

펄스다중화 보조회로를 이용한 36-펄스 Back-to-Back 전압원 컨버터

최준영 · 한병문
 명지대학교 전기공학과

36-pulse Back-to-Back Voltage Source Converter
 with Pulse-Interleaving Auxiliary Circuit

Jun-Young Choi · Byung-Moon Han
 Dept. of Electrical Engineering Myongji University

Abstract - 본 논문은 펄스 삽입 보조 회로를 갖고 있는 12-펄스 브리지 4대를 사용한 36-펄스 back-to-back 전압원 컨버터를 제안한다. 제안된 back-to-back 전압원 컨버터는 교류 연계점에서 유효전력과 무효전력의 독립적인 제어가 가능하다. 펄스 수를 증가하는 원리는 이론적 접근을 사용하여 분석되었다. 제안된 시스템의 동작 타당성은 PSCAD/EMTDC 소프트웨어의 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 제안된 back-to-back 전압원 컨버터는 HVDC와 FACTS 장치로 널리 사용될 수 있다.

1. 서 론

전압원 컨버터에는 단일 브리지를 구성하고 있는 각 스위칭 소자를 PWM방식으로 동작하는 PWM 컨버터, 그리고 2기 이상의 브리지를 변압기로 결합하여 출력파형을 형성하는 다중펄스 컨버터가 있다. PWM 컨버터의 경우 단일 브리지를 사용하므로 시스템구성이 간단하나 각 스위칭 소자를 교류한주기당 여러 번 스위칭을 하므로 스위칭 손실이 커 대용량에 적용이 어렵다. 반면 다중펄스 컨버터는 교류한주기당 한번 스위칭을 하기 때문에 스위칭 손실은 적으나 출력파형의 고조파레벨을 낮추기 위해 펄스수를 증가하여야 한다.

출력파형의 펄스수를 증가하기 위해 이미 다양한 방식이 사용되어 왔다[1,2]. 이중 가장 단순한 방식은 컨버터의 브리지수와 교류출력 단에 결합되는 변압기수를 증가하여 펄스수를 증가하는 것이다. 그러나 이 방식의 경우 브리지와 변압기의 수가 증가하여 시스템 외형이 크고 비용이 높은 단점을 갖는다. 이러한 단점을 보완하고자 변압기와 브리지 사이에 보조변압기를 두어 주변압기수를 증가하지 않고 펄스수를 증가하는 방법이 사용되어 왔다[3]. 그러나 이 경우 보조변압기의 결선구조가 복잡하여 제작이 어렵고 비용절감수준도 높지 않은 단점을 갖는다.

이러한 단점을 해결하기 위한 방법으로 직류 단에 보조회로를 삽입하여 직류커패시터에 걸리는 일정전압에 보조변압기와 브리지회로를 사용하여 펄스형태의 전압을 중첩하여 출력파형을 형성하는 방법이 제안되었다[4,5,6]. 하지만 이 방식의 경우 보조회로에서 전압중첩을 위하여 탭-변압기를 사용하게 되는데 탭-변압기는 외형이 크고 제작상 변압비가 정확히 일치하기 어렵다. 따라서 실제 하드웨어 구현 시 출력파형의 대칭성이 결여되어 고조파 발생이 우려되고 외형이 큰 단점을 갖는다.

본 연구에서는 보조회로로 H-브리지 대신 3-레벨 반 브리지를 사용하고 탭-변압기 대신에 보통변압기를 사용하는 36-펄스 컨버터 4대로 구성된 새로운 구조의 Back-to-Back 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터의 동작과 성능을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어에 의한 시뮬레이션을 실시하였다.

2. 36-펄스 전압원컨버터

본 논문에서는 그림 1에 보이는 것과 같이 직류 단에 보통변압기와 3-레벨 반브리지로 구성된 보조회로를 갖는 새로운 구조의 36-펄스 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터의 동작원리를 이해하기 쉽게 하기위해 컨버터를 이상적으로 가정하면 DC 커패시터의 전압은 동일한 v_{dc} 로 정의할 수 있다.

따라서 그림 1의 Y로 연결된 컨버터와 Δ 로 연결된 컨버터의 직류전압은 DC 커패시터의 전압 v_{dc} 와 보조브리지의 주입전압 v_{aux} 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_Y = v_{dc} + v_{aux} \quad (1)$$

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

이 관계식으로부터 각 컨버터의 출력 AC 전압은 주입 전압 v_{aux} 에 의해서 동시에 조절 가능하다. 한편 주입 전압 v_{aux} 는 보조브리지회로의 스위칭 패턴과 주입변압기의 권선비에 의해 결정된다. 따라서 주입전압 v_{aux} 는 0, kVdc, -kVdc 인 3-레벨 값으로 정해진다.

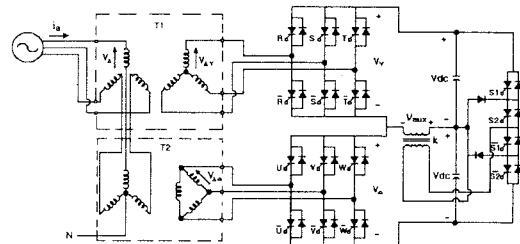


그림 1. 새로운 보조회로를 이용한 36-펄스 컨버터
 Fig. 1. 36-pulse converter with new auxiliary converter

그림 1에서 개방_Y-Y와 Y- Δ 변압기로 연결된 두 대의 컨버터 시스템은 교류 측의 상전압을 30° 위상차를 갖도록 하여 12펄스를 발생하게 되며, 보조브리지회로는 30° 마다 동작하기 때문에 주입전압 v_{aux} 는 기본 주파수의 6배에 해당하는 펄스를 형성하게 된다. 그렇기 때문에 컨버터 시스템의 변압기 1차 측에 36-펄스의 전압을 형성하게 된다.

보조회로에 사용되는 변압기의 권선비 k는 출력 상전압과 형의 고조파수준을 최소화하도록 결정하여야 하는데, 본 연구에서는 고조파분석을 통해 $k = 0.654$ 일 때 전고조파 왜형을 THD가 4.83%로 최소 값이 되는 것을 확인하였다.

그림 2는 시뮬레이션에 의해 제안하는 36-펄스 컨버터의 각 부분의 파형을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 보조브리지회로의 출력파형을 보인 것으로 교류 한주기당 12개의 펄스가 존재하여 30° 마다 동작함을 알 수 있다. 그림 2(b)와 (c)는 상단과 하단 브리지의 직류 단에 인가되는

전압파형을 V_d 와 V_r 를 나타낸 것이다. 직류전압 v_{dc} 에 v_{aux} 를 가하거나 감한 파형을 나타낸다. 그림 2(d)와 (e)는 상단과 하단 브리지의 교류 단의 전압파형을 나타낸 것이다. 이 두 파형의 합은 그림 2(f)에 보인 36-펄스 파형이 됨을 알 수 있다.

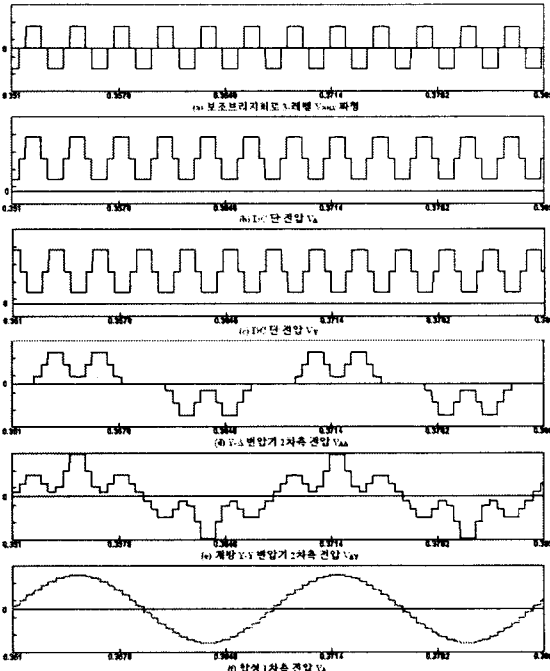


그림 2. 제안하는 컨버터의 중요부분파형
Fig. 2. Waveforms of proposed 36-pulse converter

3. 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 그림 3에 보인 것처럼 연계되는 2개 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어가능하고 양방향 전력을 제어 가능해야 한다. Back-to-Back 컨버터가 교류계통의 유무효전력을 독립적으로 제어하기 위해서 전압원컨버터는 2개의 제어 입력변수를 필요로 한다. 따라서 전압원컨버터가 PWM 방식으로 동작할 경우 교류출력전압의 크기와 위상을 독립적으로 조절 가능하여 유·무효전력의 독립적 제어가 가능하다.

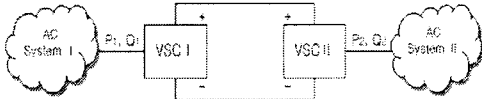


그림 3. Back-to-Back 컨버터의 개념도
Fig. 3. Conceptual diagram of Back-to-Back Converter

그러나 대용량 전압원컨버터의 경우 스위칭손실 때문에 PWM 방식으로 동작하는 것이 거의 불가능하고 PWM 방식으로 동작한다 해도 스위칭주파수가 낮아 출력교류전압에 저차고조파가 함유되는 문제를 야기하여 이를 흡수할 수 있는 수동필터가 요구된다.

그림 4는 다중펄스방식으로 동작하는 2대의 전압원컨버터를 직렬로 결합하여 상단컨버터의 점호각과 하단컨버터의 점호각을 상이하게 동작시켜 연계된 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어하기 위한 단상등가회로와 벡터도를 나타낸 것이다.

그림 4의 벡터도는 유·무효전력의 독립제어를 위해 전압원컨버터의 상하단 점호각을 달리 할 때의 전원전압, 컨버터 각각의 전압, 그리고 컨버터 전체의 전압을 벡터

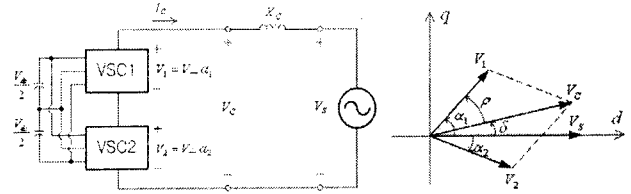


그림 4. 유무효전력제어 단상등가회로와 벡터도
Fig. 4. One-line equivalent circuit of active and reactive power control and vector diagram

도로 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상하단점호각 α_1 과 하단점호각 α_2 의 값을 적절히 조절하면 컨버터의 출력전압벡터 V_c 는 전원전압 V_s 와 전력각 δ 를 이루고 그 크기를 조절하는 것이 가능하다. 따라서 상하단 점호각 α_1 과 α_2 를 조절하여 연계된 교류계통의 유·무효전력을 독립적으로 제어하는 것이 가능하다.

4. 성능평가 시뮬레이션

새로운 구조의 Back-to-Back 컨버터를 전압형 HVDC 시스템에 적용하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시스템 동작특성 및 제어기의 성능해석을 실시하였다. 시뮬레이션 모형은 그림 5에 나타낸 것과 같이 3상 220V, 10KVA로 구성하였으며 시뮬레이션에 사용된 회로정수는 표 1에 나타나 있다. 컨버터 직류단에 설치된 커패시터의 용량은 직류최대전압의 맥동율을 고려하여 설계하였다.

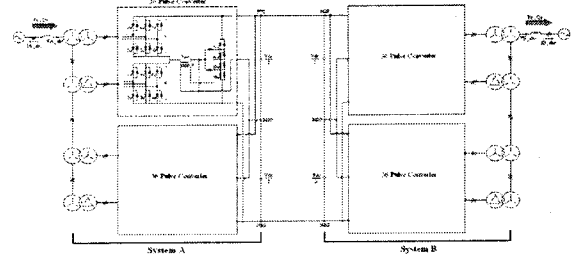


그림 5. 36-펄스 HVDC 시스템 구성도
Fig. 5. Configuration diagram of the 36-pulse HVDC

표 1. 시뮬레이션 회로정수
Table 1. Simulation Circuit Parameter

모선 전압	3Φ 220[V]
모선 주파수	60[Hz]
전원인덕턴스	2[mH]
직류 커패시터	3000[uF]
위상변압기용량	10[KVA]
보조변압기용량	10[KVA]

전원 HVDC 시스템은 전력의 흐름을 바꿀 때 점호각을 제어하여 컨버터 양단에 걸리는 전압의 극성을 바꾸어 동작하지만 전압원 HVDC 시스템은 점호각을 제어하여 컨버터 양단에 걸리는 전압의 크기를 조절하여 전류의 방향을 바꾸어 동작한다. 그림 5에 보인 것처럼 점호각을 제어하여 전력을 A시스템에서 B시스템으로, 또는 B시스템에서 A시스템으로 전송할 수가 있다. 전압원 HVDC 시스템이 연계된 계통과 원활한 동작을 하기 위해서는 연계된 두 교류시스템의 유효전력을 독립적으로 제어할 수 있어야 한다.

전압원 HVDC 시스템은 전력의 전송방향에 따라 각 시스템의 제어 대상이 변하게 된다. 즉, 그림 5에서 시스템 A에서 B로 전력이 전송될 경우 시스템 A는 일정직류전압 제어와 무효전력 제어를 수행하게 되고 시스템 B는 유효전력과 무효전력 제어를 수행하게 된다. 또한 시스템 B에서 A로 전력이 전송될 경우는 반대의 제어를 수행한다.

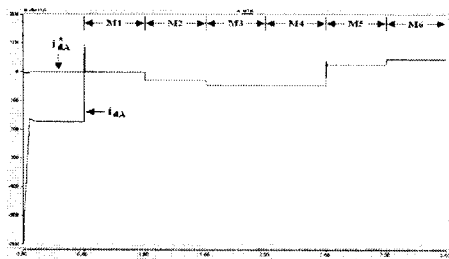
그림 5에 나타낸 새로운 구조의 36-펄스 전압원

HVDC 시스템의 성능을 검증하기 위해서 표 2와 같은 시나리오로 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 시작 후 0.5초에 각 시스템의 제어를 시작하였고 0.5초부터 2.5초까지는 시스템 A에서 B로 전력을 전송하다가 2.5초에 시스템 B에서 A로 전력을 전송하도록 설정하였다. 또한 시스템의 유효전력과 무효전력제어 성능을 분석하기 위해서 표 2에 나타난 바와 같이 각 모드별(M1~M6)로 유효전력과 무효전력의 기준값을 변경하였다.

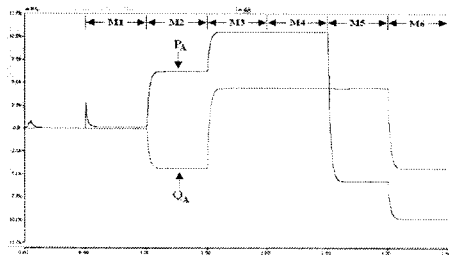
표 2. 시뮬레이션 시나리오
Table 2. Simulation scenario

시간(초)	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5
V_{dcA}, V_{dcB}	200V					
i_{dA}^*	직류전압제어					
i_{qA}^*	0A	20A	-20A	-20A	30A	50A
i_{dB}^*	0A	30A	50A	50A	직류전압제어	
i_{qB}^*	0A	20A	20A	-20A	-20A	-20A
제어모드	M1	M2	M3	M4	M5	M6

시뮬레이션 시나리오에 따른 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그림 6(a)와 그림 7(a)는 표 2에 나타난 시나리오에 따라 유효전력기준값을 변경했을 때의 제어기 성능을 보여주고 있다. 컨버터 출력전류의 검출방향을 컨버터에서 교류시스템으로 나가는 방향으로 설정하였기 때문에 M1에서 M4까지는 시스템 A의 유효전류가 음의 값을 가지고 시스템 B는 양의 값을 가지므로 전력이 시스템 A에서 B로 전송되고 있음을 알 수가 있다. 시뮬레이션 결과 실제 유효전력은 제어기의 기준신호를 큰 과도현상이 없이 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 6(b)와 그림 7(b)는 그림 6(a)와 그림 7(a)의 제어에 의해서 교류계통으로 전송되는 유효전력과 무효전력을 나타낸 것이다. 그림 5에 나타난 것처럼 유효전력과 무효전력의 전송방향을 시스템 A에서 B로 기준을 정했으므로 결과 파형에서 보듯이 동일한 크기로 나타나고 있다. 유효전류기준값에 따라 전송되는 유효전력은 0kW, 6kW, 10kW로 증가하고 있고, 또한 무효전력 역시 $\pm 4kVar$ 의 진상 및 지상무효전력을 공급하고 있다. M5에서 전송되는 전력의 흐름을 역방향으로 전환했을 때 역시 제어가 원활히 수행되고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 제안하는 새로운 구조의 전압원 컨버터는 Back-to-Back 컨버터로 잘 동작함을 알 수가 있다.

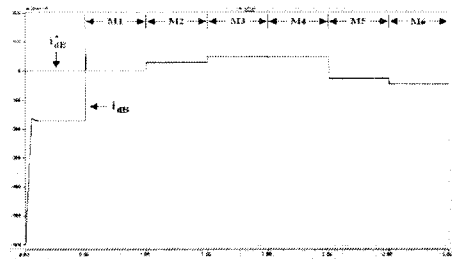


(a) 유효전류기준값(i_{dA}^*)과 실측값(i_{dA})

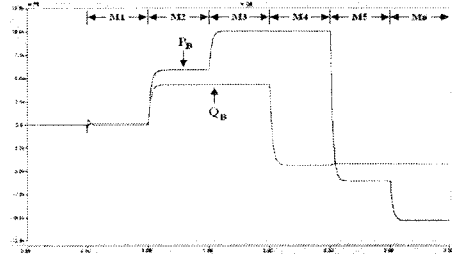


(b) 시스템 A의 전송 유효전력(P_A)과 무효전력(Q_A)

그림 6. 시스템 A의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of system A



(a) 유효전류기준값(i_{dB}^*)과 실측값(i_{dB})



(b) 시스템 B의 전송 유효전력(P_B)과 무효전력(Q_B)

그림 7. 시스템 B의 시뮬레이션 결과

Fig. 7. Simulation results of system B

5. 결론

본 논문에서는 2대의 6-펄스 컨버터브리지와 변압기가 펄스다중화 보조브리지로 구성된 새로운 구조의 36-펄스 전력변환기를 제안하고 이 36-펄스 전력변환기 4대로 구성된 Back-to-Back 컨버터에 대해 기술하고 있다.

제안하는 Back-to-Back 컨버터는 점호각 조절에 의해 연계된 양측 교류계통의 유효전력을 독립적으로 제어 가능하다. 제안하는 Back-to-Back 컨버터의 동작과 성능을 검증할 목적으로 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안하는 Back-to-Back 컨버터는 직류송전이나 주파수가 다른 2개의 교류계통을 연계하는데 적합함을 알 수 있었다.

제안하는 Back-to-Back 컨버터는 기존에 제안된 시스템에 비해 연계용 변압기의 구조가 간단하여 외형이 작고 설치비용이 저렴할 것으로 보인다.

향후 시뮬레이션 결과를 토대로 하드웨어 구현시 타당성을 검증할 목적으로 8KVA 용량의 하드웨어 프로토타입을 제작하여 실험을 실시할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] S. Mori, et al., "Development of large static var generator using self-commutated inverters for improving power system stability", IEEE Trans. on Power System, Vol. 8, No. 1, pp. 371~377, Feb. 1993.
- [2] C. Schauder, et al., "Development of a $\pm 100Mvar$ static condenser for voltage control of transmission systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1486~1493, July, 1995.
- [3] D. Ramey, "Design, Installation, and Operation of American Electric Power (AEP) 320MVA Unified Power Flow Controller (UPFC)", EPRI (Electric Power Research Institute), Palo Alto, CA, Tech. Rep. TR-113839, Nov. 1999.
- [4] S. Masukawa and S. Iida, "A Method for Reducing Harmonics in Output Voltages of a Double-Connected Inverter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9, No. 5, pp. 543~550, September 1994.
- [5] K. Oguchi, et al., "A Novel Six-Phase Inverter System with 60-Step Output Voltage for High-Power Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, No. 5, pp. 1141~1149, July, 1995.
- [6] 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.