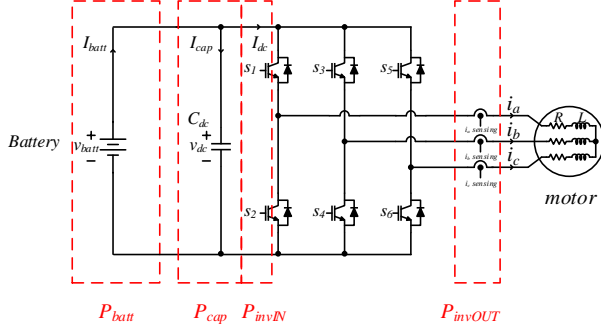


그림2 일반적인 전기자동차 인버터 회로도
Fig.2 Typical electric vehicle circuit

그림2은 일반적인 전기자동차 인버터 회로도다. 그림에서 나타내는 $P_{batt}, P_{cap}, P_{invIN}, P_{invOUT}, Battery, V_{batt}, V_{dc}, I_{batt}, I_{cap}, I_{dc}, i_a, i_b, i_c, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 는 각각 배터리 전력, 커패시터 전력, 인버터 입력 전력, 인버터 출력 전력, 배터리 전압, 직류링크 전압, 배터리 전류, 커패시터 전류, 인버터 입력 전류, 각 상전류, 반도체 스위치 (IGBT) 6개이다. 인버터 입력전력과 배터리 전력의 차로 직류링크 커패시턴스를 추정하기 위해서 배터리 전력은 배터리 관리 시스템(BMS)을 통해 계산이 가능하고 입력전력은 dq변환으로부터 얻을 수 있는 전압지령과 전류지령으로 식 3,4를 구한 후 식 5와 같이 출력 전력을 구한 후 식 6과 같이 인버터 효율 η 를 곱하면 인버터 입력 전력이 된다.

$$V_d^* = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) (i_d^* - i_d) - \omega_e L_d \quad (3)$$

$$V_q^* = K_{pd} + \frac{K_{iq}}{s} (i_q^* - i_q) + \omega_e (\psi_f + L_d i_d) \quad (4)$$

$$P_{invOUT} = 1.5(V_d^* i_d + V_q^* i_q) \quad (5)$$

$$P_{invIN} = P_{invOUT} = 1.5(V_d^* i_d + V_q^* i_q) * \eta \quad (6)$$

따라서 커패시턴스는 식 7을 통해 구할 수 있다.

$$P_{cap} = P_{batt} - P_{invIN} = C_{dc} \cdot V_{dc} \cdot \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (7)$$

2.3 시뮬레이션

표 1 영구자석 동기전동기 모터 사양

Table 1 Specification of PMSM

Parameter	Value
Number of pole	8
R_s	0.017Ω
L_d, L_q	$490\mu H$

K_e	$0.11 V_{LL}/krpm$
T_r	$47.7 N \cdot m$
C_{dc}	$220\mu F$

제안한 알고리즘의 타당성을 증명하기 위해서 PSIM 시뮬레이션을 진행하였고 회로는 그림 2와 동일하게 구성하였다. 표 1은 시뮬레이션에서 사용된 모터 제정수다.

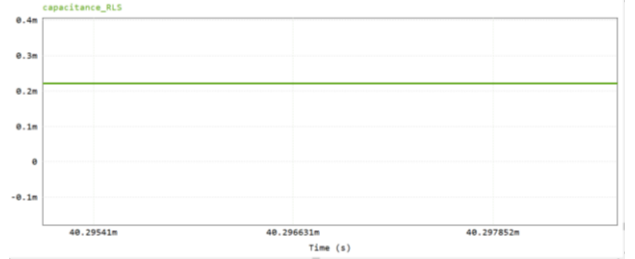


그림3 RLS 알고리즘을 적용한 직류링크 커패시턴스 추정 시뮬레이션 파형
Fig.3 DC-Link capacitance estimation simulation result based on RLS algorithm

그림 3은 PSIM을 이용한 커패시턴스 추정 결과이고 추정 값은 $220.837\mu F$ 으로 오차율 0.379%로 추정 가능했다.

3. 결론

본 논문에서는 배터리 전력과 인버터 입력전력의 차를 이용하여 직류링크 커패시턴스 추정 방법에 관하여 언급하였다. 인버터 입력전력을 계산하기 위해서 dq변환을 통해 얻어지는 전압과 전류 지령에 효율을 곱해 얻을 수 있다. 시뮬레이션 결과 오차율 0.379%의 정확성으로 직류링크 커패시턴스를 추정할 수 있었다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No.20210501010020)

참고 문헌

- [1] A. Lahyani, P. Venet, G. Grellet, and P. J. Vivierge, "Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switchmode power supply," IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, no. 6, pp. 1199-1207, Nov. 1998.10.1109/ACCESS.2023.3336986.
- [2] Reliability Prediction of Electronic Equipment, Military Handbook 217F, U.S. Dept. of Defense, Arlington County, VA, USA, Feb. 28, 1995.10.1109/ACCESS.2023.3336986.
- [3] chnical Guide of Aluminium Electrolytic Capacitors, Matsushita Electronic Components Co., Ltd., Osaka, Japan, Mar. 2, 2000.10.1109/ACCESS.2023.3336986.
- [4] M. K. P. M. Ramees and M. W. Ahmad, "Advances in Capacitor Health Monitoring Techniques for Power Converters: A Review," in IEEE Access, vol. 11, pp. 133540-133576, 2023, doi: