

특집

전력계통용 대용량 전압원인버터의 TOPOLOGY 연구동향

한 병 문

(명지대학교 전기공학과)

1. 서론

최근 대전력 스위칭소자의 전류와 전압 용량이 급속히 발달하면서 이를 이용하여 교류전력계통의 성능과 효율을 향상하는 연구가 선진국인 미국과 일본 그리고 유럽에서 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 전력전자기술을 교류전력계통에 적용하는 연구는 1987년경 미전력연구원을 중심으로 두가지 프로젝트에 의해 착수되었는데, 송전계통을 위한 FACTS (flexible ac transmission systems)와 배전계통을 위한 Custom Power가 그것이다.

FACTS는 송전계통의 전송용량증대, 저주파공진 감쇄, 과도안정도개선 등을 목표로 착수되어 현재 다이리스터 스위치와 GTO 전압원인버터를 기본으로 하는 시스템이 이미 개발되어 상용화 단계에 있다. 그러나 현재의 연구방향은 다이리스터 스위치 방식 보다는 GTO 전압원인버터 방식에 치중하고 있다. 송전용 FACTS 기기에 사용되는 GTO 전압원인버터는 기본용량이 100MW 정도로 현재 미국과 일본이 이를 이용한 무효전력보상기 (STATCON: static condenser)의 개발을 완료하고 상용화를 서두르고 있다.

Custom Power는 배전계통에서 발생하는 무효전력과 고조파를 보상하고 사고에 의한 급작스런 정전이나 전압강하를 보상하여 부하에 공급되는 전력의 질을 향상하는 것을 목표로 한다. 현재 이러한 목적으로 개발된 시스템에는 배전용 무효전력보상기, 전력용능동필터, 배터리에너지저장장치, 동적전압보상기등이 있다. 이들 기기는 모두 기본 용량이 1MW인 전압원인버터로 구성되어 있으며 스위칭소자로는 초기에는 GTO를 최근에는 IGBT를 사용하여 제작되고 있다.

송전용 GTO 인버터나 배전용 IGBT 인버터의 경우 정격 전류나 전압은 각각 단일 스위칭소자가 갖는 정격에 비해 상당히 커 스위칭소자의 직렬운용이나 다수 인버터모듈의 직렬운용이 불가피하다. 따라서 본 해설에서는 대용량 전압원인버터의 Topology를 구성하는 몇가지 방법에 대해 언급하고 각각의 특성을 기술 할 예정이다.

2. 다중화의 유래

전력전자의 효시는 1903년에 이루어진 수은아크 정류기의 발명을 들수 있다. 이 수은아크정류기에 사용되던 2극관은 그후 1920년대에 와서 제어전극이 추가된 다이랏론 (thyatron)으로 발전되었고 이를 이용한 제어정류기가 개발되어 1954년에는 100kV, 20MW 직류고압송전이 스웨덴에서 가능하게 되었다. 그러나 이 당시 사용하던 다이랏론은 단일소자의 전압용량이 100kV 이상으로 제작되어 하나의 6-pulse 브리지회로에는 6개의 스위칭소자만을 필요로 하였다.

그후 반도체 기술의 발달로 1950년말 제너럴일렉트릭사 연구소에서 다이리스터가 발명되면서 이를 이용한 직류고압송전이 활발히 추진되어 1972년 처음으로 캐나다의 Eel강 유역에 다이리스터를 스위칭밸브로 사용한 직류고압송전이 설치 운용되었다. 그런데 하나의 다이리스터가 갖는 최대 허용전압이 최대 5-6kV 정도 이어서 직류고압송전에 사용되는 다이리스터 브리지의 각 밸브는 내압상승을 위해 여러개의 다이리스터를 직렬로 연결하였다. 이를 위해 각 밸브내의 직렬연결 다이리스터에는 저항과

캐패시터를 병렬로 연결하고 턴온이 동시에 이루어 지도록 게이트 신호를 공급하였다. 이때 저항과 캐패시터는 다이리스터 누설전류를 제거하고 각 다이리스터에 걸리는 정적 및 동적 전압의 균등하게 분배하는 역할을 한다.

3. 다중화 방식

선전류형 전류원인버터로 동작하는 다이리스터의 경우 소자의 직렬운용은 위에 설명한 방법으로 비교적 용이하게 해결된다. 그러나 전압원인버터로 동작하는 GTO 다이리스터의 경우 소자의 직렬운용은 각소자에 걸리는 전압을 일정하게 유지하기 위한 능동형 clamp 회로를 필요로 하며, 게이트에 공급되는 신호의 턴온과 턴오프를 동시에 이루어지도록 시지연을 조절하여야한다. 특히 GTO의 경우 턴오프시 차단전류와 손실이 커 각각의 특성이 불균일할 때 clamp 회로의 설계는 용이하지 않다. 또한 직렬운용의 경우 밸브전체의 스위칭 성능이 각소자의 최저성능으로 설정된다.

그런데 대용량 전압원인버터는 고전압저전류로 동작하는것이 성능과 효율면에서 바람직하다. 따라서 동작전류의 레벨을 낮추고 효율을 향상하기 위해서는 컨버터의 브리지를 직렬로 연결하는 것이 보통이다. 또한 병렬연결도 용량 증대에 있어 필수적이므로 동시에 고려할 필요가 있다.

대용량 전압원인버터에서 다중화 파형을 생성하는 방식에는 크게 두가지가 있다. 하나는 여러개의 컨버터 브리지를 직렬로 연결하는 방식으로 다중브리지를 컨버터로 칭하는 것이고, 다른 하나는 브리지내에 있는 각 밸브나 풀을 여러개의 스위칭소자로 구성하는 방식으로 전자는 다중스위칭컨버터 그리고 후자는 다중레벨컨버터로 칭한다.

3.1 변압기결합 다중브리지를

먼저 다중브리지를 의한 대용량 전압인버터의 파형구성을 살펴본다. 그림 1은 4개의 전압원인버터 브리지를 변압기를 통해 직류측은 병렬로 그리고 교류측은 직렬로 연결한 구조를 나타낸 것이다. 여기서 각각의 컨버터는 스위칭방식에 의하지 않고 변압기를 Y 또는 Δ로 결선하여 위상변이에 의해 저차 고조파를 소거한다. 이 방식의 중요한 예는 10MW 배터리에너지저장장치에 사용된 GTO 컨버터로 각각의 컨버터는 사각파로 동작하고 고조파 소거는 변압기에 의한 위상결합으로 해결한다

[1,2]. GTO에 의한 강제전류방식을 사용할 경우 컨버터 출력전압의 크기와 위상은 단일펄스폭변조방식을 사용해 동시에 분리제어가 가능한데 이러한 예는 8개의 브리지를 직렬로 연결하여 48펄스로 동작하는 컨버터로 대용량 무효전력보상기에 사용되고 있다 [3].

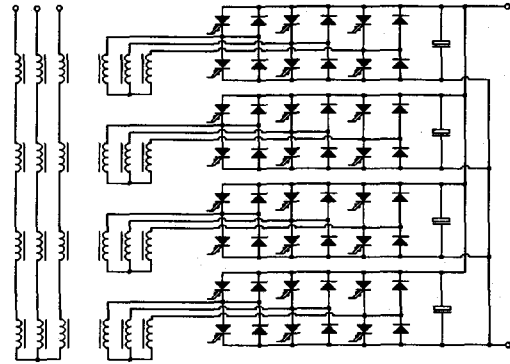


그림 1. 변압기에 의한 다중브리지를

고조파 소거는 변압기에 의한 위상변이 외에도 스위칭방식에 의해 가능하다. 두 개 PWM 브리지를 직렬로 동작하는 방법은 여러 연구자에 의해 제안되었다. 각브리지를 적절한 PWM 모듈레이션을 가해 PWM 반송파의 기수차 고조파와 사이드밴드는 완전히 제거가 가능하다. 이와같이 위상변이에 의한 PWM은 스위칭주파수를 2배로 증가한 경우보다 레벨이 더욱 낮은 고조파를 발생한다. 이때 브리지를 교류측 연결은 별도의 변압기 2차권선이나 전류등분 리액터에 의한다.

이 방식의 장점은 다음과 같다.

- 파형의 구성이 용이하고 교류측 동작전압을 쉽게 상승시킬 수 있다.

- 각 브리지를 모듈화가 가능하여 제작이나 운용 및 정비측면에서 저비용과 고신뢰도를 얻을 수 있다

반면에 단점으로는 다음을 들 수 있다.

- 파형구성을 위한 변압기나 리액터를 많이 필요로 하여 제작비용이 높고 설비 규모가 크다.

- 직렬로 동작하는 스위칭소자의 신뢰도가 문

제이며 고장시 신속한 제거가 어렵다.

3.2 중성점크래프 컨버터

중성점크래프 컨버터는 흔히 멀티레벨 컨버터로 불리우며 레벨의 수에 따라 3-level, 5-level 등이 있는데, 3-level의 경우 독립적으로 제어되는 스위치는 2개이고, 5-level의 경우는 4개의 스위치로 구성된다 [4]. 도전이 되지 않는 스위치의 전압은 다이오드와 캐패시터에 의해 고정된다. 이 방식의 가장 큰 단점은 각 스위치에 불균등한 부하외란이 작용하는 것이다. 특히 5-level 이상에서는 이러한 현상이 더욱크다. 또 다른 문제점은 어떤 한 스위치에 걸리는 전압은 2-level 컨버터의 스위치 전압보다 낮지 않다는 것이다.

이 중성점크래프 컨버터에서 모든 스위치가 동일하게 전압을 분담하는 것은 아니다. 각기 다른 스위치가 각각의 방향으로 캐패시터에 전압을 인가한다. 따라서 캐패시터의 전압을 제어하는 기능이 요구된다.

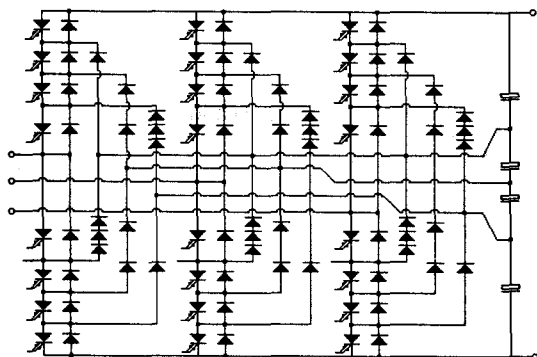


그림 2. 중성점크래프 컨버터

이 방식의 장점은 다음과 같다.

- 파형의 구성이 용이하고 교류측 동작전압을 쉽게 상승시킬 수 있다.
- 파형구성을 위한 변압기나 리액터가 적어 제작비용이 낮고 설비규모가 적다.

반면에 단점으로는 다음을 들 수 있다.

- 고레벨의 경우 역방향 다이오드의 직렬수가

증가하고 각 직류캐패시터의 전압을 균일하게 유지하는데 어려움이 있다.

- 각 브리지를 모듈화가 어려워 제작이나 운용 및 정비의 용이성이 적다

3.3 플라잉캐패시터 컨버터

다중레벨 컨버터로 최근에 제안된 것이 플라잉캐패시터 컨버터이다. 그림 3은 이 컨버터의 회로구성을 나타낸 것인데, 플라잉캐패시터의 기술을 사용하므로 그 이름을 붙인 것이다.

멀티레벨 컨버터의 경우 각 상의 leg은 상보적 스위치쌍으로 직렬 연결되어 있다. 각 쌍의 스위치는 캐패시터와 병렬로 연결되어 소자의 내압이 허용하는 안전한 범위내의 소자에 걸리는 전압을 일정하게 유지하는 기능을 한다.

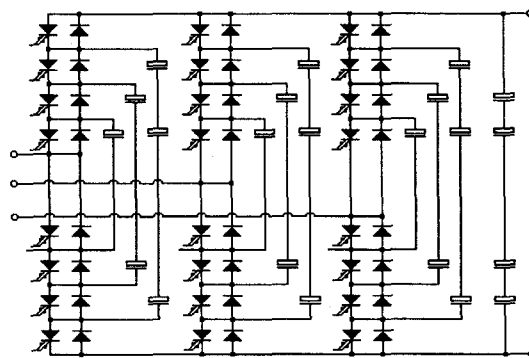


그림 3. 플라잉캐패시터 컨버터

이 컨버터의 장점을 열거하면 다음과 같다.

- 스위치쌍이 상보적 신호를 받는 경우 어떠한 스위치 조합도 가능하고 전압의 균등배분이 확실하다.
- 위상변이 PWM과 같이 캐리어를 근본으로 하는 모듈레이션 기교가 쉽게 적용가능 하다. 다만 5-level 이상일 경우 공간벡터 방식은 용이하지 않다.
- 부하의 분담은 모든 스위치에 균등하게 배분된다.
- 플라잉캐패시터의 개념은 dc-dc, ac-dc,

ac-ac 컨버터에 모두 응용 가능하다.

반면에 이 컨버터의 단점은 다음과 같다.

- 많은 수의 고전압 캐패시터를 요한다.
- 캐패시터의 초기전압이 0일 때 안전한 기동이 어렵다.

3.4 다중직렬브리지 컨버터

다중직렬브리지 컨버터는 맨 처음 설명한 컨버터의 변형으로 볼 수 있는데, 그림 4에 보인 것 처럼 각상의 leg이 교류측에 직렬로 연결된 풀브리지(full bridge)로 구성되어 있다 [6]. 따라서 각 풀브리지는 절연된 (isolated) 직류모선을 갖는데, 무효 전력보상기나 능동전력필터의 경우 직류모선에는 직류 고압캐패시터가 연결되고 에너지저장장치에서는 배터리나 태양전지판이 연결된다.

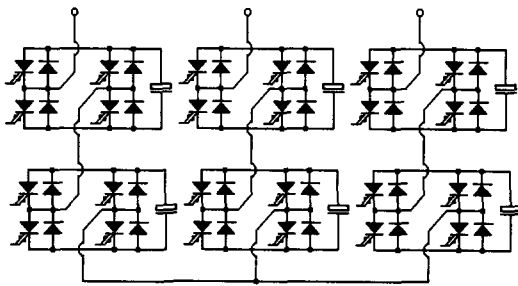


그림 4. 다중직렬브리지 컨버터

이 컨버터의 장점은 앞에서 설명한 모든 장점에 다음이 추가된다.

- 회로구성이 간단하다
 - 모든 스위치는 과전압에 대해 보호된다.
- 단점으로는 다음 두가지를 들 수 있다.
- 직류모선에 연결된 캐패시터의 전압제어가 어렵다.
 - 컨버터의 출력전류제어가 용이 하지 않다.

4. 금후 연구방향

본 해설에서는 주로 전압원인버터의 다중화에 대해서만 언급하였는데 전류원의 경우도 여러 가지 방식이 가능하다. 특히 다중직렬브리지 컨버터의 경우 전류원방식으로 쌍대성을 이용하여 구성 가능하다. 전류원의 경우 쉽게 영전류 스위칭이 가능하고 출력전류의 제어가 용이한 장점을 갖는다. 현재 대용량 전류원인버터에 의한 FACTS 연구도 추진되고 있다 [7].

참고문헌

[1] L. Walker, "10-MW GTO Converter for Battery Peaking Service", Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 1, January/February, 1990.

[2] C. W. Edward, et al, "Advanced Static Var Generator employing GTO Thyristors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, NO. 4, Oct. 1988, pp. 1622-1627.

[3] S. Mori, et al., "Development of A Large Static Var Generator using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability", IEEE PES Winter Meeting, Paper No. 92-WM165-1PWRS, Jan. 26-30, 1992.

[4] A. Nabae, et al., "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-17, No. 5, Sep./Oct., 1981, pp. 518-523.

[5] P. Bhagwt, et al., "Generalized Structure of a Multi-level PWM Inverter", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-19, No. 6, Nov./Dec., 1983, pp. 1057-1096.

[6] T. Meynard et al., "Characteristic and Design of Multi-Level Choppers", PESC '95, Feb., 1995, pp. 1208-1214.

[7] G. Ledwich, et al., "Neutral Commutated Soft Switched Current Source Converter", PESC '94, Feb., 1994, pp. 714-718.



한 병 문 (韓炳文)

1953년 7월 5일생. 1976년 2월 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 12월과 1992년 5월 미국 아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사 및 박사).

미국 Westinghouse 중앙연구소 전력전자연구실 선임연구원. 인천대학교 전기과 조교수. 현재 명지대학교 전기전자공학부 조교수