

# 직류송전 적용을 위한 18-스텝 Back-to-Back 전압원 컨버터에 관한 연구

논 문
58-4-13

## Study on 18-step Back-to-Back Voltage Source Converter for HVDC Application

이 혜 연\* · 이 지 현\* · 한 병 문† · 이 옥 용\*\* · 최 남 섭\*\*\*  
(Hye-Yeon Lee · Ji-Heon Lee · Byung-Moon Han · Yulong Li · Nam-sup Choi)

**Abstract** - This paper proposes a 18-step back-to-back voltage source converter using four sets of 3-Level converter module with auxiliary circuit to increase the number of steps. The proposed back-to-back voltage source converter has an independent control capability of active power and reactive power at the interconnected ac system. The operational feasibility of proposed system was verified through computer simulations with PSCAD/EMTDC software. The feasibility of hardware implementation was verified through experimental results with a scaled hardware model. The proposed back-to-back converter can be widely applied for interconnecting the renewable energy source to the power grid.

**Key Words** : Multi-step Converter, Back-to-Back Converter, Auxiliary circuit

### 1. 서 론

최근 에너지고갈과 환경보호 문제로 선진 각국에서는 신재생에너지원에 의한 전력생산과 이용에 대해 많은 연구를 수행하고 있다. 신재생에너지원에서 생산되는 전력은 그 양이 증가하면서 통상 대용량 전압원 컨버터를 통해 직류송전 방식으로 기존전력망과 연계된다.

전압원 컨버터에는 PWM 컨버터와 다중스텝 컨버터가 있는데, PWM 컨버터는 시스템구성은 간단하나 각 스위칭 소자를 교류 한주기당 여러 번 스위칭 하므로 스위칭 손실이 큰 단점을 갖는다. 반면 다중스텝 컨버터는 교류 한주기당 한 번 스위칭을 하기 때문에 스위칭 손실은 적으나 출력전압의 크기를 조절할 수 없고 고조파 레벨을 낮추기 위하여 다수의 모듈을 두고 각각의 출력을 중첩하여 교류 한주기당 스텝수를 증가하여야 한다.

시스템의 외형을 줄이면서 스텝수를 증가하기 위해 주변압기와 컨버터브리지 사이에 보조변압기를 설치하는 방법이 사용되어 왔으나 이 방법은 보조변압기의 결선구조가 복잡하여 제작이 어렵고, 비용절감도 크지 않은 단점을 갖는다.[1,2]

이러한 단점을 해결하는 방법으로 컨버터의 직류단에 탭-변압기와 별도의 H-브리지를 삽입하여 직류커패시터에 걸리는 일정전압에 주입전압을 중첩하여 출력전압을 형성하는 방법이 제안되었다[3,4,5]. 그런데 전압중첩을 위해 사용하는

탭-변압기는 제작 상 권수비의 균형을 정확히 일치시키기 어려워 주입전압의 비대칭에 따른 고조파 발생을 야기하고 계통연계를 위한 컨버터의 Back-to-Back 결합이 용이하지 않다.

저자들은 이러한 단점을 개선하고자 H-브리지 대신 3-레벨 반-브리지를 사용하고, 탭-변압기 대신에 보통변압기를 사용하는 36-스텝 컨버터를 제안하였다. 또한 이 컨버터 4대로 구성된 새로운 구조의 Back-to-Back 컨버터를 제안한 바 있다[6]. 그러나 제안된 36-스텝 Back-to-Back 컨버터는 송전단과 수신단에 각각 4대의 주변압기와 2대의 주입변압기를 필요로 하여 외형이 커지는 단점을 갖는다.

본 논문에서는 이러한 단점을 해결하는 방안으로 송전단과 수신단에 각각 2대의 18-스텝 컨버터를 사용하는 새로운 구조의 Back-to-Back 컨버터를 제안하였다. 기본모듈로 사용된 18-스텝 컨버터는 삼상 3-레벨 컨버터의 직류 단에 3-레벨 반-브리지와 변압기로 구성된 보조회로를 포함하고 있다.

### 2. 18-스텝 컨버터

그림 1은 3-레벨 반-브리지와 단상변압기로 구성된 보조회로와 6-스텝 브리지 2대를 사용한 36-스텝 컨버터의 구성을 보여준다[6]. 각 6-스텝 브리지에는 직류커패시터의 전압과 3-레벨 반-브리지와 변압기로 형성되는 전압이 합쳐져 공급된다. 따라서 각 6-스텝 브리지에서 형성된 출력전압은 3상 변압기에 의해 합쳐져 36-스텝의 출력파형을 형성한다. 이 컨버터의 경우 각 6-스텝 브리지는 60Hz로 동작하는 반면, 보조회로에 있는 3-레벨 반-브리지는 360Hz로 동작한다.

\* 준 회원 : 명지대학교 대학원 석사과정  
\*\* 정 회원 : 전남대학교 대학원 박사과정  
\*\*\* 정 회원 : 전남대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박  
† 교신저자, 정회원 : 명지대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박  
E-mail : erichan@mju.ac.kr  
접수일자 : 2008년 12월 1일  
최종완료 : 2009년 3월 23일

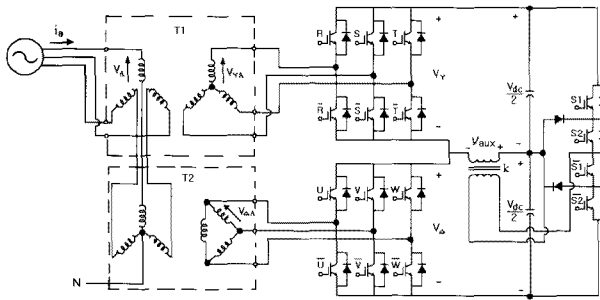


그림 1 3-레벨 반-브리지에 의한 36-스텝 컨버터  
Fig. 1 36-step converter with 3-level

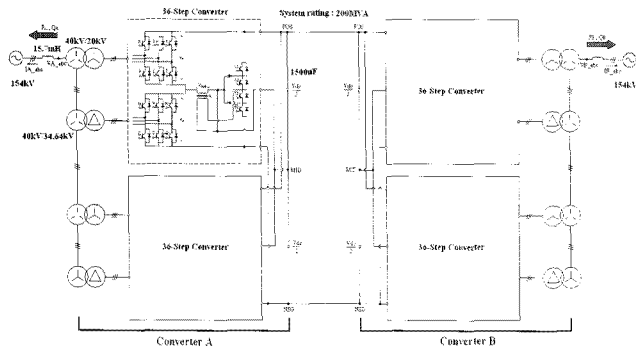


그림 2 36-스텝 Back-to-Back 컨버터  
Fig. 2 36-step Back-to-Back converter

이 컨버터를 Back-to-Back 직류송전에 적용하기 위해서는 그림 2와 같이 송전단과 수신단에 각각 4대를 주변압기를 통해 직렬로 결합해야 하고, 또한 양단에 각각 2대의 주입변압기가 있어야 한다. 따라서 시스템의 대형화가 불가피하고 또한 비용문제를 야기한다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하고자 송전단과 수신단에 각각 2대의 18-스텝 컨버터를 교류 측은 직렬로 결합하고 직류 측은 병렬로 결합하여 상이한 점호각으로 동작하여 연계된 교류계통의 유효·무효전력을 독립적으로 제어하는 새로운 구조의 Back-to-Back 컨버터를 제안한다. 그림 3은 제안하는 Back-to-back 컨버터의 기본모듈인 18-step 컨버터의 기본구성을 보인 것이다. 이 컨버터는 참고문헌 [7]에 소개된 컨버터로 3-레벨 반-브리지와 단상변압기로 구성된 보조회로를 직류 단에 포함하고 1기의 주변압기를 통하여 계통과 연계되어 있다.

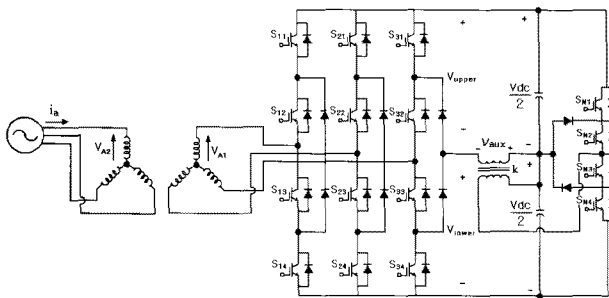


그림 3 보조회로를 이용한 18-step 컨버터  
Fig. 3 18-step converter using auxiliary circuit

이 그림에서 컨버터의 직류 상단전압과 하단전압은 DC 커패시터의 전압  $v_{dc}/2$ 와 보조브릿지가 주입변압기를 통해 공급하는 전압  $v_{aux}$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{upper} = v_{dc}/2 + v_{aux} \quad (1)$$

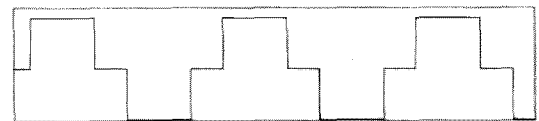
$$V_{lower} = v_{dc}/2 - v_{aux} \quad (2)$$

이 관계식에 의해 컨버터의 출력 AC 전압은 주입전압  $v_{aux}$ 에 의해서 조절이 가능함을 알 수 있다. 한편 주입전압  $v_{aux}$ 는 보조브리지회로의 스위칭 패턴과 주입변압기의 권선비에 의해 결정된다. 따라서 주입전압  $V_{aux}$ 는  $0, kV_{dc}/2, -kV_{dc}/2$ 인 3-레벨 값으로 정해지고, 보조브리지회로는  $120^\circ$  마다 동작하기 때문에 기본주파수의 3배에 해당하는 펄스를 형성하게 된다. 보조회로에 사용되는 변압기의 권선비  $k$ 는 출력 전압과형의 고조파수준을 최소화하도록 결정하여야 한다.

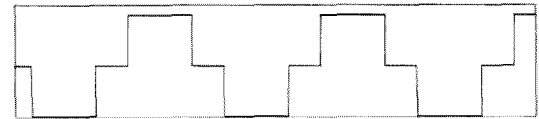
그림 4는 제안하는 18-step 컨버터의 각 부분의 파형을 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 보조브리지회로의 출력파형을 보인 것으로 교류 한주기당 3개의 펄스가 존재하여  $120^\circ$  마다 동작함을 알 수 있다. 그림 4(b)와 4(c)는 상단과 하단 컨버터 부분에 인가되는 전압파형을 나타낸 것으로, 직류전압  $V_{dc}/2$ 에  $V_{aux}$ 를 가하거나 감한 파형을 나타낸다. 4(d)와 4(e)는 출력 선간전압과 상전압을 나타낸 것이다.



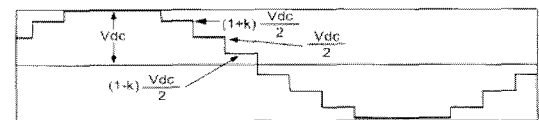
(a) 3-레벨 보조브리지 전압  $V_{aux}$



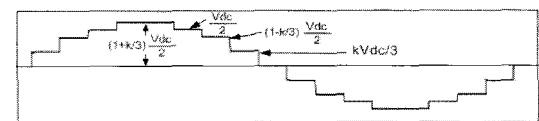
(b) DC단 전압  $V_{upper}$



(c) DC단 전압  $V_{lower}$



(d) 출력 선간전압  $V_{AB}$



(e) 출력 상전압  $V_{AO}$

그림 4 18-스텝 컨버터의 주요부분 파형  
Fig. 4 Major part waveform of 18-step converter

한편 보조브리지가 주입하는 전압의 크기는 출력전압의 고조파에 영향을 주므로 주입변압기의 권수비는 최적 값을 택하여야 한다.

그림 4(e)에 보인 출력전압을 푸리에 급수로 전개하면 다음 식과 같다.

$$v_{AN} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left[ k \cos \frac{n\beta_0}{2} + (1-k) \cos n\left(\frac{\beta_0}{2} + \beta_1\right) \right] \sin n\omega t \quad (3)$$

여기서 기본파를 포함한 각 고조파성분의 크기는 다음 수식으로 표현 가능하다.

$$V_{AN,n} = \frac{2V_{dc}}{n\pi} \left[ k \cos \frac{n\beta_0}{2} + (1-k) \cos n\left(\frac{\beta_0}{2} + \beta_1\right) \right] \quad (4)$$

인버터의 출력파형에 가장 큰 영향을 주는 성분은 5차 고조파이므로 이를 소거하기 위해서는 위의 수식에 n=5를 대입하고  $\beta_0$ 와  $\beta_1$ 을 각각  $20^\circ$ 로 할 때 크기가 0이 되어야 한다. 이때 k 값을 구하면 k=0.574 이다.

### 3. Back-to-Back 동작해석

그림 5에 보이는 것처럼 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.

만약 컨버터가 PWM 방식으로 동작할 경우 교류출력전압의 크기와 위상을 조절 가능하여 유·무효전력의 독립적 제어가 가능하다. 그러나 다중스텝으로 동작할 경우 교류출력전압의 크기는 고정되어 있어 유·무효전력의 독립적인 제어가 불가능하다.

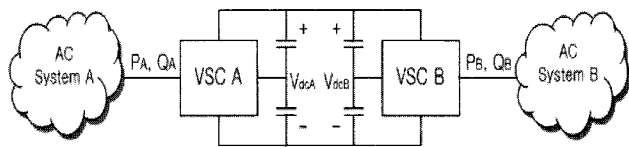
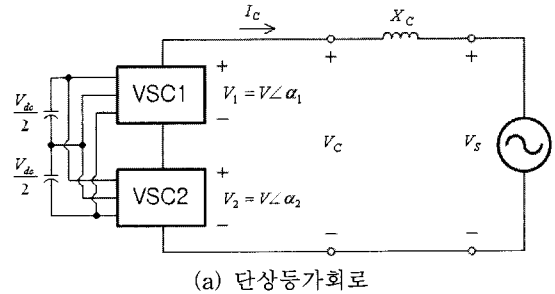


그림 5 Back-to-Back HVDC 시스템의 개념도  
Fig. 5 Conceptual diagram of Back-to-Back HVDC system

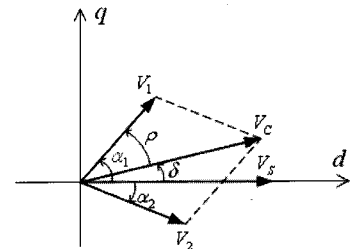
본 논문에서는 전절에서 설명한 18-스텝 컨버터 2대를 교류측은 직렬로 직류측은 병렬로 연결한 후 컨버터\_1의 점호각  $\alpha_1$ 과 컨버터\_2의 점호각  $\alpha_2$ 를 상이하게 동작시켜 연계된 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어하는 방식을 제안한다.

그림 6(a)는 제안하는 Back-to-Back 컨버터의 송·수전 단 중 한쪽 단의 단상등가회로를 보인 것이다. 그리고 컨버터의 상·하단 점호각을 달리 할 때 전원전압, 컨버터 각각의 전압, 그리고 컨버터 합성전압의 벡터도를 그림 6(b)에 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상단점호각  $\alpha_1$ 과 하단점호각  $\alpha_2$ 의 값을 적절히 조절하면 컨버터

의 출력전압벡터  $V_C$ 는 전원전압  $V_S$ 와 임의의 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.



(a) 단상등가회로



(b) 컨버터 전압의 벡터도

그림 6 제안된 back-to-back 컨버터의 동작원리  
Fig. 6 Operation principle of proposed back-to-back converter

그림 6(a)의 등가회로에서 유·무효 전력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{3V_C V_S}{X_C} \sin \delta \quad (5)$$

$$Q = \frac{3(V_S^2 - V_C V_S \cos \delta)}{X_C} \quad (6)$$

위의 식 (5)와 (6)을 결합하고, 2차 방정식의 근의 공식을 사용하여,  $V_C$ 와  $\delta$ 를 얻기 위한 두 방정식을 도출할 수 있다.

$$V_C = \sqrt{\frac{P^2 X_C^2 + (3V_S^2 - QX_C)^2}{9V_S^2}} \quad (7)$$

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{PX_C}{3V_S V_C}\right) \quad (8)$$

한편 출력전압  $V_C$ 와 전력각  $\delta$ 에 대해 상·하단 컨버터의 점호각  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 관계를 도출하기 위한 수식은 그림 6(b)의 벡터도를 사용하여 전개할 수 있다.  $V_C$ 와  $V_1$  또는  $V_C$ 와  $V_2$  사이의 각을  $\rho$ 라고 하면, 다음 두 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_C = 2V \cos \rho \tag{9}$$

$$\rho = \alpha_1 - \delta = \delta - \alpha_2 \tag{10}$$

$\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 에 관한  $\delta$ 의 관계, 그리고  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 에 관한  $V_C$ 의 관계는 다음 식으로 표현된다.  $V_C$ 의 최대값은  $V_S$ 의 1.15배로 가정한다.

$$\delta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \tag{11}$$

$$V_C = 1.15 V_S \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \tag{12}$$

위의 식 (11)과 (12)를 결합하여, 상·하단 컨버터의 점호각  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\alpha_1 = \delta + \cos^{-1}\left(\frac{V_C}{1.15 V_S}\right) \tag{13}$$

$$\alpha_2 = \delta - \cos^{-1}\left(\frac{V_C}{1.15 V_S}\right) \tag{14}$$

따라서, 주어진 P와 Q에 대한  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 값을 일률적으로 결정할 수 있다.

표 1 P와 Q에 관한  $V_C$ 와  $\delta$ 의 변화

Table 1  $V_C$  and  $\delta$  variation with respect to P and Q

	2.5 KW	5 KW	7.5 KW
-7.5 KVar	1.025Vs∠0.466°	1.025Vs∠0.931°	1.025Vs∠1.396°
-3.75 KVar	1.012Vs∠0.472°	1.012Vs∠0.943°	1.013Vs∠1.414°
0 KVar	1.000Vs∠0.477°	1.000Vs∠0.955°	1.000Vs∠1.431°
3.75 KVar	0.987Vs∠0.483°	0.987Vs∠0.967°	0.988Vs∠1.449°
7.5 KVar	0.975Vs∠0.490°	0.975Vs∠0.979°	0.975Vs∠1.468°

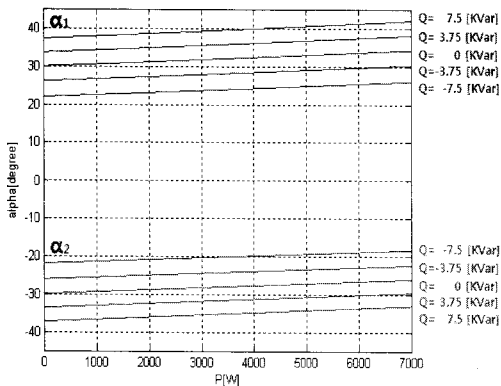


그림 7 각 컨버터의  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 변화

Fig. 7  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  variation of each converter

표 1은 선간전압이 220V이고 커플링 인덕턴스가 10KVA 기준용량의 10%라고 가정했을 때, P와 Q에 관한  $V_C$ 와  $\delta$ 의 값을 보여준다. 그림 7은 P에 관한  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 변화를 Q에

따라서 보여준다. 무효전력 Q가 유도성에서 용량성으로 이동함에 따라,  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 값이 0°축에 가까워진다.

#### 4. 시뮬레이션 분석

새로운 구조의 back-to-back 컨버터를 전압형 HVDC 시스템에 적용하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시스템 동작특성 및 제어기의 성능해석을 실시하였다. 전력회로는 회로소자, 스위치, 변압기를 사용하여 구성하였고, 제어기는 내장된 제어모듈을 사용하여 구성하였다. 그림 8은 HVDC에 적용하기 위한 back-to-back 컨버터의 전력회로를 보여준다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수는 표 2에 나타났다.

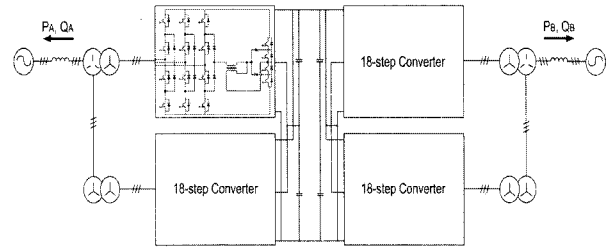


그림 8 18-스텝 back-to-back HVDC 시스템 구성도

Fig. 8 Configuration of 18-step back-to-back HVDC system

표 2 시뮬레이션 회로정수

Table 2 Simulation Circuit Parameters

모선 전압	3φ 220V, 60Hz
전원 인덕턴스	2mH
직류 커패시터	3000uF
주변압기	110V/110V(Y-Y)
보조변압기	110V/63.14V
시스템 용량	10KVA

전압원 HVDC 시스템은 점호각을 제어하여 컨버터 양단에 걸리는 단자 전압의 크기를 조절하고 전력의 방향을 바꾸어 동작한다. 전력의 전송방향에 따라 각 컨버터의 제어 대상이 변하게 된다. 즉, 시스템 A에서 B로 전력이 전송될 경우 컨버터 A는 일정직류전압제어와 무효전력제어를 수행하게 되고 컨버터 B는 유효전력과 무효전력의 제어를 수행하게 된다. 그리고 시스템 B에서 A로 전력이 전송될 경우는 반대의 제어를 수행한다. 따라서 각 컨버터의 제어기는 그림 9와 같은 동일한 구성을 갖는다.

컨버터 A에서 컨버터 B로 전력이 전송될 때, 직류 전압  $V_{dc}$ 의 실측값은 기준값  $V_{dc}^*$ 를 따른다. 유효전류의 기준값  $I_{dA}^*$ 는 컨버터 B의 유효전류 실측값  $I_{dB}$ 로부터 얻어진다. 무효전류  $I_{qA}$ 와 유효전류  $I_{dA}$ 의 실측값은 제어 알고리즘을 통해 기준값  $I_{qA}^*$ 와  $I_{dA}^*$ 를 따른다. 교류 전류 제어기는 컨버터에 일반적으로 사용되는 제어기와 동일한 구성을 갖는다. d-q 변환된 교류 시스템 전압의 기준값  $V_{dA}^*$ 와  $V_{qA}^*$ 는  $V_C$ 와  $\delta$ 의 값을 결정하기 위해 사용된다.  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 값은 식 (13)과 (14)에 의해서  $V_C$ 와  $\delta$ 로부터 얻어진다.

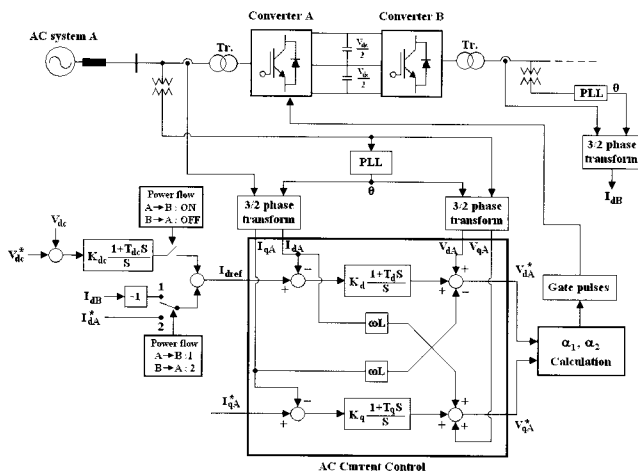


그림 9 시스템 A의 컨버터 제어기  
Fig. 9 Converter controller at system A-side

표 3 시뮬레이션 시나리오

Table 3 Simulation scenario

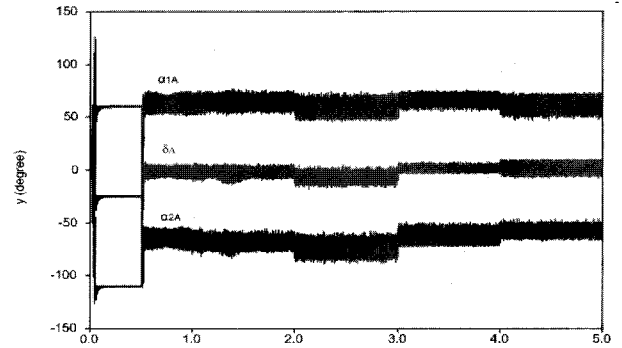
제어모드	M1	M2	M3	M4	M5
시간(초)	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0
V <sub>dc</sub> *[V]	350				
i <sub>dA</sub> *[A]	V <sub>dc</sub> control			-15	-25
i <sub>qA</sub> *[A]	0	20	0	15	-30
i <sub>dB</sub> *[A]	0	10	25	V <sub>dc</sub> control	
i <sub>qB</sub> *[A]	0	30	-15	0	15
P <sub>A</sub> [KW]	0	4.4	5.5	-3.3	-5.5
Q <sub>A</sub> [Kvar]	0	4.4	0	3.3	-6.6
P <sub>B</sub> [KW]	0	-4.4	-5.5	3.3	5.5
Q <sub>B</sub> [Kvar]	0	6.6	-3.3	0	3.3

표 3은 제안된 back-to-back 컨버터의 동작분석에 사용된 시뮬레이션 시나리오를 보여준다. 제어기는 시뮬레이션을 시작하고 0.5초 후에 동작을 시작한다. 0.5초부터 3.0초까지는 시스템 A에서 B로 전력을 전송하다가, 3.0초에 시스템 B에서 A로 전력을 전송하도록 설정하였다. 또한 시스템의 유효전력과 무효전력제어 성능을 분석하기 위해서 각 모드별(M1~M5)로 유효전력과 무효전력의 기준값을 변경하였다.

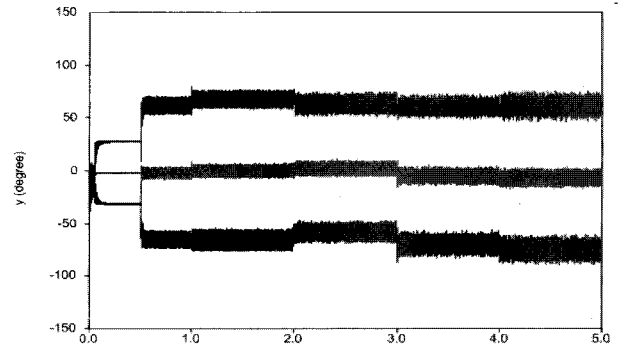
전체 시스템 동작을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 그림 10에 나타내었다. 시스템 A와 B의 제어기는 동일한 구조로 되어 있고, 모든 제어값은 같으며 부호는 반대이다. 그림 10(a)와 (b)는 출력전압의 전력과  $\delta$ , 상단 점호각  $\alpha_1$ , 그리고 하단 점호각  $\alpha_2$ 의 변화를 나타낸 것이다.

그림 10(c)와 (d)는 각 컨버터 출력전압과 합성 출력전압을 보여주고 있다. 그림 10(e)는 직류링크전압의 제어 성능을 보여준다. 시스템이 0.5초에 동작을 시작할 수 있도록 직류링크전압을 초기에 350V로 충전하였다. 실측된 직류링크전압이 큰 과도현상없이 기준값인 350V를 잘 추종하고 있다. 그림 10(f)는 교류시스템 A에서 컨버터 A로 전송되는 유효전력과 무효전력을 나타내고 있다. 시스템 A의 유효전

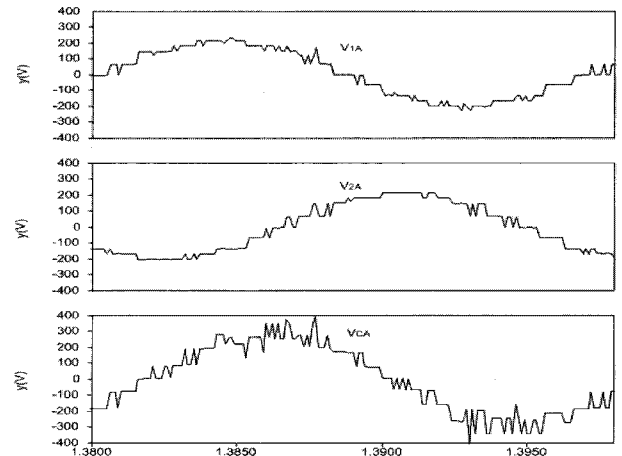
력과 무효전력이 각각 독립적으로 제어되고 있음을 확인하였다. 그림 10(g)는 컨버터 B에서 교류시스템 B로 전송되는 유효전력과 무효전력을 나타내고 있다. 유효전력은 그림 10(f)의 값과 거의 동일한 크기를 나타내고 있지만 무효전력은 각 컨버터가 독립적인 제어를 수행하고 있으므로 다르게 나타나고 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 제안하는 시스템은 유효전력과 무효전력의 독립제어가 가능하다.



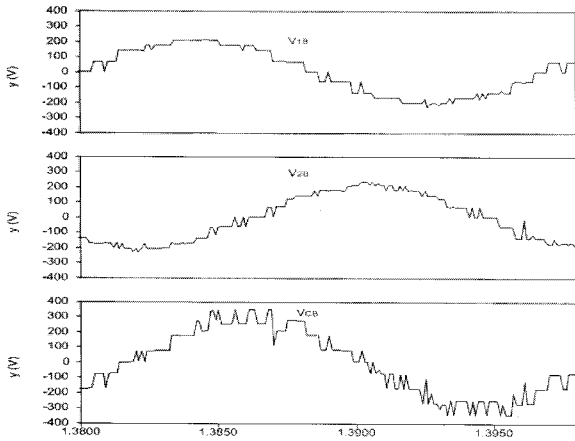
(a) 컨버터 A의 컨버터 전력각  $\delta_A$ , 상단 점호각  $\alpha_{1A}$ , 그리고 하단 점호각  $\alpha_{2A}$



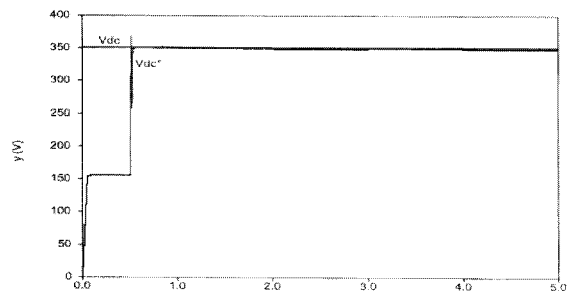
(b) 컨버터 B의 컨버터 전력각  $\delta_B$ , 상단 점호각  $\alpha_{1B}$ , 그리고 하단 점호각  $\alpha_{2B}$



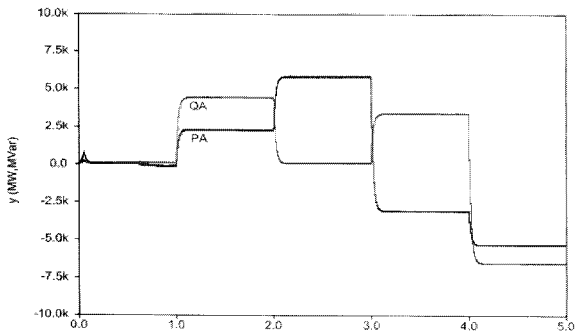
(c) 컨버터 A의 합성전압  $V_{CA}$ , 그리고  $V_{1A}$ ,  $V_{2A}$



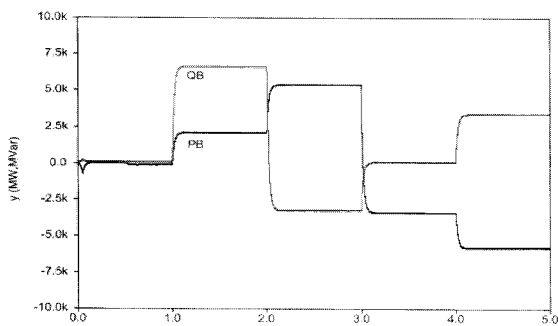
(d) 컨버터 B의 합성전압  $V_{CB}$ , 그리고  $V_{1B}$ ,  $V_{2B}$



(e) 직류링크전압 기준값  $V_{dc}^*$ 와 직류링크전압 실측값  $V_{dc}$



(f) 컨버터 A의 전송 유효전력  $P_A$ 와 무효전력  $Q_A$



(g) 컨버터 B의 전송 유효전력  $P_B$ 와 무효전력  $Q_B$

그림 10 제안된 back-to-back HVDC 시스템 시뮬레이션 결과  
Fig. 10 Simulation results of proposed back-to-back HVDC system

### 5. 축소모형 실험분석

제안하는 18-step Back-to-Back 컨버터의 하드웨어 구현을 통한 동작검증을 위해 그림 11에 보인 것처럼 하드웨어를 제작하고 실험을 실시하였다. 실험 세트는 전원 시플레이터와 18-step Back-to-Back 컨버터로 양 측에 3상 전원을 연결하도록 구성하였다. 표 4는 축소 모형에 사용된 실험 회로정수이다.

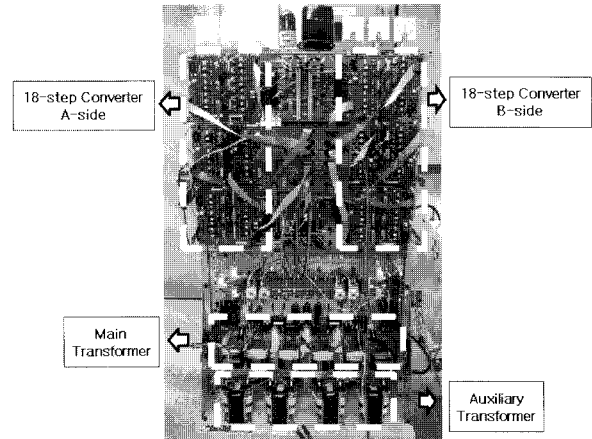


그림 11 Back-to-Back 컨버터의 축소모형  
Fig. 11 Scaled model of Back-to-Back converter

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 4 하드웨어 실험 회로정수

Table 4 Hardware experiment parameters

모선 전압	3 $\phi$ , 220[V]
모선 주파수	60[Hz]
선로인덕턴스	2[mH]
직류 커패시터	3300[uF]
주변압기	110:110
보조변압기	110:63
시스템 용량	2[KVA]

본 논문에서 제안하는 방식의 Back-to-Back 컨버터 시스템이 실제 하드웨어에서 유·무효전력 제어를 수행하는지 확인하기 위하여 표 5의 시나리오에 따라 실험을 실시하였다.

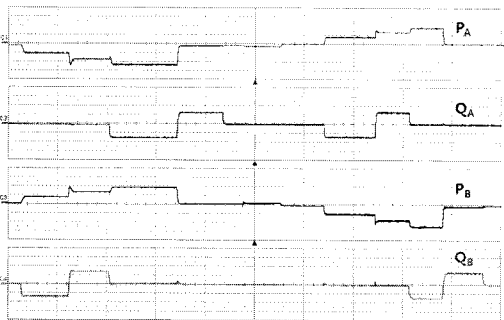
시나리오에 따라 유·무효전류 기준값을 변경하고 양 측의 유·무효전력을 측정할 파형이 그림 12(a)에 나타나 있다. A측과 B측 모두 원하는 기준값을 원활히 추종하고 있고 유·무효전력이 독립적으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 12(b)는 Back-to-Back 컨버터의 양 측 DC-링크 전압 파형이다. DC-링크 전압제어는 유효전력의 전송방향에 따라 A측 또는 B측 컨버터가 하고 있는데 제어를 시작하였을 때 큰 과도현상 없이 기준값을 잘 추종함을 알 수

있다. 그림 12(c)는 동작원리 벡터도에 나타난 전력각에 대한 파형으로,  $\alpha_1 - \delta = \delta - \alpha_2$ 의 관계를 가지고 있다. 그림 12(d)는 상·하단 컨버터의 출력전압과 각 컨버터의 합성전압, 보조변압기에 의한 주입전압을 나타낸다. 상·하단 컨버터의 출력전압이 합해져 컨버터의 합성전압이 됨을 확인할 수 있고, 보조변압기에 의해 기본주파수의 3배에 해당하는 3-레벨 전압이 주입되고 있음을 확인할 수 있다.

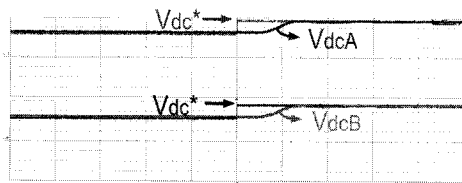
표 5 실험 시나리오

Table 5 Experimental Scenario

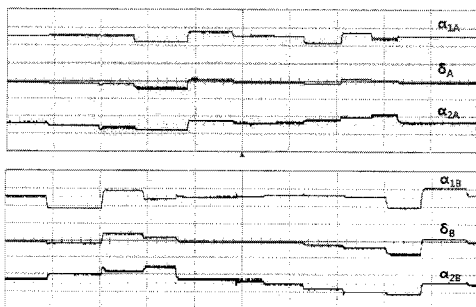
모드	M1	M2	M3	M4	M5
$V_{dcA}^*$ , $V_{dcB}^*$ [V]	200				
$I_{dA}^*$ [A]	직류전압제어				
$I_{qA}^*$ [A]	0	0	-2.273	2.273	0
$I_{dB}^*$ [A]	0	1.136	2.273	3.409	0
$I_{qB}^*$ [A]	0	-2.273	2.273	0	0
모드	M6	M7	M8	M9	M10
$I_{dA}^*$ [A]	1.136	2.273	3.409	0	0
$I_{qA}^*$ [A]	-2.273	2.273	0	0	0
$I_{dB}^*$ [A]	직류전압제어				
$I_{qB}^*$ [A]	0	0	-2.273	2.273	0



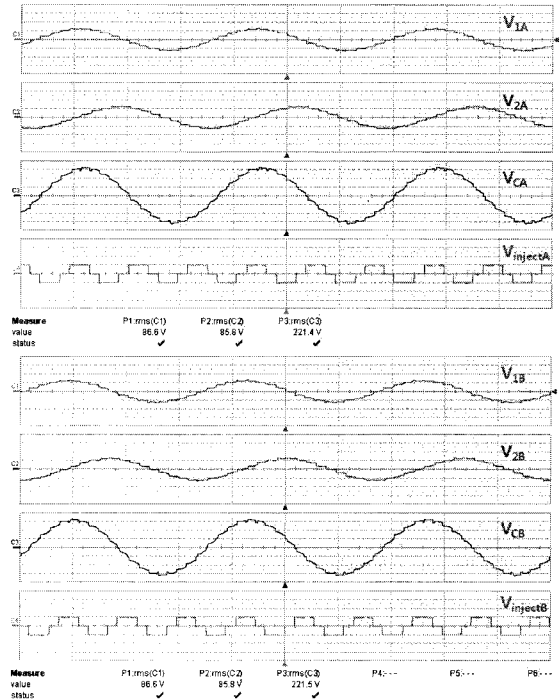
(a) 전송 유효전력과 무효전력



(b) DC-링크 전압



(c) 컨버터의 전압벡터 전력각



(d) 상·하단 컨버터 출력전압과 컨버터 합성 출력전압 및 보조변압기에 의한 주입전압

그림 12 하드웨어 축소모형 실험결과

Fig. 12 Experimental results of scaled model

## 6. 결론

본 논문에서는 송전단과 수신단에 각각 2대의 18-스텝 컨버터를 교류측은 직렬로 직류측은 병렬로 결합하여 상이한 점호각으로 동작시켜 출력전압의 크기와 위상을 조절하여 연계된 교류시스템의 유·무효전력의 독립적인 제어가 가능한 새로운 구조의 Back-to-Back 컨버터를 제안하였다.

제안하는 Back-to-Back 컨버터의 동작과 성능을 검증할 목적으로 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 기반으로 한 시뮬레이션 모델을 개발하고 분석을 실시하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 토대로 하드웨어 축소모형을 제작하고 실험을 실시하여 시스템의 실제구현 가능성을 검증하였다.

제안하는 Back-to-Back 컨버터는 기존에 제안된 시스템에 비해 출력전압의 스텝수가 적어 고조파 레벨은 다소 높지만 연계용 변압기의 구조가 간단하고 그 수가 적어 설치면적이 적고 설치비용이 저렴할 것으로 보인다. 또한 18-스텝에 따른 고조파레벨은 필터에 의해 저감이 가능할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 논문은 지식경제부 지원으로 수행한 "IT 기반의 대용량 전력수송 제어시스템"과 에너지자원인력양성사업의 결과물입니다.

참 고 문 헌

- [1] C. Schauder, et. al., "Development of a  $\pm 100$ Mvar static condenser for voltage control of transmission systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1486~1493, July, 1995.
- [2] D. Ramey, "Design, Installation, and Operation of American Electric Power (AEP) 320MVA Unified Power Flow Controller (UPFC)", EPRI (Electric Power Research Institute), Palo Altos, CA, Tech. Rep. TR-113839, Nov. 1999.
- [3] S. Masukawa and S. Iida, "A Method for Reducing Harminics in Output Voltages of a Double-Connected Inverter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9, No. 5, pp. 543~550, September 1994.
- [4] L. Yonghe, J. Arrillaga, N. Watson, "EMTDC Assessment of a New Type of VSC for Back to back HVDC Interconnections", International Conference on Power system Transients-IPST 2003 in New Orleans, USA, pp. 1~5.
- [5] L. Yonghe, J. Arrillaga, N. Watson, "Multi-level voltage sourced conversion by voltage reinjection at six times the fundamental frequency", IEE Proc. on Electrical Power Application, Vol. 149, No. 3, pp. 201~207, May 2002.
- [6] B. Han, S. Baek, B. Bae, J. Choi, "Back-to-Back HVDC system using a 36-step voltage source converter", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 153, No. 6, pp. 677~683, November 2006
- [7] K. Oguchi, Y. Maki, Y. Sunaga "Three-Phase Multilevel Voltage Source Converters with Low Switching Frequencies and Less-Distorted Input Voltages", Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1993 IEEE, vol.2, pp. 870~878 2-8 Oct. 1993



이 지 헌 (李知憲)

1983년 12월 19일생.  
 2008년 명지대 전기공학과 졸업.  
 2008년 동 대학원 전기공학과 입학.  
 Tel : 031-335-6563  
 Fax : 031-330-6816  
 E-mail : pho1234@mju.ac.kr



한 병 문 (韓炳文)

1976년 서울대 전기공학과 졸업.  
 1988년 미 아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).  
 미 Westinghouse 중앙연구소 선임연구원  
 현재 명지대학교 전기공학과 교수  
 Tel : 031-330-6366  
 Fax : 031-330-6816  
 E-mail : erichan@mju.ac.kr



리 위 룡 (李玉龍)

1982년 8월 14일생.  
 2004년 8월 중국 북경석유화학대학교 전자통신공학과 졸업.  
 2006년 전남대학교 전기공학과 졸업(석사).  
 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).  
 현재 현대중공업 연구원



최 남 심 (崔南燮)

1963년 3월 5일생.  
 1987년 고려대 전기공학과 졸업.  
 1989년 KAIST 전기 및 전기공학과 졸업(석사)  
 1994년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학박)  
 1995년~현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수

저 자 소 개



이 혜 연 (李慧妍)

1984년 8월 25일생.  
 2008년 명지대 전기공학과 졸업.  
 2008년 동 대학원 전기공학과 입학.  
 Tel : 031-335-6563  
 Fax : 031-330-6816  
 E-mail : hyeyeon825@mju.ac.kr