

# 듀얼벅 인버터의 무효전력 보상을 위한 모듈레이션 기법

한상훈, 황덕환, 조영훈  
 건국대학교 전력전자연구실

## Modulation Technique for Reactive Power Compensation by Dual-Buck Inverter

Sanghun Han, Duck-Hwan Hwang, Younghoon Cho  
 Power Electronics Lab. Konkuk Univ.

### ABSTRACT

듀얼벅 인버터는 효율이 높고 누설전류가 작다는 장점을 가지지만, 단방향 전력 전달 특성으로 인해 적용범위에 한계가 존재한다. 이에 본 논문에서는 듀얼벅 인버터의 무효전력 보상을 위한 새로운 모듈레이션 기법을 제안한다. 제안하는 모듈레이션 기법을 적용할 경우 회로를 수정하지 않고 듀얼벅 인버터의 장점을 유지한 채 무효전력 출력이 가능하다. 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

계통 연계형 태양광 인버터는 태양광 패널의 직류 전압 및 전류를 교류로 변환하여 계통으로 전달하기 위해 사용된다. 태양광 패널은 유효전력만 생성하므로, 단방향 전력 전달 특성을 가진 듀얼벅과 H5, HERIC 등의 회로를 적용할 수 있다.<sup>[1]</sup> 이중 듀얼벅 인버터는 높은 효율과 작은 누설전류라는 장점을 가진다.<sup>[2]</sup> 이러한 장점에도 불구하고 최근 계통으로 투입되는 태양광 발전 시스템이 증가함에 따라 태양광 인버터의 무효전력 보상 능력을 요구하고 있어 듀얼벅 인버터 회로의 적용이 제한되고 있다. 따라서 본 논문에서는 듀얼벅 인버터의 회로 수정 없이 무효전력 출력이 가능한 새로운 모듈레이션 기법을 제안한다.

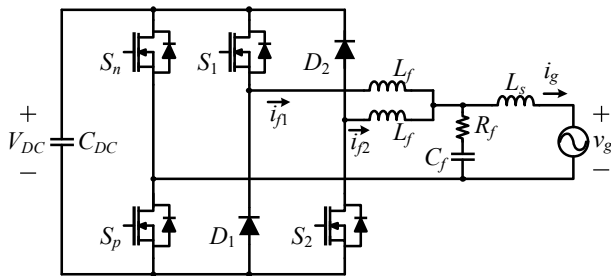


그림 1 듀얼벅 인버터 회로  
 Fig. 1 Dual-buck inverter topology

### 2. 무효전력 보상을 위한 모듈레이션 기법

#### 1.1 절 듀얼벅 인버터

듀얼벅 인버터는 다양한 회로가 존재하며, 본 논문에서는 연구한 회로는 그림 1과 같다. 듀얼벅 인버터는 하나의 양방향 스위칭 레그와 두개의 단방향 스위칭 레그로 구성된다. 기존 모듈레이션 기법은 듀티 지령  $d$ 의 주파수와 동일하게  $S_p$ 와  $S_n$ 이 저주파로 상보 동작한다.  $S_1$ 은  $d$ 가 양의 값일 때,  $S_2$ 는  $d$ 가 음의 값일 때 고조파로 스위칭한다. 따라서  $d$ 의 한 주기동안 하나의 스위치만 고조파로 동작하므로 스위칭 손실이 다른 인버터들에 비해 현저

히 감소한다. 또한 단방향 스위칭 레그의 다이오드를 역회복 전류가 없는 SiC 소자로 사용할 경우 shoot-through 현상 또한 줄어든다.<sup>[2]</sup> 기존 모듈레이션 기법을 적용하여 단위 역률 운전 시 DC-link 전압  $V_{DC}$ 와 계통전압  $v_g$ ,  $d$ 의 관계는 식 (1)과 같다.<sup>[2]</sup> 따라서 단위 역률 운전 시  $d$ 는  $v_g$ 와 같은 정현파로 제어되며, 이는 일반 제어기의 대역폭으로 충분히 제어가 가능하다.

$$d = v_g / V_{DC} \quad (1)$$

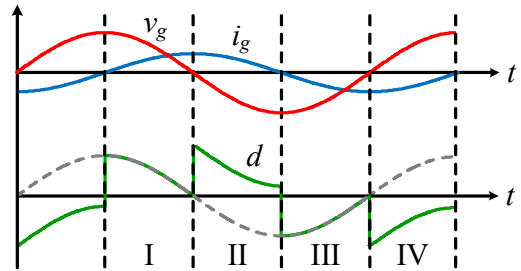


그림 2 무효전력 출력 시 계통 전압, 계통 전류 및 듀티  
 Fig. 2 Grid voltage, grid current and duty under reactive power condition

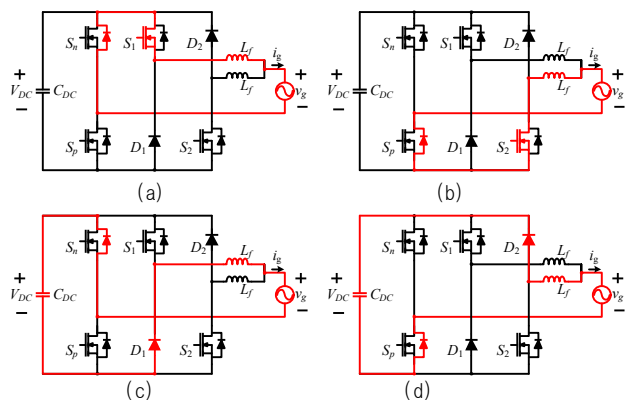


그림 3 무효전력 출력 시 동작 모드  
 Fig. 3 Operating mode under reactive power condition

그림 2는 무효전력 출력 시  $v_g$ 와  $i_g$ ,  $d$ 를 나타낸다. 구간 I와 III은  $v_g$ 와  $i_g$ 의 극성이 같고, 기존 듀얼벅 인버터의 동작과 동일하다. 구간 II와 IV는  $v_g$ 와  $i_g$ 의 극성이 다르며, 이때 전류의 경로는 그림 3과 같다. 해석의 편의를 위해  $L$  필터를 고려하였다. 구간 II에서의 동작을 살펴보면  $S_1$ 이 on 되었을 때 그림 3(a)와 같고,

$S_1$ 이 off 되었을 때 그림 3(c)와 같다. 계통의 주파수보다 스위칭 주파수가 매우 크다는 것을 고려하여, 스위칭 주파수의 한 주기 동안  $V_{DC}$ 와  $v_g$ ,  $d$ 의 관계를 volt-second balance 원리로 해석하면 식 (2)와 같고, 이는 구간 IV에서도 동일하게 해석이 가능하다.

$$d = 1 - v_g / V_{DC} \quad (2)$$

따라서 무효전력 출력 시 구간별 듀티 지령은 그림 2의  $d$ 와 같다. 그림 2의  $d$ 는 일반 제어기의 대역폭보다 높은 주파수의 고조파들을 포함한다. 따라서 기존 모듈레이션 기법을 사용 시 제어기의 대역폭을 최대한 확보하여도 그림 2와 같은 듀티 지령을 제어하기는 어렵다.

### 1.2 절 제안하는 모듈레이션 기법

무효전력 출력 시 급변하는 듀티를 모듈레이션을 통해 해결한다면 제어기가 보상해야 하는 고조파가 감소한다. 따라서 그림 4와 같이 모듈레이터를 변경하였다. 제어기의 출력인  $d$ 는 모듈레이션을 위한  $d_{offset}$ 과 더해진다.  $d_{offset}$ 은  $i_g$  지령과  $d$ 의 극성이 같을 경우 0, 극성이 다르며  $i_g$  지령이 양의 값이면 1, 극성이 다르며  $i_g$  지령이 음의 값이면 -1이다.

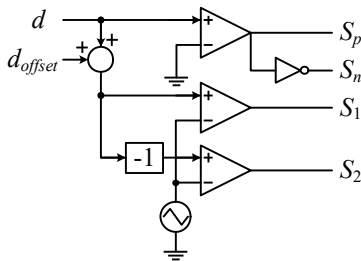


그림 4 제안하는 모듈레이터  
Fig. 4 Proposed modulator

### 3. 시뮬레이션

제안하는 모듈레이션 기법을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 진행하였다. 듀얼벅 인버터의 전류 제어기는 일반적인 계통 연계형 인버터에서 사용하는 비례 공진 제어기를 사용하였다. 시스템 파라미터들은 표 1과 같다. 그림 5는 3kVA 조건에서의 시뮬레이션 결과이다. 그림 5(a), (b)는 각각 30° 진상 전류, 30° 지상 전류를 제어한 결과이다. 두 경우 모두 무효전력을 출력하지만, 영전류 부근에서 왜곡이 나타난다. 이는 그림 2에서와 같이  $v_g$ 와  $i_g$ 의 극성에 따라 나뉘는 실제 구간과 모듈레이터가 판단한 구간 사이 발생하는 위상차로 인해 나타난다. 하지만 THD 계산 시 약 3.32%로 KS C 8564에서 제시한 5% 기준과 비교하였을 때 허용 가능한 왜곡임을 확인하였다.

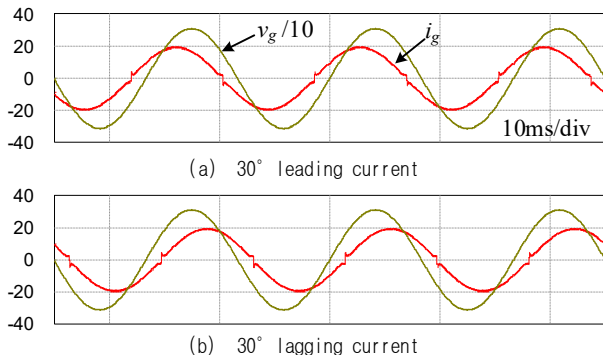


그림 5 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 Simulation results

표 1 시스템 파라미터  
Table. 1 System parameters

$v_g$	220V	$L_f$	0.6mH
$V_{DC}$	380V	$L_s$	0.33mH
$f_g$	60Hz	$C_f$	1 $\mu$ F
$f_{sw}$	30kHz	$R_f$	3.33 $\Omega$

### 4. 실험

실험은 1.5kVA 조건에서 진행하였으며, 결과를 그림 6에 나타냈다. 실험에서 사용한 파라미터들은 시뮬레이션에서 사용한 표 1과 같다. 그림 6(a), (b)는 각각 30° 진상 전류, 30° 지상 전류를 제어한 결과이다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 영전류 부근에서 전류 왜곡이 나타나며, 실험에서는 영전압 부근에서도 전류의 왜곡이 발생한다. 이는 실제 실험에서 나타나는 시지연으로 인해 나타나는 문제로, 추후 연구를 통해 개선이 필요한 사항이다. 이를 제외한 결과를 분석 시 시뮬레이션과 동일하며, 제안하는 모듈레이션 기법을 통해 듀얼벅 인버터를 이용한 무효전력 보상이 가능함을 알 수 있다.

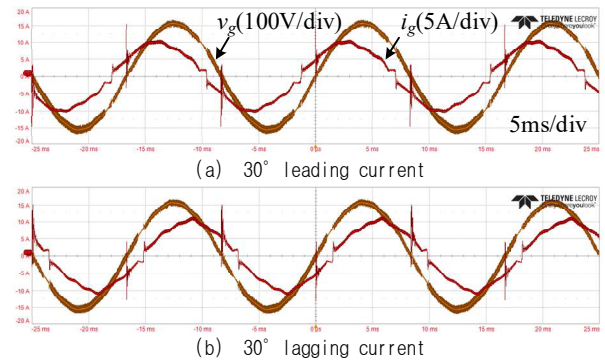


그림 6 실험 결과  
Fig. 6 Experimental results

### 5. 결론

듀얼벅 인버터는 높은 효율과 작은 누설 전류를 가진다는 장점에도 불구하고 단방향 전력 전달 특성으로 인해 활용이 제한되었다. 본 논문에서는 듀얼벅 인버터의 회로를 변경하지 않고, 기존의 장점을 유지한 채 무효전력 보상이 가능한 새로운 모듈레이션 기법을 제안하였다. 또한 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 이로 인해 기존에 단위 역률 운전 시스템으로 제한되었던 듀얼벅 인버터의 적용 범위가 폭넓게 확장될 것으로 기대된다.

본 논문은 중소벤처기업부에서 지원하는 2017년도 산학연협력 기술개발사업(NO. C0511847)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No.20174030201660)

### 참고 문헌

- [1] T. K. S. Freddy, J. H. Lee, H. C. Moon, K. B. Lee and N. A. Rahim, "Modulation Technique for Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters With Reactive Power Capability," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 9, pp. 6989-6999, Sept. 2017.
- [2] Y. Cho, "Dual-buck residential photovoltaic inverter with a high-accuracy repetitive current controller", Renew. Energy, vol. 101, pp. 168-181, 2017.