

계통연계형 단상 인버터 무효전력 주입전략

임정우, 류재섭, 배채윤
엘에스 일렉트릭

Reactive Power Injection Strategy in Single Phase Grid tied Inverter

JeongWoo Lim, Jaeseop Ryu, ChaeYoon Bae
LS ELECTRIC

ABSTRACT

본 논문은 단상 계통연계형 인버터를 이용하여 안정적으로 유효전력제어와 무효전력을 주입하기 위한 전력제어 전략을 소개한다. 내측 계통 전류제어기를 포함하는 인버터 직류링크 전압제어기를 이용하여 실시간 출력 유효전력량을 추정하고 이를 바탕으로 입력받은 무효전력량을 제어한다. 단상 계통연계형 인버터의 기본 제어블록과 제안하는 전력제어를 포함하는 전체 시스템 제어블록을 도시하였다. 본 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험이 진행되었다.

1. 서 론

최근 화석연료의 지속적인 사용으로 인한 환경오염 문제가 대두되면서 탄소에 대한 국제적인 규제가 강화되었다. 이에 신재생에너지에 대한 수요 및 개발이 활발해짐에 따라 여러 종류의 에너지원의 계통연계가 가능도록 강인한 전력배전망이 요구되고 있다. 전력배전망 또는 계통의 안정성을 높이기 위한 대표적인 방법은 계통에 적절한 무효전력을 주입하여 전압 불안정과 선로 과부하 등의 문제를 예방하는 것이다.^{[1][2]} 본 논문에서는 인버터의 정격범위내에서 최대 무효전력 보상하기 위한 무효전력 제한범위를 설정하고 보다 간단한 방법으로 무효전력을 주입할 수 있는 무효전력 보상전략을 제안한다.

2. 본 론

2.1 인버터 출력제한

반도체 스위칭소자로 구성되어 있는 인버터는 정격 용량을 가지고 있다. 정해진 정격용량이상으로 구동하게 되면 기능저하 또는 영구적 손실에 이르게 된다. 따라서 인버터의 정격용량을 고려한 적절한 제어영역을 정의하고 정의된 영역에서 구동하는 것이 중요하다. 그림 1은 인버터와 연계되어 있는 계통 전압 v_g 와 동기하고 있는 p-q축 동기좌표계를 보여준다. 여기서 인버터의 유효한 전류용량을 원형의 전류영역 A로 나타낼 수 있다.

$$v_g = V_g \sin(\phi) \tag{1}$$

$$\vec{i}_g = \vec{i}_p + \vec{i}_q \tag{2}$$

2.2 최대무효전력 전류산정

인버터를 정상적으로 동작시키기 위해서는 부하변동에 따라 적절한 유효전력을 공급해야 한다. 따라서 인버터는 유효전력을 우선하는 무효전력 공급전략을 설계해야 한다. 그림 1에서 p축은 계통전압 v_g 와 동기하고 있기 때문에 V_g 를 상수로 가정하면 p축 전류 i_p 는 유효전력량과 선형이고 q축 전류 i_q 는 무효전력과 선형인 변수로 정의할 수 있다. 따라서 i_p (유효전력량)이 정해지게 되면 인버터의 전류영역 A의 원주를 따라 공급할 수 있는 최대 i_q (무효전력량)을 산정할 수 있다.

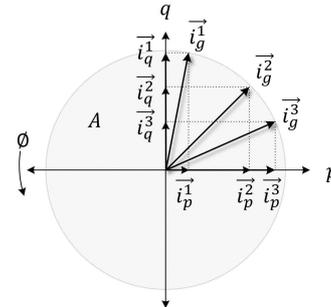


그림 1 계통전압과 동기하고 있는 p-q축과 전류출력영역
Fig. 1 A synchronized p-q axis with grid voltage phase and output current area

2.3 유/무효전력 전류제어

그림 2는 인버터의 유/무효 전력을 적절하게 제어하기 위하여 본 논문에서 제안하는 시스템 제어블록도를 보여주고 있다. 기본적으로 인버터의 직류링크를 제어하는 전압제어기와 계통 전류를 제어하는 전류제어기로 구성되어 있으며, 인버터가 출력할 수 있는 최대 무효전력량을 산정하기 위한 실시간 유효전력 추정블록과 무효전력 제한기가 포함되어 있다. 유효전력량은 전압제어기의 출력 i_p^* 가 실제계통에 흐르는 유효전류와 같다고 가정하여 아래 식(3)을 통해 산정할 수 있다.

$$P_{ac}^c = v_g^* i_g \approx \frac{V_g^* i_p^*}{2} \tag{3}$$

$$P_{ap} = \sqrt{P_{ac}^2 + P_{re}^2} \tag{4}$$

$$\vec{i}_g^* = [i_p^* \ i_q^*]^T \begin{bmatrix} \sin(\phi) \\ \cos(\phi) \end{bmatrix} \tag{5}$$

추정된 유효전력량 P_{ac}^e 와 식(4)를 이용하여 인버터가 출력할 수 있는 최대 무효전력량을 산정하여 최대 무효전류량 i_q^{lmt} 를 정의할 수 있다. 그림 3은 인버터의 정격용량에 따라 출력하는 무효전력량을 제한하기 위한 그림 2의 무효전력제한기 블록을 자세하게 보여주고 있다. 여기서 i_q^{**} 는 인버터가 출력해야 하는 무효전력 전류지령이다.

이렇게 계산정한 무효전력 전류지령 i_q^{**} 는 식(5)를 통하여 정지좌표에서의 i_g^* 를 정의할 수 있다.

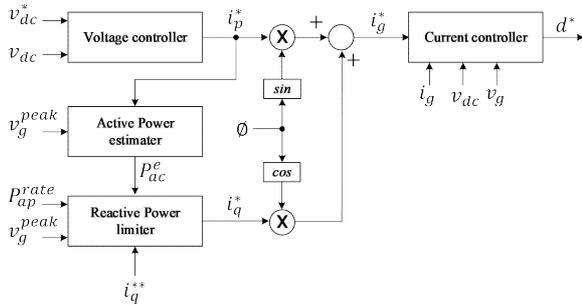


그림 2 제안하는 유/무효 전력 제어블록 다이어그램
Fig. 2 A proposed active/reactive power control block diagram

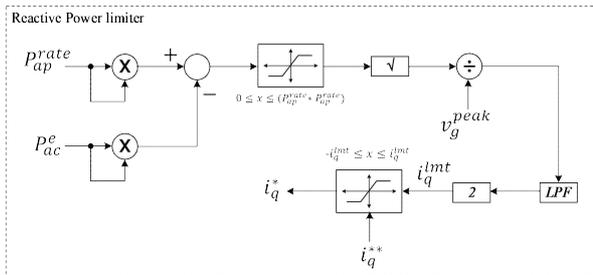


그림 3 무효전력 제한기 블록
Fig. 3 A reactive power limiter block

2.3.1 시뮬레이션 결과

그림 4는 제안하는 전력제어 알고리즘을 적용한 계통 연계형 인버터의 시뮬레이션 출력파형을 보여주고 있다. 여기서 I_o 는 인버터 직류링크 출력전류이고 $P_{ap}, P_{ac}, P_{re}, P_{re}^{lmt}$ 는 각각 피상전력, 유효전력, 무효전력, 출력가능한 무효전력량이다. ‘rate’, ‘e’, ‘sm’은 각각 정격, 추정, 측정값을 의미한다.

제안하는 알고리즘 검증을 위하여 무부하 운전중인 인버터에 t_0 에서 인버터 정격 80%의 무효전력 지령을 인가하였고, 이후 $t_1 \sim t_2$ 동안 정격 100%의 부하를 선형적으로 증가시켰다. t_1 에서 부하가 증가함에 따라 유효전력 추정값이 증가하고 기존에 출력하던 무효전력량과 증가하는 유효전력량이 인버터 정격용량을 초과함에 따라 무효전력 지령을 강제로 제한하며 인버터의 안정성을 확보하고 있다. 최종적으로 t_2 에서 유효전력이 인버터 정격의 100%가 됨에 따라 출력가능한 무효전력량이 0으로 수렴함을 확인할 수 있다. 마지막 파형은 계통전압과 전류의 위상을 이용하여 역률을 도시한 파형으로 초기 무효전력만 인가했을 경우에는 0에서 수렴하다가 부하를 증가함에 따라

1(단위역률)로 이동하고 있다. 여기서 θ 는 전류의 위상이다.

2.3.2 실험 결과

그림 5는 제안하는 전력제어 알고리즘을 적용한 계통 연계형 인버터의 출력파형을 보여주고 있다. 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 무효전력과 유효전력을 인버터의 정격의 약 90%를 인가하고 그림 5의 t_p 에서 인버터의 정격이상으로 부하를 인가하였다. 이때 인버터의 안정적 운전을 위하여 i_q^{lmt} 가 감소하면서 실제 q축 전류지령 i_q^* 를 강제적으로 제한하는 것을 확인할 수 있다.

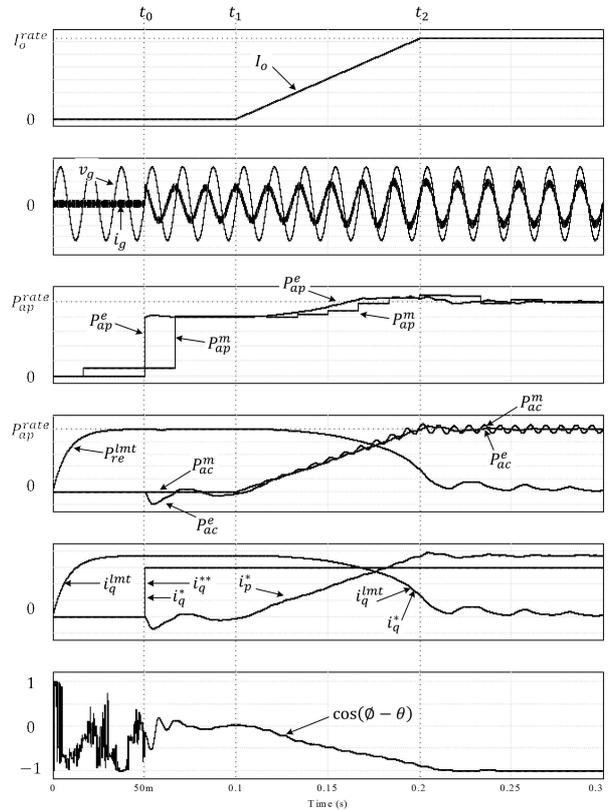


그림 4 제안하는 전력제어 알고리즘 시뮬레이션 결과 파형
Fig. 4 Simulation result waveform of proposed power control algorithm

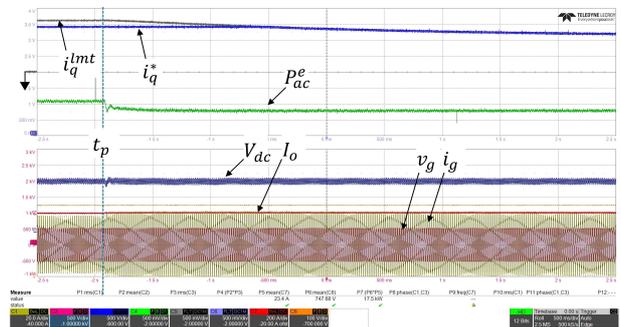


그림 5 제안하는 전력제어 알고리즘 실험결과 파형
Fig. 5 Experiment result waveform of proposed power control algorithm

3. 결 론

본 논문에서는 단상 계통연계형 인버터에서 안정적으로 무효전력을 주입하기 위한 새로운 전략을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 병행하였다. 제안하는 알고리즘은 제어기의 출력을 이용하여 실시간으로 출력하고 있는 유효전력을 추정하기 때문에 제어기의 구성 및 제어기 대역폭에 따라 성능차이가 나타날 수 있다. 또한 그림 5의 실험파형에서 보듯이 부하가 빠르게 인가되었음에도 i_q^{int} 는 수렴이 비교적 늦은 것을 확인할 수 있다. 이는 알고리즘의 신뢰성을 향상시키기 위해 적용한 저역통과필터의 영향으로 분석된다. 따라서 측정오차, 추정오차, 필터등으로 인한 오차들의 영향을 반영하기 위해서는 적용하는 환경에 따라 인버터의 정격용량을 90%~80% 이하로 하향설정하여 운용하는 것이 권장된다.

본연구는산업통상자원부(MOTIE)와한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20210501010020)

참 고 문 헌

[1] 심우식, et al. "배전선로용 단상 무효전력 보상기의 무효전력제어." 전력전자학회논문지 25.2 (2020): 73-78.

[2] Sarkar, Mohammad Nazmul Islam, Lasantha Gunaruwan Meegahapola, and Manoj Datta. "Reactive power management in renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization algorithms." Ieee Access 6 (2018): 41458-41489.