

Z-소스 인버터를 이용한 계통연계형 PV 시스템용 PCS 설계

박종형*, 김흥근*, 전태원**, 노의철***
 경북대학교*, 경북대학교*, 울산대학교**, 부경대학교***

PCS Design for Grid-Connected PV System Using Z-Source Inverter

Joung-Hyoung Park, Heung-Geun Kim, Tae-Won Chun, Eui-Cheol Nho
 KyungPook National University, KyungPook National University, University of Ulsan, PuKyong National University

ABSTRACT

Z-소스 인버터는 기존의 전압원 인버터나 전류원 인버터가 가지고 있는 단점들을 효율적으로 극복하고 있다. 이러한 장점을 가지고 있는 Z-source 인버터를 10kW급 계통연계형 태양광 발전 시스템용 PCS에 적용시키기 위하여 그에 필요한 제어 알고리즘을 구현하고 모의 실험을 통하여 타당성을 검증한다.

1. 서론

화석 에너지의 고갈로 연일 유가가 오르내리고 환경 문제가 더불어 기후변화 협약의 규제들 때문에 신재생 에너지원이 그 자리를 대체하고 있으며 이에 대한 연구개발과 보급 정책들이 추진되어 오고 있다. 이와 발맞추어 일본의 경우 에너지 공급 방식의 다양화와 분산화를 전적으로 내세우고 있어 각 지방의 환경특색에 맞는 에너지원의 개발이라는 과제를 낳아 신재생 에너지의 보급이 더욱 확산되고 있다.

우리나라에서 정의하고 있는 11개의 신재생에너지 중 태양광 발전 분야는 풍력 다음으로 많이 확산되어 있다. 에너지원이 깨끗하고 무제한적이며 필요한 장소에서 필요량만큼의 발전이 가능하고 유지보수가 용이하다는 점과 더욱이 무인화가 가능하면서도 20년 이상의 긴 수명을 가지고 있다는 장점이 있으나 단점으로 전력 생산량이 지역별, 계절별 일사량에 의존해야하는 점을 꼽고 있다. 하지만 이는 부하가 집중되는 하절기에 최대 부하에서의 부하 평준화 기능을 하기 때문에 오히려 장점으로 볼 수가 있다.^[1]

이러한 태양광 발전시스템은 계통과의 연계 여부에 따라 독립형과 계통연계형이 있다. 이 중 계통연계형 태양광 발전시스템은 PCS(Power Conditioning System)를 통해 전력계통과 연계되어 점차 그 용량이 커지고 제어능력이 향상됨에 따라 단순 분산전원^[2]의 개념을 넘어 전력시스템에 결합 운전되는 독립적으로 제어 가능한 하나의 전원시스템으로 선진국에서 이미 연구되고 있는 마이크로 그리드 사업의 일환으로 그 중요성이 더해진다.^[3]

독립형이든 계통연계형이든 PV-어레이에서 생산된 직류전력을 교류로 변환하기 위해서는 전력변환기가 필요하다. 기존에 전압형(V-source)과 전류형(I-source) 인버터가 있지만 몇 해 전에 새로 나온 Z-소스 인버터^[4]는 이들의 단점을 보완하고 경제적인 측면에서도 뛰어나 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

다.

위와 같은 여러 정황을 볼 때 Z-소스 인버터를 이용한 계통연계형 태양광 발전시스템은 충분히 연구할 가치가 있고 향후 그 쓰임이 아주 기대되는 시스템이다. 따라서 다음과 같은 기존 인버터들이 담당하고 있던 여러 제어기법들을 무리 없이 구현할 수 있도록 시스템 검증이 필요하다.

계통연계형 태양광 발전시스템에는 다음과 같은 제어 기법들이 사용되고 있다. 최대전력점추종제어, 직류전압링크제어, PLL제어, 인버터 출력 전류 제어, 독립운전 방지기술, 보호기술 등이 있다.^[5]

위에서 언급한 제어기술들 중 최대전력점 추종제어, 직류전압링크 제어, 인버터 출력 전류 제어는 기존 인버터를 Z-소스 인버터로 대체 시 새로운 알고리즘을 적용해야하는 부분이다. 따라서 본 논문에서는 계통연계형 태양광 발전 시스템에 Z-source 인버터를 도입하여 위에서 언급한 주요 제어알고리즘을 구현하는 데 초점을 맞추어 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증한다.

2. 본 문

2.1 Z-소스 네트워크

2.1.1 전압 관계식

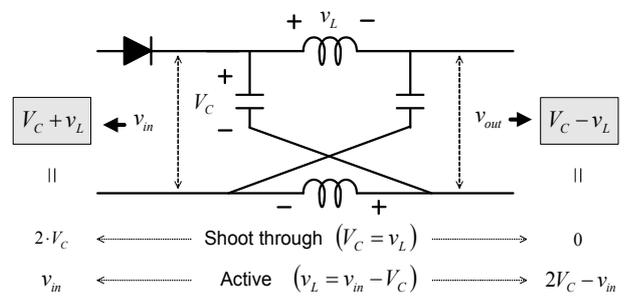


그림 1. Z-소스 네트워크 전압 관계도
 Fig. 1. Voltage relation of z-source network

그림 1에서 각각의 L과 C가 같은 값을 갖게 될 때 다음과 같은 식을 만족하게 된다.

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C, v_{L1} = v_{L2} = v_L \quad (1)$$

식(1)을 바탕으로 그림 1은 Z-소스 인버터의 임피던스 네트워크의 전압 관계도를 나타낸다. 암단락(Shoot through) 모드일 때와 활성(Active) 모드일 때 임피던스 네트워크의 앞단과 뒷단의 전압 관계도를 나타내고 있다.

암단락이 일어나면 인덕터와 캐패시터는 같은 전압을 갖게 되고 임피던스 네트워크 앞단은 각 전압의 두 배가 되며 이 때문에 다이오드에 역바이어스가 걸려 개방회로가 된다. 이 때 임피던스 네트워크의 뒷단의 전압은 0이다. 임피던스 네트워크의 L과 C는 각각 충전과 방전을 하여 L은 전류가 증가하는 반면 C는 전압이 감소한다.

이어서 활성 모드에 접어들면 인덕터 전류가 감소하여 인덕터의 전압이 역전되고 다이오드가 순바이어스로 넘어가 태양광 어레이의 전원을 공급받는다. 임피던스 네트워크의 L과 C는 위와 반대로 방전과 충전을 하는데 L은 부하에 전류를 보내며 방전을 하고 C는 전원에서부터 전류를 받아 충전을 한다.

2.1.2 전류 관계식

다음 그림 2는 Z-소스 인버터의 임피던스 네트워크의 전류 관계도를 나타내고 있다.

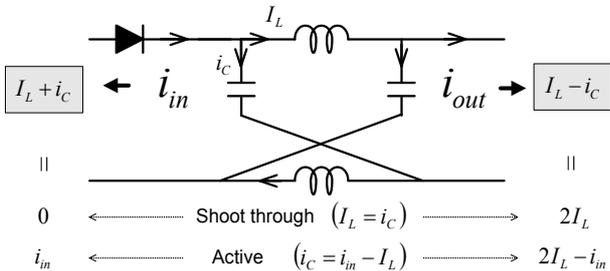


그림 2. Z-소스 네트워크 전류 관계도
Fig 2. Current relation of Z-source network

전류 역시 위 식 (1)과 같이 각각의 L과 C가 같은 값을 갖게 될 때 아래 식을 만족한다.

$$i_{C1} = i_{C2} = i_c, I_{L1} = I_{L2} = I_L \quad (2)$$

활성 모드에서 입력전류는 아래 식과 같다.

$$i_{in} = I_{L1} + i_{C1} = I_{L1} + (I_{L2} - i_{out}) = 2I_L - i_{out} \quad (3)$$

식 (3)의 입력 전류가 양일 때 다이오드는 순바이어스 상태를 유지한다. 그렇지 않으면 이 Z-소스 임피던스는 전류 불연속 모드로 동작한다.^[6]

2.2 계통연계형 PV 시스템 PCS용 인버터 구성

앞에서 간단히 Z-소스 임피던스 네트워크의 전압 전류 특성을 알아보았다. 네트워크 앞단은 각 모드에 따라 다이오드가 온, 오프를 반복하는데 이는 PV어레이로부터 연속적인 전원공급을 받는데 어려움이 있고 최대 전력점 추종 제어를 위해서는 역시 조치가 필요한 부분이다. 또한 임피던스 네트워크의 뒷단은 전압이 0과 $B \cdot V_{PV}^{[4]}$ 를 스위칭 주파수만큼 반복한다. 이를 염두에 두고 인버터 구동 시점인 활성 모드에서는 같은 전압을

유지하도록 해야 하며 계통전압과 비슷한 전압을 유지하기 위해 적절히 승압이 되어야 한다. 또한 불연속 모드에서는 인버터 동작이 불안정하여 연속 모드로 동작 하도록 하는 것도 필요하다.

지금부터 이를 토대로 계통 연계형 PV 시스템 인버터를 구성하도록 하겠다.

2.2.1 전체 구성

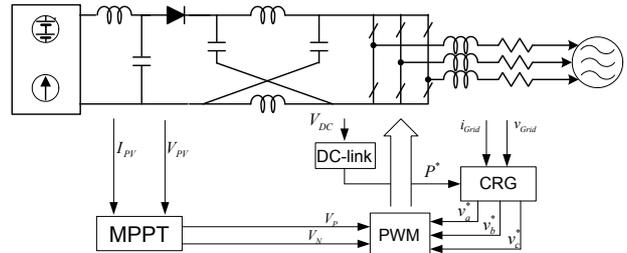


그림 3. Z-소스를 이용한 계통 연계형 PV 시스템 개략도
Fig 3. Outline of grid-connected PV system using Z-source inverter

그림 3은 제어부분과 전력부분을 포함한 전체 구성을 보여 준다. 제어부분은 크게 최대전력점 추종제어(MPPT)기, 인버터 출력전류제어기, 직류전압 링크제어기와 PWM 발생 부분으로 구성된다.

2.2.2 제어방법

최대전력점 추종제어는 암단락 시간으로 제어를 하게 된다. 그림 3의 앞쪽 부분이 PV어레이이다. PV어레이 뒷단에 LC 필터를 달았는데 이는 암단락 시에도 PV 어레이가 연속적인 전류를 공급하도록 한다. 즉 암단락 시에는 전류가 커패시터로 흐르도록 하여 PV에서 최대 전력을 발생할 때의 전류 및 전압이 되도록 지속시간을 제어한다.

인버터 출력전류제어는 계통의 전압정보를 받아 동기를 맞추고 직류링크 전압과 함께 전류 지령을 만든다. 이는 실제 전류와 비교하여 오차 부분을 최종적으로 전압 지령 형태로 만들어 PWM을 발생하게 된다.

직류 링크 전압은 설정한 기준전압과 비교를 하게 되는데 인버터 출력 전류 제어와 맞물려서 제어를 행한다. 즉 실제 직류링크 전압이 기준 전압보다 작게 되면 유효전력을 감소시켜 Z-소스 네트워크의 캐패시터 전압을 높게 되고 지령보다 높으면 유효전력을 높이도록 제어하게 된다.

PWM 발생에 있어서 기존의 전압원 또는 전류원 인버터와 달리 단 하나의 비교 삼각파에서 DC/AC 변환과 최대전력점 추종제어가 한꺼번에 이루어지기 때문에 서로 간섭을 받지 않도록 조절하는 것이 중요하다.

제어 흐름은 그림 4와 같다. 먼저 계통에서 3상 전압을 받아 정자좌표계로 변환 후 직류링크 전압에 의한 P^* 지령과 임의의 Q^* 지령을 받아 전류 지령을 만들고 이를 실제 전류와 비교하여 동기좌표계로 변환 후 제어를 한다. 제어기 출력은 동기좌표계 전압 지령으로서 좌표변환을 거치고 계통 전압의 전향 보상을 더하게 되면 최종적으로 PWM을 위한 전압 지령이 만들어진다. 이와 별개로 최대전력점 추종 제어를 위한 암단락 시

간은 오른쪽 아래와 같이 PV 어레이의 전압 전류의 정보를 읽어 P&O법을 이용하여 전류지령을 만들고 제어기를 거쳐 그에 상응하는 압단락 시간을 만들어낸다. 압단락이 이뤄지면 다이오드에 역 바이어스가 걸리고 PV 어레이의 전류는 LC 필터의 커패시터로 흐른다.

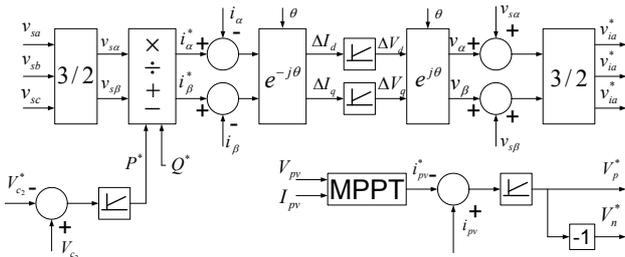


그림 4. 제어 흐름도
Fig. 4 Control flow

그림 5는 하나의 비교 삼각파에 MPPT 제어를 위한 지령전압과 DC/AC변환을 위한 지령 전압이 혼재하는 그림이며 아래 쪽에는 비교를 통해 만들어진 각 스위치 인가 펄스 파형을 그리고 있다.

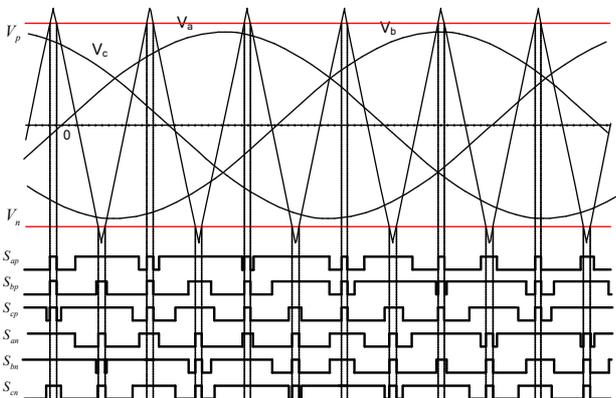


그림 5. 각 지령과 PWM 결과 파형
Fig 5. Reference Voltages and result PWM wave form

위 그림에서 알 수 있듯이 각 압단락은 모든 스위치가 온 또는 오프 상태일 때 일어나게 되어 활성 모드의 변환에는 영향을 끼치지 않는다.

2.3 모의 실험

PV어레이는 보간법에 의해 가상시뮬레이터를 구성하여 개방전압과 최대전력점 전압이 각각 308V, 250V 가 되도록 하였고 단락전류와 최대전력점 전류를 각각 44A, 40A가 되도록 하여 최대전력점에서 10kW를 생산하도록 설계하였다. 계통의 선간 전압은 220V로 단위역률이며, 인버터 출력이 PV어레이 출력과 동일하도록 PV어레이가 최대 전력을 낼 때 인버터 역시 10kW의 전력을 내도록 설계하였다.

그림 6은 모의실험에 의한 인버터와 PV어레이의 출력 파형이다. 인버터 각 상의 전류는 rms값은 26.27A 이다. 상전압의 rms 값이 126.9V 이므로 한 상의 전력은 3.3kW이며 전체 전력은 약 10kW임을 알 수 있다. 이 때 PV어레이의 출력 전압, 전류 역시 250V와 40A로 전력이 10kW로써 발전 된 전력

이 Z-소스를 통해 계통으로 공급 되고 있는 것을 알 수 있다.

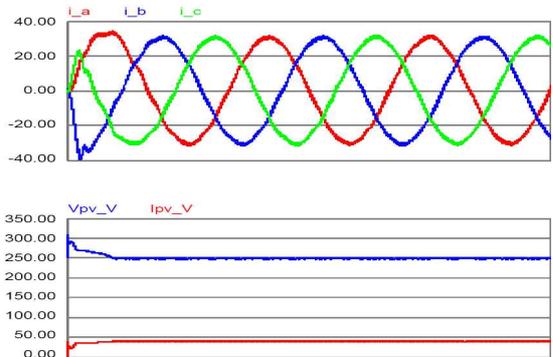


그림 6. 시뮬레이션 결과 파형 (출력전류, PV어레이 출력전압 · 전류)
Fig 6. Simulation result wave form (Grid Current, PV-array Voltage and Current wave form)

3. 결 론

본 논문에서 Z-소스 인버터를 이용한 계통연계형 PV 시스템용 PCS를 설계하고 모의실험을 하였다. 이렇게 구성된 Z-source 인버터는 다음과 같은 특징을 갖는다. 첫째, 하나의 비교 삼각파에서 DC/AC변환과 MPPT가 이뤄지고, 둘째, 스위치 수가 작아지며 셋째, 데드타임이 필요하지 않다. 그리고 넷째, 이러한 특징들을 가지면서 여섯 가지 스위칭 동작을 하는 기존 인버터의 장점을 유지하고 있다. 앞으로 실제 실험을 통해 신뢰도를 높여야할 것이다.

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 육성·지원사업(1-2007-0-261-01)에 의한 마이크로그리드연구센터 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Electric Power Research Institute, AP-3351 : Photovoltaic Power Systems Research Evaluation : A Report of the EPRI Ad Hoc Photovoltaic Advisory Committee, prepared by Strategies Unlimited, EPRI, Palo Alto, CA, 1983.
- [2] 박정욱, 이수원, 이성룡, “계통연계 분산전원시스템”, 전력전자학회지. vol 11. no 5. pp.46~50, 2006
- [3] H. Song, X. Liu, D. Jakobsen, et al. The MicroGrid: a Scientific Tool for Modeling Computational Grids. in IEEE Supercomputing (SC 2000). Nov. 4-10, 2000. Dallas, USA.
- [4] F. Z. Peng, “Z-source inverter”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 2, pp. 504-510, Mar./Apr. 2003
- [5] 윤중혁 “계통 연계형 PV 시스템의 분석 및 설계”, 경북대학교 대학원 석사학위 청구논문, 2005
- [6] Miaosen Shen, F. Z. Peng, “Operation Modes and Characteristics of the Z-Source Inverter with Small Inductance,” Proc. of IEEE IAS 2005, pp. 1253-1260.