

## 풍력 발전용 포워드 컨버터의 역률 개선에 관한 기초 연구

· 장수형\*, 박정환\*, 조성훈\*, 박영산\*\*, 안병원\*\*, 이성근\*\*\*, 김윤식\*\*\*

### A Study on Power Factor Correction Forward Converter for Wind Power Generation

Su-Hyoung Jang, Jeung-Hwan Park, Sung-Hun Cho, Young-San Park,  
Byong-Won Ahn, Sung-Geun Lee, Yoon-Sik Kim

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 목포해양대학교

\*\*\* 한국 해양대학교

**Abstract :** This paper presents a detailed analysis method of the universal input forward converter with LC input filter operating in discontinuous capacitor voltage mode(DCVM) for wind power generation. In this analysis, condition for DCVM operation and conversion ratio for rectified sinusoidal input are made clear. To verify the validity of the analysis , simulation is carried out for the universal input ranging from  $90 V_{rms}$  to  $260 V_{rms}$ .

**Key words:** Wind power generation(풍력 발전), Forward converter(포워드 컨버터), PFC(역률개선회로), DCVM(입력전압 불연속모드), DICM(인덕터전류 불연속모드 )

#### 1. 서론

풍력 발전에 이용되는 교류 발전기는 바람의 세기에 따라 출력전압과 주파수가 크게 변한다. 또한, 입력과 출력을 전기적으로 절연하여 안전성을 높임과 동시에 태양광 발전 등과의 연계시 다 입력 회로에 적합한 고 역률 정류회로가 질실히 요구된다.

한편, 전기·전자·통신 장비의 직류 안정화 전원장치로 폭 넓게 사용되고 있는 SMPS(Switch Mode Power Supply)는 반도체 집적 회로의 발달로 소형, 경량화가 가능하지만 전원장치는 인덕터와 캐패시터 같은 에너지 축적소자의 존재로 소형, 경량화가 어려우므로 SMPS에 대한 소형화, 경량화의 요구가 더욱 높아지고, IEC 555-2와 같은 고조파 규격에 만족되어야 한다<sup>[1][2]</sup>. 특히, 풍력발전과 같이 교류 입력 전원을 직류 출력으로 변환하는 AC/DC 컨버터의 경우에는 두 단계로 나누어 앞단에는 역률 개선 회로를 부가하고 뒷

단에는 출력전압을 안정화하는 것이 일반적이다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 상용전압과 분리로 더욱 안정성이 고려되고 멀티 입력이나 멀티 출력이 가능한 절연컨버터의 일종인 포워드컨버터를 사용하여 역률을 보상하였다. 여기서 제안한 포워드 컨버터는 광범위한 입력 ( $90 V_{rms} \sim 250 V_{rms}$ )에서 동작이 가능하며 Discontinuous Inductor Current Mode(DICM)와 Discontinuous Capacitor Voltage Mode(DCVM)에서 동작한다. DICM과 DCVM에서는 입력전류나 전압의 센싱(sensing)없이 일정한 듀티비(duty ratio)로 스위칭 소자를 제어하여 제어회로가 간단하다. 또한 DCVM의 동작조건 및 특성들을 제시하고, 정현파 입력에 대한 변환비( $M_{sin}$ )와 스위치의 전압 스트레스를 계산하였다. 이러한 결과들을 토대로 광범위한 입력에 대하여 포워드 컨버터를 설계하고 설계 특성을 고려한 시뮬레이션 회로를 사용하여 입력전압과 전

류의 파형을 분석한다<sup>[4][5]</sup>.

본 논문에서 회로 설계는 24[V]/72[W]에서 동작하고 광범위한 입력에서 원만히 동작함을 확인하기 위하여 입력전압은 2부분( $110 V_{rms} \cdot 220 V_{rms}$ )으로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. DCVM 파워드 컨버터

Fig. 1은 일반적인 파워드 컨버터에 LC 필터를 포함하는 형태이다. 여기서  $C_1$ 이 아주 작은 값이면 입력 전압이 불연속이 되는 구간이 존재한다.

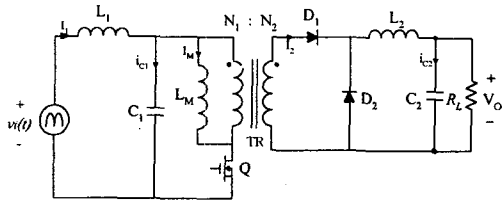


Fig. 1 The main circuit

Discontinuous Inductor Current Mode(DICM), Discontinuous Capacitor Voltage Mode(DCVM)는 스위칭의 일정한 시간 동안 인덕터의 전류와 캐패시터의 전압이 zero가 되는 구간이 존재한다.

Fig. 2는 DCVM에서의 각부의 파형을 나타낸다. 여기서  $L_1$ 과  $L_2$ 는 스위칭의 한 주기동안 일정한 전류를 흘릴 수 있을 정도로 충분히 큰 값을 선정한다.

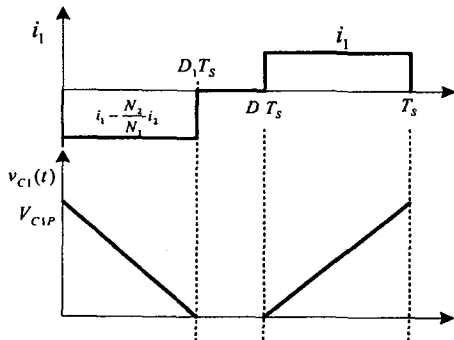


Fig. 2 waveforms in DCVM

## 2.1 회로 해석

DCVM의 동작은 스위치의 ON, OFF에 의해 3개의 모드로 나눌 수 있다.

모드 1 [ $0 - D_1 t_s$ ] :

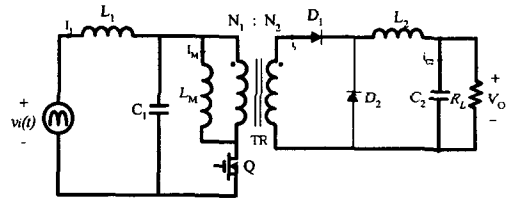
스위치가 ON되는 구간으로 캐패시터  $C_1$ 은 방전되기 시작하고 다이오드  $D_1$ 은 ON,  $D_2$ 는 OFF로 출력측으로 에너지가 전달된다.

모드 2 [ $D_1 t_s - D t_s$ ] :

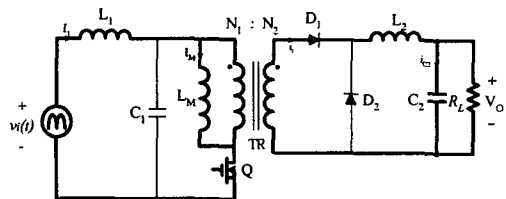
스위치는 계속 ON되어 있는 상태에서  $C_1$ 이 완전히 방전되어 0이 되는 구간이고  $D_1$ 이 OFF 상태로 되고  $D_2$ 가 ON된다.

모드 3 [ $D t_s - t_s$ ] :

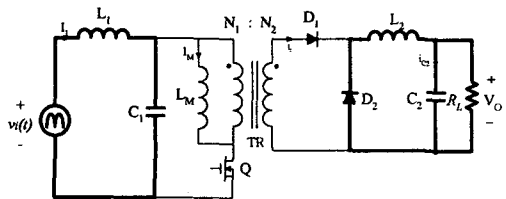
스위치는 OFF되고  $C_1$ 은 충전을 시작하며  $D_2$ 는 계속 ON 상태로 남아있다.



(a) Mode 1



(b) Mode 2



Mode 3

Fig. 3 Operation Mode

## 2.2 입·출력 특성

효율을 고려한 경우 입력에서의 에너지가 출력으로 모두 전달되어진다면 다음과 같은 관계식이 된다.

$$W_o = \eta W_i \quad (1)$$

여기서  $\eta$ 는 효율이다.

정류된 입력전압의 반주기동안 출력에너지 ( $W_o$ )는 식(2)이다.

$$W_o = \frac{N_2}{N_1} \frac{T_L}{2} \frac{V_o^2}{R_L} \quad (2)$$

정류된 입력전압은 식(3)으로 나타낸다.

$$v_i(t) = V_i |\sin \omega_L t| \quad (3)$$

입력측에서 평균 입력저항  $r_i(t)$ 는 식(4)가 된다.

$$r_i(t) = \frac{T_s}{2C_1} (1-D)^2 \frac{V_i \sin \omega_L t}{V_i \sin \omega_L t - \frac{N_1}{N_2} V_o} \quad (4)$$

식(4)에서 평균 입력전류는  $i_1(t) = v_i(t)/r_i(t)$ 의 관계에서 식(5)이다.

$$i_1(t) = \frac{1}{\frac{T_s}{2C_1} (1-D)^2} V_i \sin \omega_L t - \frac{N_1}{N_2} V_o \quad (5)$$

정류된 입력전압의 반주기 동안의 입력에너지 ( $W_i$ )는

$$W_i = \int_{t_1}^{T_L/2} v_i \cdot i_1 dt \quad (6)$$

그러므로 식(3),(5)를 식(6)에 대입하면 식(7)이 된다.

$$M_{\sin}^2 \frac{K(1-D)^2}{4} - \eta \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sin^{-1} M_{\sin} + \frac{1}{\pi} M_{\sin} \sqrt{1 - M_{\sin}^2} - \frac{N_1}{N_2} \frac{2}{\pi} M_{\sin} \sqrt{1 - M_{\sin}^2} \right] = 0 \quad (7)$$

여기서  $K$  및  $M_{\sin}$ 은 식(8)이다

$$K = \frac{2T_s}{R_L C_1} \quad (8)$$

$$M_{\sin} = \frac{V_o}{V_i}$$

포워드 컨버터의 동작은 입력전압이 항상 출력전압보다 크기 때문에  $V_i \sin \omega_L t > V_o$  조건이 만족되어야 한다. 입력전원의 반주기동안에 컨버터의 동작 시작시간을  $t_1$ 이라하면

$$t_1 = \frac{1}{\omega_L} \sin^{-1} \frac{V_o}{V_i} \quad (9)$$

또한 입력전압이 DCVM에서 동작하려면 식(10)을 만족해야 된다.

$$d_1(t) = \frac{V_o(1-D)}{\frac{N_2}{N_1} V_i \sin \omega_L t - V_o} > D \quad (10)$$

입력전압이 불연속이 되는 시간을  $t_2$ 라 하면  $t_2$ 는 식(11)이다.

$$t_2 = \frac{1}{\omega_L} \sin^{-1} \frac{M_{\sin}}{D} \quad (11)$$

그러므로 입력전압의 불연속은 정류된 입력전압의 반주기에서  $[t_2 \sim (T_L/2 - t_2)]$  구간이 된다.

## 2.3 제안한 포워드 컨버터 설계

식(8)에서  $K$ 값에 따른 변환비( $M_{\sin}$ )와 듀티비의 관계를 Fig. 4에 도시하였다.

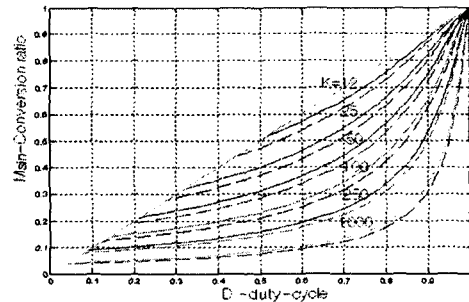


Fig. 4 Conversion ratio vs. Duty cycle

또한  $K$ 값 일정( $K=100$ )할 때 권수비의 역수 ( $n = N_2/N_1$ )와 듀티비의 관계를 Fig. 5에 도시하였다.

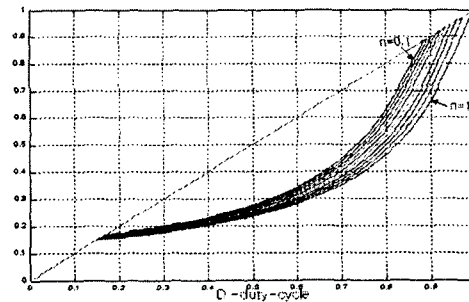


Fig. 5 turn ratio vs. Duty cycle

권수비에 따른 DCVM 경계에서 동작할 조건을 Fig. 6에 도시하였다.

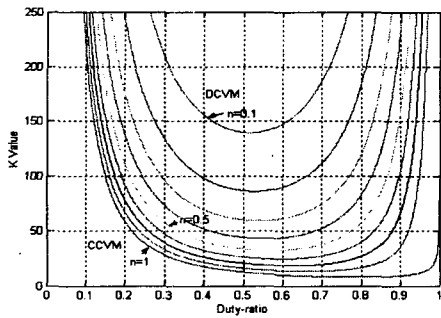


Fig. 6 DCVM boundary vs. Turn ratio

Fig. 6에서 K값은  $n=0.8$ 일 경우 최소한 20이상은 되어야 하고, 듀티비를 고려하여 DCVM에서 동작이 가능하도록 값을 선정한다. 또한 이러한 관계는 Fig. 4-5에서도 적용된다. 각각의 특성들을 고려하여  $K=110$ ,  $n=0.8$ 을 선정한다.

앞 식들의 관계에서 Table 1과 같이 소자를 선정한다.

Table 1 The Calculated value of parameters

Parts	Value
Input Voltage( $V_{rms}$ )	90 ~ 260 [ $V_{rms}$ ]
Output Voltage( $V_o / P_o$ )	24 [V] / 72 [W]
$L_1$	1.57 [mH]
$C_1$	22 [nF]
$L_2$	20 [ $\mu$ H ]
$C_2$	1000 [ $\mu$ F ]
$N_1$	38 turn
$N_2$	30 turn

### 3. 시뮬레이션 및 고찰

Table 1을 토대로 IsSpice로 제안한 포워드 컨버터를 시뮬레이션하였다. Fig. 7은 시뮬레이션 회로도를 나타낸다.

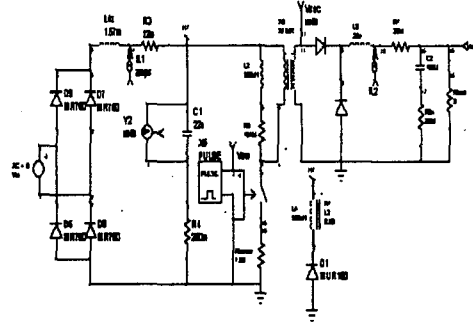
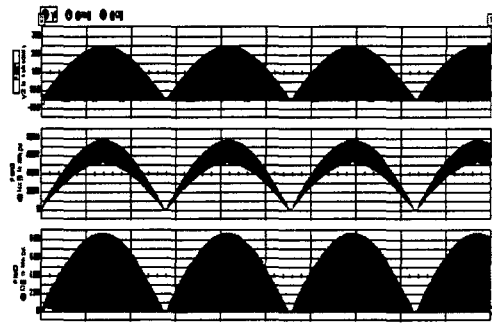
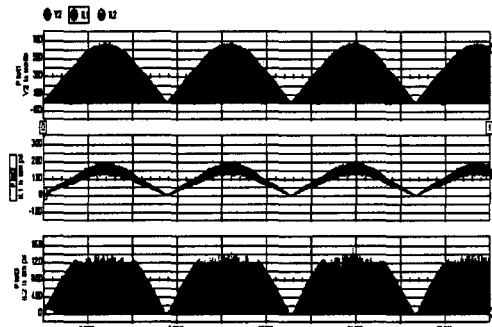


Fig. 7 Simulation circuit

Fig. 8(a)은 입력전압이  $110 [V_{rms}]$ ,  $L_2$ 가  $20 [ \mu H ]$ 일 경우의 캐패시터 전압  $V_C$ 과 인덕터 전류  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ 를 도시하였다. 인덕터 전류  $i_1(t)$ 과 캐패시터 전압  $V_C$ 은 거의 동상이므로 입력 전압과 입력전류는 동상이다.



(a)  $V_i = 110 [V_{rms}]$ ,  $L_2 = [20 \mu H]$



(b)  $V_i = 220 [V_{rms}]$ ,  $L_2 = [20 \mu H]$

Fig. 8 Simulated waveforms

또한 Fig. 8(b)에서 입력전압이  $220[V_{rms}]$ 에서도 마찬가지로 안정적으로 동작하고 DCVM과 DICM의 장점 중의 하나인 간단한 제어 방법으로 피크 전류를 제어할 수 있다. 그러나 인덕터  $L_2$ 에서 전류를 일정하게 유지하기 위하여 큰 값을 사용한다면 Fig. 9처럼 찌그러진 파형이 나타난다.

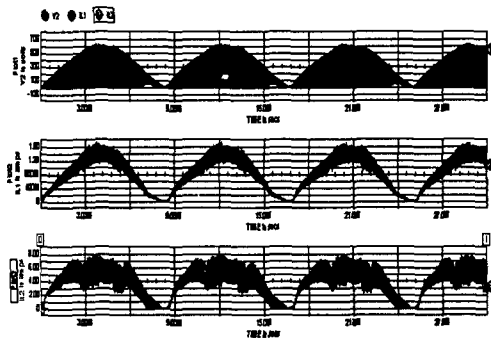


Fig. 9 Simulated waveforms  
( $V_i = 220[V_{rms}]$ ,  $L_2 = [100 \mu H]$ )

#### 4. 결론

풍력 발전용 고역률 정류회로로 포워드 컨버터를 선택하여 고역률 운전을 위하여 DCVM과 DCVM의 운전특성을 해석하였다. 이러한 이론을 바탕으로 제안한 포워드 컨버터의 특성을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 입증하였으며 아래와 같은 장점을 갖는다.

- 1) 간단한 제어회로로 입력전압과 출력전압이 동상이 된다.
- 2) 광범위한 입력전압에 대하여 안정적으로 동작한다.
- 3) 인덕터와 캐패시터의 값이 작아서 소형화에 유리하다.
- 4) 스위칭 소자를 IGBT로 구동 할 수 있어 저전압 대전류용 풍력발전 정류회로의 응용이 가능하다.

앞으로 스위칭 소자의 스트레스 저감과 컨버터의 효율 개선에 좀 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] 김희준, 스위치 모드 파워 서플라이, 성안당, pp.49-111, 1993
- [2] 최현철, Electronic Systems, (주)테크월드, pp.26-33, 2000.2
- [3] R. W. Erickson, Fundamentals of Power Electronics, Chpman and Hall, 1997
- [4] Vlad Grigore and Jorma Kyyra, "High Power Factor Rectifier Based on Buck Converter Operating in Discontinuous Capacitor Voltage Mode," Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, pp.1241-1249, 2000
- [5] Bo-Tao Lin and Yim-Shu Lee, "Power-Factor Correction Using Cuk Converters in Discontinuous-Capacitor-Voltage Mode Operation," Tran. on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 5, pp.648-653, 1997.10