

새로운 18-step 전압원 컨버터를 이용한 Back-to-Back 계통연계시스템

이혜연\*, 이지현\*, 한병문\*, 리위롱\*\*, 김수열\*\*\*, 장병호\*\*\*  
 명지대학교\*, 전남대학교\*\*, 전력연구원\*\*\*

Back-to-Back Interconnection System using New 18-step Voltage Source Converter

Hye-Yeon Lee\*, Ji-Heon Lee\*, Byung-Moon Han\*, Yulong Li\*\*, Soo-Yeol Kim\*\*\*, Byung-Hoon Chang\*\*\*  
 Myongji University\*, Chonnam University\*\*, Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)\*\*\*

**Abstract** - 본 연구에서는 펄스다중화 보조회로를 이용한 18-step Back-to-Back 전압원 컨버터를 제안한다. 제안하는 Back-to-Back 전압원 컨버터는 교류연계점에서 유·무효전력의 독립적인 제어가 가능하다. 펄스수를 증가시키는 방법은 이론적인 접근을 통해 분석하였으며, 제안하는 시스템의 동작은 PSCAD/EMTDC 소프트웨어로 시뮬레이션 모델을 개발하여 확인하였고 실질적인 성능검증은 하드웨어 축소모형을 제작하고 실험을 통해 실시하였다.

1. 서 론

PWM 컨버터의 경우 단일 브리지를 사용하므로 시스템구성이 간단하나 각 스위칭 소자를 교류한주기당 다수의 스위칭을 하므로 스위칭 손실이 커 대용량에 적용이 어렵다. 반면 다중펄스 컨버터는 교류한주기당 한 번의 스위칭을 하므로 스위칭 손실은 적으나 고조파레벨을 낮추기 위해 출력파형의 펄스수를 증가하여야 한다.

출력파형의 펄스수를 증가하기 위해 이미 다양한 방식이 사용되어 왔는데, 그 중 한 방식은 변압기와 브리지 사이에 보조변압기를 두어 주변압기수를 증가하지 않고 펄스수를 증가하는 것이다. 그러나 이 경우 보조변압기의 제작이 어렵고 비용절감수준도 높지 않은 단점을 갖는다[1]. 이러한 단점을 보완하고자 직류단에 3-레벨 반브리지와 보통 변압기로 구성된 보조회로를 삽입하여 펄스형태의 전압을 중첩하여 출력파형을 형성하는 방법이 제안되었다. 그러나 이 경우 컨버터 한 대당 2기의 주변압기와 1기의 보조변압기가 필요하여 설치면적이 넓고, 비용절감수준도 높지 않은 단점을 갖는다[2,3].

본 연구에서는 3-레벨 반브리지와 1기의 보통변압기로 구성된 보조회로를 갖고 1기의 주변압기로 계통에 연계된 18-step 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터의 동작과 성능 검증을 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어에 의한 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 토대로 2KVA 용량의 하드웨어 시작품을 제작하고 실험을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 18-step 전압원 컨버터

본 논문에서는 그림 1에 보인 것과 같이 직류단에 보통변압기와 3-레벨 반브리지로 구성된 보조회로를 갖고 1기의 주변압기를 통하여 계통에 연계된 18-step 컨버터를 제안한다. 그림 1에서 직류단의 보조변압기를 기준으로 컨버터 상단전압과 하단전압은 DC 커패시터의 전압  $V_{dc}$ 와 보조브리지의 주입전압  $u_{aux}$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{upper} = V_{dc} + u_{aux} \quad (1)$$

$$V_{lower} = V_{dc} - u_{aux} \quad (2)$$

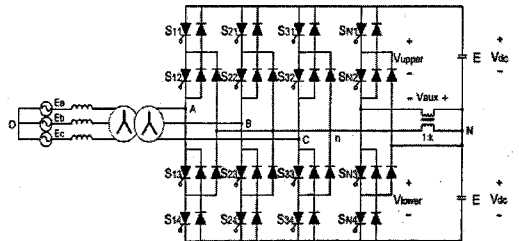


그림 1. 보조회로를 이용한 18-step 전압원 컨버터

이 관계식에 의해 컨버터의 출력 AC 전압은 주입전압  $u_{aux}$ 에 의해서 조절 가능하다. 한편 주입전압  $u_{aux}$ 는 보조브리지회로의 스위칭 패턴과 주입변압기의 권선비에 의해 결정된다. 따라서 주입전압  $u_{aux}$ 는 0,  $kV_{dc}$ ,  $-kV_{dc}$  인 3-레벨 값으로 정해지며, 보조브리지회로는  $120^\circ$  마다 동작하기 때문에 기본 주파수의 3배에 해당하는 펄스를 형성하게 된다.

보조회로에 사용되는 변압기의 권선비  $k$ 는 출력 상전압파형의 고조파수준을 최소화하도록 결정하여야 하는데, 본 연구에서는 고조파분석을 통해  $k=0.65$ 일 때 전 고조파 왜형율이 최소 값이 되는 것을 확인하였다.

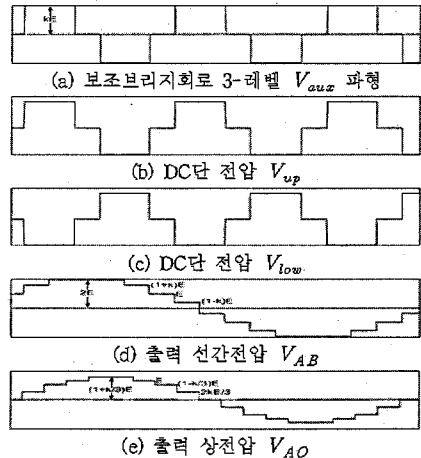


그림 2. 제안하는 컨버터의 중요부분 파형

그림 2는 시뮬레이션에 의해 제안하는 18-step 컨버터의 각 부분의 파형을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 보조브리지회로의 출력파형을 보인 것으로 교류 한주기당 3개의 펄스가 존재하여  $120^\circ$  마다 동작함을 알 수 있다. 그림 2(b)와 2(c)는 상단과 하단 컨버터 부분에 인가되는 전압파형을 나타낸 것으로, 직류전압  $V_{dc}$ 에  $V_{aux}$ 를 가하

거나 감한 파형을 나타낸다. 2(d)와 2(e)는 출력 선간전압과 상전압을 나타낸 것이다.

### 2.2 Back-to-Back 컨버터

Back-to-Back 컨버터는 주파수가 다른 2개의 교류계통을 연계하거나 직류송전 또는 대규모 풍력발전단지를 전력계통에 연계하는데 사용된다. 따라서 Back-to-Back 컨버터는 연계되는 2개 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어가능하고 양방향 전력조류를 제어 가능해야 한다. Back-to-Back 컨버터가 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어하기 위해서 전압원 컨버터는 2개의 제어 입력변수를 필요로 한다.

그림 3은 다중펄스방식으로 동작하는 2대의 전압원컨버터를 직렬로 결합하여 상단컨버터의 점호각과 하단컨버터의 점호각을 상이하게 동작시켜 연계된 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어하기 위한 단상등가회로와 벡터도를 나타낸 것이다.

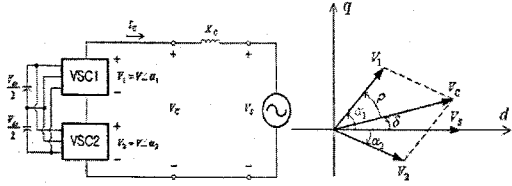


그림 3. 유·무효전력제어 단상등가회로와 벡터도

그림 3의 벡터도는 유·무효전력의 독립제어를 위해 전압원컨버터의 상·하단 점호각을 달리 할 때의 전압원전압, 컨버터 각각의 전압, 그리고 컨버터 전체의 전압을 벡터도로 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상단점호각  $\alpha_1$ 과 하단점호각  $\alpha_2$ 의 값을 적절히 조절하면 컨버터의 출력전압벡터  $V_o$ 는 전압원전압  $V_s$ 와 전력각  $\delta$ 를 이루고 그 크기를 조절하는 것이 가능하다. 따라서 상·하단 점호각  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 를 조절하여 연계된 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어하는 것이 가능하다.

### 2.3 성능평가 시뮬레이션

18-step Back-to-Back 컨버터의 시스템 동작특성 및 제어기의 성능검증을 PSCAD/EMTDC 소프트웨어로 시뮬레이션 모델을 개발하여 실시하였다. 시뮬레이션 모형은 그림 4와 같이 구성하였으며 시뮬레이션에 사용된 회로정수는 표 1에 나타나 있다. 컨버터 직류단에 설치된 커패시터의 용량은 직류최대전압의 맥동율을 고려하여 설계하였다.

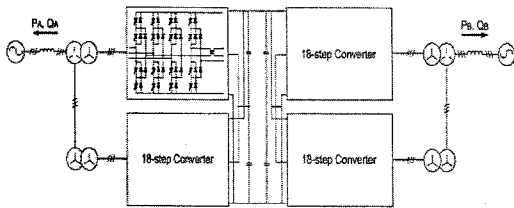


그림 4. 18-step Back-to-Back 컨버터 시스템 구성도

표 1. 시뮬레이션 회로정수

모선 전압	3 $\phi$ , 220[V]
모선 주파수	60[Hz]
전원인덕턴스	2[mH]
직류 커패시터	3000[ $\mu$ F]
위상변압기 용량	10[KVA]
보조변압기 용량	10[KVA]

전압원 HVDC 시스템은 전력의 흐름을 바꿀 때 점호각을 제어하여 컨버터 양단에 걸리는 전압의 크기를 조절하여 전류의 방향을 바꾸어 동작한다.

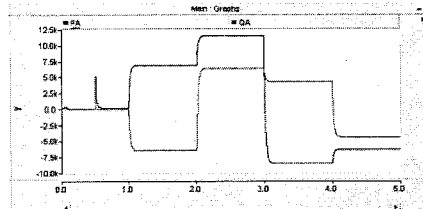
전압원 HVDC 시스템은 전력의 전송방향에 따라 각 시스템의 제어 대상이 변하게 된다. 즉, 시스템 A에서 B로 전력이 전송될 경우 시스템 A는 일정직류전압제어와 무효전력제어를 수행하고 되고 시스템 B는 유효전력과 무효전력제어를 수행하게 된다. 또한 시스템 B에서 A로 전력이 전송될 경우는 반대의 제어를 수행한다.

18-step Back-to-Back 컨버터 시스템의 성능을 검증하기 위해서 표 2와 같은 시나리오로 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 시작 후 0.5초에 각 시스템의 제어를 시작하였고 0.5초부터 3초까지는 시스템 A에서 B로 전력을 전송하다가 3초에 시스템 B에서 A로 전력을 전송하도록 설정하였다. 또한 시스템의 유효전력과 무효전력제어 성능을 분석하기 위해서 표 2에 나타낸 바와 같이 1초 간격으로 유효전력과 무효전력의 기준값을 변경하였다.

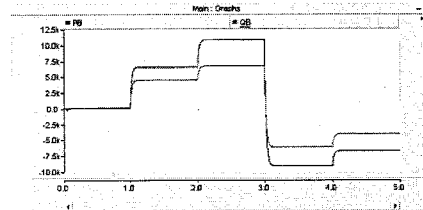
표 2. 시뮬레이션 시나리오

시간(초)	0.5~1	1~2	2~3	3~4	4~5
$V_{dcA}^*, V_{dc}$	370[V]				
$I_{dA}^*$ [A]	직류전압제어		40	30	
$I_{qA}^*$ [A]	0	30	-30	-20	20
$I_{dB}^*$ [A]	0	30	50	직류전압제어	
$I_{qB}^*$ [A]	0	20	30	-20	-30

시뮬레이션 시나리오에 따른 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5는 표 2에 나타낸 시나리오에 따라 유·무효전류 기준값을 변경했을 때의 제어기 성능을 보여주고 있다. 유·무효전력의 전송방향을 시스템 A에서 B로 기준을 정했으므로 결과파형에서 보듯이 0.5 ~ 3초까지는 시스템 A에서 B로, 3~5초까지는 시스템 B에서 A로 전송되고 있음을 알 수가 있다. 시뮬레이션 결과 실제 유효전력은 제어기의 기준신호를 큰 과도현상 없이 잘 추종함을 알 수 있다. 또한 무효전력의 경우, 각 시스템에서 독립적으로 잘 제어되고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 제안하는 전압원 컨버터는 Back-to-Back 컨버터로 잘 동작함을 알 수가 있다.



(a) 시스템 A의 전송 유효전력( $P_A$ )와 무효전력( $Q_A$ )



(b) 시스템 B의 전송 유효전력( $P_B$ )와 무효전력( $Q_B$ )

그림 4. 시뮬레이션 결과

### 2.3 하드웨어 제작 및 실험

제안하는 18-step Back-to-Back 컨버터의 하드웨어 구현을 통한 동작검증을 위해 그림 5에 보인 것처럼 하드웨어를 제작하고 실험을 실시하였다. 실험 세트는

전원 시뮬레이터와 18-step Back-to-Back 컨버터로 양 측에 3상 전원을 연결하도록 구성하였다. 표 3은 축소 모형에 사용된 실험 회로정수이다.

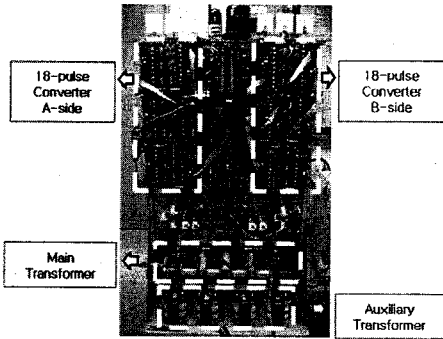


그림 5. 제안하는 Back-to-Back 시스템 하드웨어

제어보드는 메인보드와 확장보드로 나누어 구성하였으며, 메인 프로세서는 TI(Texas Instrument)사에서 개발된 실수형 프로세서인 DSP(TMS320vc33)를 사용하였다. 메인보드는 Altera사에서 개발한 50,000 게이트인 EPLD(EP1K50QC208)를 사용하였으며, 확장보드는 PWM 로직을 위해 EPLD(EP1K50QC208)를 사용하였다.

표 3. 하드웨어 실험 회로정수

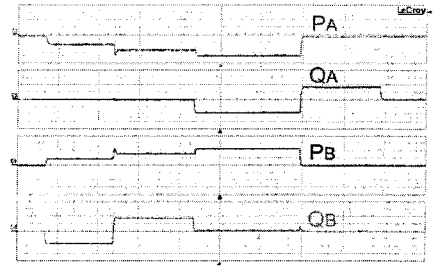
모선 전압	3 $\phi$ , 220[V]
모선 주파수	60[Hz]
선로인덕턴스	2[mH]
직류 커패시터	3300[ $\mu$ F]
위상변압기	220:110
보조변압기	110:75
시스템 용량	2[KVA]

본 논문에서 제안하는 방식의 Back-to-Back 컨버터 시스템이 실제 하드웨어에서 유·무효전력 제어를 수행하는지 확인하기 위하여 표 4의 시나리오에 따라 실험을 실시하였다. 실험실의 환경적인 이유로 실험 시나리오의 경우 시뮬레이션 시나리오와 같이 양방향 전력조류 제어를 하지 않고 단방향 전력조류 제어를 하였다. 실험실에서는 하나의 계통만이 존재하므로 양방향 전력조류 제어를 하면 영상분 전류가 흐르게 되어 제어가 원활히 되지 않는다.

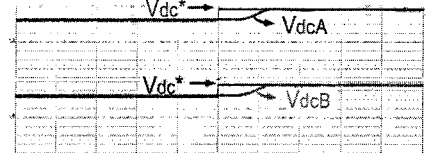
표 4. 실험 시나리오

시간(초)	M1	M2	M3	M4	M5
$V_{dcA}^*, V_{dcB}$	220				
$I_{dA}^*$ [A]	직류전압제어				
$I_{qA}^*$ [A]	0	0	-2.273	2.273	0
$I_{dB}^*$ [A]	0	1.136	2.273	3.409	0
$I_{qB}^*$ [A]	0	-2.273	2.273	0	0

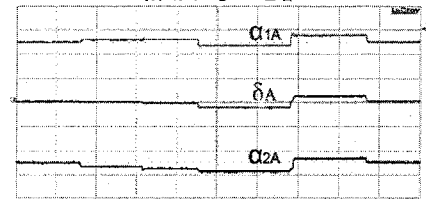
시나리오에 따라 유·무효전류 기준값을 변경하고 양 측의 유·무효전력을 측정할 파형이 그림5(a)에 나타나 있다. A측과 B측 모두 원하는 기준값을 원활히 추종하고 있고 유·무효전력이 독립적으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 Back-to-Back 컨버터의 양 측 DC-링크 전압 파형이다. DC-링크 전압제어는 A측 컨버터가 하고 있는데 제어를 시작하였을 때 기준값을 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 5(c)는 동작원리 벡터도에 나타낸 전력각에 대한 파형이다.  $\alpha_1 - \delta = \delta - \alpha_2$ 의 관계를 가지고 있다.



(a) 전송 유효전력과 무효전력



(b) DC-링크 전압



(c) A측 컨버터의 전압벡터 전력각  
그림5. 하드웨어 실험 결과

### 3. 결 론

본 논문에서는 3-레벨 반브리지와 1기의 보통변압기로 구성된 보조회로를 갖고 1기의 주변압기로 계통에 연계된 18-step 컨버터를 제안하고 이 18-step 컨버터 4대로 구성된 Back-to-Back 컨버터에 대해 기술하고 있다.

제안하는 Back-to-Back 컨버터는 점호각 조절에 의해 연계된 양 측 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어 가능하다. 제안하는 Back-to-Back 컨버터의 동작과 성능을 검증할 목적으로 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 토대로 하드웨어를 구현하여 실험을 통해 실질적인 성능검증을 실시하였다.

제안하는 Back-to-Back 컨버터는 기존에 제안된 시스템에 비해 출력전압의 펄스수가 적어 고조파레벨은 약간 증가하지만 연계용 변압기의 구조가 간단하고 그 수가 적어 설치면적이 적고 설치비용이 저렴할 것으로 보인다.

### [참 고 문 헌]

- [1] C. Schauder, "Development of a  $\pm 100$ Mvar static compensator for voltage control of transmission systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1486-1493, July, 1995.
- [2] Y. Liu, J. Arrillaga, N. Watson "Multi-level voltage sourced conversion by voltage reinjection at six times the fundamental frequency", IEE Proceeding on Electrical Power Application, Vol. 149, No. 3, May, 2002.
- [3] 백승택, 최준영, 한병문, "펄스다중화 보조회로를 이용한 36-펄스 Back-to-Back 전압원 컨버터의 직류송전", 대한전기학회 논문지 55A권 3호, pp53-58, 2006년 2월