

### 3-stage 운전에 의한 3상 DCM컨버터의 입력역률개선

최해룡, 구영모, 김응진, 목형수, 최규하, 김규식\*, 원충연\*\*  
 건국대학교 전기공학과, \*서울시립대학교 전기공학과, \*\*성균관대학교 전기공학과

### Power Factor Correction of Three Phase DCM Converter by 3-stage Operation

H.R. Choi, Y.M. Goo, E.J. Kim, H.S. Mok, G.H. Choe, K.S. Kim\*, C.Y. Won\*\*

Dept. of Electrical Eng. , Konkuk Univ.

\*Dept. of Contr.& Instru. Eng., Seoul City Univ.

\*\*Dept. of Electrical Eng., Sung Kyun Kwan University

Abstract - As utility pollution take a growing interest, ac/dc converter optimizing utility condition has been vigorously studied in decades. In this paper three phase DCM converter is analyzed and equations for average input currents are presented. Also relationships of voltage gain & duty according to angular velocity are presented and variable frequency controller is implemented using reset integrator which is designed in detail. In result power factor and THD characteristics of 3-stage and 4-stage operation are compared respectively.

#### 1. 서 론

전원의 오염에 대한 관심이 고조되어 전원의 상태를 최적으로 제어하는 단위 역률 직/교류컨버터는 지난 수십년동안 활발히 연구되고 있다. 브릿지 형태의 제어소자를 이용하는 3상 컨버터의 경우 높은 역률개선의 장점에도 불구하고 복잡한 제어회로를 요구하게 되고 또한 경제적인 시스템구성이 어려운 문제점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 고역률과 경제성의 잇점을 갖는 단일스위칭형 DCM(Discontinuous Conduction Mode)컨버터가 활발히 연구되고 있으며 5kW급의 출력을 요하는 응용분야로의 적용이 적절할 것으로 판단된다.[1-4] 그러나 본 컨버터는 입력역률을 개선시키기 위해서는 충분한 전압이득이 요구되며 이는 실제 구현성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 본 컨버터에 요구되는 최적의 조건은 낮은 출력전

압으로도 전원측의 역률을 최대로 유지하는 것이다. 기존에 활발히 연구된 제어기법은 고정주파수, 가변 시비율의 원리를 기본으로 하며 무엇보다 최적의 스위칭 패턴을 얻는 것이 중요한 문제라 할 수 있다. 그러나 크게 4가지의 stage로 구분되는 한 스위칭 주기를 통하여 특히 선형영역이 stage1에만 국한되기 때문에 전체 주기중에 이 선형영역을 증대하는 것이 중요하다. 하지만 기존의 고정주파수 운전의 경우는 stage4에 해당하는 영역이 매우 크므로 역률을 개선시키는데 있어 큰 제한적 요소로 작용하게 된다. 따라서 본 논문에서는 stage4가 존재하지 않는 가변주파수운전을 기본으로 하는 3상 DCM 컨버터를 통해 비선형 영역의 최소화를 꾀하고 이를 통한 역률개선 효과를 검증하고자 한다.

#### 2. 3상 DCM컨버터의 구성 및 동작원리

3상 DCM컨버터는 그림 1과 같이 브리지 다이오드에 스위칭에 의한 고조파성분을 제거하기 위한 입력필터( $L_f - C_f$ ), 입력전압을 승압하기 위한 리액터와 스위치( $S_b$ ) 그리고 단방향성운전을 보장하기 위한 블록킹 다이오드( $D_b$ )등으로 구성되어 있다. DC-DC 승압컨버터의 원리를 기본으로 하는 3상 DCM컨버터는 기존 다이오드 정류기의 입력전류에 함유되어 있는 저차고조파성분을 스위칭 동작에 의해 고차 고조파성분으로 변화시킴으로써 다이오드 정류기에 비해 매우 작은 리액티브 요소로도 우수한 필터링효과를 얻을 수 있다. 그림 2는  $[0, \frac{\pi}{3}]$ 에서 3상 DCM 컨버터의 스위칭 한 주기동안의 각 상의 입력전류파형이며 스위칭조건 및 각 상전

압 조건에 따라 모두 4가지의 회로상태가 얻어지게 된다. 스위칭 한 주기동안 상전압이 일정하다는 가정하에서  $T_{on}$  동안에는 각상의 전류가 입력 상전압과 선형적으로 증가하며 에너지가 출력측에 전달되는  $T_{off}$  동안에는 a상 전류가 먼저 영점에 도달하고 나머지 b,c상이 이후에 영점에 각각 도달하게 된다. Switch On-Time (*stage1*)에서는 입력측 리액터에 에너지가 자기적인 형태로 저장되고 Switch Off-Time(*stage 2,3*)에는 전원과 극성이 반전된 부스트 리액터의 에너지가 출력단에 전달되며 그때의 각 상의 전압조건에 따라 도통상태가 구분된다. 기존의 방식은 이렇게 모드3구간 이후 입력측의 전력이 출력에 전달되지 않고 오직 커패시터에 저장되어 있던 에너지가 부하로 전달되는 구간이 존재하였으나 이 구간은 각상전압과의 비선형성으로 인해 고조파를 발생시키는 요인이 된다. 결국 나머지 두상의 전류가 영점에 이르는 시점을 검출하여 다시 스위치를 도통시킴으로서 비선형영역을 최소화하고 상대적으로 선형영역을 극대화함으로써 역률개선효과를 증대할 수 있다.

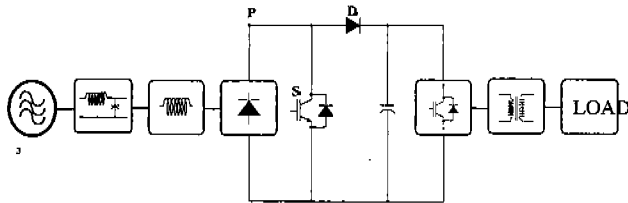
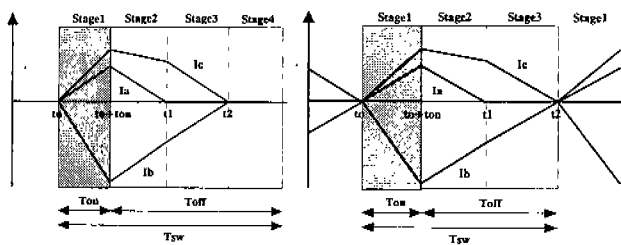


그림 1. 3상 DCM컨버터

Fig. 1. Three-Phase DCM Converter.

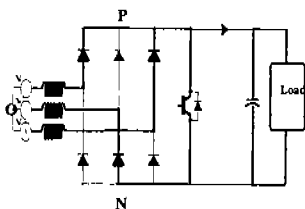


(a) 4-stage 운전

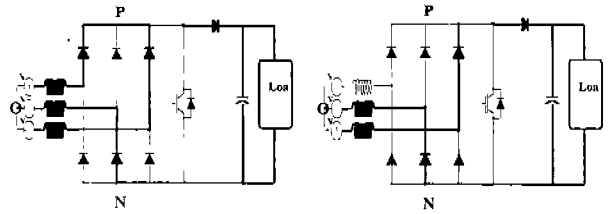
(b) 3-stage 운전

그림 2. 스위칭 한주기의 입력전류 비교

Fig. 2 Input currents for a switching cycle.



(a) stage 1(Switch On)



(b) stage 2(Switch Off) (c) stage 3(Switch Off)

그림 3. 3상 DCM컨버터의 운전 stages

Fig. 3. Operating stages of three-phase DCM converter.

### 3. 경계조건운전 3상 DCM컨버터의 해석

주 스위치의 On/Off 등가회로의 평균화를 통한 회로의 상태방정식은 다음과 같다. Switch On-Time 동안의 KVL식은 (1)로 표현된다

$$V_{PO} = -L \frac{di_a}{dt} + V_o = -L \frac{di_b}{dt} + V_o = -L \frac{di_c}{dt} + V_o \quad (1)$$

또한 Switch Off-Time 동안의 KVL식은 (2)로 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{PO} - V_o &= -L \frac{di_a}{dt} \\ V_{PO} - V_b - V_o &= -L \frac{di_b}{dt} \\ V_{PO} - V_c &= -L \frac{di_c}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

식(1),(2)을 통해 얻어진  $V_{po}$ 를 통해 입력전류를 On-time과 Off-time에서의 각각의 전류값의 합으로 표현할 수 있다. a상이 영점에 도달하는 시간과 나머지 두상이 영점에 도달하는 시간을 구하여 평균화기법을 이용함으로써 전류의 평균치를 얻을 수 있으며 이를 식 (3),(4),(5)에 나타내었다. 결국 나머지 두상의 전류가 0이되는 점이 스위칭 주기가 된다.

$$[0 \leq \omega t < \frac{\pi}{6}]$$

$$I_A = \frac{[\sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2M} \sin 2\omega t] \frac{V_o T_{ON}}{2L}}{\sqrt{3}M - 3 \sin(\omega t)} \quad (3)$$

$$[\frac{\pi}{6} \leq \omega t < \frac{\pi}{3}]$$

$$I_A = \frac{M \sin(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t - \frac{2\pi}{3})}{[\sqrt{3}M - 3 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})][M - \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})]} \frac{V_o T_{ON}^2}{2L T_{SW}} \quad (4)$$

$$[-\frac{\pi}{3} \leq \omega t < \frac{\pi}{2}]$$

$$I_A = \frac{M \sin(\omega t) + \sin(2\omega t + \frac{2\pi}{3})}{[\sqrt{3}M + 3 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})][M - \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})]} \frac{V_o T_{ON}^2}{2LT_{sw}} \quad (5)$$

$$\text{where } M = \frac{V_o (\text{dc link-전압})}{\sqrt{3} V_{LN} (\text{입력측 선간전압의 peak 치})}$$

식 (3),(4),(5)를 통해 전류식에 포함되어 있는 매개 변수 중에서 일정주파수 운전과 일정 시비율 운전을 가정할 때에 고조파에 영향을 미칠 수 있는 변수는 입력 리액턴스와 전압이득(M)임을 알 수 있다. 본 수식을 그래프화 함으로써 간단히 큰 값의 전압이득이 역률개선에 효과적임을 알 수 있으나 출력전압이 제한적일 경우 입력리액터의 적절한 선정이 역률개선에 중요한 요소가 된다. 식 (6)은 DCM 컨버터의 전압이득(M) 및 위상성분에 대한 시비율의 경계조건을 나타내며 이것을 통해 3-stage 컨버터는 4-stage 컨버터와는 다르게 경계조건이  $\omega t$ 에 의존적임을 알 수 있다.

$$d_b = 1 - \frac{1}{M} \cos \omega t \quad (6)$$

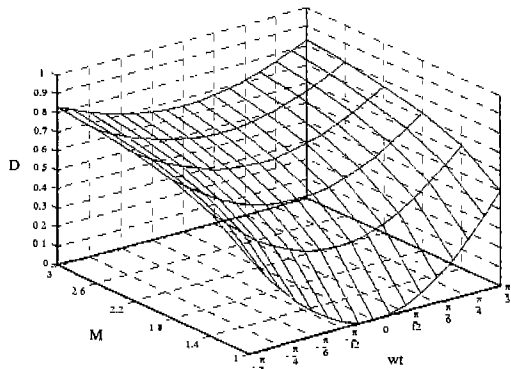


그림 5. 각속도와 시비율의 관계

Fig. 5. Relation of angular velocity & duty ratio

#### 4. 3-stage 운전을 위한 가변주파수제어의 구현

경계조건에서의 운전을 위해서는 스위칭주기 안에서 나머지 두상이 영점에 도달하는 시간을 검출하여야 한다. 따라서 다이오드 브릿지의 직류단의 전류를 홀센서를 이용하여 검출하고 이 신호를 통해 영점신호를 얻게된다. 또한 이 신호를 받아 리셋적분기의 리셋신호로 사용함으로써 제어신호를 변조하기 위한 캐리어 신호를 발생시키게 된다. 결국 기존의 방식이 경부하에 따라 비선형 영역인

stage-4 영역이 증가하여 역률이 저하되는 문제를 지니고 있었는데 반하여 본 기법은 미리 설정된 부하범위에 대하여 높은 역률개선 특성을 지니게 된다. 결국 정해진 운전 범위에 대해서 매우 높은 역률특성을 유지하는 장점을 지니게 된다. 그림6은 경계조건에서 운전되는 3상 DCM컨버터의 제어블록도이며 그림7은 리셋 적분기의 입출력특성을 나타낸다.

$$V_{out} = \frac{I_{in} \times \Delta t}{C_{int}} \quad (7)$$

where)  $V_{out}$  = 최대 출력 전압  
 $C_{int}$  = 적분 캐패시터  
 $I_{in}$  = 입력 전류  
 $\Delta t$  = 적분시간

$$\text{Slew Rate} = \frac{I_{in}}{C_{int}} \quad (8)$$

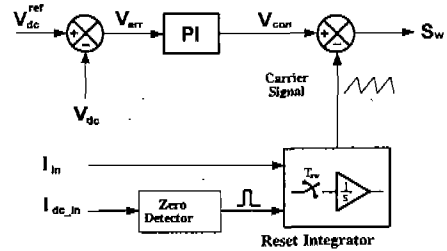


그림 6. 제어 블록도

Fig. 6. Control block diagram

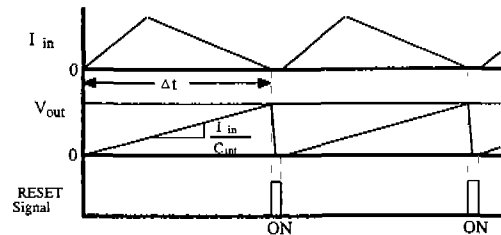


그림 7. reset적분기의 입출력관계

Fig. 7. I/O relationship of reset integrator

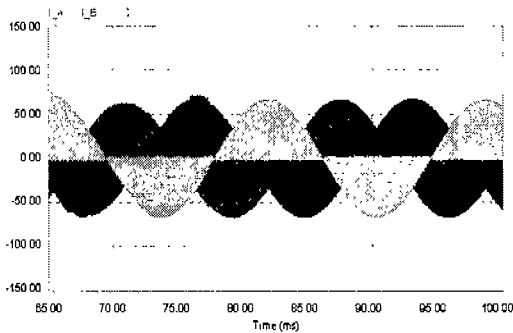
#### 5. 시뮬레이션

시뮬레이션을 통한 특성해석에는 이상적이고 간략화된 소자모델을 이용하여 연산속도가 빠르고 회로해석이 용이한 전력전자 전용언어인 PSIM (Power Simulation)을 사용하여 입출력특성 및 고

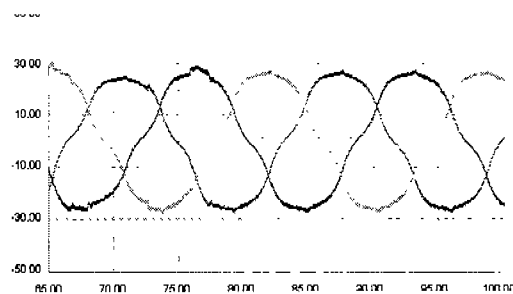
조파특성을 조사하였고 이를 바탕으로 이론적 해석의 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션에 사용된 상수는 표1과 같다. 필터링을 하지 않은 입력측의 불연속적인 전류파형과 이에 제동비를 고려한 L-C 수동필터를 통해 필터링한 전류파형이 그림8에 나타난다. 표2는 4-stage DCM 컨버터와 3-stage DCM 컨버터의 같은 동작조건하에서의 THD특성과 역률특성의 비교를 나타낸다.

표 1. 해석을 위한 상수선택  
Table 1. Constants selection for analysis.

$f_{cutoff}$	4.5kHz
$C_{out}$	3300uF
$f_{sw}$	20kHz(전부하시)
$L_f$	45uH
$C_f$	25uF
$V_o$	600V
$P_o$	7.5kHz
$L_b$	15uF



(a) 불연속 입력전류파형 및 주파수 스펙트럼



(b) 연속 입력전류파형

그림 8. 3-stage DCM 컨버터의 입력측 전류파형  
Fig. 8. Input side current waveform of 3-stage DCM converter.

표 2. 시뮬레이션 결과(Load-100%)  
Table 2. Simulation results(Load-100%)

4-stage		3-stage	
THD	10%	THD	4.5%
PF	0.985	PF	0.995

## 6. 결 론

단순한 구조 및 제어의 장점을 지닌 3상 DCM 컨버터의 3-stage 운전특성에 대하여 수치적 해석 및 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 이 방식을 통하여 고조파 발생량을 최소화함으로써 기존방식에 비해 역률 개선효과를 얻었다. 출력전압에 의존적인 DCM컨버터의 역률특성을 고려할 때 본 기법의 적용으로 낮은 출력전압에서 개선된 역률특성을 기대할 수 있으며 아울러 입력 리액터의 높은 전류스트레스가 저감되어 리액터설계시 사이즈와 무게의 저감효과를 기대할 수 있다.

## [참고 문헌]

- [1] H. Oishi, H. Okada, K. Ishizaka, R. Itoh, "Single-phase switch mode rectifier employing voltage reversal circuit switched with a fixed frequency", IEE Pro. Electr. Power Appl., Vol. 142, No. 2, pp. 154-160, 1995.
- [2] J. T. Boys, A. W. Green "Current-forced Single-Phase reversible rectifier", IEE. Proce, September, vol. 136, No. 5, pp. 205-211, 1989.
- [3] Q. Huang, and F. C. Lee. "Harmonic Reduction in a Single - Switch, Three-Phase Boost Rectifier with High Order Harmonic Injected PWM", Proceeding of the Virginia Power Electronics Conference, pp, 24-26, 1995.
- [4] Mohammad Sadighy, Francis P. Dawson. "Single-Switched Three-Phase Power Factor Correction", IPEC- Yokohama, pp. 293-297, 1995.

본 연구는 1998년도 과학재단 특정기초지원연구비에 의하여 이루어 졌음.(No. 97-01-01-01-3)