

36-펄스 전압원 컨버터로 구성된 Back-to-Back HVDC 시스템의 실험적 분석

박용희, 조운호, 이두영, 이동근, 한병문
 영지대학교 전기공학과

Experimental Analysis of Back-to-Back HVDC System Composed of 36-pulse Voltage Source Converter

Yong-Hee Park, Yun-Ho Cho, Doo-Young Lee, Dong-Geun Lee, Byung-Moon Han
 Myong-ji University

Abstract - 본 논문은 펄스 삼입 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. 하드웨어 구현 타당성을 검증하기 위해 축소모형을 제작하고 실험에 의해 분석하였다. 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. 이 중 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 [1]. 그러나 이 경우 보조변압기의 결선구조가 복잡하여 제작이 어렵고 비용절감수준도 높지 않은 단점을 갖는다. 이러한 단점을 해결하기 위한 방법으로 직류 단에 보조회로를 삼입하여 직류커패시터에 걸리는 일정전압에 보조변압기와 브리지회로를 사용하여 펄스형태의 전압을 중첩하여 출력파형을 형성하는 방법이 제안되었다 [2,3,4]. 하지만 이 방식의 경우 보조회로에서 전압중첩을 위하여 탭-변압기를 사용하는데 탭-변압기는 외형이 크고 제작상 변압비가 정확히 일치하기 어렵다. 따라서 실제 하드웨어 구현 시 출력파형의 대칭성이 결여되어 고조파 발생이 우려되고 외형이 큰 단점을 갖는다.

2. 본 론

2.1 36-펄스 전압원 컨버터

본 논문에서는 그림 1에 보인 것과 같이 직류 단에 보통변압기와 3-레벨 반브리지로 구성된 보조회로를 갖는 새로운 구조의 36-펄스 컨버터를 제안한다. 그림 1의 Y로 연결된 컨버터

와 Δ로 연결된 컨버터의 교류전압은 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 주입전압 v_{aux} 에 의해서 동시에 조절 가능하다.

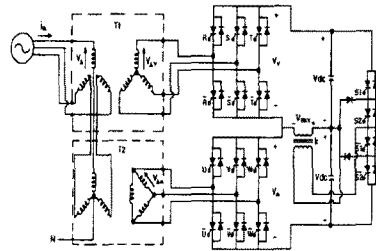


그림 1. 새로운 보조회로를 이용한 36-펄스 컨버터

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

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 그림 2에 보인 것처럼 연계되는 2개 교류계통의 유효·무효전력을 독립적으로 제어가능하고 양방향 전력조류를 제어 가능해야한다.

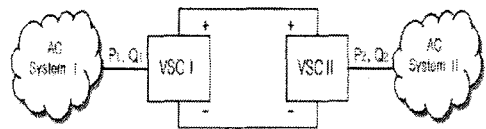


그림 2. Back-to-Back 컨버터의 개념도

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

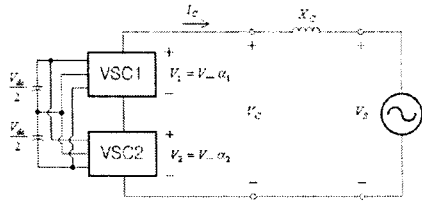


그림 3. 유·무효전력제어 단상동기회로

그림 4는 유·무효전력의 독립제어를 위해 전압원컨버터의 상하단 점호각을 달리 할 때의 전원전압, 컨버터 각각의 전압, 그리고 컨버터 전체의 전압을 벡터도로 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상단점호각 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.

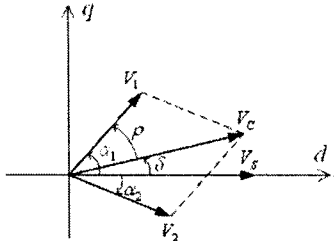


그림 4. 동작원리의 벡터도

2.3 성능평가 시뮬레이션

새로운 구조의 Back-to-Back 컨버터를 전압형 HVDC 시스템에 적용하기 위해 EMTDC/PSCAD를 이용하여 시스템 동작특성 및 제어기의 성능해석을 실시하였다.

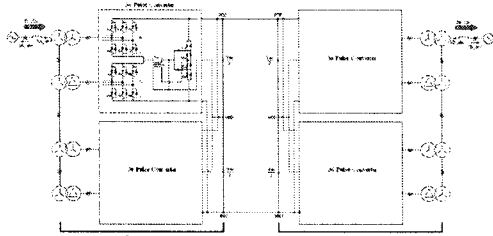


그림 5. 36-펄스 HVDC 시스템 구성도

표 1. 시뮬레이션 회로정수

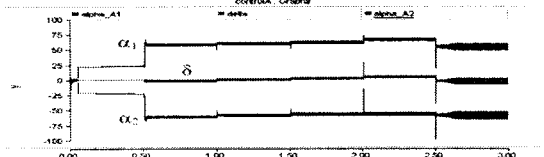
모선 전압	3 Φ 220[V]
모선 주파수	60[Hz]
전원인덕턴스	2[mH]
직류 커패시터	3000[μ F]
위상변압기용량	10[KVA]
보조변압기용량	10[KVA]

전압원 HVDC 시스템은 점호각을 제어하여 컨버터 양단에 걸리는 전압의 크기를 조절하여 전류의 방향을 바꾸어 동작한다. 그림 5에 나타난 새로운 구조의 36-펄스 전압원 HVDC 시스템의 성능을 검증하기 위해서 표 2와 같은 시나리오로 시뮬레이션을 실시하였다.

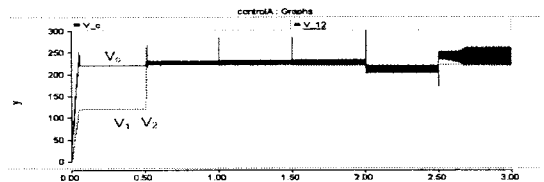
표 2. 시뮬레이션 시나리오

시간(초)	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
V_{dB}^*	200V				
i_{dA}^*	0A	10A	20A	30A	0A
i_{dA}^*	0A	0A	0A	-20A	20A
i_{dB}^*	V _{dc} Control				
i_{qB}^*	0A	-20A	20A	0A	0A
제어모드	M1	M2	M3	M4	M5

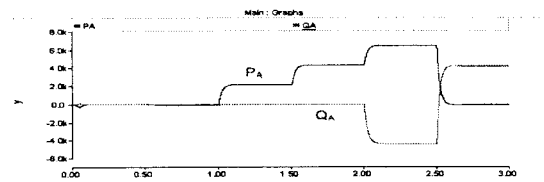
그림 6(a)와 7(a)는 표 2에 나타난 시나리오에 따라 유효전력기준값을 변경했을 때의 제어기 성능을 보여주고 있다. 그림 6(b)와 7(b)는 시스템의 유효전력제어와는 독립적으로 각 시스템이 교류계통의 무효전력을 제어하고 있음을 보여주고 있다. 그림 6(c)와 7(c)는 각 시스템이 직류전압기준값에 따라 실제 직류링크전압이 200V_{dc} 큰 과도현상없이 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 6(d)와 7(d)는 교류계통으로 전송되는 유효전력과 무효전력을 나타낸 것이다. 결과적으로 제안하는 새로운 구조의 전압원 컨버터는 Back-to-Back 컨버터로 잘 동작함을 알 수 있다.



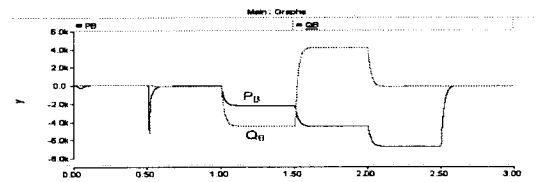
(a) 컨버터 전력각 δ , 상단점호각 α_1 과 하단점호각 α_2



(b) 출력전압 V_1 과 V_2 가 컨버터의 전체출력전압 V_c



(c) A_side 유·무효전력



(d) B_side 유·무효전력

그림 6. 시뮬레이션 파형

2.4 축소모형 제작 및 실험 결과

제안하는 HVDC 시스템에 대하여 향후 실 시스템 적용가능성을 확인하기 위하여 축소모형을 제작하고 실험을 실시하였다. 축소모형 실험세트는 그림 8과 같이 구성하였다.

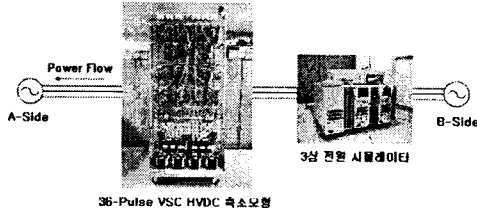


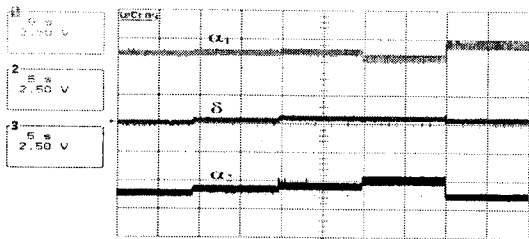
그림 8. 36-펄스 HVDC 시스템의 축소모형

시스템의 유효전력과 무효전력 제어 성능을 분석하기 위해서 표 3에 나타난 바와 같이 각 모드별(M1~M5)로 유효전력과 무효전력의 기준값을 변경하였다.

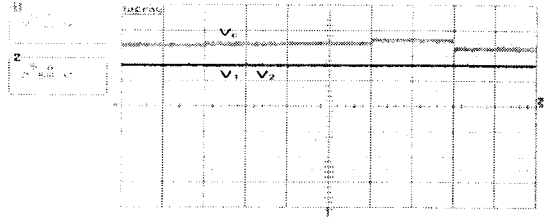
표 3. 실험 시나리오

시간(초)	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25
V_{dc}^*	200V				
i_{dA}^*	0A	2.273A	4.545A	6.818A	0A
i_{qA}^*	0A	0A	0A	-4.545	4.545A
i_{dB}^*	V_{dc} Control				
i_{qB}^*	0A	-4.545A	4.545A	0A	0A
제어모드	M1	M2	M3	M4	M5

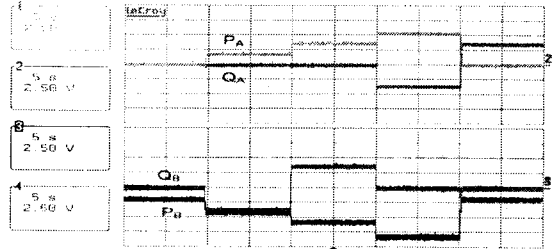
그림 9는 표 3에 나타난 시나리오에 따라 유무효전력 기준값을 변경했을 때의 결과 파형이다. 컨버터 출력전류의 검출방향을 컨버터에서 교류시스템으로 나가는 방향으로 설정하였기 때문에 시스템 A의 유효전력이 양의 값을 가지고 시스템 B는 음의 값을 가지므로 전력이 시스템 B에서 A로 전송되고 있음을 알 수가 있다. 실험 결과 실제 유효전력은 제어기의 기준신호를 큰 과도현상이 없이 잘 추종함을 알 수가 있다.



(a) 컨버터 전력각 δ , 상단점호각 α_1 과 하단점호각 α_2



(b) 출력전압 V_1 과 V_2 가 컨버터의 전체출력전압 V_C



(c) 시스템 A와 B의 전송 유효전력과 무효전력

이상의 실험으로 제안하는 시스템이 HVDC의 기능을 충실히 수행함을 확인할 수 있다.

3. 결 론

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 컨버터의 동작과 성능을 검증할 목적으로 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하고 축소모형을 제작하여 실험하였다. 실험 결과를 통하여 제안하는 Back-to-Back 컨버터는 직류송전이나 주파수가 다른 2개의 교류계통을 연계하는데 적합함을 알 수가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.