

HEV/EV용 인버터의 입력 Film Capacitor 최적 설계 방법

신승민*, 유승희*, 이병국*, 박래관**
성균관대학교 정보통신대학*, 에이디티**

Optimum Designing Film DC Link Capacitors for HEV/EV Applications

Seung Min Shin*, Seung Hee Ryu*, Byoung Kuk Lee*, Rae Kwan Park**
College of Information & Communication Engineering, SungKyunKwan University*, ADT**

ABSTRACT

본 논문에서는, 전기 자동차용 인버터의 DC Link에 사용되는 Film Capacitor의 최적 용량 선정 방법을 제시한다. 이를 위해 Film Capacitor의 동작 온도에 따른 기대수명, 전류 내량, 전압 내량 등을 고려하며, 실제 적용사례를 들어 검증한다.

1. 서론

최근 국내외적으로 유가급증과 환경규제 강화로 인하여 전기자동차에 대한 수요 전망이 크게 증가하고 있다. 하지만, 배터리의 직류 전원을 공급받아 모터를 구동하는 인버터에 있어 크기, 무게, 수명, 비용, 신뢰성 등은 계속 문제가 되고 있다. 특히, DC Link Capacitor는 인버터를 구성하는 주요 부품들 중 전기자동차용 인버터가 가지는 문제점에 가장 큰 영향을 주는 수동소자이다.

전통적인 인버터는 DC Link Capacitor로 전해캡을 사용했다. 하지만, 전해캡은 기대 수명이 10,000 시간 정도로 짧으며 ripple current 수용량이 적어, 80kW 정도의 인버터 제작 시 전체 시스템의 크기, 무게, 비용 상승을 유발시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Film Capacitor를 이용한 전기자동차용 인버터 제작이 증가하고 있다. Film Capacitor는 전해 캡에 비하여 등가 직렬 저항의 값이 평균적으로 10배가 적으며, 극성·폭발·Dry out의 문제가 없다. 또한 기대 수명이 100,000 시간 정도로 전해캡을 사용한 EV용 인버터보다 사용가능 시간을 크게 증가시킬 수 있다. 하지만 Film Capacitor는 전해캡에 비하여 Capacitance의 선택의 폭이 많지 않으며, 동작 온도가 올라갈수록 전류 밀도가 급격히 떨어지는 단점이 있다. 더군다나 최대 동작 온도에서 10°C 15°C 초과하면 기대 수명이 절반으로 낮아진다. 따라서 EV에 적용 시 방열 설계가 무엇보다도 중요하다^{[1][2]}.

높은 파워를 요구하는 EV용 인버터의 Film Capacitor는 Decoupling, Filtering, 에너지 버퍼의 역할을 수행하여, 비용·크기·무게 등 전체 시스템 설계 및 구성에 크게 영향을 준다. 따라서 동작 온도에 따른 기대수명의 만족, 비용·부파·무게 감소를 고려한 최적 설계가 필요하며, 순시 에너지 보상 가능 크기, 리플 전류, 리플 전압 등의 고려가 필요하다. 본 논문에서는 DC Link Capacitor의 역할과 최적 설계를 위한 기준을 제시하며, 실제 적용 사례를 들어 검증하겠다.

2. 본론

1.1 DC Link Capacitor 기대수명

EV 시스템은 높은 기대 수명이 요구되어 진다. 하지만 대표적 수동 소자인 Capacitor, 특히 DC Link의 Film Capacitor의 경우 동작 온도 특성에 따라 기대 수명이 급격히 변하기 때문에 방열 설계에 따른 정확한 기대 수명 예측이 필요하다.

Film Capacitor의 내부 온도는 식 1과 같이 결정되어 진다.

$$T_h = T_a + P \cdot R_{th} \quad (1)$$

여기서, T_a 는 대기 온도, R_{th} 는 Capacitor의 내부와 대기 사이의 상대적인 열저항, P 는 Capacitor의 파워 손실을 나타낸다.

Capacitor의 손실은 대부분 R_{ESR} 에 의해 발생하며 식 2와 같이 계산된다.

$$P = I^2 R_{ESR} \quad (2)$$

이를 통해 Film Capacitor의 기대 수명은 식 3과 같이 예측 가능하다.

$$L_{est} = L_{max} \cdot k^{\frac{T_{ambt} - T_h}{8}} \cdot \left(\frac{V_{nom}}{V_{DC}}\right)^7 \quad (3)$$

여기서, L_{est} 는 예측 기대수명, L_{max} 는 최대 동작 온도에서의 기대수명, k 는 온도 변동 계수, V_{nom} 은 정격 전압, V_{DC} 은 동작 전압을 나타낸다.

이를 통해 Film Capacitor의 수명 예측이 가능하며, 방열 설계의 최적화를 통해 기대수명을 늘리는 것이 가능하다.

1.2 에너지 버퍼

그림 1과 같이 배터리가 직류 전원을 공급하여 인버터를 구동하는 EV 시스템은 최악의 경우 순간적으로 높은 에너지를 필요로 한다. 특히, Zero to Hundred 의 경우 순간적으로 300A 400A를 부하에서 필요로 한다. 따라서 DC Link Capacitor를 통하여 순간적인 부하 변화에 대한 순시 에너지 보상이 필요하며, 이것은 식 4와 같이 계산하여 Capacitance의

최소 요구 값을 구할 수 있다.

$$C_{\min} = \frac{2P_o}{f_{sw} \cdot (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)} \quad (4)$$

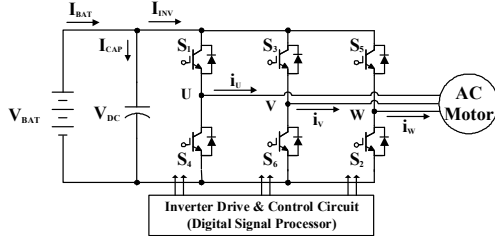


그림 1 배터리가 연결된 EV용 인버터
Fig. 1 Battery connected inverter for EV system

1.3 리플 전류

DC Link Capacitor를 선택할 경우 인버터 동작 특성에 따라 발생하는 리플 전류를 연속적으로 흘릴 수 있는 리플 전류량을 만족시켜야 한다. 리플 전류의 크기는 Source Inductance가 고주파 리플 전류를 제한할 정도로 충분히 크다고 가정하면, 부하 전류의 변화량과 거의 동일하며, SVPWM으로 구동 시 Modulation Index (MI), 출력 전류, Power Factor에 영향을 받는다. 이것은 식 5와 같이 구할 수 있다.

$$I_{rip}^2 = I_{out}^2 \left[\frac{MI}{\pi} + \left(\frac{4}{\pi} - \frac{3}{2} MI \right) \cdot MI \cdot \cos^2 \theta \right] \quad (5)$$

1.4 리플 전압

DC Link Capacitor를 선택할 경우 인버터 동작 특성에 따라 발생하는 리플 전압 크기를 만족시켜야 한다. 리플 전압의 크기는 Capacitor에 흐르는 전류의 크기는 식 6과 같이 때문에 식 7을 통해서 구할 수 있다.

$$i_c = C \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

$$\Delta V_{0.5t} = \frac{V_{bus}}{32L \cdot C \cdot f^2} \quad (7)$$

이때, Duty가 0.5일 경우 최대 리플 전류가 발생되며, 리플 전압의 크기도 최대가 된다.

1.5 EV Inverter Capacitor

EV용 인버터에 사용되어 질 수 있는 DC Link Film Capacitor를 선택을 통하여 신뢰성, 가격, 무게, 부피의 향상을 가져올 수 있다. 인버터의 스위칭 주파수는 8kHz, DC Link 전압의 크기는 380V로 설계하였으며, 리플 전압은 1% 이내로 제어 되어야 한다. 또한 인버터의 출력을 DC Link Capacitor에서 모두 공급받는다 가정한다면 DC Link Capacitor에 인버터가 최대로 출력할 수 있는 에너지가 저장될 수 있는 용량이 필요하다. DC Link 전압의 변동율이 10%라 가정한다면, 아래 식 8과 같이 Capacitor의 최소 요구 값을 구할 수 있다.

$$C_{\min} = \frac{2P_o}{f_{sw} \cdot (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)} = \frac{2 \times 80000}{8000 \times (380^2 - 342^2)} \approx 730 \mu F \quad (8)$$

또한, 모터 한 상의 인덕턴스의 크기가 100uH로 가정하면 Capacitor의 크기가 1000uF일 경우 리플 전압의 크기가 1% 이하인 것을 식 9를 통하여 확인할 수 있다.

$$C = \frac{V_{bus}}{32L \cdot \Delta V_{0.5t} \cdot f^2} = \frac{380}{32 \times 100 \mu H \times 3.8 \times 8000^2} \approx 500 \mu F \quad (9)$$

80kW EV용 인버터의 리플 전류의 크기는 80A로 가정하였으며, 따라서 표1과 같은 Film Capacitor를 선택하여 병렬연결하여 위의 조건을 만족하는 1000uF의 DC Link를 구성하였다.

표 1 선택 Film Capacitor
Table 1 Selected Film Capacitor

| DC Link Film Capacitor for 80kW Inverter | | | |
|--|---------------------|------------------------|---------------------|
| Nominal Capacitance | 500uF | Tolerance | ±10% |
| Rated DC Voltage | 1200V _{DC} | Peak Voltage | 1300V _{DC} |
| Nominal RMS Current | 80A | Max Peak Surge Current | 19000A |
| ESR | 3.57mohm | Life Time | 100,000Hour |
| Dimension | D*H =116*145mm | Weight | 2.2kg |

3. 결론

본 논문에서는 EV용 인버터시스템의 신뢰성, 가격, 부피, 무게 향상을 위해 DC Link Film Capacitor를 선택하기 위한 방법의 기준을 제안하였다. 먼저 방열 설계에 따른 Film Capacitor의 기대 수명을 예측하는 방법을 제시하여, 신뢰성에 대한 최소 요구사항 만족시킬 수 있다. 또한 Film Capacitor 선택을 위한 에너지 버퍼, 리플 전류, 리플 전압에 대한 기준식을 제시하여, 최적의 설계가 가능하여 가격, 무게, 부피의 향상을 가져올 수 있다. 이를 80kW EV용 인버터의 실제 적용 사례를 통하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] M. Salcone, J. Bond, "Selecting Film Bus Link Capacitors For High Performance Inverter Applications", IEMDC2009, pp. 1692-1699, 2009.
- [2] R. Grinberg, P. R. Palmer, "Advanced DC Link Capacitor Technology Application for a Stiff Voltage Source Inverter", VPPC2005, pp. 6-12, 2005.