

# 단상 PWM 컨버터의 직류링크 커패시턴스 추정

보성사, 누옌탄하이, 이동춘  
영남대학교 전기공학과

## Calculation of DC-link Capacitance for Single-phase PWM Converters

Xingsi Pu, Thanh Hai Nguyen, Dong-Choon Lee  
Department of Electrical Engineering, Yeungnam University, Korea

### ABSTRACT

본 논문은 단상 PWM 컨버터의 직류링크 전해커패시터의 용량을 추정하는 기법을 제안한다. 무부하 상태에서 저주파수의 교류전압성분을 직류링크에 주입하여 리플 전압 및 전력 성분을 이용하여 커패시터의 용량을 계산한다. 제안된 방법은 실험적으로 검증되며 추정된 커패시터 용량의 오차는 0.85% 이내이다.

### 1. 서론

최근 신재생에너지의 전력변환장치로서 단상 PWM 컨버터를 많이 사용한다. 예를 들면 태양전지(PV)와 연료전지용 계통 연계형 인버터로 사용되고 또 무정전전원장치(UPS)<sup>[1]</sup> 등에서도 많이 이용된다. 이러한 AC/DC PWM 컨버터는 직류링크 부를 가지는데 대부분 전해 커패시터가 사용된다. 전해 커패시터는 저가격에 비해 큰 용량을 가지므로 필터나 에너지 버퍼로서 기능을 한다.

전해 커패시터는 사용시간이 지남에 따라 내부 전해질의 휘발에 의해 용량이 감소한다. 일반적으로 전해 커패시터 수명은 컨버터의 다른 부품에 비하여 매우 짧으므로 시스템 전체의 수명에 영향을 미치게 된다. 따라서 커패시터의 교체시기를 판별하기 위하여 커패시터 용량을 추정할 필요가 있다.

그 동안 전해 커패시터의 고장진단과 수명예측에 관한 몇몇 연구가 발표되었다. 특정온도 및 특정주파수에서의 등가직렬저항 값을 비교하는 방법은 온도센서와 추가적인 하드웨어가 필요하다<sup>[2]</sup>. [3]-[4]의 방법들은 알고리즘이 복잡하고 연속적으로 동작할 것을 요구한다. 또한 대부분 전력변환 시스템에서 커패시터는 내부에 설치되어 있어 계측기로 용량을 측정하기 위해서는 시스템으로부터 분리해야 하므로 측정이 어렵다.

본 연구에서는 단상 AC/DC PWM 컨버터 시스템에서 커패시터를 시스템에서 분리하지 않고 입력전압 주입을 통하여 온라인으로 커패시턴스를 추정하는 방법을 제안하고 실험을 통해 추정오차 0.85% 이하의 결과를 얻을 수 있음을 보인다.

### 2. AC/DC PWM 컨버터의 제어

그림 1은 단상 AC/DC PWM 컨버터의 제어 구성도 및 제안된 커패시턴스 추정 알고리즘을 나타낸다.

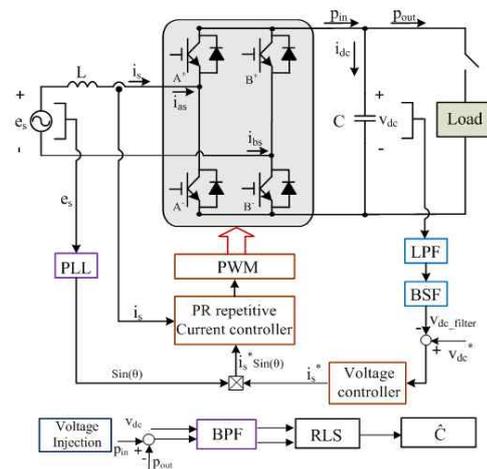


그림 1 단상 PWM 컨버터의 제어 블록도  
Fig. 1 Control block diagram for single-phase PWM converters.

### 2.1 단상에서의 위상 동기화 (Phase-Locked Loop)

본 연구에서는 수정된 3상 순시 무효전력 이론(p-q theory)<sup>[5]</sup>을 기반으로 한 단상 Phase-Locked Loop(PLL)를 적용한다. 전원단 전압의 정확한 위상각과 주파수 정보를 PLL로부터 얻을 수 있다.

### 2.2 비례 공진 반복 제어기

단상AC/DC 컨버터에서 d-q 좌표변환 이론을 직접 적용할 수 없다<sup>[6]</sup>. 본 연구에서는 특정 주파수의 지령을 대역폭 변화 없이 추종할 수 있는 비례 공진 제어기를 주제어기로 한다. 또한, 시스템의 특성으로 인하여 발생된 다수 고조파 성분은 주 제어기에 병렬로 반복제어기를 부가함으로써 보상된다.

비례 공진 반복 제어기의 식 (1)과 같다<sup>[7]</sup>.

$$H_{PR}(s) = K_P + K_I \frac{s}{s^2 + \omega^2} + K_{RE} \frac{e^{-sT}}{1 - e^{-sT}} \quad (1)$$

여기서,  $K_P = 27$ ,  $K_I = 1200$ ,  $K_{RE} = 0.5$ .

### 3. 전압 주입을 통한 커패시턴스 추정

#### 3.1 AC 전압 주입

정상상태에서, 직류링크의 전압은 스위칭에 의한 리플을 제

외하면 일정한 값이다. 정상상태 직류 값에서는 어떤 유효한 정보를 얻기 어려우므로 식(2)와 같은 특정한 주파수의 교류전압을 직류링크에 주입한다.

$$v_{inj}^* = 10\sin(2\pi \times 30t) \quad (2)$$

이 특정한 교류성분은 쉽게 추출될 수 있고 그 값으로부터 후술할 RLS기법을 통하여 커패시터의 용량을 추정할 수 있다.

### 3.2 직류링크 전력

컨버터의 손실을 무시하면 커패시터의 전력을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$p_{cap} = p_{in} - p_{out} = v_s(t)i_s(t) = \frac{C}{2} \frac{dv_{dc}^2}{dt} \quad (3)$$

여기서  $p_{cap}$ 는 직류링크 전력이고  $p_{in}$ 는 컨버터 입력단의 전력,  $p_{out}$ 는 부하측의 출력전력이다.  $v_{dc}$ 는 직류링크 전압이고  $C$ 는 직류링크 커패시터의 커패시턴스이다.

### 3.3 전압 주입을 위한 RLS기법

커패시터에서 전력 및 전압의 관계는 식(3)으로 알려져 있다. 전압주입으로 인하여 발생된 전력을 검출하기 위하여 식(3)의 양변에 대역통과 필터를 적용한다.

$$BPF[p_{cap}] = \frac{C}{2} \times BPF\left[\frac{dv_{dc}^2}{dt}\right] \quad (4)$$

따라서 RLS에 의하여 갱신된 값은 식(5)와 같이 주어진다.<sup>[8]</sup>

$$\hat{C}(n+1) = \hat{C}(n) + \mu(n)BPF\left[\frac{1}{2} \frac{dv_{dc}^2}{dt}(n)\right] \times [BPF[p_{cap}(n)] - \hat{C}(n)BPF\left[\frac{1}{2} \frac{dv_{dc}^2}{dt}(n)\right]] \quad (5)$$

여기서, 조정 이득은  $\mu(n) = 9.5 \times 10^{-13}$ .

## 4. 실험 결과

제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 시스템 파라미터를 표 1에 보인다.

표 1 시스템 파라미터  
Table 1 System parameters

파라미터	파라미터 값	
컨버터 용량	3 [kW]	
입력전압	220 [V <sub>rms</sub> ]	
승압용 인덕터의 인덕턴스	3 [mH]	
승압용 인덕터의 저항성분	0.06 [ $\Omega$ ]	
스위칭 주파수	5 [kHz]	
직류링크 전압	340 [V]	
샘플링 시간	100 $\mu$ s	
커패시터 용량	공칭용량	측정치 (LCR 미터)
	$C_1 : 1,000[\mu F]$	1,046 $\mu F$
	$C_2 : 1,500[\mu F]$	1,550 $\mu F$
	$C_1+C_2 : 2,500[\mu F]$	2,596 $\mu F$

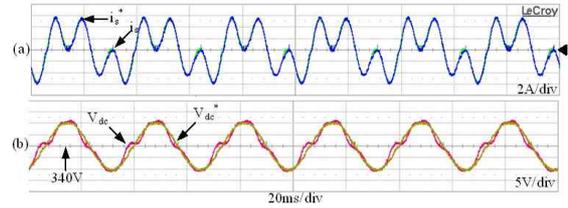


그림 2 전압주입시 전류 제어기와 전압 제어기 특성

(a)전원 전류( $i_s^*$ :reference,  $i_s$ :actual)

(b)직류링크 전압( $V_{dc}^*$ :reference,  $V_{dc}$ :actual)

Fig. 2 Performance of current and voltage control in the case of voltage injection

(a)Source currents( $i_s^*$ :reference,  $i_s$ :actual)

(b)DC-link voltages( $V_{dc}^*$ :reference,  $V_{dc}$ :actual)

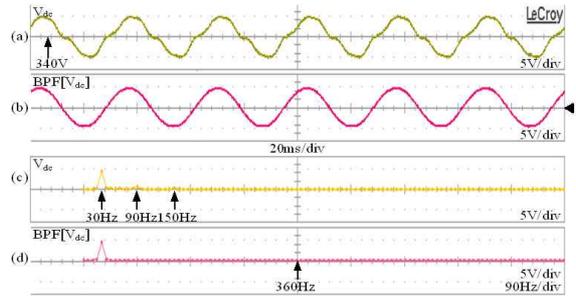


그림 3 직류링크 전압

(a)실측치

(b)대역통과필터 통과후

(c)(a)의 주파수 스펙트럼

(d)(b)의 주파수 스펙트럼

Fig. 3 DC-link voltage

(a)Measured

(b)Band-pass filtered

(c)Harmonic spectrum of (a)

(d)Harmonic spectrum of (b)

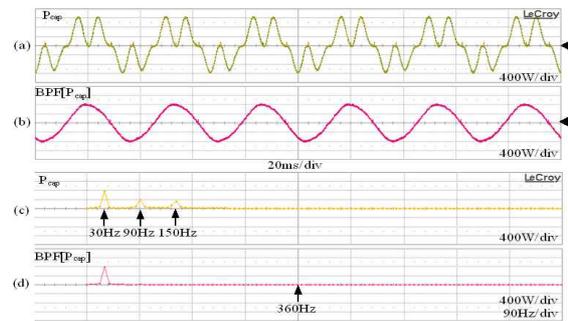


그림 4 직류링크 전력

(a)계산치

(b)대역통과필터 통과후

(c)(a)의 주파수 스펙트럼

(d)(b)의 주파수 스펙트럼

Fig. 4 Capacitor power

(a)Calculated capacitor power

(b)Band-pass filtered

(c)Harmonic spectrum of (a)

(d)Harmonic spectrum of (b)

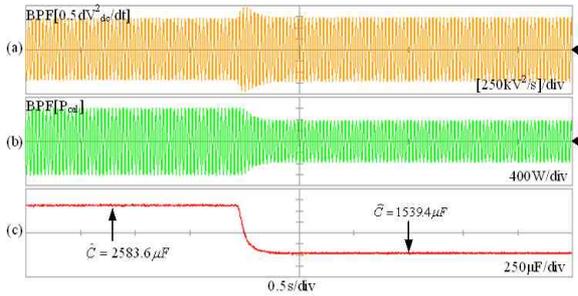


그림 5 급작스런 용량 변화시 커패시턴스 추정  
 (a) 대역통과필터 통과후( $0.5dV_{dc}^2/dt$ )  
 (b) 대역통과필터 통과후( $P_{cap}$ )  
 (c) (a)의 주파수 스펙트럼  
 (d) 추정된 커패시턴스

Fig. 5 Capacitance estimation at an abrupt variation of C.  
 (a) Band-pass filtered ( $0.5dV_{dc}^2/dt$ )  
 (b) Band-pass filtered ( $P_{cap}$ )  
 (c) Harmonic spectrum of (a)  
 (d) Estimated capacitance

그림 2는 직류링크 전압주입시의 전류제어기와 전압제어기의 특성을 보인다. (a)는 무부하시의 전원전류를 나타내고 있으며 실제 값이 지령 값을 잘 추종함을 보인다. (b)는 주입된 교류전압을 포함하는 직류링크 전압을 나타낸다. 여기서 직류링크 평균전압은 340[V]이고 주입된 교류전압은 식(2)로 주어진다.

그림 3은 직류링크 전압 파형이다. (a)와 (b)는 각각 측정된 직류링크 전압 및 대역통과 필터의 출력 값을 나타낸다. (c)와 (d)는 각각 (a)와 (b)의 주파수 스펙트럼을 보인다. 주파수 변조효과로 인하여 높은 주파수 성분(90[Hz], 150[Hz])이 포함되어 실제 전압 값과 다소 차이를 보인다.

그림 4는 직류링크 전력 파형이다. (a)는 실제의 측정된 전력이고 (b)는 직류링크 전력의 대역통과 필터의 출력이다. (c)는 (a)의 주파수 스펙트럼을 나타내며 리플성분(30[Hz], 90[Hz]와 150[Hz])을 보이고, (d)는 (b)의 주파수 스펙트럼으로 30[Hz] 성분만을 추출한 파형이다.

그림 5는 커패시터의 급격한 변동에 따른 추정 결과를 보여 주고 있다. 초기에 커패시터  $C_1=1,046[\mu F]$ ,  $C_2=1,550[\mu F]$ 를 병렬 연결하여 커패시턴스를 추정하고 일정 시간 후  $C_1$ 을 직류링크에서 분리시켜 커패시턴스에 급격한 변화를 주었다. (a)는 BPF[ $0.5dV_{dc}^2/dt$ ]의 대역통과 필터 출력 값이고 (b)는 커패시터 전력의 대역통과 필터 출력 값이다. (c)는 커패시턴스 추정결과를 나타내는데 과도상태에서도 추정 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문은 단상 AC/DC PWM 컨버터에서 직류링크에 교류전압성분 주입을 이용하여 직류링크 커패시터의 용량을 추정하는 기법을 제안하였다. 실험 결과, 용량의 추정오차가 0.85% 이내에 있음을 확인하였고 과도상태에서도 잘 추정됨을 보였다. 이 기법은 하드웨어의 추가 없이 소프트웨어만으로 구현이 가능하다. 제안된 기법은 단상 태양광 인버터, 연료전지 인버터 등에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. F. Schonardie and D. C. Martins, "Solar grid-connected three-phase system with active and reactive power control and input voltage clamped," in *Proc. IEEE Electronics, Circuits and Systems Conf.*, 2007, pp. 463-466.
- [2] P. Venet, F. Perisse, M.H. El-Husseini, and G. Rojat, "Realization of a smart electrolytic capacitor circuit", *IEEE Industry Application Magazine*, pp.16-20, January/February. 2002.
- [3] Y.-M. Chen, H.-C. Wu, M.-W. Chou, and K.-Y. Lee, "Online failure prediction of the electrolytic capacitor for LC filter of switching mode," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 400-406, January 2008.
- [4] E. C. Aeloíza, J. H. Kim, P. Ruminot, and P. Enjeti, "A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterrupted power supplies," in *Proc. IEEE Power Electronics Spec. Conf.*, 2005, pp. 2867-2872.
- [5] S. A. Oliveira da Silva, R. Novochadlo, and R.A. Modesto, "Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2008, pp. 4706-4711.
- [6] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P.C. Loh, "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters," *IEE Proc. Electric Power Applicat.*, vol. 153, no. 5, pp. 750-762, September 2006.
- [7] D.-G. Kim, J.-W. Choi, and H.-G. Kim, "Current control method of distribution static compensator considering non-linear load," *Trans. of KIEE*, vol. 58, no.7, pp.1342-1348, 2009.
- [8] D.-C. Lee, K.-J. Lee, J.-K. Seok, and J.-W. Choi, "Online capacitance estimation of DC-link electrolytic capacitors for three-phase AC/DC/AC PWM converters using recursive least squares method," *IEE Proc. -Electr. Power Appl.*, Vol. 152, No. 6, pp.1503-1508, November 2005.