

대용량 태양광 발전용 멀티센트럴 시스템

박종형*, 고광수**, 김흥근***, 노의철****, 전태원*****

*경북대학교 대학원 전기공학과(bell@knu.ac.kr), **LS산전(kks3330@hanmail.net),
경북대학교 전기공학과(kimhg@knu.ac.kr), *부경대학교 전기공학과(nhoec@pknu.ac.kr),
*****울산대학교 전기공학부(twchun@mail.ulsan.ac.kr)

Multi-Central System for Large Scale PV Power Generation

Park, Jong-Hyoung*, Ko, Kwang-Soo**, Kim, Heung-Geun***,
Nho, Eui-Cheol****, Chun, Tae-Won*****

*Dept. of Electrical Engineering, Graduate School, KyungPook National University(bell@knu.ac.kr),
**LS Industrial Systems(kks3330@hanmail.net),
***Dept. of Electrical Engineering, KyungPook National University(kimhg@knu.ac.kr),
****Dept. of Electrical Engineering, PuKyong National University(nhoec@pknu.ac.kr),
*****Dept. of Electrical Engineering, University of Ulsan(twchun@mail.ulsan.ac.kr)

Abstract

This paper proposes efficient operation method of PV system consisted of multi-central which is suitable for large scale system. The multi-central system used switch at a DC-link and applied proposed algorithm can improve the efficiency and the reliability on the existing system. This algorithm, with advantage of Multi-Central system can minimize the effect of different characteristic of each PV array due to a shadow or damaged PV cell. Each system is analysed and maximum power point tracking control, DC-link voltage control and output current control is used commonly. The validity is verified after comparing of the existing system and proposed system by simulation.

KeyWords : 멀티센트럴 인버터(Multi-central inverter), 계통연계형 태양광 시스템(Grid-tied photovoltaic system), 대용량 태양광 인버터(Large scale PV inverter), 전력변환시스템(Power conditioning system), 분산전원시스템(Distributed power system)

1. 서 론

최근 화석 에너지의 고갈과 탄소 배출권에 따른 이산화탄소 감축 의무화, 환경문제가 대두되면서 저탄소 녹색성장을 위한 신재생 에너지 연구개발과 확산보급 정책들이 추진되어 오고 있다¹⁾²⁾. 전 세계적으로 태양광 발전은 급격히 발전하고 있으며, 미래의 대체 에너지로서 역량을

높이기 위해서 다양하고 신속한 기술 개발이 이루어지고 있다.

그림 1은 일반적인 3상 태양광 발전 시스템의 블록도를 나타낸다. 태양광어레이로부터 발전된 전력은 DC/DC컨버터를 거쳐 직류링크단으로 전달되

1) 그린에너지산업 발전전략, 지식 경제부, 2008.

2) 녹색기술 연구개발 종합대책(안), 교육과학기술부, 2009.

고, 직류링크단의 전력은 인버터를 거친 후 필터를 통해 전류 주입 방식에 의해 계통으로 전달된다.

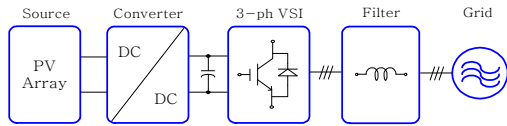


그림 1 일반적인 3상 계통연계형 태양광 발전 시스템 블록도

Fig. 1 block diagram of a typical three-phase grid-connected photovoltaic system.

최근에 태양광발전 시스템은 과거와 달리 분산전원으로서의 활용도를 높이기 위해 대형 발전소가 태양광 산업의 주가 되고 있다. 태양광 발전은 산업용과 발전용으로 쓰이면서 점차 DC/DC 컨버터를 제외하고 PV어레이와 직류링크단이 직접 연결되는 1단구성의 형태로 대용량화 되어가고 있으며 시스템의 안정성과 신뢰성이 대두되고 있다. 전력 계통에 고품질의 전력을 공급하기 위해서는 전력변환 제어기술이 필요하며, 태양광 PCS (Power Conditioning System)의 다 기능화, 고 신뢰화, 고 효율화 기술이 요구되고 있다.

본 논문에서는 고밀도와 고효율, 시스템의 안정한 전력을 얻기 위한 변환 장치로써 멀티센트럴 스위치(MCS : multi-central switch)를 갖는 멀티센트럴 인버터 제어 기법을 제안한다. 각각의 10 kVA급 태양광 어레이와 인버터를 모델링하였고, 두 대의 태양광 시스템 인버터를 계통연계점(PCC : Point of Common Coupling)에서 병렬로 접속시키고, 직류링크 전압단을 멀티센트럴 스위치로 연결하였다. 제안하는 멀티센트럴 인버터는 기상여건에 따라서 적절한 동작 모드로 인버터를 제어하는 시퀀스 기법을 적용하였다. 제안한 멀티센트럴 스위치를 이용한 멀티센트럴 제어기법이 공통 DC버스 멀티센트럴 인버터보다 더 신뢰성 있고 효율적임을 모의실험을 통해 입증하였다.

2. 멀티 센트럴 인버터 토폴로지

계통연계형 태양광 발전 시스템은 용도와 구조에 따라서 MIC (Module Integrated Converter),

스트링(string), 멀티스트링(multi-string), 센트럴(central), 멀티센트럴(multi-central) 인버터로 분류할 수 있다³⁾⁴⁾.

멀티센트럴 인버터는 주로 발전소용으로 사용되며, 센트럴 인버터를 병렬로 연결한 형태로 시스템의 효율과 성능, 안전성을 개선한 발전 시스템이다.

2.1 공통 DC버스 멀티센트럴 인버터

현재 대용량 태양광 발전 시스템에 사용되고 있는 멀티센트럴 인버터의 구조는 그림 2와 같다.

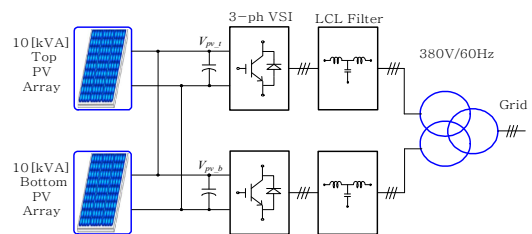


그림 2 공통 DC버스 멀티센트럴 시스템 토폴로지

Fig. 2 Common DC-bus multi-central system topology.

이 구조는 두 대의 인버터의 직류링크단이 스위치 없이 공통으로 병렬 연결되어 항상 직류링크 전압을 공유하게 된다. DC버스를 공유하게 되면 제어가 간단한 반면 각 어레이의 독립적인 MPPT는 불가능하다. 따라서, 두 태양광 어레이의 특성이 어떤 원인에 의해 달라질 경우 DC버스가 공통으로 연결되어 있기 때문에 두 어레이의 평균 출력이 최대인 점에서 동작하게 되므로 DC버스를 분리해서 각각을 MPPT제어하는 경우에 비해 에너지 회수가 떨어진다.

3) Jin-Yi Kim, Dong-Jun Won, Seung-Il Moon, "Development of the dynamic equivalent model for large power system", Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE, vol.2, pp. 973 - 977, 2001.

4) Jung Hun So, Young Seok Jung, Byung Gyu Yu, Hye Mi Hwang, Gwon Jong Yu, Ju Yeop Choi, "A cost analysis of very large scale PV (VLS-PV) system on the world deserts", Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, vol.2, pp. 2375 - 2378, 2006.

2.2 멀티센트럴 스위치를 이용한 멀티센트럴 인버터

본 논문에서 다루고 있는 대용량 태양광 발전 시스템의 멀티센트럴 PCS 등이 구조는 그림 3과 같이 구성된다. 공통 DC버스 멀티센트럴 인버터와 달리, 스위치를 사용하여 두 개의 독립적인 태양광 어레이가 직류링크 전압단에서 멀티센트럴 스위치를 거쳐 병렬로 연결되도록 하고 있다. 스위치는 상황에 따라 한 번씩 온 오프 되므로 공통 DC버스 멀티센트럴 인버터와 마찬가지로 일단구조이다. 멀티센트럴 스위치를 이용한 멀티센트럴 인버터는 공통 DC버스 인버터와 같이 일사량이 적을 때 상단과 하단의 인버터를 적절히 선택하여 정격에 맞게 운전할 수 있고 일사량 상태에 따라서 멀티센트럴 스위치를 동작시켜 독립적으로 각 어레이의 최대전력점 추종이 가능하여 동일한 상황에서 공통 DC버스 멀티센트럴보다 더 많은 전력을 회수할 수 있다.

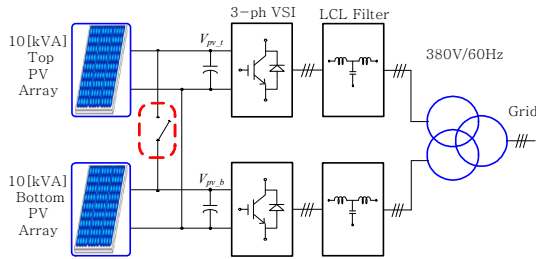


그림 3 MCS를 이용한 멀티센트럴 시스템 토폴로지
Fig. 3 Multi-central system topology using MCS.

일사량 상태 뿐 아니라 대용량인 만큼 넓은 면적에 걸쳐 태양광 어레이가 분포하기 때문에 부분적인 그림자효과를 무시할 수 없다. 이 때, 그림자가 드리워진 어레이와 그렇지 않은 어레이 사이에 일사량 차이뿐만 아니라 온도 불균형이 발생할 경우 발전량이 그늘진 어레이에 한정되게 되는데 이 때, 이를 분리시켜 운전이 가능하다.

3. 멀티센트럴 인버터 동작

태양광 발전 시스템의 태양전지(photovoltaic cell)는 기상 여건에 따라 전압 전류 특성곡선이

변화하므로 주어진 상황에서 최대한의 전력을 발생하는 것이 바람직하다. 그러므로 기상 여건에 따라 태양광 발전 시스템의 적절한 제어를 하는 것이 필요하다.

스위치를 이용한 멀티센트럴 인버터는 초기에 직류링크 전압을 센싱하여 상단과 하단 인버터 중에서 직류링크 전압이 높은 쪽의 인버터가 먼저 운전된다. 본 논문에서는 초기에 인버터 동작에 있어서 상단의 인버터 직류링크 전압을 하단 인버터보다 더 높게 하여 상단 인버터가 먼저 동작하는 경우라고 가정하였다.

3.1 동작모드 1 : 상단 인버터 제어

그림 4는 상단 인버터가 먼저 동작을 시작할 때 멀티센트럴 스위치에 흐르는 전류의 방향이다. 동작 시퀀스를 살펴보면, 아침에 일출하면 운전 가능한 상태로 될 때까지 두 대의 인버터의 직류링크 전압을 센싱하여 먼저 운전 가능한 상태가 된 인버터를 동작시키게 된다. 즉, 직류링크 전압이 큰 인버터가 먼저 동작한다. 상단의 직류링크 전압이 하단의 직류링크 전압보다 크므로 상단으로의 돌입전류가 없는 상태에서 하단의 어레이에서 출력된 에너지가 상단으로 흐를 수 있도록 T_t 스위치를 켜 준다. 스위치가 접속되면 상단 인버터의 최대전력점 추종(MPPT) 제어와 PWM 신호를 인가하여 상단 인버터를 동작시킨다. 상단의 인버터는 정격 출력의 80%미만까지 계속 운전하게 되며, 인버터 정격 출력의 80%이상 되면 운전모드 2가 되어 멀티센트럴 인버터로 동작하게 된다.

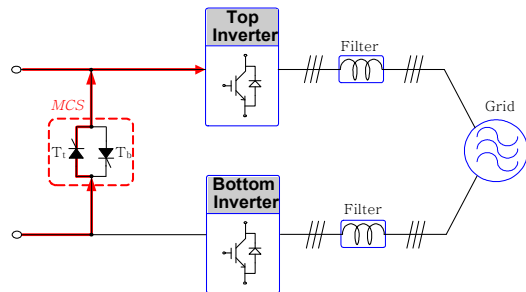


그림 4 상단 인버터 동작모드
Fig. 4 Top inverter operation mode.

3.2 동작모드 2 : 멀티센트럴 인버터 제어

그림 5는 멀티센트럴 인버터로 동작할 때 두 대의 인버터에 흘러 들어가는 에너지의 방향이다. 이 모드에서는 상단 인버터와 하단 인버터가 각각 독립적으로 최대전력점 추적제어와 PWM을 수행하며 멀티센트럴 스위치로 흐르게 되는 전류는 0이다.

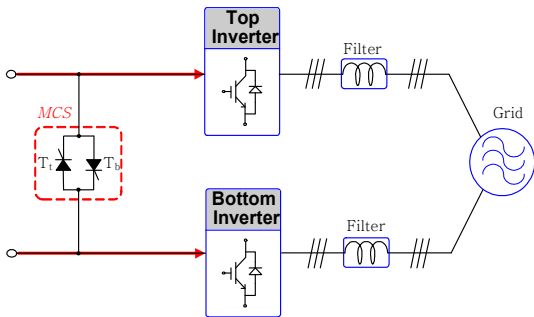


그림 5 멀티센트럴 인버터 동작모드
Fig. 5 Multi-central inverter operation mode.

상단의 인버터 출력이 정격 출력의 80%를 넘어서게 되면, 하단 인버터를 동작시켜 전류지령을 서서히 증가시킨다. 이 때, 상단 인버터 전류지령은 하단 인버터 전류지령의 크기만큼 감소하게 되며 상단과 하단의 전류지령이 같아지는 순간 T_t 스위치에 오프신호를 주면 직류링크 전압이 하단보다 커질 때 스위치는 자연스럽게 꺼지게 된다.

스위치가 꺼지게 되면 상단과 하단의 최대전력점 추적제어와 PWM을 수행하면서 두 대의 인버터가 각각 동작하게 된다.

멀티센트럴 인버터 동작은 정격 출력의 40%까지 계속 동작하게 되며, 인버터 정격 출력의 40%미만이 되면 운전모드 3이 되어서 하단 인버터로 동작하게 된다.

3.3 동작모드 3 : 하단 인버터 제어

그림 6은 하단 인버터가 동작할 때 멀티센트럴 스위치에 흐르는 전류의 방향이다.

이때는 하단 인버터로 전류를 함하여 하단의 인버터만 동작시킨다. 일단 돌입전류를 제한하기

위해 상단의 직류링크 전압을 감소시키고 하단의 직류링크 전압을 개방전압 이하까지 증가시킨다. 그러면 하단의 직류링크 전압이 상단의 직류링크 전압보다 커지게 될 때, 멀티센트럴 스위치의 스위치를 켤 수 있게 된다. 스위치가 켜지면 상단의 전류 지령을 0까지 지속적으로 감소시켜 출력 에너지를 하단 인버터로 보내고, 하단 인버터는 최대전력점 추적제어를 수행한다. 그러면 하단 인버터의 전류지령은 서서히 증가하게 되고, 상단 인버터 전류지령이 0에 도달하게 되면 PWM을 꺼 주게 되고 일사량이 감소하여 인버터가 운전 불가능한 상태가 되어 멈출 때까지 하단 인버터로만 동작하게 된다.

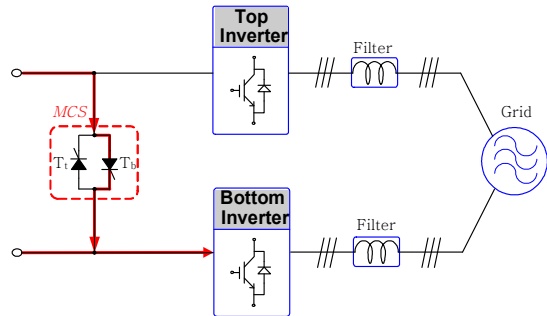


그림 6 하단 인버터 동작모드
Fig. 6 Bottom inverter operation mode.

그림 7은 멀티 센트럴 인버터의 운전 모드 1~3의 인버터 출력전류 지령을 구름 없는 날 하루를 기준으로 개념적으로 나타낸 것이다. 종축은 시간이며, 횡축은 일사량 변화에 따른 전류 지령 값이다.

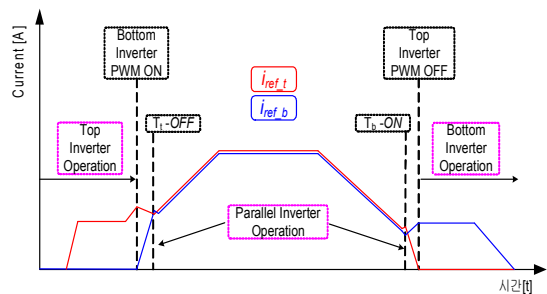


그림 7 인버터 출력전류 지령 비교
Fig. 7 Compare of inverter output current reference.

4. 모의실험 결과

모의실험은 그림 3의 시스템을 표 1과 같은 조건으로 PSIM을 이용하여 수행하였다. LCL 필터는 [5]를 참고하여 10kW에서 THD 3%를 만족하도록 설계하였다.

표 2는 상단과 하단의 어레이의 파라미터 값을 나타낸다. 이 조건으로 멀티센트럴 스위치를 이용한 멀티센트럴 인버터와 공통 DC 버스 멀티센트럴 인버터의 특성을 시뮬레이션 하였다.

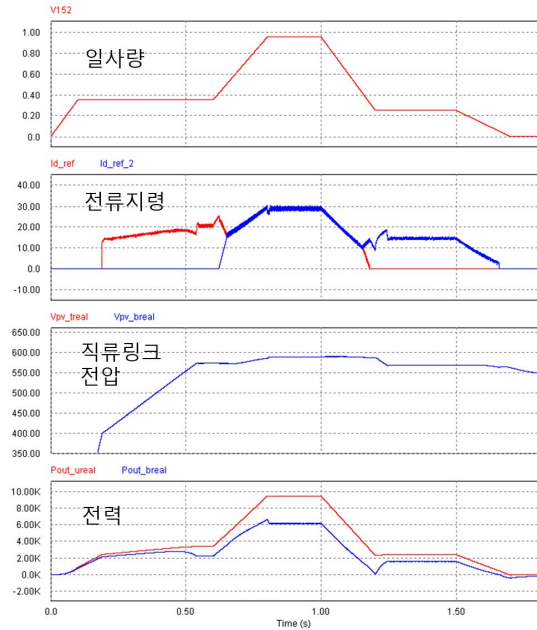
표 1 멀티센트럴 인버터 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Parameters of simulation for multi-central inverter

정격 전력(P)	10[kW]
계통 선간전압(V)	220/380[V]
스위칭주파수(f_{sw})	10[kHz]
계통주파수(f)	60[Hz]
직류링크 커패시터(C_{pv})	2000[μF]
인버터측 필터인덕터(L_i)	500[μH]
계통측 필터인덕터(L_g)	150[μH]
필터 커패시터(C)	20[μF]

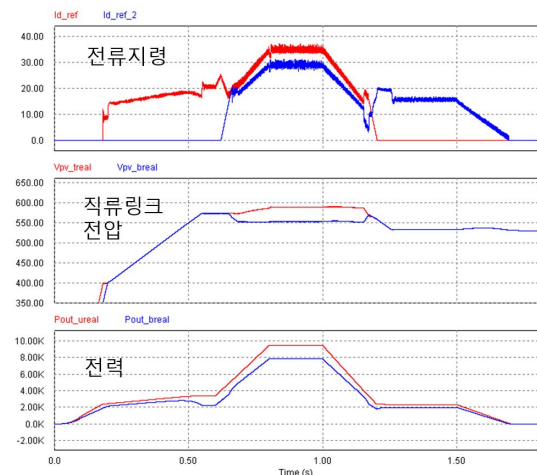
표 2 태양광 어레이 파라미터
Table 2 PV array parameter

	상단 어레이	하단 어레이
개방전압(V_{OC})	650[V]	610[V]
단락전류(I_{SC})	17.34[A]	15.3[A]
MPP전압(V_{mp})	591.5[V]	555.1[V]
MPP전류(I_{mp})	16.86[A]	14.87[A]
기준 일사량	1000[W/m ²]	
기준온도	25 [°C]	

그림 8(a)의 일사량 곡선과 같이 일사량을 가정하고 각각에 대해 전류지령과 직류링크 전압 및 태양광 어레이의 출력 전력 파형을 비교하였다.



(a) 공통 DC 버스 멀티센트럴 인버터 파형



(b) MCS를 이용한 멀티센트럴 인버터 파형

그림 8 병렬 운전 시 멀티센트럴 인버터 파형 1
Fig. 8 Multi-central inverter output waveforms while parallel operation 1.

공통 DC버스 인버터의 경우 멀티센트럴 동작을 하지만 병렬운전 시 두 어레이의 평균 출력이 최대인 점에서 동작하여 최대 전력을 발생하지 못하고 있다. 전류지령은 동일하며 직류링크 전압역시 평균 출력이 최대인 점으로 짐작되는 591[V]로 제어되고 있고, 이 때 각각의 어레이는

9439.6[W]와 6123.7[W]의 전력을 발전하고 있다.

그림 8(b)와 같이 MCS를 이용한 멀티 센트럴 인버터의 경우에는 일사량이 높을 때 각각의 최대전력점 전압에서 최대전력을 추적하고 있음을 알 수 있다. 이때 각각의 어레이는 9439.9[W]와 7816.7[W]를 발전하고 있다. 한편 각각의 전류지령은 해당 어레이의 특성에 따라 다르며 모드 변환 부분에서 안전한 스위치 동작을 위한 제어가 행해지는 것을 볼 수 있다.

일사량이 최대일 때 출력전력을 비교해보면 공통 DC버스 멀티센트럴의 전력 합은 15563.3[W]이고, 스위치를 이용한 멀티센트럴의 전력의 합은 17256.6[W]이다. 따라서 전력의 차는 1693.3[W]이며, 하루에 4시간 정도 병렬 운전을 한다고 가정하면 에너지를 획득 차는 식 (1)과 같다.

$$1693.3 \times 4 = 6773.2 \text{ Wh} \quad (1)$$

한 달에 25일 정도 태양광 발전을 한다고 가정하면,

$$6773.2 \times 25 = 169.33 \text{ kWh} \quad (2)$$

식 (2) 만큼의 에너지를 더 회수할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 대용량 인버터에 적합한 일단 구조의 계통연계형 태양광 발전용 PCS를 구성하고 10 kVA급 태양광 시스템 인버터를 PCC (Point of Common Coupling)에서 병렬로 접속시켰다. 직류링크 전압단에 멀티센트럴 스위치를 이용하여 합리적이고 효율적인 멀티센트럴 시퀀스 제어기법을 제안하여 이용률을 높였다.

이 방식은 첫째, 일사량 변동에 따라서 인버터가 정격에 가깝게 운전하도록 하여 전력 변환 효율을 높이고, 일사량이 낮은 경우에 동작하지 않는 인버터는 동작하지 않는 만큼 수명을 연장할 수 있다. 둘째, 효율 비교 모의실험에서 확인한 바와 같이 태양광 어레이의 특성이 다른 경우에 태양광 어레이에서 생산된 에너지를 각각 최대전력점 추적제어를 할 수 있기 때문

에 동일한 상황에서 더 많은 에너지를 회수할 수 있다. 셋째, 유지·보수나 하나의 인버터 시스템에서 고장 발생 시 정상 작동하는 인버터는 높은 에너지 레벨에서 발전을 지속할 수 있어 더 많은 에너지 회수가 가능하다. 마지막으로, 계통 측과 인버터를 연결하는데 있어서 기존의 2중 변압기를 사용하는 대신 중압 변압기 멀티센트럴 방식으로 효율을 높일 수 있다. 멀티센트럴 제어 기법은 향후 발전소와 같은 대용량 인버터 시스템에 널리 활용 될 것으로 기대되며 실제 실험을 통한 안정성과 신뢰성을 검증해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 그린에너지산업 발전전략, 지식 경제부, 2008.
2. 녹색기술 연구개발 종합대책(안), 교육과학기술부, 2009.
3. Jin-Yi Kim, Dong-Jun Won, Seung-Il Moon, "Development of the dynamic equivalent model for large power system", *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001. IEEE, vol.2, pp. 973 - 977, 2001.
4. Jung Hun So, Young Seok Jung, Byung Gyu Yu, Hye Mi Hwang, Gwon Jong Yu, Ju Yeop Choi, "A cost analysis of very large scale PV (VLS-PV) system on the world deserts", *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, vol.2, pp. 2375 - 2378, 2006.
5. 박종형, 지민훈, 김홍근, 전태원, 노의철, "충고조파 왜울과 리플 감쇄율을 이용한 계통연계형 PCS용 LCL 필터 설계," *전력전자학회논문지*. vol. 3, no. 15 pp. 235-243, Jun. 2010.