

교류계통 비동기 연계를 위한 Back-to-Back 컨버터의 시뮬레이션 분석



한병문
명지대학교 전기공학과 교수

1. 서론

최근 국내외적으로 화석연료의 고갈과 탄산가스 배출이 크게 문제되면서 친환경적인 전력생산 및 공급에 대해 많은 관심과 연구가 집중되고 있다. 친

환경적인 전력생산을 위해 신재생에너지원의 보급이 증가하고 최근에는 발전용량 또한 급증하여 기존의 전력망과 효율적인 연계에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 한편 과학기술의 발달과 산업화로 인해 대도시로 인구의 집중이 가속화되고 이에 따

라 전력의 수요도 대도시에 집중되면서 전력수요의 집중에 따른 단락용량의 증대가 전력회사에 큰 문제로 대두되어 있다. 이러한 2가지 문제를 해결하는 방안으로 BTB(Back-To-Back) 컨버터를 이용하여 대규모 신재생 발전단지에서 생산하는 전력을 전력망에 연계하고, 또한 대규모 전력계통을 몇 개의 소규모 계통으로 분할하고 이 사이를 BTB 컨버터로 연계하는 연구가 선진국을 중심으로 다양하게 수행되고 있다.

BTB 컨버터로는 직류송전에 많이 사용되고 있는 Thyristor를 스위칭소자로 하는 전류원 컨버터(LCC: Line-Commutated Converter)와 GTO(Gate Turn-Off Thyristor) 또는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 스위칭소자로 하는 전압원 컨버터(VSC: Voltage Source Converter)를 기반으로 하는 2 종류가 가능하다. LCC를 구성하는 Thyristor의 경우 Gate에서 Turn-On 만 가능하고 Turn-Off는 흐르는 교류전류가 영점을 지날 때 자동적으로 이루어진다. 따라서 LCC의 동작은 연계된 교류전압의 강인도가 어느 정도 필요하고 항상 지상영역에서만 동작한다. 반면에 VSC를 구성하고 있는 스위칭소자는 Gate에서 항시 On 과 Off 조작이 가능하여 진상과 지상 모든 영역에서 동작한다. 따라서 VSC의 동작은 연계된 교류전압의 강인도와 무관하고 교류전원이 없어도 동작이 가능하여 소위 말하는 Black Start 기능을 갖는다. 또한 스위칭소자가 고속으로 동작하여 교류 한주기 동안 여러번 스위칭 하는 PWM(Pulse Width Modulation) 기법을 이용하여 저차 고조파를 감소시켜 출력파형을 개선할 수 있다. 따라서 무효전력을 보상하는 장치가 필요 없고 필터의 용량을 감소시켜 VSC는 LCC에 비해 공간점유율이 대단히 적은 장점을 갖는다.

하지만 VSC에 사용되는 스위칭소자는 Thyristor에 비해 내압과 전류용량이 작고, 컨버터를 고압으로 동작하는데 필요한 소자의 직결운용에 제약이 따른다. 또한 스위칭소자에서 발생하는 손실이 LCC에 비해 3배 이상이어서 대용량화에 제약이 따른다. 따라서 현재 사용 중인 VSC의 용량은 수백 MW 정도이나 LCC의 용량은 수 GW 정도로 직류송전에 많이 이용되고 있다. 그러나 최근 실리콘-카바이드 계열의 전력용 반도체가 개발되면서 이를 이용한 대용량 VSC의 개발이 머지않아 획기적으로 가능할 것으로 보인다. 또한 현재 대규모 풍력단지를 전력망에 연계할 경우 수백 MW 규모의 직류송전이나 BTB 컨버터가 많이 활용될 것으로 보여 이에 대한 관심은 더욱 커질 것으로 기대된다.

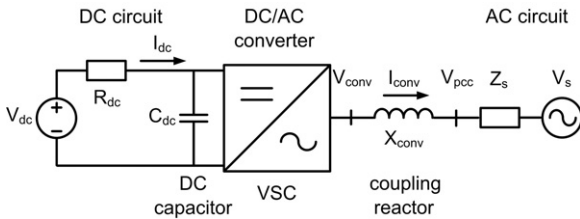
본 글에서는 두 교류계통을 연계하는데 필수적인 VSC를 이용한 BTB 컨버터의 동작원리와 교류계통의 유·무효전력을 제어하는 원리를 살펴본다. 이를 위해 먼저 전압원 컨버터의 동작원리를 설명하고 이를 바탕으로 BTB 컨버터로 구성된 경우 동작과 기능을 설명한다. 또한 설명한 BTB 컨버터의 동작과 성능을 구체적으로 분석할 수 있는 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 모델을 소개하고 이를 통한 분석결과를 소개한다.

2. 전압원 컨버터 동작원리

가. 전압원 컨버터 구성

그림 1은 전압원 컨버터가 한 쪽은 직류회로에, 다른 한 쪽은 교류회로에 연결되어 있는 일반적인 회로도들을 나타낸 것이다. 이 그림에서 직류 단에는 직류전압원 V_{dc} , 직류저항 R_{dc} , 컨버터의 직류전압을 안정화하는 직류캐패시터 C_{dc} 로 구성되어 있

다. 컨버터의 교류 단에는 연계용 리액터(coupling reactor)를 두어 연결점(PCC: point of common connection)의 교류전압 V_{pcc} 이 결합되어 있다. 이 리액터는 컨버터가 공급하는 출력전류의 고조파를 저감하고 컨버터가 전력계통의 유효전력과 무효전력을 제어하는데 필요하다. 이 연계용 리액터는 각 상에 리액터를 직접 삽입하는 경우도 있으나 통상은 연계용 변압기의 누설인덕턴스를 사용한다. 직류 단에 병렬로 결합된 커패시터와 교류단에 직렬로 결합된 리액터는 전압원 컨버터가 적절히 동작하는데 필수적인 요소이다.



[그림 1] 전압원 컨버터의 회로도

전압원 컨버터에서는 컨버터의 변조지수(modulation index)와 점호각을 조절하여 출력전압의 크기와 위상을 동시에 독립적으로 제어가 가능하다. 따라서 전압원 컨버터는 여자전압과 공급토크를 조절하여 출력전압의 크기와 위상을 동시에 독립적으로 제어하는 발전기와 동일하게 취급할 수 있다. 다만 전압원 컨버터는 전력용 반도체스위치를 사용하여 정지형이고 고속으로 출력전압의 조절이 가능하다. 반면에 발전기처럼 관성에 의한 에너지저장 효과는 없어 계통고장에 따른 파급효과가 직접적이다.

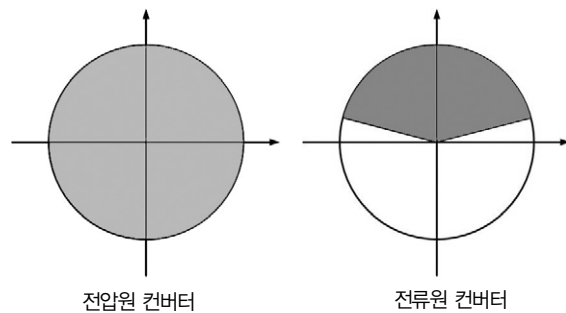
나. 유·무효전력제어

회로적으로 계통에 연계된 전압원 컨버터는 계통에 연계된 발전기와 등가로 취급할 수 있어 전달하

는 유·무효전력의 관계식은 다음과 같다.

$$(1) P = \frac{V_{pcc} V_{conv}}{X_{conv}} \sin \alpha \quad (2) Q = \frac{V_{pcc}^2 - V_{pcc} V_{conv} \cos \alpha}{X_{conv}}$$

전압원 컨버터는 출력전압 V_{conv} 의 크기와 점호각 α 의 크기를 제어하여 유·무효전력의 제어가 가능하다. 위의 식(1)에서 만일 α 가 양이면 유효전력은 교류계통으로 주입되고 이때 직류전류는 나가는 방향으로 $P_{dc} > 0$ 으로 되어 인버터로 동작되고 만일 α 가 음이면 교류계통으로부터 유효전력을 흡수하여 이때 직류전류는 들어오는 방향으로 $P_{dc} < 0$ 으로 되어 정류기로 동작한다. 또한 전압원 컨버터는 출력전압이 연결점의 전압과 동상인 점에서 그 크기를 제어하면 위의 식(2)에서 무효전력의 제어가 가능하다. 따라서 교류계통으로 무효전력을 공급하여 용량성으로 동작하고, 교류계통에서 무효전력을 소모하여 유도성으로 동작한다. 이러한 원리로 전압원 컨버터는 그림 2에 보인 4상한 동작이 가능하다. 반면에 전류원 컨버터는 Thyristor의 특성상 항상 전류가 전압보다 뒤진 지상으로 운전되므로 계통으로부터 무효전력을 소모한다.

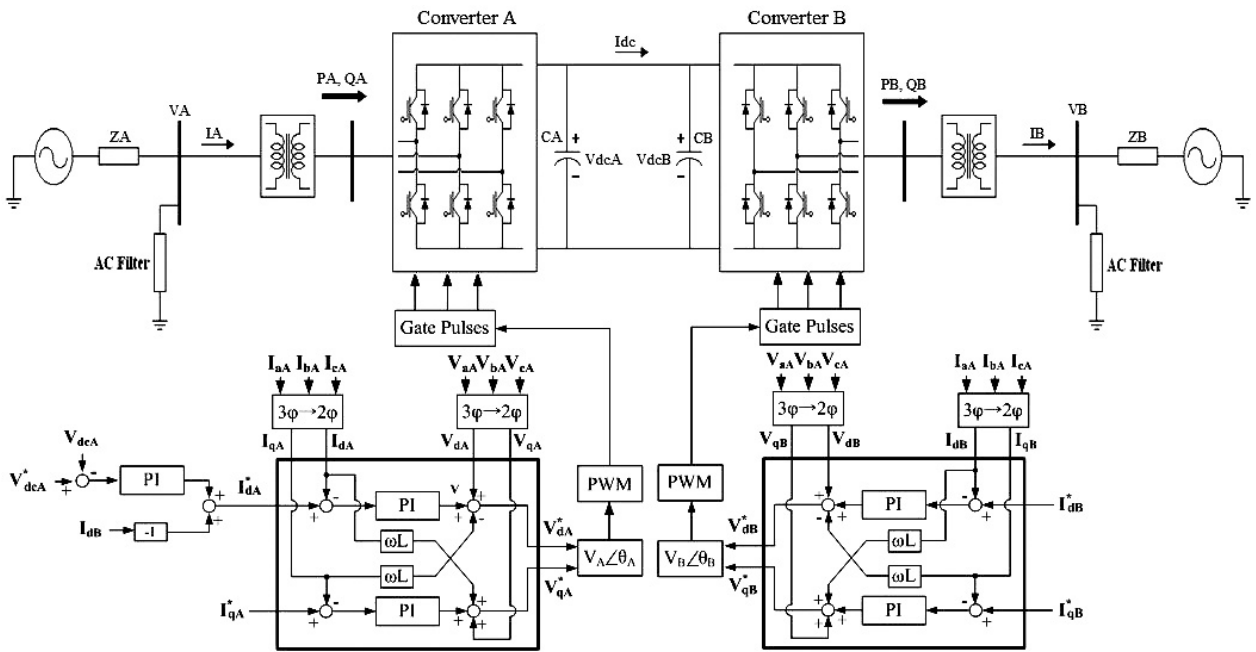


[그림 2] 전압원과 전류원 컨버터의 유·무효전력 제어 범위

3. BTB 컨버터의 유·무효전력제어

가. BTB 컨버터의 구조

그림 3은 전압원 컨버터를 이용한 BTB 컨버터의



[그림 3] BTB 컨버터의 구조와 유·무효전력제어

구조를 제어기를 포함하여 나타낸 것이다. BTB 컨버터는 두 대의 전압원 컨버터가 직류단을 공유하고 각각의 교류단은 두 개의 각기 다른 교류 전력계통과 결합된 구조를 갖는다. 전력전자공학에서 통상 컨버터의 교류단을 전방으로 직류단을 후방으로 명명하였기 때문에 BTB 컨버터란 두 대의 컨버터가 후방 즉 직류단을 공통으로 결합한 컨버터를 의미한다.

BTB 컨버터는 주파수가 다른 두 개의 전력계통을 결합하여 양방향으로 유효전력의 흐름을 제어하고 결합된 교류계통의 무효전력을 독립적으로 제어한다. BTB 컨버터는 선로의 길이가 영인 즉 송전단과 수전단의 컨버터가 한 곳에 설치되어 운전되는 직류송전시스템으로 간주할 수 있다. BTB 컨버터에서는 일반적으로 송전단의 교류전압을 변압기를 통해 낮추고 이 강하된 전압을 전력변환기에 가하

여 직류전력을 얻는다. 이렇게 얻어진 직류전력은 반대편 전력변환기에 의해 교류전력으로 바뀌고 다시 변압기를 통해 승압한 후 수전단으로 보내진다.

BTB 컨버터의 유·무효전력의 제어는 앞절에서 설명한 전압원 컨버터의 제어와 유사성을 갖으나 약간의 차이점을 갖는다. 송전단의 유·무효전력을 각각 PA, QA 라 하고 수전단의 유·무효전력을 각각 PB, QB 라고 하면 이 네 개의 제어출력을 각 컨버터의 출력전압의 크기와 위상으로 제어해야 한다. 그런데 컨버터의 손실을 무시하면 PA와 PB는 동일하다. 따라서 BTB 컨버터에서는 송전단에서 유·무효전력을 제어하고 수전단에서는 직류전압과 무효전력을 제어하거나, 또는 송전단에서 무효전력과 직류전압을 제어하고 수전단에서 유·무효전력을 제어하는 방식을 채택한다. 본 글에서는 후자의 방식을 택한 것으로 가정한다.

나. BTB 컨버터의 제어

그림 3에서와 같이 BTB 컨버터에서 유·무효전력의 제어는 전류제어기에 의해 구현되고 3상전원에서의 제어이므로 d-q변환과 역변환을 사용한다. 또한 송전단과 수전단이 비동기상태이고 주파수가 다를 수가 있으므로 각각 송전단과 수전단의 전압에 동기화되어 제어가 이루어져야 하므로 별도의 PLL(phase locked loop)을 필요로 한다.

그림 3에서 송전단 컨버터는 직류전압제어기가 있어 실측한 직류링크전압을 기준값과 비교하여 PI 제어기를 통하여 유효전류의 기준값 I_d^* 를 생성한다. 그런데 송전단의 유효전력과 수전단의 유효전력은 유사한 크기로 직접관계 되어있어 수전단의 유효전류를 Feed-Forward 하여 기준값을 보정한다. 이렇게 보정된 유효전류의 기준값은 실측유효전류와 비교하여 PI제어기를 거쳐 컨버터의 유효전압성분을 생성한다. 이 유효전압성분은 실측유효전압성분과 합쳐지고 다시 무효전류성분에서 공급되는 교차성분만큼 보정된 후 컨버터가 출력해야 할 기준유효전압 V_d^* 를 생성한다. 한편 기준무효전류는 기준무효전력을 정격단자전압으로 나누어 기준무효전류 I_q^* 를 생성한다. 이렇게 생성된 무효전류의 기준값은 실측무효전류와 비교하여 PI 제어기를 거쳐 컨버터의 무효전압성분을 생성한다. 이 무효전압성분은 실측무효전압성분과 합쳐지고 다시 유효전류성분에서 공급되는 교차성분만큼 보정된 후 컨버터가 출력해야 할 기준무효전압을 생성한다. 이렇게 형성된 기준 유·무효전압 V_d^* 와 V_q^* 를 역변환하면 컨버터가 출력해야 하는 기준상전압 V_a^* , V_b^* , V_c^* 가 생성된다. PWM 컨버터의 경우, 이 기준 상전압을 삼각파 반송파와 비교하여 컨버터스위칭소자의 게이트에 공급할 펄스를 생성한다. 수전단에서 사용하는 제어기에서는 유효전류의 기준값 I_d^* 를 유효

전력의 기준값 P^* 를 정격단자전압으로 나누어 생성하는 점을 제외하고는 나머지 모든 제어과정은 동일하다.

4. BTB 컨버터의 시뮬레이션 분석

본 절에서는 BTB 컨버터의 동작을 분석하기 위해 범용 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 사용하였다. BTB 컨버터를 포함한 전력회로는 PSCAD/EMTDC 제작사에서 제공하는 기본모듈을 사용하였고, 제어기는 C 코드로 된 사용자정의 모델을 사용하여 구성하였다. 시뮬레이션에 사용된 전력회로와 컨버터에 관한 회로정수는 표 1과 같다.

교류계통전압(V_A, V_B)	400kV
직류전송전력(P_{dc})	200MW
직류전압(V_{dc})	280kV
직류전류(I_{dc})	714A
전압원 컨버터 용량	110MVA × 2
스위칭 주파수	3kHz

[표 1] 시뮬레이션 회로정수

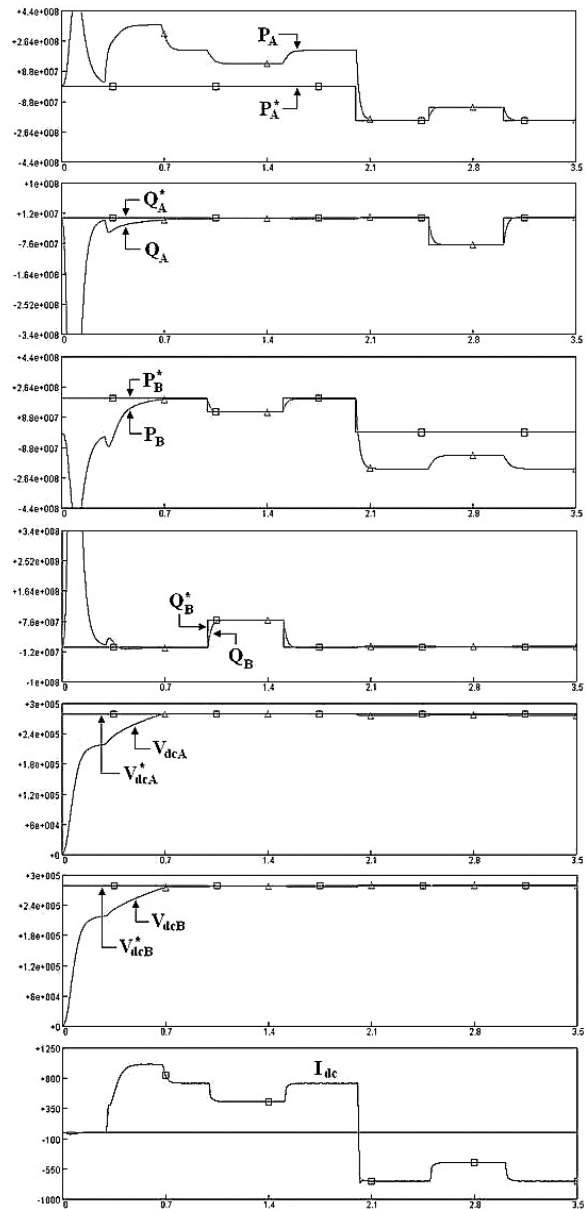
시뮬레이션에 의한 분석이 현실성이 있도록 하기 위해 표 2에 나타낸 시나리오에 따라 BTB 컨버터의 동작을 시뮬레이션을 실시하였다. 이 시나리오에 의하면 0초에서 2초까지는 시스템 A에서 B로 전력을 전송하는 경우로 정류기로 동작하는 컨버터-A에서 일정직류전압제어와 무효전력제어를 수행하고, 인버터로 동작하는 컨버터-B에서는 유·무효전력 제어를 수행하는 것으로 하였다. 한편 2초에서 3.5초까지는 시스템 B에서 A로 전력을 전송하는 경우로 정류기로 동작하는 컨버터-B에서

시간[sec]	0-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5
P_A^* [MW]	일정 직류전압 제어			200	120	200
Q_A^* [MVar]	0	0	0	0	80	0
P_B^* [MW]	200	120	200	일정 직류전압 제어		
Q_B^* [MVar]	0	80	0	0	0	0
V_{oc} [kV]	280	280	280	280	280	280

[표 2] 시뮬레이션 시나리오

일정직류전압제어와 무효전력제어를 수행하고, 인버터로 동작하는 컨버터-A에서는 유·무효전력 제어를 수행하는 것으로 하였다. 0초에서 2초까지는 컨버터-A는 직류 280kV를 유지하고 무효전력은 0으로 제어하며, 컨버터-B는 유효전력을 200MW, 120MW, 200MW로 그리고 무효전력을 0Mvar, 80Mvar, 0Mvar로 계단식으로 제어한다. 2초에서 3.5초까지는 컨버터-B는 직류 280kV를 유지하고 무효전력은 0으로 제어하며, 컨버터-A는 유효전력을 200MW, 120MW, 200MW로 그리고 무효전력을 0Mvar, 80Mvar, 0Mvar로 계단식으로 제어한다.

그림 4는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 시스템 A에서 B로 전력을 전송할 경우 BTB 컨버터를 통해서 전송되는 직류전력은 시스템 A가 일정 직류전압 제어를 수행하므로 시스템 B로 흐르는 직류전류 I_{dc} 에 비례한다는 것을 알 수가 있다. 2초에서 전력의 흐름을 시스템 B에서 A로 변경하면 그림에서 볼 수 있듯이 시스템의 제어가 서로 바뀌게 되므로 직류전류가 반대방향으로 흐르게 된다. 1초에 시스템 B의 유효전력 기준값을 120MW로 낮추게 되면 시스템 A에서 일정 직류전압제어를 수행하고 있으므로 직류전압은 변동이 없고 직류전류가 변해서 전송 직류전력이 낮아진다. BTB 컨버터로 연결되어 있는 교류계통은 전압안정도의 향상을 위



[그림 4] 시뮬레이션 결과

해 유효전력제어와는 독립적으로 무효전력제어를 실시한다. 따라서 이러한 성능을 검증하기 위해서 스텝으로 무효전력 기준값을 변경해서 시스템에서 교류계통으로 전송되는 무효전력을 제어할 수 있는지 확인할 필요가 있다.

5. 결론

본 글에서는 전압형 컨버터에 의한 BTB 컨버터의 특성과 동작원리를 소개하고 유·무효전력을 제어하는 제어기의 원리를 설명하였다. 또한 BTB 컨버터의 동작을 모의하는 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 모델을 소개하고 이를 이용한 BTB 컨버터의 동 특성을 분석한 내용에 대해 기술하였다.

본 글에서 소개한 시뮬레이션 모델은 400kV 교류계통에 연결되어 있는 것으로 가정하였고, 최대 200MW의 전력을 전송하고 연계된 교류계통에 무효전력을 독립적으로 제어하는 것을 분석하여 소개하였다. 전압원 BTB 컨버터는 Thyristor를 스위칭 소자로 사용하는 전류원 BTB 컨버터와 비교하면 교류 한주기당 여러 번 스위칭을 하는 PWM 방식으로 동작하여 출력전압의 파형에 저차고조파가 낮아 수동필터 규모가 작아 시스템의 설치면적이 감소하는 장점이 있다. 또한 필요시 계통이 분리되었을 경우 각 컨버터는 독립적으로 연계계통에 대해 무효전력보상기로 동작할 수 있다.

본 글에서 소개한 시뮬레이션 모델은 향후 BTB 컨버터나 직류송전시스템을 설계할 때 동작과 성능을 분석하는데 유용하게 사용될 것으로 보인다.

KEA

참고문헌

- [1] Hingorani, N.G., "High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse", Spectrum, IEEE, Vol. 33, No. 4, pp. 63-72, April 1996.
- [2] SCHETTLER E, HUANG, H., CHRISTL N., "HVDC transmission system using voltage source converters—design and applications", IEEE PES Summer Meeting, July 2000.
- [3] LARSSON, T., et al, "Eagle pass back-to-back tie: a dual purpose application of voltage source converter technology", IEEE PES Summer Meeting, 2001.
- [4] Andersen, B.R. Xu, L. Horton, P.J. Cartwright, P., "Topologies for VSC transmission", Power Engineering Journal, Vol. 16, No. 3, pp. 142-150, June 2002.
- [5] Bueno, E. J., Cóbreces, S., Rodríguez, F. J., Hernández, A., Espinosa, F., "Design of a Back-to-Back NPC Converter Interface for Wind Turbines With Squirrel-Cage Induction Generator", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 23, Issue 3, pp. 932-945, Sept. 2008.
- [6] Yazdani, A., Iravani, R., "Dynamic model and control of the NPC-based back-to-back HVDC system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, Issue 1, pp. 414-424, Jan. 2006.
- [7] Han, B.-M., Baek, S.-T., Bae, B.-Y., Choi, J.-Y., "Back-to-back HVDC system using a 36-step voltage source converter", Generation, IEE Proceedings on Transmission and Distribution, Vol. 153, Issue 6, pp. 677-683, November 2006.