

## 전류 리플을 이용한 직류단 캐패시터의 용량 선정 기법에 관한 연구

### A Study on Capacitance Selection Method of DC-link Capacitor Using Current Ripple

김용휴<sup>1</sup>, 이병훈<sup>2</sup>, 황선환<sup>3\*</sup>

Yong-Hyu Kim<sup>1</sup>, Byung-Hoon Lee<sup>2</sup>, Seon-Hwan Hwang<sup>3\*</sup>

#### 〈Abstract〉

This paper proposes a method for selecting the capacitance of DC-link capacitors of inverters. In general, the DC-link capacitance of the inverter system must be considered for DC-link voltage, ripple current, switching frequency, ripple voltage, and pulse-width modulation techniques. Therefore, the appropriate capacitance can be determined by finding the rms and peak values of the ripple current of the capacitor. In this paper, the process of extracting the ripple current of DC-link capacitor is described in detail. In addition, the simple method for finding DC-link capacitor capacitance using the result value is presented through the simulations.

*Keywords : DC-link Capacitor, Current Ripple, Ripple Voltage, Simulation, SVPWM*

---

1 정회원, 주저자, 부산테크노파크 스마트모빌리티 센터장  
E-mail: yhkim@btp.or.kr

2 정회원, (주)신기인터모빌, 차장  
E-mail: lbh3136@sinkimobil.com

3\* 정회원, 교신저자, 경남대학교 전기공학과, 교수  
E-mail: seonhwan@kyungnam.ac.kr

1 Head Director, Smart Mobility Technology Center, Busan Techno Park

2 Senior Research Engineer, Technical Strategy Team, Sinki Intermobil Co.

3\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

## 1. 서론

최근 국제 유가증가 및 친환경 규제에 의한 전동기와 인버터를 이용한 하이브리드 및 전기 자동차, 전철 등의 수요가 증가하고 있다. 또한, 신재생에너지원 사용에 따른 계통연계형 시스템 역시 확대 적용되고 있다. 특히, 전기자동차 및 계통연계형 산업분야 등에 적용되는 인버터 시스템은 제품의 사이즈, 무게, 수명 및 신뢰성 등이 중요한 문제로 대두되고 있다. 인버터 시스템은 입력단과의 디커플링 및 직류 전압 평활을 목적으로 전해 캐패시터 또는 필름 캐패시터가 일반적으로 사용되고 있고 직류단 캐패시터의 수명과 신뢰성이 전체 시스템의 운전 성능에 상당한 영향을 미치고 있다 [1]-[3].

앞서 언급했듯이 인버터의 직류단 캐패시터로는 전해 캐패시터를 널리 사용하고 있다. 하지만 전해 캐패시터는 리플 전류의 수용량이 낮아 인버터 시스템의 크기, 무게, 비용 등을 상승시키며 캐패시터의 기대 수명도 작은 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 배터리 전압을 이용하여 구동되는 전기 자동차 및 방산용 로봇 등 고신뢰성과 소형, 친환경 특성을 요구하는 산업분야에서는 금속 증착형 캐패시터와 유전체인 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 필름 사용이 증가하고 있다. 우수한 전류 리플 특성을 가진 금속 증착형 폴리프로필렌 필름 캐패시터는 전극 무게와 부피 감소로 인한 소형화가 가능하며 자기회복 현상으로 인한 고신뢰성을 얻을 수 있다. [4]-[6]

최근 직류단 캐패시터의 신뢰성 향상을 위해 유전체 매질, 증착방식에 관한 연구와 캐패시터의 용량을 실시간으로 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고 본 논문에서 논의하고자 하는 직류단 캐패시터 선정은 운전 전압, 정격 전류, 전력 손실, 열 제한, 에너지 저장 용량 및 시스템

매개변수와 상호 간섭 효과를 비롯한 다양한 요인에 따라 달라지며 이러한 요인에 의해 캐패시터를 설계함에 있어 어려움이 발생한다. [7]-[10]

이러한 요인을 고려하여 직류단 캐패시터를 설계하는 방법으로 PWM 방식에 따라 리플 전류와 변조 지수의 상관관계를 분석하거나 역기전력, 고조파, 리플 전류, 전압 마진 및 주파수를 이용한 캐패시터 선정 방법이 있으나 SVPWM 방식이 적용된 수식이 아니며, 이를 이용한 캐패시터 선정에 대한 내용이나 구체적인 수학적 표현이 생략되어있다. [8], [10]

본 논문에서는 금속 증착형 폴리프로필렌 필름 캐패시터를 사용한 직류단 캐패시터의 리플 전류를 분석하고, 이 결과값을 통해 직류단 캐패시터 값을 선정하는 간단한 방법을 제안한다. 또한, 케이블 선로에 존재하는 기생 인덕턴스 성분을 포함한 인버터 시스템 시뮬레이션을 모사하여 캐패시터의 용량 선정 방법을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 직류단 캐패시터의 용량 선정 기법의 효용성은 다수의 시뮬레이션과 수식의 결과 비교를 통해 확인하였다.

## 2. 본론

### 2.1 직류단 캐패시터의 전류 리플 분석

인버터 시스템의 특성에 따라 발생하는 리플 전류를 수용할 직류단 캐패시터를 선정하기 위해 유효 전압 벡터와 영 전압 벡터를 활용하여 출력 전압 공간 벡터를 표현하는 공간 벡터 전압 변조(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 방식이 적용된 인버터 시스템에서 직류단 캐패시터를 구하는 수식을 활용하여 리플 전류를 수학적으로 표현하고자 한다.

Fig. 1은 일반적인 3상 교류 전동기를 구동하기 위한 인버터 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 인버터 시스템에서의 각 상전류는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. [11]

$$\begin{aligned} i_{N\_A} &= I_m \cos(\theta - \cos\varphi) \\ i_{N\_B} &= I_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3} - \cos\varphi) \\ i_{N\_C} &= I_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3} - \cos\varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $i_{N\_A}, i_{N\_B}, i_{N\_C}$ 는 전동기측 상전류,  $\cos\varphi$ 는 역률값,  $I_m$ 은 상전류의 최댓값이다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 알 수 있듯이 인버터로 입력되는 전류  $i$ 는 공간 벡터 전압 변조 방식의 스위칭 상태에 따라 식 (2)와 같은 스위칭 함수로도 표현이 가능하다.

$$i = S_a i_{N\_A} + S_b i_{N\_B} + S_c i_{N\_C} \quad (2)$$

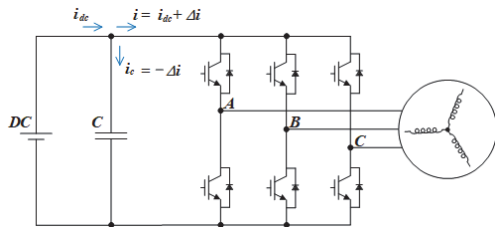


Fig. 1 Configuration of PWM voltage source inverter

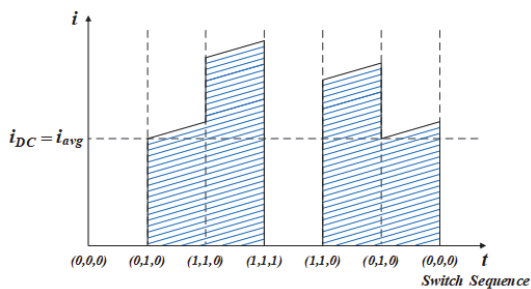


Fig. 2 Current waveform according to switch states

여기서,  $S_a, S_b, S_c$ 는 스위칭 소자의 턴-온 및 턴-오프에 따른 '1'과 '0'의 값을 갖는 스위칭 함수이다.

SVPWM에서 유효 전압 벡터와 영 전압 벡터로 구성된 8가지의 스위칭 패턴은 각각의 스위칭 상태에 따라 인가 시간을 구할 수 있다. Fig. 2에서 볼 수 있는 유효 전압 벡터인 (0, 1, 0), (1, 1, 0)과 영 전압 벡터인 (0, 0, 0), (1, 1, 1)는 '섹터 2' 영역으로 해당 스위칭 상태에서의 인가 시간을 표현하면 아래와 같다.

$$D_{(0,1,0)} = \frac{t_{(0,1,0)}}{T_s} = \frac{\sqrt{3}}{2} M \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \quad (3)$$

$$D_{(1,1,0)} = \frac{t_{(1,1,0)}}{T_s} = \frac{\sqrt{3}}{2} M \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) \quad (4)$$

$$D_{(0,0,0)} = D_{(1,1,1)} = 0.5(1 - D_{(0,1,0)} - D_{(1,1,0)}) \quad (5)$$

여기서,  $M = \frac{V_{phase\_pk}}{0.5 V_{dc}} = \frac{V_m}{0.5 V_{dc}}$ 이다.

Fig. 2의 스위칭 상태에서의 인버터측 입력전류의 평균값  $i_{avg}$ 는 식 (6)과 같이 기술할 수 있다.

$$i_{avg} = \frac{2}{T_s} \int_0^{\frac{T_s}{2}} i(t) dt \quad (6)$$

식 (6)을 전동기측 상전류와 스위칭 상태에 따른 인가 시간으로 대입하여 전개하면 식 (7)과 같이 입력전류의 평균값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{avg} &= D_{(0,1,0)} i_{N\_B} - D_{(1,1,0)} i_{N\_C} \\ &= \frac{3}{4} I_m M \cos\varphi \end{aligned} \quad (7)$$

앞서 인버터의 입력 전류는 저주파와 고주파가 아닌 스위칭 주파수 성분을 포함하기에 실질적인

입력전류의 실효값  $i_s$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)의 스위칭 상태에 따른 유효 전압 벡터와 영 전압 벡터 및 상전류를 활용하여 전개하면 식 (9)와 같다.

$$i_s^2 = \frac{2}{T_s} \int_0^{\frac{T_s}{2}} i^2(t) dt \quad (8)$$

$$i_s^2 = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} (D_{(0,1,0)} i_{N.B}^2 + D_{(1,1,0)} i_{N.C}^2) d\theta \quad (9)$$

여기서,  $\theta$ 는 기준 전압 벡터의 위치이다.

최종적인 인버터 입력 전류의 실효값  $i_s$ 는 다음과 같다.

$$i_s = I_m \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi} M \left( \frac{1}{4} + \cos^2 \varphi \right)} \quad (10)$$

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 일반적인 인버터 시스템에서 입력전류  $i$ 는 다음과 같이 직류 성분  $i_{dc}$ 과 교류 성분  $i_{ac}$ 로 나눌 수 있으며 직류 성분은 입력전류의 평균값  $i_{avg}$ 로 볼 수 있다.

$$i = i_{dc} + i_{ac} = i_{avg} + i_{ac} \quad (11)$$

식 (11)의 입력전류를 직류단 캐패시터의 입력 전류와 교류 성분의 실효값으로 표현하면 식 (12)

와 같이 정리할 수 있다.

$$i_s^2 = i_{dc}^2 + i_{ac.s}^2 = i_{avg}^2 + i_{c.s}^2 \quad (12)$$

여기서,  $i_{dc}$ 는 직류단 캐패시터의 입력 전류 실효값이고  $i_{c.s}$ 는 직류단 캐패시터의 교류 성분 실효값이다.

직류단 캐패시터의 교류 성분에 해당되는 실효값  $i_{c.s}$ 는 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$i_{c.s}^2 = i_s^2 - i_{avg}^2 \quad (13)$$

식 (13)을 식(8)과 식(10)을 활용하여 전개하면 직류단 캐패시터 산정에 필요로 하는 교류 성분의 실효값을 식 (14)와 같이 계산할 수 있다.

$$i_{c.s} = I_{out.s} \sqrt{\frac{M}{\pi} + \left( \frac{4}{\pi} - \frac{3}{2} M \right) M \cos^2 \varphi} \quad (14)$$

여기서,  $M$ 은  $0 < M \leq 1.15$  이다.

## 2.2 인버터 시스템의 모델링

본 논문에서 제안하는 직류단 캐패시터의 캐패시턴스 선정 기법의 효용성을 검증하기 위해 Fig. 3과 같이 시뮬레이션 모델을 구현하고 수식의 결

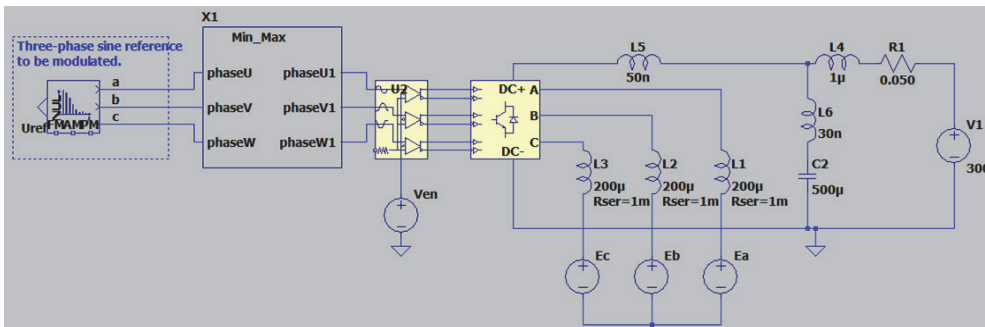


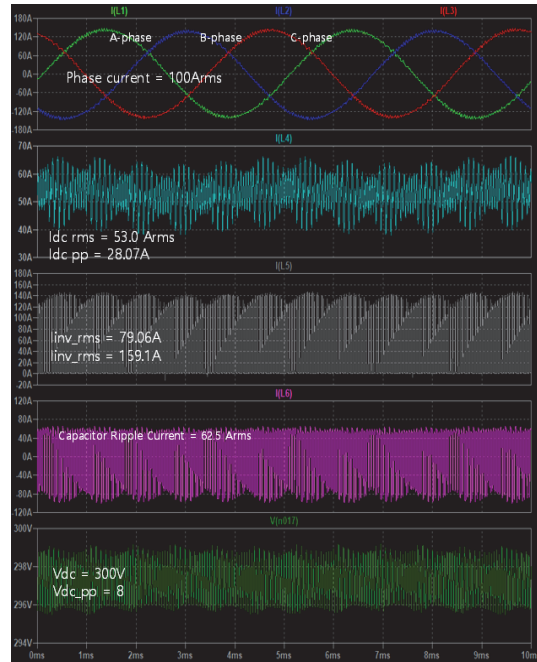
Fig. 3 Simulation model of 3-phase PWM voltage source inverter

과를 비교하였다. 구현한 시뮬레이션의 모델은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 직류단 회로내에 존재하는 기생 인덕턴스 성분 및 전동기측 고정자 인덕턴스 및 고정자 저항을 반영하여 실제 인버터 시스템을 모사하였다. Table 1의 인버터 시스템은 직류단의 캐패시터 선정에 위해 직류단 전압, 상전류, PWM 변조지수 및 역률을 이용하여 제안한 수식으로부터 리플 전류를 계산하고 모사된 시뮬레이션 결과를 비교한 표이다.

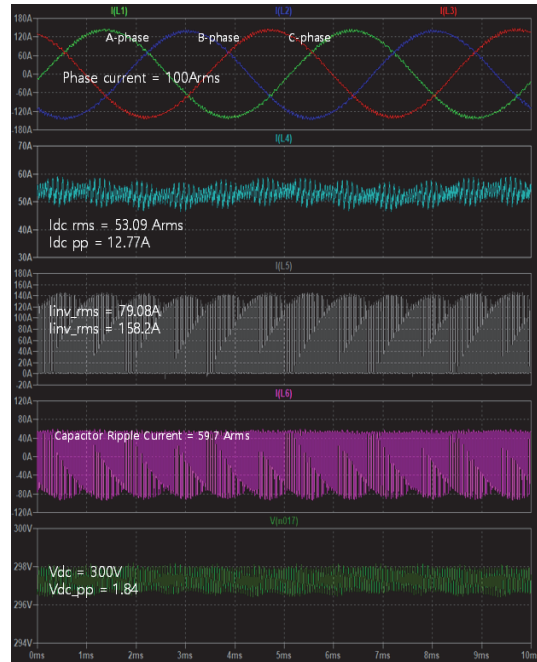
Fig. 4는 모사한 인버터 시스템을 통한 각 운전 조건에 따른 시뮬레이션 결과이다. 각각의 인버터 시스템에 선정된 직류단 캐패시터로 인한 리플 전압, 전류를 확인할 수 있다. 제안된 수식으로 계산된 전압 리플과 실제 모사한 시뮬레이션의 전압 리플 결과값의 범위 안에 있음을 확인할 수 있으며 표 1과 같이 직류단 캐패시터의 용량이 증가함에 따라 전압 리플이 감소되는 효과도 확인할 수 있다. Fig. 4(a)와 (b)는 직류단 캐패시터 용량이 각각 500 [μF]과 1,000 [μF] 조건에서의 시뮬레이션 조건으로 부하측 상전류, 직류단 캐패시

Table 1. Specifications of 3-phase SPMSM driving system

Parameters	Case(a)	Case(b)
$C$	500[μF]	1,000[μF]
$I_c$	62.5[Arms]	59.67[Arms]
$dt$	25[us]	25[us]
$\Delta V_{Formula}$	4.419[V]	2.109[V]
$\Delta V_{Simul.}$	3.73[V]	1.837[V]
$V_{dc\_s}$	297.3[V]	297.3[V]
$I_{dc}$	53.44[A]	53.09[A]
$I_{dc\_pp}$	28.57[A]	12.76[A]
$I_{inv\_s}$	79.12[A]	79.08[A]
$I_{inv\_pp}$	159.1[A]	158.2[A]



(a)



(b)

Fig. 4 Simulation results.

(a) C : 500[μF]. (b) C : 1,000[μF]

터 입력 전류, 인버터 입력 전류, 직류단 캐패시터의 리플 전류와 리플 전압을 보여주고 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 3상 PWM 인버터의 직류단 캐패시터의 리플 전류를 분석하고, 해당 캐패시터의 용량을 선정하는 기법을 제안하였다. 일반적으로 3상 PWM 인버터 시스템은 전동기측 상전류 및 출력 전압의 리플이 결정되면, 직류단 캐패시터의 리플 전류를 산정하여 캐패시턴스를 선정할 수 있다. 또한 캐패시턴스 선정을 위한 캐패시터 리플 전류 분석하고 수식을 전개하였다. 이를 통해 캐패시터의 용량 선정에 있어 신뢰성과 정확성을 위한 직류단 회로 내의 기생 인덕턴스 성분도 반영하여 실제 인버터 시스템을 모사한 시뮬레이션을 통해 제안된 캐패시터의 용량 선정 기법에 대한 효용성을 검증하였다. 이를 위해 수식적 접근과 더불어 시뮬레이션 결과에 의한 전압 리플을 상호 비교 분석을 진행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 직류단 캐패시터의 용량이 증가함에 따라 전압 리플이 감소함을 확인하였다.

### Acknowledgement

이 논문은 산업통상자원부의 디자인혁신역량강화사업(미래선행디자인기술개발) “반려동물 패밀리 중심 다중 센서 기반 인공지능 탑승자 인식 및 공기청정 콘솔 인터페이스 디자인”(과제번호 20006697)으로 수행된 것임.

### 참고문헌

- [1] Y. Yoshida and T. Muraoka, “The development of high voltage power capacitor technology in Japan,” IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 33-45, (1995).
- [2] J. W. McPherson, J. Y. Kim, A. Shanware, H. Mogul and J. Rodriguez, “Trends in the ultimate breakdown strength of high dielectric-constant materials,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 50, no. 8, pp. 1771-1778, (2003).
- [3] C. H. Yang, D. J. Park, Y. W. Jeon, G. B. Kang and D. W. Han, “DC link film capacitor development for HEV inverter”, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, pp. 2066-2070, 2008.
- [4] K. Harada, A. Katsuki and M. Fujiwara, “Use of ESR for deterioration diagnosis of electrolytic capacitor”, IEEE Trans, vol. 8, no. 4, pp. 355-361, Oct. 1993.
- [5] A. M. Imam, D. M. Divan, R. G. Harley and T. G. Habetler, “Real-time condition monitoring of the electrolytic capacitors for power electronics applications”, IEEE Appl. Power Electronics, pp. 1057-1061, 2007.
- [6] G. M. Buiatti, J. A. Martín-Ramos, A. M. R. Amaral, P. Dworakowski and A. J. M. Cardoso, “Condition monitoring of metalized polypropylene film capacitors in railway power trains”, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, vol. 58, pp. 3796-3805, 2009.
- [7] M. Salcone and J. Bond, “Selecting film capacitors for high performance inverter applications”, IEMDC 2009, pp. 1692-1699, 2009.
- [8] X. Pu, T. H. Nguyen, D. Lee, K. Lee and J. Kim, “Fault diagnosis of dc-link capacitors in three-phase ac/dc PWM converters by online estimation of equivalent series resistance”, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 60, no. 9, pp. 4118-4127, Sept. 2013.
- [9] R. Grinberg and P. R. Palmer, “Advanced dc link capacitor technology application for a stiff voltage-source inverter”, in Proc. IEEE Conf.

- Veh. Power Propulsion, pp. 6, 2005.
- [10] H. S. Park, "The study on dc-link film capacitor in 3 phase inverter system for the consideration of frequency response", Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society, vol. 19, no. 4, pp. 117-112, 2018.
- [11] J. W. Kolar, T. M. Wolbank, and M. Schrod, "Analytical calculation of the RMS current stress on the DC link capacitor of voltage DC link PWM converter systems," in Proc. IEE Conf. Electrical Machines and Drives no. 468, pp. 81-89, 1999.

---

(접수: 2021.12.31. 수정: 2022.01.16. 게재확장: 2022.01.17.)