

단상 계통연계형 태양광 발전시스템 인버터의 전류제어에 관한 연구

김태완, 전세봉, 류승표, 서광덕
 현대중공업 기술개발본부 기계전기연구소

A Study on the Current Control of the Grid-tied Single Phase Inverter for the Solar Energy Generation System

Kim Tae-Wan, Jeon Se-Bong, Ryu Seung-Pyo, Seo Kwang-Duk

Electro-Mechanical Research Institute, R&D Division, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.

ABSTRACT

대체에너지 시스템에서 필수적인 계통연계형 인버터는 LC필터를 거친 정현전압 출력에 계통과 연계용 인덕터를 연결하여 사용하여 왔으나, 최근 들어 인버터와 계통을 LC필터 없이 인덕터로만 계통과 연결하여 직접 전류를 제어하는 형태가 적용되고 있다. 또한 출력에 절연 변압기를 사용하던 기존방식과 달리 변압기가 없는 비절연형 인버터는 전류제어를 통해 계통과 직접연결하고, 부피감소와 원가절감을 이룰 수 있다.

본 논문에서는 저주파 절연변압기가 없는 3kW급의 태양광 발전시스템 시제품을 소개하고 단상계통과 연계한 전류제어 알고리즘의 실험결과를 통해 순시전류제어의 타당성을 확인한다.

1. 서 론

최근 석유 에너지자원의 고갈과 고유가로 대체에너지에 대한 관심과 투자가 집중되고 있다. 특히 국내에서도 정책적으로 계통연계형 태양광 발전시스템의 보급사업이 추진중에 있으며, 이와 더불어 계통연계형 태양광 발전시스템의 세부적인 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다.

현재 다양한 연구결과를 살펴보면 교류측에 절연 변압기를 생략한 방식이 주로 발표되고 있으며, 국내에서도 소형, 저가격화를 위해 저주파 절연변압기가 없는 방식을 정책적으로 추진하고 있다. 이러한 방식에는 크게 비절연형과 고주파 링크형으로 나뉘어 진다. 고주파 링크형은 파워소자가 많고 복잡할 수 있지만 태양전지측과 절연을 유지할 수 있어 가정용과 같이 안전이 무엇보다 필요한 곳에 적합할 것이다. 물론 최근 고주파 링크형은 다양한 형태로 연구가 되고 있어 단순하고 소형화될 것으로 전망된다. 비절연형 또한 최근 연구가 활발히

진행되고 있으며, 소형경량화, 저가화 및 고효율화를 이루기 위해 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 하지만 안정성 확보를 위해 복잡한 제어와 부가적인 보호회로를 필요로 하는 단점이 있다.^[1]

본 논문에서는 저주파 절연변압기가 없는 고주파 링크 절연형 시스템을 3kW급의 가정용으로 제작한 시스템을 소개하고 단상계통과 연계한 전류제어 알고리즘과 실험결과를 통해 적용한 전류제어의 타당성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 시스템의 구성

계통연계형 태양광 발전시스템은 그림 1과 같이 태양전지, DC/DC 컨버터 그리고 단상 인버터로 구성된다. DC/DC 컨버터는 태양전지의 전압을 고주파 스위칭과 승압형 트랜스포머를 이용하여 인버터에 일정 DC전압을 공급한다.^[2]

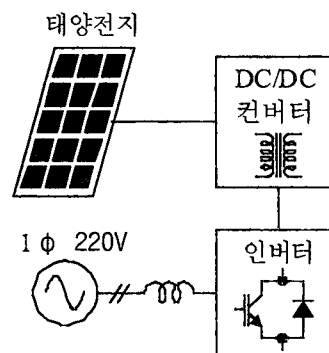


그림 1 계통연계형 태양광 발전시스템의 구성

인버터는 최대출력점 추종(MPPT)에 의하여 생성된 전류지령에 의하여 순시전류제어를 수행하며 이때 계통으로 태양에너지가 전달되어진다. 독립형

태양광 발전시스템과 달리 DC/AC 인버터는 교류 전압을 출력하는 출력전압제어를 수행하지 않고 직접 계통과 연결되어 계통과 단위역률의 교류 정현파 전류로 제어하게 된다.

DC/DC 컨버터는 MosFET Full-Bridge로 트랜스포머 승압형으로 구성하였으며 60kHz 스위칭 주파수로 운전하고 전류분담을 위해 두 대를 병렬로 사용하여 출력이 DC 360V 전압으로 제어되도록 하였다.

인버터는 IGBT를 사용하여 그림 2와 같이 구성하였다. 인버터는 단상 IGBT 승압형 컨버터와 동일한 구성으로, 전력의 흐름을 DC측에서 교류측으로 운전하여 발전하는 형태가 된다. 그러므로 DC측 전압은 최소한 교류출력전압의 최대전압보다 커야 제어가 가능하게 된다.

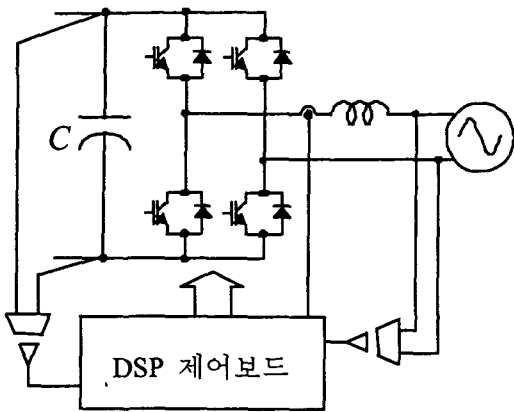


그림 2 계통연계형 단상 인버터의 구성

실제 제작된 계통연계형 인버터의 외관을 그림 3에 나타내었다. 기존 단독형으로 개발된 인버터를 계통연계형으로 출력결선만 수정하면 가능하도록 하였으며 소프트웨어로 단독형 또는 계통연계형을 선택할 수 있도록 하였다.

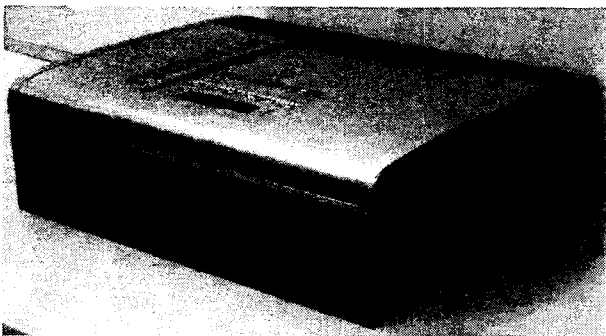


그림 3 태양광 인버터 시제품

2.2 계통연계형 인버터의 제어

2.2.1 단상 인버터의 모델

그림 4와 같은 단상 인버터는 다음의 식 (1)로 시스템의 방정식을 나타낼 수 있다.

$$v_i = L \frac{di_s}{dt} + v_s \quad (1)$$

즉, 계통전압 v_s 를 기준으로 인버터 전압 v_i 를 적절히 출력함에 따라 인덕터(L)에 전류 i_s 가 흐르게 되며 동시에 전력의 흐름이 결정되게 될 것이다.

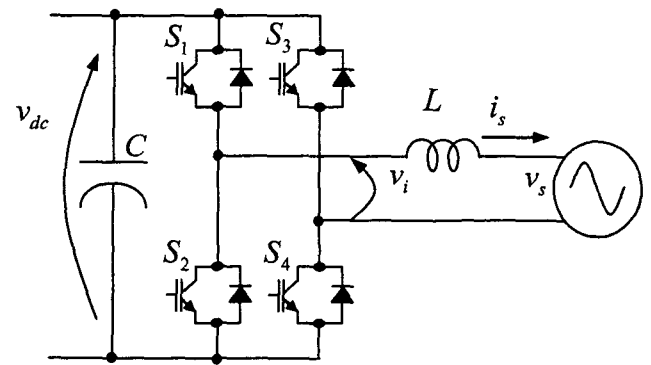


그림 4 단상 인버터의 회로도

2.2.2 단상인버터의 전류제어

위에서 설명한 바와 같이 발전을 위해서는 계통 전압과 인버터 출력전류가 동상을 유지하며 동일한 극성을 유지한다면 유효전력만을 제어할 수 있다. 기존에는 이와 같이 전력을 제어하기 위해서 전압 전류의 페이서를 이용하여 위상제어와 전압제어를 하였으나, 최근에는 순시 전류제어를 통해 유효전력을 제어하고 있다. 본 논문에서는 제어게인의 선정이 간편하고 과도특성이 우수한 예측전류제어를 적용하였다.^[3]

우선 식 (1)을 이산화 하면 다음과 같다.

$$V_i(k) = \frac{L}{T_s} [i_s(k+1) - i_s(k)] + V_s(k) \quad (2)$$

여기서 T_s 는 sampling time

이때 T_s 가 매우 작고 인버터의 전압변조가 이상적이라면 식 (2)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_i^*(k) = \frac{L}{T_s} [i_s^*(k+1) - i_s(k)] + V_s(k) \quad (3)$$

즉, 현재 k번째의 전류 $i_s(k)$ 에서 k+1번째에 전

류 지령 $i_s^*(k+1)$ 을 추종하기 위한 인버터의 출력 전압을 나타낸 것으로, 이때 전류 지령을 계통전압과 동상의 정현파로 발생시켜 단위역률이 되도록 한다.

식 (3)의 경우는 계통전압이 정현파임을 가정하고 근사화한 결과이지만 실제 계통전압은 고조파를 포함하는 경우가 대부분이므로 식 (3)은 수정되어야 한다. 고조파가 포함된 계통전압은 다음 샘플링에서의 전압값을 미리 계산 할 수가 없다. 이러한 경우에는 선형예측을 이용하여 k+1번째의 전압을 다음과 같이 예측할 수 있다.^[4]

$$V_s^*(k+1) = 2V_s(k) - V_s(k-1) \quad (4)$$

이때 한 샘플링 구간에 적용되는 평균전압은 다음과 같다.

$$v_{s_avg}^*(k) = \frac{1}{2} [3v_s(k) - v_s(k-1)] \quad (5)$$

이를 적용하여 최종 예측전류제어 연산식을 구하면 다음과 같다.

$$i_s^*(k) = \frac{L}{T_s} [i_s^*(k+1) - i_s(k)] + v_{s_avg}^*(k) \quad (6)$$

그림 5에 나타낸 것과 같이 예측전류를 위해서 계통전압과 전류를 궤환하여, 식 (6)을 사용하여 인버터의 전압 지령치를 구하고 DC전압에 따른 PWM을 통해 인버터 출력전압을 만들어 낸다. 이때 전류지령은 태양전지의 MPPT(Maximum Power Point Tracking)를 통해 연산된 출력전력(P_{out}^*)으로부터 계통전압과의 역률을 단위역률로 가정하여 구한다.

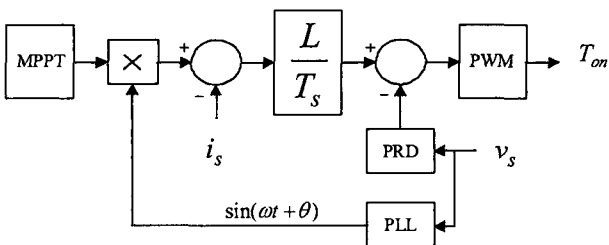


그림 5 단상 인버터의 전류제어 블록도

2.2.3 단상인버터의 PWM 발생

인버터의 PWM발생은 단방향(Unipolar) 스위칭 방식을 적용하였으며, 스위칭 시간은 다음과 같이

결정된다.

$$S1 \text{ on 시간} : \frac{0.5 V_{inv}^* T_s}{V_{dc}} + T_{offset}$$

$$S3 \text{ on 시간} : \frac{-0.5 V_{inv}^* T_s}{V_{dc}} + T_{offset}$$

$$T_{offset} = \frac{T_s}{4}$$

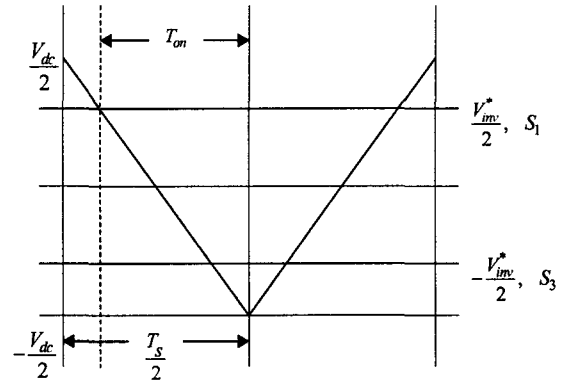


그림 6 단상 인버터의 스위칭 시간

2.3 실험결과

전류제어 특성을 확인하기 위해 3kW급 태양광 발전용 인버터에 적용하여 실험하였다. 제어기는 TMS320C31을 사용하여 구현하였으며, DC/DC 컨버터와 인버터를 동시에 제어할 수 있도록 하였다. 입력전원은 실제 태양전지를 설치하여 이용하였으며, 계통전원은 상용 220V를 사용하였다. 실험에 적용된 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시스템 파라미터

항목	값
AC Inductor(L)	2.5[mH]
DC Capacitor(C)	4000[μF]
V _{dc} 설정값	360[V]
계통전압(V _s)	220[V]
스위칭 주파수(f _{sw})	9000[Hz]

그림 7은 계통전압과 인버터 출력전류를 나타낸 것으로 역률이 1에 가깝고 파형은 정현파와 유사하게 제어되고 있음을 보여준다.

사용된 입력전원은 일반적으로 여러 가지 정류기 부하들이 많이 연결되기 때문에 고조파를 포함하고 있을 뿐만 아니라 다이오드의 전류(Commutation)

참 고 문 헌

- [1] R.L. Steigerwald, A. Ferraro, F.G. Turnbull, "Application of Power Transistors to Residential and Intermediate Rating Photovoltaic Array Power Conditioners", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 1A-19, pp. 254-267, March/April 1983.
- [2] 류승표, 전세봉, 민병권, 서광덕, "태양광 발전용 전력변환 장치에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집 II, pp. 961-964, 2003.7.
- [3] O. Stihl and B. T. Ooi, "A Single-phase Controlled-current PWM Rectifier", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 3, pp. 453-459, July 1988.
- [4] Y. Nishida, O. Miyashita, T. Haneyoshi, H. Tomita, A. Maeda, "A Predictive Instantaneous-Current PWM Controlled Rectifier with AC-Side Harmonic Current Reduction", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 44, No. 3, pp. 337-343, June 1997.

시 발생하는 Notch현상이 많이 나타난다. 이는 전류제어에 영향을 주어 전류를 왜곡시켜 THD를 증가시키는 결과를 가져온다.

그림 8은 전류 지령치를 스텝 변경하였을 경우 출력전류의 응답을 보여준다. 그림에서 보듯이 예측전류제어의 응답특성이 매우 뛰어난 것을 볼 수 있다.

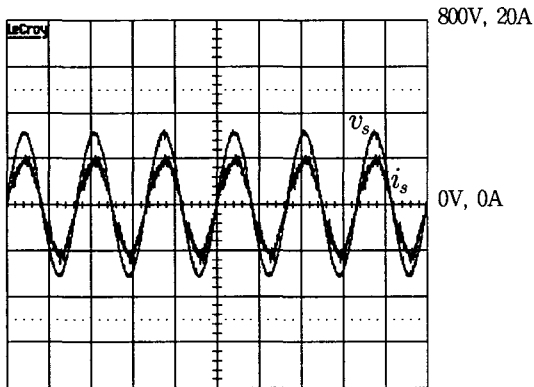


그림 7 계통전압(v_s) 및 인버터 출력전류(i_s)

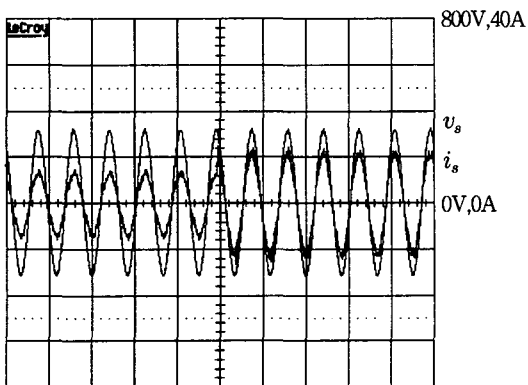


그림 8 전류지령 변화(4A→7A)에 따른 응답특성

3. 결 론

본 논문에서는 비절연형의 계통연계형 단상 인버터의 제어에 순시 예측전류제어를 적용하고 시제품에 탑재하여 실증시험을 통해 타당성과 신뢰성을 검증하였다.

예측전류제어는 전류지령에 따라 신속한 응답특성을 나타내며, 실제 계통전원이 정현파가 아닌 경우에도 계통전압의 근사예측을 통하여 출력전류를 정현파에 가깝게 제어하여 전류의 THD를 최소화할 수 있었다.

예측전류제어는 단순하고 제어게인의 선정이 용이하여 쉽게 구현될 수 있어 계통연계형 인버터에 많이 적용될 것이다.