

신재생에너지용 전력변환기 연구동향

송성근(전자부품연구원 센터장/공학박사) · 박성준(전남대학교 교수/공학박사)

1 서 론

1.1 신재생에너지용 전력변환기의 필요성

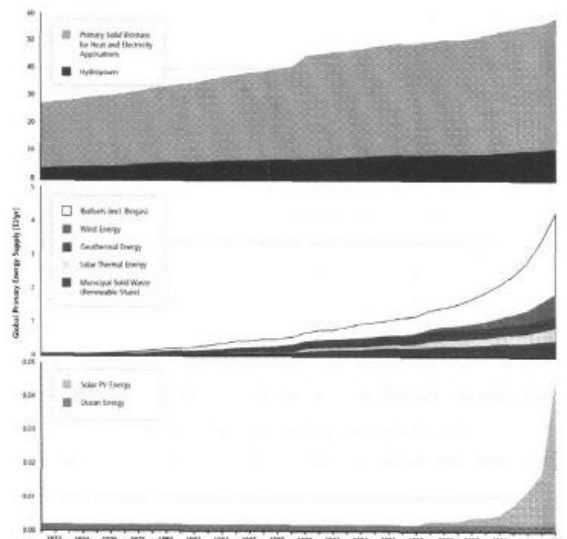
신흥개발도상국가의 발달 및 삶의 질 향상으로 인하여 에너지 수요는 세계적으로 급증하고 있으나, 기존 석유, 석탄등의 화석연료의 고갈, 지구 온난화와 같은 환경적 문제 및 기존 중요한 에너지원이었던 원전의 안정성 문제로 인하여 전세계 에너지 포트폴리오의 급격한 변화가 이루어지고 있다.

최근 들어 새로운 에너지원으로 각광을 받고 있는 것으로는 Shale gas(암석에 갇힌 천연가스) 및 신재생에너지원등이 있다. Shale는 지하 1.5km 이하의 암반층에 형성되어 있는 가스층으로 최근 새로운 공법의 개발로 저가의 대규모 채굴이 가능해 짐으로써 미국을 중심으로 각광을 받을 것으로 예상되고 있는 에너지원이며, 신재생에너지는 풍력, 태양광, 바이오, 수력, 지열 등의 재생에너지와 연료전지, 수소와 같은 신 에너지원을 통칭하는 것으로 CO₂ 배출이 없는 청정에너지원이다.

이와 같은 재생가능에너지의 경제성은 대부분 다른 에너지원에 비해 아직 낮은 것이 사실이나 바이오, 수력, 풍력, 태양광과 같은 일부 재생가능에너지원은 이미 시장에서 충분한 경쟁력을 확보한 상태이다.

그림 1은 SRREN의 2009년도 보고서에서 제시

한 세계 재생에너지의 비중을 나타낸 그림으로 지속적으로 재생에너지의 사용이 증가할 것으로 예상하고 있으며, 이중 근래에 급성장하고 있는 재생에너지원으로는 태양광, 풍력이 있다. 또한 그림 2의 전력거래소 정산단가를 보면 태양광 및 풍력의 kWh 당의 정산단가가 기존 화력발전의 정산단가와 많은 차이가 나지 않음을 확인할 수 있으며, 이는 재생에너지의 상용화가 멀지 않았음을 간접적으로 확인시켜준다.



※ 출처 : "재생가능에너지와 기후변화에 관한 특별보고서(SRREN)"

그림 1. 세계 1차 에너지 공급에서 차지하는 재생가능 에너지의 비중 변화(%)

그러나 이와 같은 태양광, 풍력 재생에너지원은 인간이 원하는 시점에 맞추어 임의적으로 발전할 수 없다는 단점이 있어 반드시 계통을 안정화 하기 위한 ESS(Energy Storage System)과 같은 안정화 장치가 같이 개발되지 않으면 대규모의 발전이 불가능한 것 또한 현실이다.

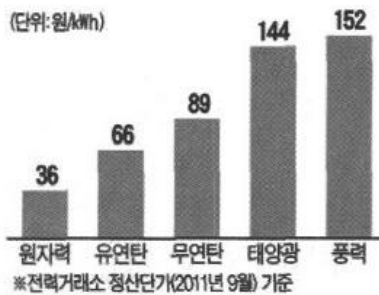


그림 2. 주요에너지원별 발전 단가

그러므로 태양광, 풍력, ESS를 전력계통에 연결하여 재생에너지를 원활히 사용하기 위해서는 전력변환기라는 에너지를 변환하는 장비의 사용이 필수적이다.

최근 재생에너지용 전력변환기는 수백W 용량의 MIC(Module-Integrated Converter)부터 수 MW 대용량 전력변환기까지 많은 연구가 수행되고 있다. 특히 재생에너지를 최대한 사용하기 위해서는 전체 시스템 효율의 향상이 중요하며, 이를 위해서는 태양광 모듈이나 풍력발전기와 같은 재생에너지 발생원에 대해 효율 향상도 요구되나 이를 계통과 연계하는 전력변환기의 고효율화 연구가 매우 중요한 이슈로 부각되고 있다.

2. 신재생에너지용 전력변환기 동향

2.1 태양광 전력변환기[1]

태양광 발전시스템은 그림 3과 같이 태양에너지를 전기로 변환하는 태양전지 모듈, 생산된 DC에너지를

일반 전력계통에서 사용하기 위해 AC에너지로 변경하기 위한 전력변환기, 태양전지 모듈과 전력변환기를 연결하기 위한 인터페이스 부, 그리고 전력변환기와 상용 전력계통을 연결하는 인터페이스 부로 크게 나눌 수 있다.

태양광 전력변환기의 유형은 태양전지 모듈과의 조합에 따라 그림 4와 같이 MIC, String, Central, Multi String, Multi Central로 분류할 수 있으며, 각 전력변환기의 특징은 표 1에 정의하였다.

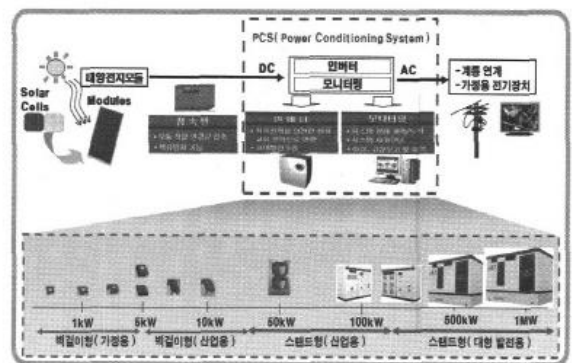


그림 3. 태양광 전력변환기의 개요

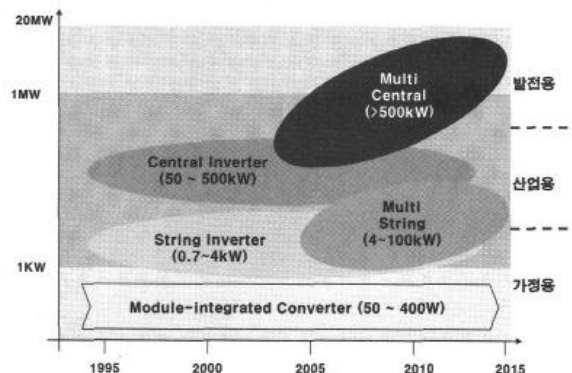


그림 4. 용량별 태양광발전용 전력변환기의 유형

MIC 전력변환기는 각 모듈별 전력변환기를 부착하는 형태로 저용량에 사용되며, DC라인 배선이 필요치 않아 설치가 용이하며, 최대 에너지 수확(Harvest)이 가능하다는 장점이 있으나 대용량 구현

표 1. 전력변환기 유형별 특징

| | MIC | String | Multi-String | Central | Multi Central |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구조 | | | | | |
| 특징 | <ul style="list-style-type: none"> ▶모듈별 DC/AC 전력 변환기 사용 ▶별도의 DC 배선이 필요치 않음 | <ul style="list-style-type: none"> ▶모듈별군별 DC/AC 전력변환기 사용 ▶String별 MPPT 제어 가능 | <ul style="list-style-type: none"> ▶모듈별군별 DC/DC 변환기 및 단일 DC/AC 전력변환기 ▶전력변환기 2중화로 효율이 낮음 | <ul style="list-style-type: none"> ▶중앙에 단일 DC/AC 전력변환기 사용 ▶구조가 간단하며 유지보수가 용이함 | <ul style="list-style-type: none"> ▶Central 구조를 보완한 형태 변환기 및 주변회로 최적 설계로 시스템 효율 최적화 |
| Cost | x | o | △ | ◎ | ◎ |
| 효율 | o(95%, 변압기제외) | o(95%, 변압기제외) | △(94%, 변압기제외) | ◎(98%, 변압기제외) | ◎(97%, 변압기포함) |
| Harvest | ◎ | o | o | △ | △ |
| 유연성 | ◎ | △ | o | x | x |

시 비용 부담이 크고 효율이 낮다는 단점이 있다.

String방식의 전력변환기는 700W~4kW 정도의 용량에 사용하며, 모듈 직렬군당 전력변환기를 사용하여 String별 MPPT 제어가 가능하나 대용량 발전소 적용할 때는 전력변환기의 개수가 너무 많아 유지보수비용이 증가하게 된다.

Multi-String 방식은 모듈 직렬군당 DC/DC 컨버터를 사용하는 방식으로 String 방식과 Central 방식의 장점을 모아놓은 형태이나 2중의 전력변환기를 사용하므로 시스템의 효율이 낮다는 단점이 있다.

Central 방식의 전력변환기는 50~500kW 발전 시스템에 주로 사용되는 방식으로 모든 모듈의 직·병렬 조합으로 에너지 수확이 다소 낮다는 단점이 있으나 변환기의 효율이 우수하고, 출력 용량대비 단가가 저렴하다는 장점이 있어 대용량 산업용 전력변환기 방식으로 주로 사용된다.

Multi-Central 방식은 단일 전력변환기라는 표현보다는 몇 개의 전력변환기와 중앙 통합제어기 및 주변 회로를 가지는 일종을 전력변환기 시스템이라는 명칭이 더 정확할 것이다.

태양광 시장의 성장에 따라서 태양광 PCS의 가격, 효율, 전력밀도의 변화 추이는 그림 5와 같이 시장이 확대되면서 가격은 급속히 떨어지고 있다.

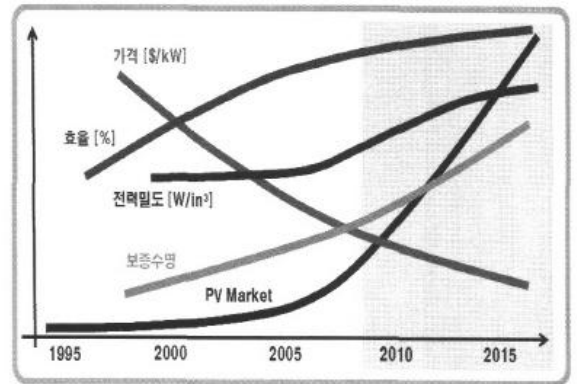


그림 5. 연도별 전력변환기 가격, 전력밀도 및 효율 변화 추이

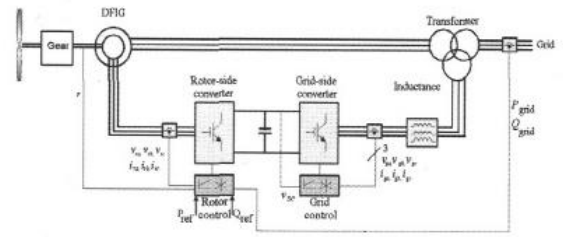
지금까지 태양광 전력변환기는 효율에 대한 기술 경쟁으로 최근에는 대용량 전력변환기의 경우 최대 효율 98% 수준에 이르고 있으며, 소용량 전력변환기의 경우 최근 95% 이상의 효율을 내고 있다. 이로

인해 각 선진사들은 과거 효율을 높이는 기술경쟁에서 전력변환기의 전력밀도를 높여 제품을 콤팩트화하거나, 가격, 신뢰성을 향상 시키는 등의 기술개발을 추진하고 있는 추세로 업체간 기술 경쟁이 심화되고 있다.

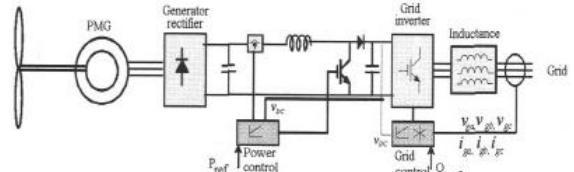
2.2 풍력 전력변환기

풍력발전기는 크게 육상용 풍력발전기와 해상용 풍력발전기로 나눌 수 있으며 주로 육상용 풍력 발전기는 3MW이하의 용량대를 해상용 풍력발전기는 경제성 (COE, Cose Of electricity)의 이유로 그 이상의 풍력 발전기를 많이 사용하고 있다.

이와 같은 풍력용 전력변환기의 경우 풍력발전기의 구조에 따라 DFIG용 전력변환기 및 Full-Power 전력변환기로 나뉘며, DFIG용은 여자를 담당하는 전력변환기로 통상 전체 시스템 용량의 30%~40%대의 용량을 사용한다. 그러나 최근 풍력발전 시스템의 효율을 최대한 높이기 위해 Full-Power 전력변환기의 사용이 많아지고 있다.



〈DFIG 방식의 풍력발전시스템 구조도〉



〈Full-power converter방식의 풍력발전시스템 구조도〉

그림 7. 풍력발전기 구조에 따른 분류

대용량 풍력발전 시스템의 경우 전력변환기를 풍력기 타워 내부에 설치를 하고 있으며, 이를 위해서는 전력변환기의 전력밀도를 매우 높여야 하며, 이를 위해 대형 풍력용 전력변환기의 경우 냉각 방식을 수냉식 방식을 사용하여 전력밀도를 극대화하고 있다.

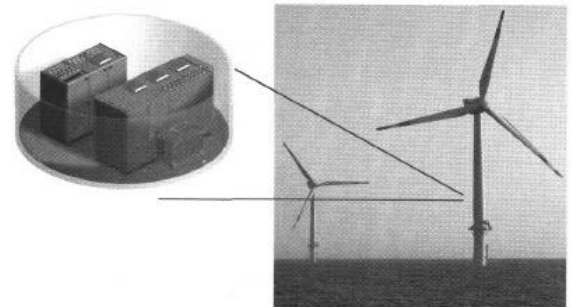


그림 8. 대용량 풍력 전력변환기 배치도

5MW급 이상의 대용량 풍력발전시스템에서 690V의 저전압 계통연계시 육상과 연결되는 송전 배선 및 발전기 코일가격 상승에 따른 경제성 문제로 3.3kV와 같은 MV(Medium Voltage) 전력계통과 직접

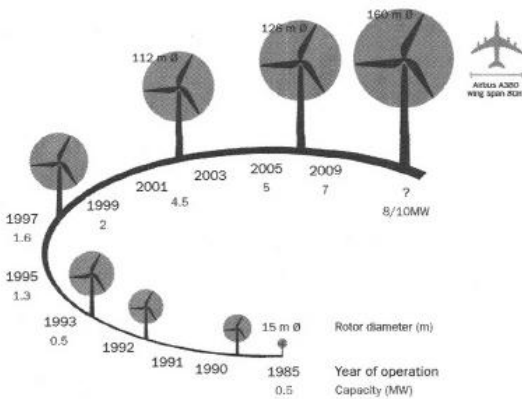


그림 6. 풍력발전기 대형화 추세

※ 출처 [Lesser, M. & Muller, J. (2009). Generating the Future of Offshore Wind Power Renewable Energy World conference and Exhibition, May 27. Cologne, Germany.]

연결할 수 있는 MV 전력변환장치의 개발이 활발히 진행되고 있어, 국내 해상풍력용 고전압 전력변환장치의 기술개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

3. 전력변환기 연구 방향

신재생에너지 전력변환기는 앞에서 언급한 바와 같이 재생에너지원을 최대한 효율적으로 사용하기 위해 전력변환기 자체의 효율 향상이 매우 중요한 이슈가 되어 있으며, 또한 시스템의 안정성 및 계통과 연계되므로 계통사고에 대응하는 기능 역시 재생에너지용 전력변환기의 중요한 연구 방향이 되고 있다.

3.1 전력변환기 토폴로지(2)

최근 판매 되고 있는 소용량의 태양광용 전력변환기의 효율은 95%이상으로 보통 비절연형 토폴로지를 사용하고 있으며, 최근 MIC의 경우 절연형 입에도 불구하고 최대 효율 96% 이상의 제품이 개발되고 있는 실정이다. 최근 이와 같이 전력변환기의 효율로 각 전력변환기의 기술 수준을 판단하고 효율에 따른 전력변환기의 가격도 다르게 형성되고 있다.

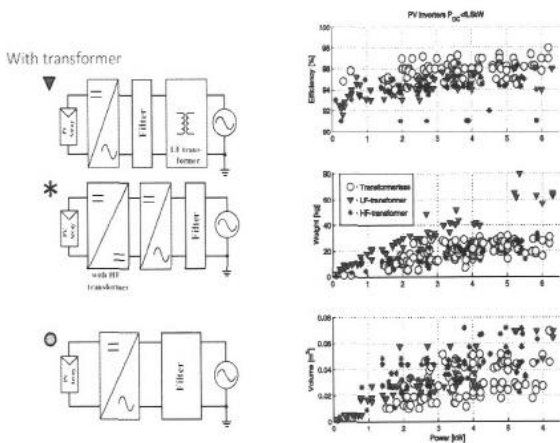


그림 9. 전력변환기의 구조(절연, 비절연)의 따른 효율, 중량 및 무게 비교

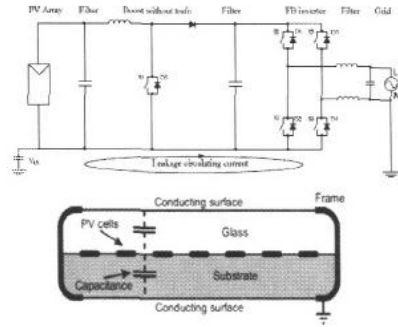


그림 10. 일반적인 단상 전력변환기의 구조 및 누설 전류의 패스

또한 근래에는 태양광 모듈의 대형화로 태양전지의 발전 전압이 상승하고 있으며, 비절연 타입의 전력변환기의 경우 누설 및 DC 유출에 대한 규제가 엄격해지고 있는 실정이다.

수 kVA 이하의 소용량 전력변환기의 경우 주로 단상 전력변환기가 사용되고 있으며, 적용되는 토폴로지는 SMA의 H5 브릿지, Sunway사의 HERIC, 그 외 ZVFBR, H6등의 고효율에 적합한 비절연 타입의 토폴로지를 사용되고 있다. 일부 몇 개 나라에서의 계통 연계 규정으로 인해 고주파 변압기를 사용한 토폴로지도 사용되고 있다.

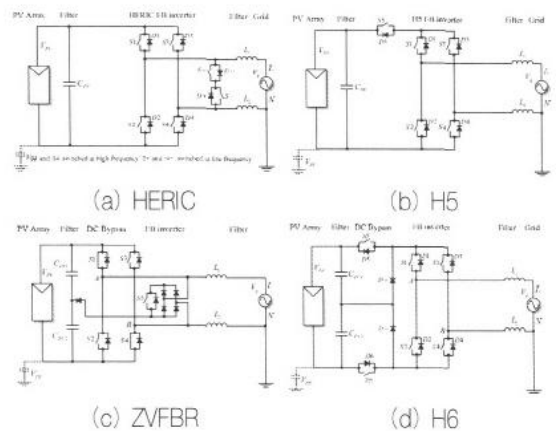


그림 11. 단상 전력변환기의 고효율, 저 누설 전류 토폴로지

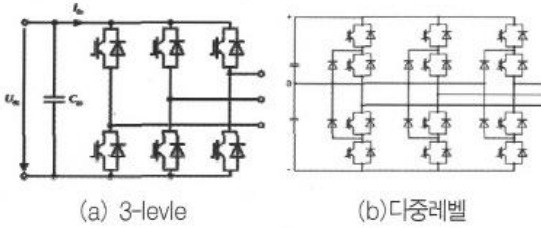


그림 12. 3상 전력변환기 토폴로지

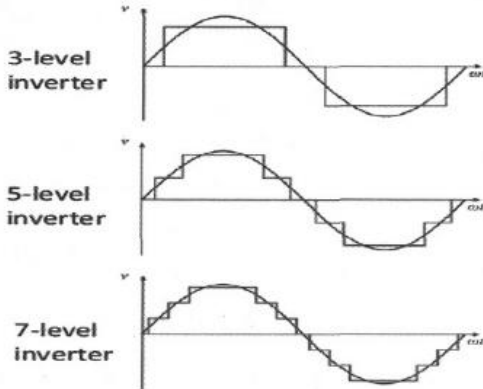


그림 13. 레벨 전력변환기별 출력 전압파형

대용량 태양광 및 풍력용 전력변환기의 경우 3상 전력변환기가 사용되고 있으며 특히 풍력은 대용량화 되어 발전기의 출력 전압이 기존 저압 690V에서 3kV나 13.8kV와 같은 전압으로 상승하고 있어 효율 및 고전압 스위칭 하기 위해 다중레벨 방식을 사용하고 있다.

최근 이와 같이 다양한 효율 향상 기법을 적용하여 전력변환기의 효율이 최대 99%에 이르고 있는 실정이다.

그림 12는 일반적으로 상용되는 3-레벨 전력변환기와 다중레벨 전력변환기의 구조를 나타내는 것으로 다중레벨의 경우 스위치의 수용 개수는 증가하는 단점이 있으나 스위치 직렬연결을 통한 고압스위칭이나 출력단 필터가 줄어드는 등의 장점이 있어 근래 고압, 대용량의 전력변환기에서 사용이 많아지고 있다.

그림 13은 각 레벨 전력변환기별 출력 파형을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 레벨이 증가함에

따라 전력변환기 출력 파형이 출력하고자 하는 사인 파형에 가까워진다.

3.2 스위칭 방식(3)

전력변환기의 목적은 출력하고자 하는 전압이나 전류의 크기와 주파수를 동시에 변환하기 위한 것으로 이를 위해서 근래에는 PWM(Pulse Width Modulation) 기법을 사용하고 있다. 지금까지 개발된 PWM 기법은 크게 최적 변조 방식, 삼각파 비교 변조방식, 공간벡터 변조방식으로 구분되며, 최근에는 지령전압과 삼각파를 비교하는 SPWM(Sinusoidal PWM)방식이 주로 사용되고 있다.

이 같은 PWM 방식을 3상에 사용하게 되면 3상의 모든 소자가 항상 연속적으로 스위칭을 하게 되어 이와 같은 스위칭 기법을 연속 스위칭 변조 방식(CPWM, Continuous PWM)이라 한다. 그러나 3상 시스템의 경우 일부 영역에서 2상의 스위칭 만으로도 평형인 3상 파형을 발생시킬 수 있어, 전력변환기의 스위칭 회수를 줄여 효율을 향상시키기 위해 3상의 스위치 중 1상의 스위칭을 하지 않도록 하는 불연속 스위칭 변조 방식(DPWM, Discontinuous PWM) 방식이 사용되고 있다.

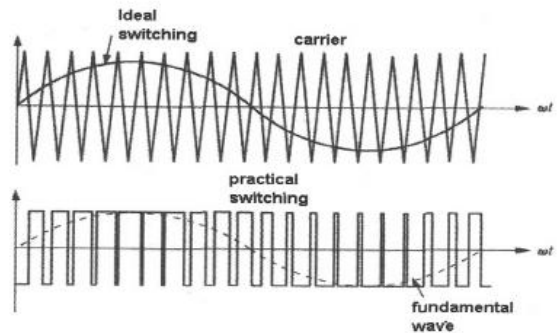


그림 14. SPWM 방식

이와 같은 DPWM 방식은 스위칭 하지 않는 상의 전류가 최대치 부근에서 스위칭을 하지 않게 하여

전력변환기 손실을 최소화 하는 방식으로 불연속 구간의 영역에 따라 60DPWM, 60(-30)DPWM, 60(+30)DPWM, 120DPWM, 30DPWM등이 있으며, 각 스위칭 방식에 따른 손실을 비교하면 그림 15와 같다.

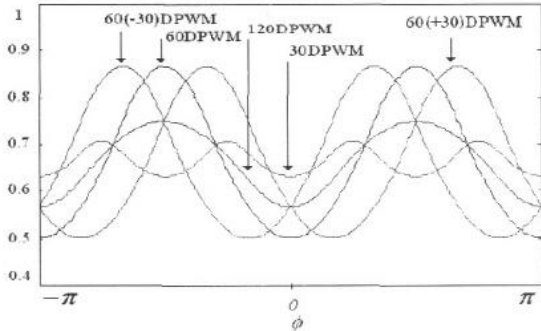


그림 15. 불연속 PWM 방식에 따른 손실

3.3 전력변환기 출력전류 제어[4]

일반적으로 전력변환기 출력 전류 제어는 3상인 경우 그림 16과 같이 dq-축변환에 의한 제어가 일반적이나 재생에너지용 전력변환기의 경우 출력이 전력계통으로 계통에서는 단상 지락, 선간 단락, 3상 단락 등의 사고가 발생하며, 이 경우 단순 PI 제어만으로는 불평형 상태의 전류제어가 불가능하다는 문제점이 있어 최근에 계통사고시 나타나는 정상분, 역상분의 전압을 이용하여 제어하는 방식을 사용하고 있다.

최근 전류제어의 속응성을 높이기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며 일례로 Dead-bet 제어, 공진 제어 등이 이에 속한다.

그림 17는 계통연계형 전력변환기와 1기 무한모션 형태의 전력계통을 모의 하고 전력변환기와 계통은 Y-Δ결선 변압기를 통하여 연결되는 경우를 가정한 시뮬레이터로, 이와 같은 시뮬레이터를 이용하여 단상 지락사고가 발생한 경우를 모의한 경우 전력변환기의 출력측 전압 파형은 그림 18과 같이 나타나게

된다. 그림 19는 단상지락 사고가 계통에 발생한 경우 $\alpha\beta$, dq, Dead-bet 제어에 의한 전력변환기 각 상의 전류 파형을 나타내고 있다.

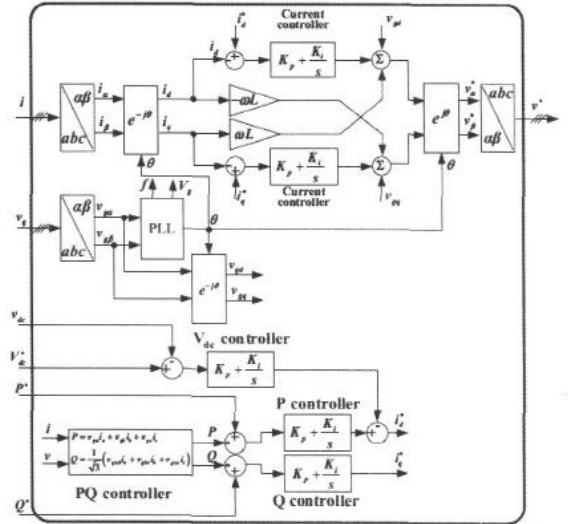


그림 16. 3상전력변환기 출력전류 제어

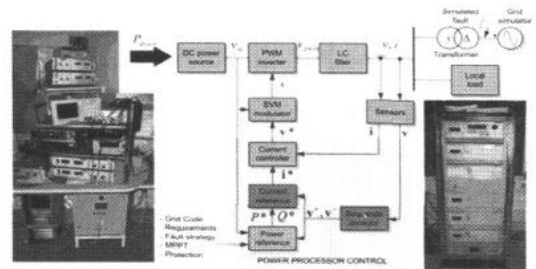


그림 17. 3상 전력변환기 출력전류 제어

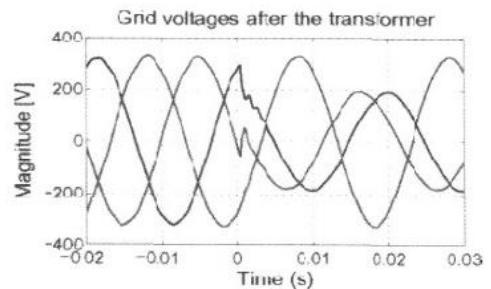


그림 18. 단상계통사고시 각 상의 전압파형

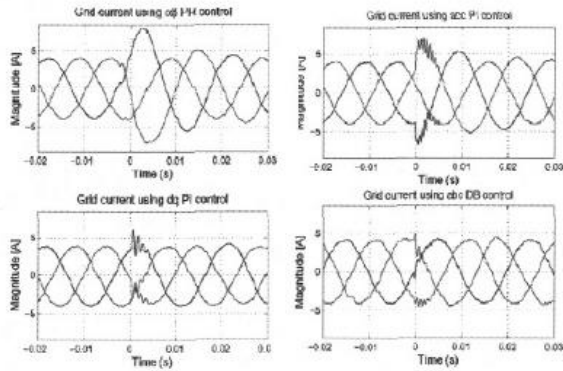


그림 19. 제어기별 출력전류 제어 파형

그림에서 보는 바와 같이 재생에너지용 전력변환기의 경우 전력계통 사고시에도 전력변환기의 출력 전류는 Over Shoot가 최소화되어야 하며, 3상평형의 전류를 계통에 공급하도록 제어되어야 한다.

4. 결 론

앞에서 살펴본 바와 같이 재생에너지 특히 태양광 및 풍력용 전력변환기는 크게 수 kVA 이하의 소용량과 수십 kVA에서 수 MVA 까지의 대용량 전력변환기로 구분이 가능하며, 각각의 전력변환기 모두 최대한 재생에너지의 이용률 향상을 위해 전력변환기의 효율을 최대화 하려는 노력을 하고 있다.

또한 재생에너지용 전력변환기는 대부분 계통연계형으로 전력계통 사고시에도 안정적으로 전원을 공급하여야 하며, 최근 유럽의 경우 대용량 재생에너지용 전력변환기의 FRT(Fault Ride Through) 규정과 같은 계통사고시의 전력변환기의 운전 규정이 마련되고 있는 실정이다.

향후 재생에너지용 전력변환기 및 다른 용도의 전력변환기의 경우도 SiC 소자와 같은 새로운 전력반도체 소자의 개발 및 다양한 토폴로지, 제어기법등의 개발로 보다 효율 좋고 온도특성이 우수하며 안정적 제어가 가능한 전력변환기의 기술개발이 이루어질 것

으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 박성준, 송성근, 김용구, "태양광 발전용 PCS의 연구 동향", 전력전자학회지, 15(3), 2010.06, 47-53
- [2] Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez, "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems" WILEY.
- [3] 김상훈, "DC, AC, BLDC 모터제어", 북두출판사.
- [4] Remus Teodorescu, Rik W. De Doncker, Marco Liserre, Pedro Rodriguez "Grid Converters for PV and WT Systems", ECCE Tutorials, 2010.

◇ 저 자 소 개 ◇



송성근(宋成根)

1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년~2004년 (주)프로컴 시스템 연구원. 2007년~현재 전자부품연구원 디지털컨버전스연구센터 센터장.



박성준(朴星濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 동 대학원 지능 기계공학과 졸업(공학박). 1996년 3월~2000년 2월 거제대학 전기과 조교수. 2000년 3월~2003년 8월 동명대학 전기공학과 조교수. 2003년 8월~현재 전남대 전기공학과 교수, 본 학회 편수위원.