

# 클램핑 다이오드를 갖는 ARCP 인버터의 성능 분석

## Performance Analysis for Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter with Clamping Diodes

이 윤 석\* · 김 재 혁\* · 한 병 문†  
(Yoon-Seok Lee · Jae-Hyuk Kim · Byung-Moon Han)

**Abstract** - This paper proposes a new auxiliary resonant commutated pole (ARCP) inverter which has a modified auxiliary circuit. The proposed auxiliary circuit includes two auxiliary IGBT switches, an LC resonant circuit, and two clamping diodes. In order to analyze the performance of proposed ARCP inverter, computer simulations with PSCAD, and hardware experiments were carried out. Through analyzing the experimental results, it is known that the proposed ARCP inverter offers efficiency improvement of 1.5% compared with the hard-switching inverter.

**Key Words** : Auxiliary resonant commutated pole (ARCP) inverter, Auxiliary switches, LC resonant circuit, Clamping diodes

### 1. 서 론

인버터는 산업용 구동장치, 신재생에너지 발전, 전기자동차 추진장치, 엘리베이터 등에서 DC 전력을 AC 전력으로 변환하는데 광범위하게 이용되고 있다. 따라서 인버터의 전력변환 효율을 증대하는 것은 전체 시스템의 에너지절감 측면에서 매우 중요한 요소이다.

인버터의 출력전압을 형성하는 가장 보편적인 모듈레이션 방식이 PWM (Pulse Width Modulation)인데, PWM의 경우 통상 스위칭 주파수가 높아, 반도체 스위치에서 발생하는 손실의 대부분은 스위칭 시 발생하고, 도통 시 발생하는 손실은 상대적으로 상당히 적다. 따라서 인버터의 효율을 높이기 위해서는 스위칭 손실을 최소화하는 방법이 필요하다.

스위칭 손실을 최소화하기 위해 DC 단에 보조회로를 병렬 또는 직렬로 삽입하여 영전압 스위칭(ZVS: Zero Voltage Switching) 또는 영전류 스위칭(ZCS: Zero Current Switching)에 의한 다양한 소프트 스위칭 방식이 제안되었다[1]-[6]. 이들 방식 중 가장 보편적인 것이 2개 IGBT와 Diode, LC 공진회로, 그리고 별도의 IGBT로 구성된 병렬공진 소프트 스위칭 인버터이다. 그러나 이들 소프트 스위칭 인버터의 단점은 추가되는 소자가 너무 많아 비용이 크다는 것이다.

이러한 단점을 보완할 수 있는 토폴로지로서 인버터의 DC 전압 중앙점과 주스위칭 교류 출력점 사이에 보조회로를 장착한 Auxiliary Resonant Commutated Pole (ARCP) 인버터가 제안되

었다. ARCP 인버터의 보조회로는 2개의 IGBT 스위치와 한 개의 인덕터, 그리고 주스위칭 양단에 위치하는 2개의 커패시터로 구성되어 있다[7]. 보조스위칭과 주스위칭간의 On/Off 상태에 따라 크게 3가지의 동작상태를 보인다. 첫 번째로는 부하전류가 주스위칭에 병렬로 연결된 다이오드를 통해 프리윙링하는 동작, 두 번째로 공진리액터로 흐르는 전류와 부하전류간의 크기 차이에 따른 공진커패시터의 충/방전, 마지막으로 주스위칭의 ZVS 환경에서 동작시, 공진커패시터의 충/방전에 따른 LC 공진회로에 흐르는 공진전류이다. ARCP 인버터는 보조회로의 구성이 간단하고 측정된 효율이 충분히 높으나, 보조 IGBT 스위칭 양단에 고주파 과도전압이 나타나고, 이 과도전압은 보조 IGBT 스위칭의 수명에 악영향을 초래한다. 이러한 단점 때문에 ARCP 인버터는 산업계에서 활용이 잘 안되어 왔다.

ARCP 인버터의 이러한 단점을 개선하고자 단상 풀-브리지 인버터를 대상으로 기존 ARCP 인버터의 보조회로와 동일한 구조에서 클램프 다이오드를 장착한 방식이 제안되었다[8]. 또한 몇 가지 새로운 구조의 보조회로를 갖는 ARCP 인버터가 참고문헌 [9]-[11]에 기술되어 있다. 그러나 이들 보조회로는 구성이 다소 복잡한 단점을 갖는다.

본 논문에서는 두 개의 IGBT 스위칭, LC 공진회로, 그리고 2개의 클램프 다이오드를 장착한 새로운 구조의 ARCP 인버터를 제안하고 그 동작과 성능을 이론적인 분석과 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션으로 확인하였다. 또한 하드웨어 구현 타당성을 확인 할 목적으로 3상 380V/5kVA 용량의 프로토타입을 실험실에서 제작하여 실험을 실시하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 소프트 스위칭의 효과를 추정할 목적으로 먼저 인버터의 손실을 이론적으로 분석하였다. 3장에서는 제안하는 ARCP 인버터의 구성과 동작을 소개하였다. 4장에서는 제안하는 ARCP 인버터의 동작과 성능을 확인하는 시뮬레이션

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea.

E-mail: erichan@mju.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea  
Received : August 31, 2018; Accepted : November 27, 2018

분석에 대해 기술하였다. 5장에서는 제안하는 ARCP 인버터의 프로토타입 제작과 실험 결과에 대해 기술하였고 6장에서는 시뮬레이션과 실험 결과로 판단한 결론에 대해 기술하였다.

## 2. 인버터의 손실분석

본 논문에서는 소프트스위칭을 적용하여 기존 하드스위칭인버터의 손실을 최소화하는 것을 연구 목표로 하고 있다. 실제 인버터 토폴로지는 2-레벨, 3-레벨, 멀티-레벨 등 다양하나, 본 논문에서는 2-레벨 반브리지 인버터를 대상으로 하드스위칭 방식과 제안하는 ARCP 소프트스위칭 방식의 효율을 비교할 예정이다.

하드스위칭 인버터와 소프트스위칭 인버터의 효율을 정량적으로 분석한 내용이 참고문헌 [12]에 상세하게 기술되어 있다. 이 참고문헌에서 2-레벨 인버터를 대상으로 정격 출력이 100kVA, 직류 전압이 750V, 그리고 부하역률이 0.8인 조건에서 손실분석을 실시하였다. 이때 스위칭 소자로는 인버터의 정격 용량과 직류 전압을 고려하여 Fuji 사의 1200V, 300A IGBT, 2MBI300UC-120을 대상으로 하였다.

2-Level 인버터의 주된 손실은 스위칭 소자의 도통손실 (Conduction Loss)와 스위칭손실(Switching Loss) 그리고 필터리액터에 의한 손실이다. IGBT의 제조사에서 제공하는 데이터 시트는 도통 전압강하에 대한 정보가 포함되어있어, IGBT의 도통손실은 식 (1)을 통해 계산 가능하다. 일정한 입/출력 전압조건에서 부하전력이 증가함에 따라 부하전류  $I_{max}$ 가 증가함을 의미하며, 아래 수식에서 보이는 것과같이 도통손실 또한 증가함을 의미한다. 이에 관련된 부하전력량에 따른 도통손실값은 그림1에서 확인할 수 있다.

$$P_{cond}^{loss} = \frac{I_{max}(V_{CE} + V_D)}{\pi} + \frac{mI_{max}\pi}{4}(V_{CE} + V_D)\cos\varphi \quad (1)$$

여기서,  $I_{max}$ 는 부하전류의 최대치,  $V_{CE}$ 는 ON-상태 IGBT 전압,  $V_D$ 는 ON-상태 다이오드 전압,  $m$ 은 모둘레이션 인덱스,  $p$ 는 부하 역률값.

한편 스위칭 손실은 IGBT Data Sheet로부터 도출이 가능한데 식 (2)와 같이 표현 가능하다[12].

$$P_{switching}^{loss} = 2f_c \left\{ \sum_{n=1}^{n=\frac{\varphi}{2\pi} \frac{f_s}{f_c}} \left[ E_{on}i \frac{n}{f_s} + E_{rr}i \frac{n}{f_s} + E_{off}i \frac{n}{f_s} \right] \right\} + 2f_c \left\{ \sum_{n=\frac{\varphi}{2\pi} \frac{f_s}{f_c}}^{n=\frac{f_s}{2f_c}} \left[ E_{on}i \frac{n}{f_s} + E_{rr}i \frac{n}{f_s} + E_{off}i \frac{n}{f_s} \right] \right\} \quad (2)$$

여기서,  $f_s$ 는 스위칭 주파수,  $f_c$ 는 캐리어 주파수,  $E_{rr}$ 는 역회복 (Reverse recovery) 에너지 상수,  $E_{on}$ 은 턴-온 (Turn-on)시 에너지 상수,  $E_{off}$ 는 턴-오프 (Turn-off) 에너지 상수.

그림 1은 데이터 시트에서 얻은 값을 위의 식 (1)과 (2)를 통해 구한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 도통손실은 최대출력 100kVA에서 0.8kW인 반면 스위칭손실은 3.8kW 로 스위칭손실이 도통손실에 비해 아주 큰 것을 알 수 있다. 따라서 인버터의 손실을 저감하기 위해서는 스위칭손실을 저감해야 됨을 알 수 있다.

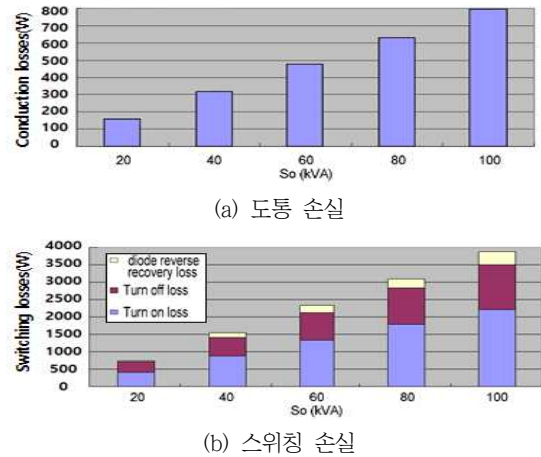


그림 1 인버터 IGBT 스위치의 도통과 스위칭 손실[12]

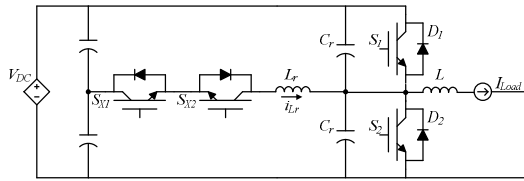
Fig. 1 Conduction and switching loss of inverter IGBT switch [12]

## 3. 제안하는 ARCP 인버터

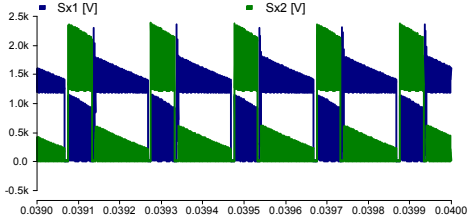
### 3.1 기존 ARCP 인버터

ARCP 인버터는 그림 2(a)와 같이 DC 링크 중앙부와 AC 출력단에 독립적으로 제어되는 스너버 커패시터  $C_s$ , 공진 인덕터  $L_r$ , 그리고 보조 스위치  $S_x$ 로 구성된 보조회로를 이용하여 ZVS 턴온을 수행한다. 보조스위치  $S_x$ 는 4상한 동작이 가능한 스위치로, 양방향의 전압과 전류를 지지 또는 도통시킬 수 있어야 하므로 보통  $S_{x1}$ 과  $S_{x2}$ 의 한 쌍의 스위치로 구성된다. 보조스위치  $S_{x1}$ 은 보조전류를 메인 인버터 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 로,  $S_{x2}$ 는 메인 인버터 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 에서 나오는 보조전류를 중성점으로 보낸다. 스위치  $S_1$ 이 Off에서 On으로 되는 ZVS가 이뤄지는 동안 부하전류의 흐름은 보조스위치  $S_{x1}$ 의 동작과 함께, 메인 다이오드  $D_2$ 에서 메인 스위치  $S_1$ 을 통해 흐르게 된다. 그리고 보조회로 동작은 ZCS 상태에서 Turn-off 되며 스위치에 걸리는 전압은 직류단 전압의 1/2이다.

ARCP 인버터의 주된 손실은 주회로와 필터리액터 그리고 보조회로 손실로 나뉜다. 주회로의 스위치는 영전압 상태에서 Turn-on 되고, 보조회로의 스위치는 영전압 상태에서 Turn-on과 Turn-off 동작을 하기 때문에 손실은 오로지 주회로의 스위치가 Turn-off 될 때 발생한다. 또한 스너버 역할을 하는 커패시터에 의해 스위치의 전압과 전류의 중첩되는 넓이가 줄어 손실은 더욱 줄어든다.



(a) 기존 ARCP 인버터 회로도



(b) 보조스위치 양단전압

그림 2 기존 ARCP 인버터의 회로구성과 보조스위치 양단전압

Fig. 2 Circuit configuration of existing ARCP inverter and voltage across auxiliary switches

기존 ARCP 인버터에서 보조스위치  $S_{X1}$ 과  $S_{X2}$  양단에 나타나는 전압을 시뮬레이션을 통해 측정해 보면 그림 2(b)와 같이 스위칭 주파수에 해당하는 과도전압이 나타나는 문제가 발생한다. 이러한 과도전압은 보조스위치에 전압 스트레스를 가하여 신뢰도와 수명에 영향을 준다. 이러한 이유 때문에 기존 ARCP 인버터는 널리 활용이 안되고 있는 상황이다.

### 3.2 제안하는 ARCP 인버터

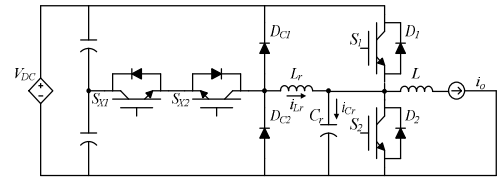
기존 ARCP 인버터의 이러한 단점을 개선하기 위해 본 연구에서는 그림 3(a)에 보인 새로운 구조의 다이오드-클램프 ARCP 인버터를 제안하였다. 제안하는 회로는 주 스위치 양단에 있던 2개의 공진커패시터  $C_r$ 을 제거하고 하나만 공진리액터  $L_r$ 과 병렬로 연결하였다. 그리고 공진리액터  $L_r$  앞단에 2개의 클램핑 다이오드를 연결하였다. 보조스위치 양단에 걸리는 과도전압은 클램핑 다이오드를 통해 제거가 가능하다. 그림 3(b)는 보조스위치 양단에 걸리는 전압파형을 나타낸 것이다.

그림 4에 보인 것처럼 제안하는 다이오드-클램프 ARCP 인버터는 8개의 동작모드로 구분할 수 있고, 각 모드에서는 아래와 같은 동작이 수행된다. 또한 각 동작모드의 등가회로와 전류 루프는 그림 5와 같다.

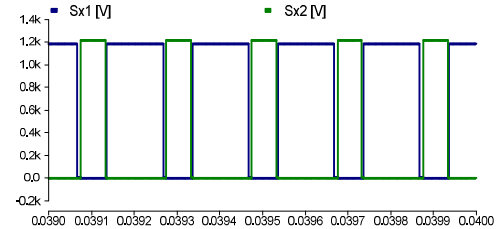
M1:  $i_{Lr}$ 이  $i_o$ 를 감쇠하는 구간으로  $S_{X1}$ 과  $S_{X2}$  그리고  $S_2$ 로 흐르는  $i_{Lr}$ 은  $i_o$ 와 반대 방향으로 흘러  $i_o$ 를 감쇠한다.

$$i_{Lr} = \frac{V_{DC}}{2L_r}(t - t_1), (t_1 \leq t < t_2) \quad (3)$$

M2:  $i_{Lr} > i_o$  인 구간으로  $C_r$ 이  $i_{Lr} - i_o$  크기로 충전되고  $S_2$ 의 전압이  $C_r$ 의 전압 크기로 증가한다.  $i_o$ 는  $C_r$ 을 통해 흐르고  $S_1$ 의 전압은  $V_{DC}$ 에서 서서히 감소한다.



(a) 제안하는 ARCP 인버터 회로도



(b) 보조스위치 양단전압

그림 3 제안하는 ARCP 인버터의 회로구성과 보조스위치 양단전압

Fig. 3 Circuit configuration of proposed ARCP inverter and voltage across auxiliary switches

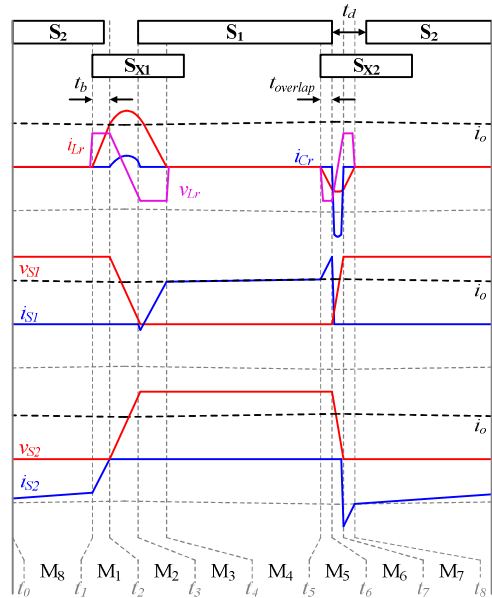


그림 4 동작모드 다이어그램: 주스위치와 보조스위치 게이팅 펄스, 공진전류, 주스위치 양단 전압, 주스위치에 흐르는 전류

Fig. 4 Operation Mode Diagram: Gating pulse for main and auxiliary switches, resonant current, voltage across main switches, current through main switches

$$i_{Lr} = I_o + \frac{V_{DC}}{2Z_o} \sin(\omega_o(t - t_2)), (t_2 \leq t < t_3) \quad (4)$$

$$i_{Cr} = \frac{V_{DC}}{2Z_o} \sin(\omega_o(t - t_2)), (t_2 \leq t < t_3) \quad (5)$$

$$v_{Cr} = v_{s2} = \frac{V_{DC}}{2}(1 - \cos(\omega_o(t - t_2))), (t_2 \leq t < t_3) \quad (6)$$

(공진 임피던스  $Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$ , 공진 주파수  $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ )

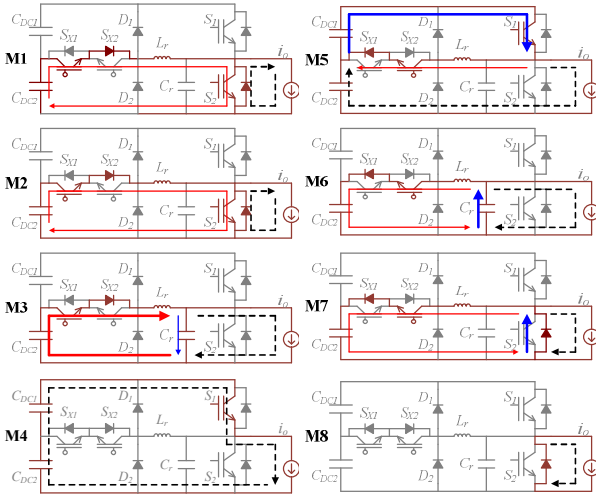


그림 5 각 동작모드별 등가회로와 전류 루프  
**Fig. 5** Equivalent circuit for each operation mode and current loop

M3: ZVS이 발생하는 구간으로  $s_1$ 의 전압이 '0'이 되는 동안  $s_1$ 에  $i_o - i_{Lr}$ 이 흐른다. 만일  $i_{Lr} > i_o$ 이 되면,  $s_1$ 의 내장 다이오드가 ZVS로 Turn-on 된다. 이때  $i_{Lr}$ 은 '0'까지 선형으로 감소하고  $i_{s1}$ 은  $i_o$ 까지 상승한다.

$$i_{Lr} = I_o - \frac{V_{DC}}{2L_r}(t - t_3), (t_3 \leq t < t_4) \quad (7)$$

M4:  $i_{s1} = i_o$ 인 구간으로  $i_o$ 는  $s_1$ 을 통해 흐르고 다른 스위치  $s_2$ ,  $s_{x2}$ 는 모두 Turn-off 된 상태로 있다.

M5: 공진전류를 Boosting 하는 구간으로  $s_{x2}$ 가 Turn-on 되면,  $s_1$ 과  $L_r$ 을 통해 폐회로가 구성되고  $s_1$ 이 Turn-off 될 때까지  $i_o + i_{Lr}$ 이  $s_1$ 을 통해 흐른다.

$$i_{Lr} = -\frac{V_{DC}}{2L_r}(t - t_5), (t_5 \leq t < t_6) \quad (8)$$

M6: 근사 ZCS이 발생하는 구간으로  $s_1$ 이 Turn-off 될 때  $i_{Lr} + i_o$ 가  $C_r$ 을 통해 흐른다.  $s_2$ 의 전압과  $C_r$ 의 전압은 동일한 수준으로 감소하고  $s_1$ 의 전압은  $V_{DC} - V_{Cr}$ 까지 상승한다.  $s_2$  전압의 하강 기울기와  $s_1$  전압의 상승 기울기는  $C_r$ 에 의해 정해진다. 따라서 적절히  $C_r$ 을 설정하면  $i_{s1}$ 과  $v_{s1}$ 의 오버랩은 최소화 가능하여 근사 ZCS로 동작한다.

M7:  $i_{Lr}$ 이 '0'으로 Reset 되는 구간으로  $s_2$ 의 내장 다이오드가 Turn-on 되어  $i_o + i_{Lr}$ 가  $s_2$ 의 내장 다이오드로 흐르고  $i_{Lr}$ 은 '0'까지 상승한다.

M8:  $i_{s2} = -i_o$ 인 구간으로  $i_o$ 가  $s_2$ 의 내장 다이오드와 필터인덕터를 통해 흐른다.

제안하는 ARCP 인버터에서 공진커패시터와 공진리액터는 각 모드구간에서의 공진조건과 소자의 내압과 내전류를 고려하여 설계되어야 한다. 그 외에도 주스위치와 보조스위치의 Overlap 시간  $t_{overlap}$ 을 적절하게 선정해야 한다. 그렇기에 공진소자는 소프트스위칭이 발생하는 M2 구간에서의 동작과 파형의 수식을 통해 설계될 수 있다.

M2 구간에서의 공진커패시터의 최대전류는 직류단 전압  $V_{DC}$ 와 특성임피던스  $Z_o$ 로 표현될 수 있고, 공진리액터의 최대전류는 출력전류와 공진커패시터 전류의 합으로 나타낼 수 있다.

$$I_{Cr,MAX} = \frac{V_{DC}}{2Z_o} = \frac{V_{DC}}{2\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}} \quad (9)$$

$$I_{Lr,MAX} = I_{o,MAX} + I_{Cr,MAX} \quad (10)$$

앞서 소개된 공진 주파수  $f_o$ 의 수식을 식(9)에 대입하여 정리하면, 공진커패시터  $C_r$ 과 공진리액터  $L_r$ 의 값을 선정할 수 있다. 그리고 공진 주파수  $f_o$ 는 주스위치의 데드타임과 밀접한 관련이 있는데, 공진이 주로 데드타임 내에 발생하기에 공진 주파수의 반주기를 데드타임에 가깝도록 맞추어 설계해야 한다.

$$C_r = \frac{I_{Cr,MAX}}{\pi V_{DC} f_o}, L_r = \frac{V_{DC}}{4\pi f_o I_{Cr,MAX}} \quad (11)$$

#### 4. 시뮬레이션 결과

그림 6부터 9까지는 제안하는 다이오드-클램프 ARCP 인버터의 동작을 시뮬레이션으로 분석한 결과이다. 그림 6은 제안하는 ARCP 인버터가 DC 출력전압을 유지할 때 주스위치  $s_1$ 과  $s_2$  양단 전압과 이에 흐르는 전류, 그리고 공진 커패시터와 인덕터의 전류를 나타낸 파형이다. 이 시뮬레이션 결과를 통해 공진전류는 주스위치  $s_1$ 과  $s_2$ 가 Turn-on 또는 Turn-off 되는 순간에 공급됨을 알 수 있다.

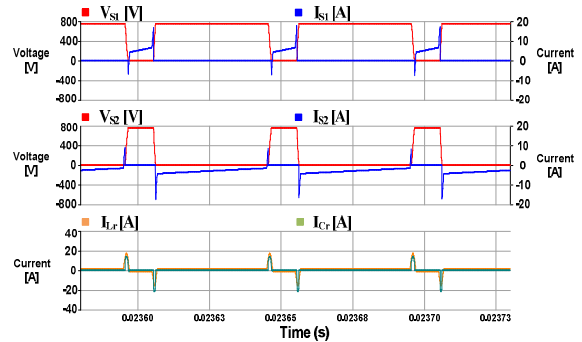


그림 6 주스위치 전압과 공진전류  
**Fig. 6** Main switch voltage and resonant current

그림 7은 주스위치  $S_1$ 이 Turn-on 되는 구간을 중심으로 주스위치  $S_1$ 과  $S_2$  양단 전압과 이에 흐르는 전류, 그리고 공진 커패시터와 인덕터의 전류를 확대한 파형이다. 주스위치  $S_1$ 에 걸리는 전압은 Turn-on 되는 순간에 0으로 감소하고 그후 스위치 전류는 서서히 상승하여 영전압 스위칭이 이루어 짐을 알 수 있다. 주스위치  $S_2$ 는 이와 반대로 영전류 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다.

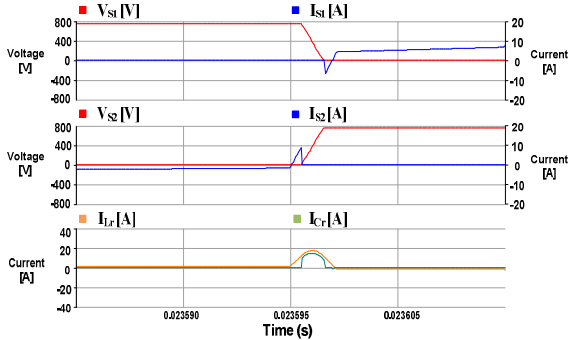


그림 7 턴-온 시 확대한 주스위치 전압과 공진전류 파형  
 Fig. 7 Expanded switch voltage and resonant current at turn-on

그림 8은 주스위치  $S_1$ 이 Turn-off 되는 구간을 중심으로 주스위치  $S_1$ 과  $S_2$  양단 전압과 이에 흐르는 전류, 그리고 공진 커패시터와 인덕터의 전류를 확대한 파형이다. 주스위치  $S_1$ 에 흐르는 전류는 Turn-off 되는 순간에 0으로 감소하고, 스위치 양단 전압은 서서히 상승하여 영전류 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다. 주스위치  $S_2$ 는 이와 반대로 영전압 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다.

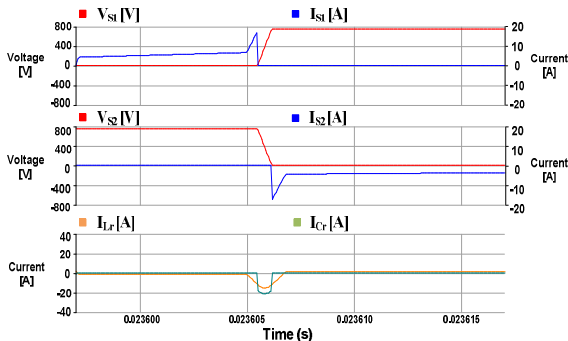


그림 8 턴-오프 시 확대한 주스위치 전압과 공진전류 파형  
 Fig. 8 Expanded switch voltage and resonant current at turn-off

그림 9는 주스위치  $S_1$ 이 Turn-off 되는 구간을 중심으로 보조스위치  $S_{X1}$ 과  $S_{X2}$ 에 나타나는 전압과 이에 흐르는 전류, 그리고 클램핑 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 에 나타나는 전압과 전류를 보인 것이다. 보조스위치  $S_{X1}$ 과  $S_{X2}$ 는 공진전류에 의해 Turn-on과 Turn-off 되는 순간 모두 영전압과 영전류 상태에서 동작함을 알 수 있다. 그리고 보조스위치 양단에 나타나는 전압은 그림 2(b)에 보였던 기존 ARCP 인버터의 보조스위치에 나타났던 과도전압이 제거

됨을 알 수 있다. 또한 클램핑 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 에 나타는 전압과 전류를 보인 것인데 약간의 오버러프 영역이 존재함을 알 수 있다.

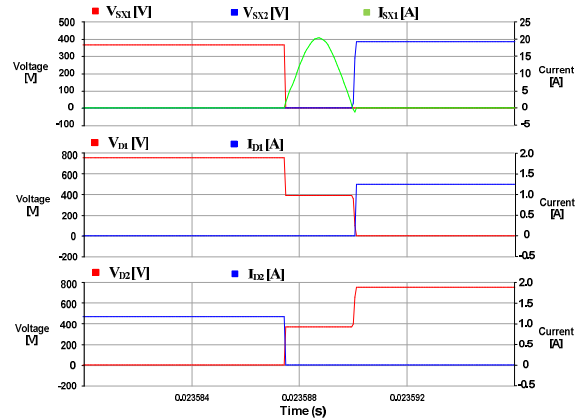
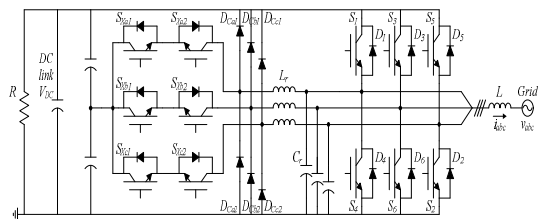


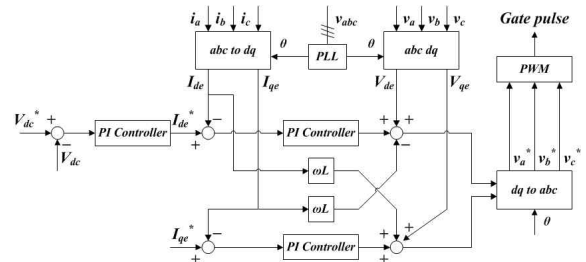
그림 9 보조스위치 양단 전압과 클램핑 다이오드 양단 전압  
 Fig. 9 Voltages across auxiliary switches and clamping diode

### 5. 하드웨어 실험 결과

그림 10은 설계한 다이오드-클램프 ARCP 인버터의 3상 회로도를 나타낸 것이다. 기본적으로 단상 다이오드-클램프 ARCP 인버터 3대를 병렬로 결합한 형태로 보조스위칭 회로는 각 상별로 한 세트씩 배치되어 있다. 3상 인버터가 교류 전력계통과 연계하여 동작할 경우 DC 전압제어와 무효전력제어가 필요한데 그림 10(b)는 이를 나타낸 것이다.



(a) 3상 ARCP 인버터 회로도



(b) 3상 전류제어 블록도

그림 10 제안하는 3상 ARCP 인버터 회로도 및 전압-전류 제어기  
 Fig. 10 Proposed 3-phase ARCP inverter circuit diagram and voltage-current controller

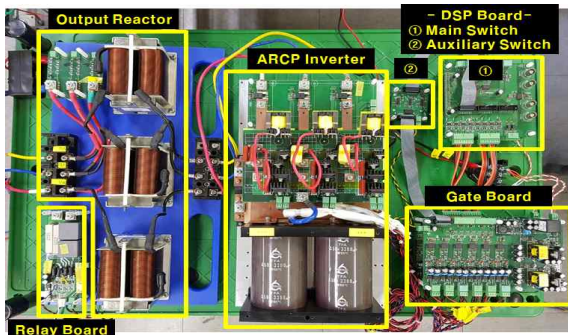
제작한 하드웨어 프로토타입의 정격과 회로정수는 표 1과 같다.

표 1 제안하는 ARCP 인버터의 회로정수

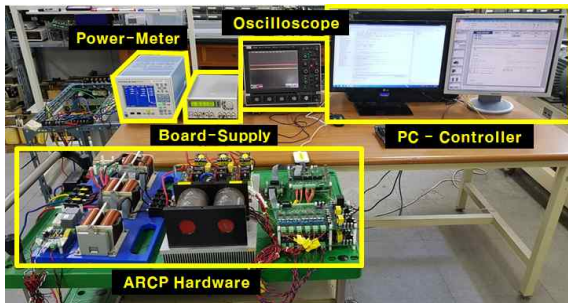
Table 1 Circuit parameters for proposed ARCP

Parameter	Value
Rated Power $P$	5kW
Input AC Voltage $V_{LL}$	380Vac
Output DC Voltage $V_{DC}$	750Vdc
Switching Frequency $f_{SW}$	20kHz
Resonant Inductor $L_r$	18uH
Resonant Capacitor $C_r$	10nF
Filter Inductor $L$	2mH
Load Resistance $R$	112Ω

그림 11은 실험실에서 제작한 제안하는 ARCP 인버터의 프로토타입과 이를 테스트하는 시험장치의 사진을 보인 것이다.



(a) 제안하는 ARCP 인버터



(b) 제안하는 ARCP 인버터의 시험장치 구성

그림 11 실험실에서 제작한 5kVA 3상 ARCP 인버터와 시험장치 구성

Fig. 11 Proposed 3-phase ARCP inverter and configuration of its test set-up

그림 12는 주스위치와 보조스위치에 공급되는 게이팅 펄스를 나타낸 것이다. 여기서 보조스위치에 공급되는 게이팅 펄스는 주스위치에 공급되는 PWM 펄스의 상승단 보다 앞서서 상승함을 알

수 있다. 채널 2에 나타낸 보조스위치의 게이팅 펄스는 채널 1에 나타낸 주스위치의 PWM 펄스의 상승단보다  $2\mu s$  일찍 상승함을 볼 수 있다.

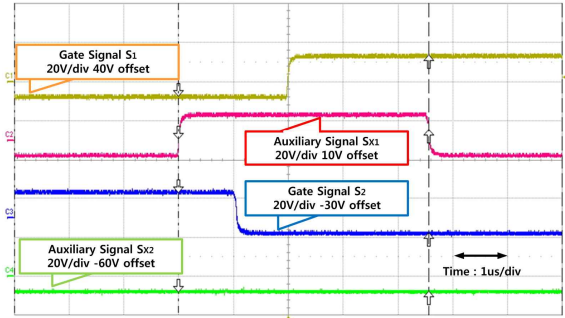


그림 12 주스위치와 보조스위치의 게이팅 펄스

Fig. 12 Gating pulses for main and auxiliary switches

그림 13은 DC 전압이 750V를 유지하면서 5kW 전력을 교류 측에서 직류 측으로 전달할 때 주스위치 상/하단 Arm 양단에 걸리는 컬렉터-에미터 전압, 공진 전류, DC 전류를 나타낸 것이다. 최상단 파형은 A상 전류를 나타낸 것이고 중간 파형은 상/하단 주스위치 컬렉터-에미터 양단에 걸리는 전압을 나타낸 것이고 최하단 파형은 인덕터로 흐르는 공진전류를 나타낸 것이다. 인덕터의 공진전류는 상단 Arm의 컬렉터-에미터 양단에 걸리는 전압이 영이 되기 전에 상승하기 때문에 상단 Arm 스위치는 ZVS로 동작한다. 또한 인덕터의 공진전류는 하단 Arm의 컬렉터-에미터 양단에 걸리는 전압이 영이 되기 전에 상승하기 때문에 하단 Arm 스위치 역시 ZVS로 동작한다.

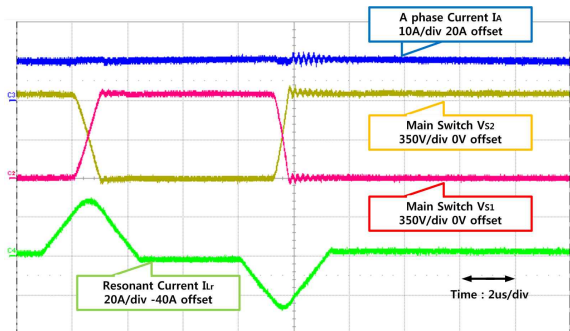


그림 13 주스위치 전압과 공진 전류

Fig. 13 Main switch voltages and resonant current

그림 14는 DC 전압이 750V를 유지하면서 5kW 전력을 교류 측에서 직류 측으로 전달할 때 인버터 교류 측에서 측정한 3상 전류와 DC 전압을 나타낸 것이다. 3상 전류는 주파수가 60Hz 이고 왜곡이 거의 없는 파형을 나타내고 있으며 DC 전압은 750V의 일정한 값을 유지함을 알 수 있다.

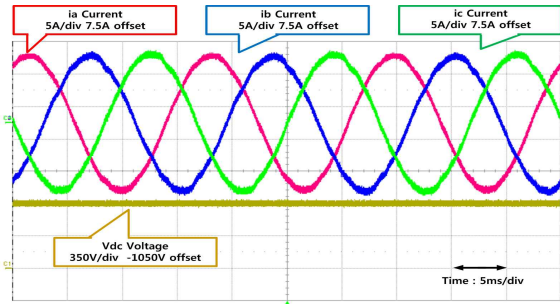


그림 14 3상 인버터 전류와 DC 전압  
 Fig. 14 3-phase inverter current and dc voltage

제안하는 ARCP 인버터의 효율을 측정할 목적으로 인버터의 교류 측을 3상 전원에 연결하고 AC 측으로부터 5kW의 전력을 흡수하여 DC 전력으로 바꾼 다음 DC 측의 저항부하에서 소모하는 형태로 동작한다. 이때 교류 측 전류제어에 의해 인버터 교류 측에서는 무효전력의 소모가 없는 단위 역률로 동작하도록 전류제어를 실시하였다. 상호비교를 위해 동일한 조건에서 하드스위칭 인버터를 동작시켜 각각의 효율을 Power Meter로 교류입력에 대한 직류출력의 비를 측정하였다.

그림 15는 제안하는 ARCP 인버터의 효율과 하드스위칭 인버터, 기존 ARCP 인버터의 효율을 측정하여 비교한 그래프이다. 2kW 이하 영역에서는 하드스위칭 인버터의 효율이 ARCP 인버터보다 높게 나타난다. 그 이유는 제안하는 ARCP 인버터의 경우 보조회로에서 소모되는 전력이 낮은 출력에서는 차지하는 비중이 크기 때문이다. 그러나 2kW 이상의 영역에서는 하드스위칭 인버터보다 높은 효율을 나타낸다. 제안하는 ARCP 인버터의 최대효율은 97% 정도로 하드스위칭 인버터에 비해 정격 용량에서 약 1.5% 이상 높은 효율을 나타내었다. 제안하는 ARCP 인버터는 기존 ARCP 인버터에 비해 약간 낮은 효율을 보이는데 이것은 클램핑 다이오드에서 발생하는 손실 때문인 것으로 판단된다. 소프트 스위칭 인버터의 경우 구성요소의 3차원적인 물리적인 배치와 제작이 효율에 큰 영향을 주는데 학교실험실이 아닌 숙련된 산업체에서 전문적으로 제작할 경우 효율은 좀 더 향상될 것으로 판단된다.

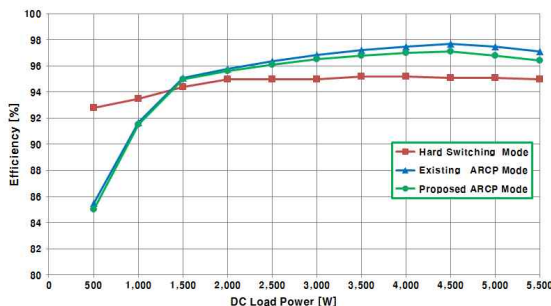


그림 15 하드스위칭 인버터와 ARCP 인버터의 효율 비교  
 Fig. 15 Comparison of efficiency between hard switching inverter and ARCP inverter

## 6. 결 론

본 논문에서는 2개의 보조스위치, 2개의 클램핑 다이오드, 그리고 LC 공진회로로 구성된 새로운 구조의 ARCP 인버터를 제안하였다. 제안하는 ARCP 인버터의 동작과 성능은 이론적인 분석과 시뮬레이션에 의해 검증하였고, 또한 하드웨어 구현 타당성을 검증하기 위해 3상 380V/5kVA 용량의 프로토타입을 실험실에서 제작하여 실험을 실시하였다. 실험결과를 분석한 결과 제안하는 ARCP 인버터는 하드스위칭 인버터에 비해 1.5% 정도의 효율 개선이 가능함을 확인할 수 있었다. 제안하는 ARCP 인버터는 기존 ARCP에 비해 단일 공진 커패시터가 필요하나 2개의 클램핑 다이오드를 필요로 하여 기존 ARCP 인버터에 비해 비용면에서 불리하나 보조스위치에서 발생하는 과도전압을 억제하여 보조스위치의 수명을 개선하는 효과를 갖는다. 또한 제안하는 ARCP 인버터는 손실 개선효과가 1.5% 정도로 낮으나 다수의 신재생발전과 전기자동차 그리고 산업용 구동장치를 고려하면 전체적인 손실저감 효과는 클 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 기초연구개발과 제 연구비에 의해 지원되었음.(과제번호 : R18XA06-52)

## References

- [1] B. R. Lin and K. L. Shih, "Analysis and implementation of a soft switching converter with reduced switch count", in *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 559-570, July 2010.
- [2] P. Sun, J.S. Lai, H. Qian, W. Yu, C. Smith, J. Bates, B. Arnet, A. Litvinov, and S. Leslie, "efficiency evaluation of a 55kW soft-switching module based inverter for high temperature hybrid electric vehicle drives application", *IEEE 25th Applied Power Electronics Conf. and Exposition*, pp. 474-479.
- [3] P. Nguyen and A. Gerth, "Soft switching with SiC-devices for compact onboard railway power supplies", *15th EPE International Power Electronics and Motion Control Conf.*, EPE/PEMC 2012.
- [4] G. Kulothungan, A. K. Rathore and S. K. Sahoo, "Analysis and design of extended soft-switching current-fed three-phase dc/dc converter with simple modulation technique and magnetizing inductance effect", *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, PEDES 2012.
- [5] J. Miao, X. You, Y. Li and M. Liang, "Research on soft-switching and peak current of dual active bridge converters", *20th IEEE Applied Power Electronics Conf.*

and Exposition(APEC 2014), pp. 2926-2931.

- [6] Y. Zhang, C. Li, Z. Cao and D. Xu, "Soft-switching single-stage current-fed full-bridge isolated converter for high power AC/DC applications", *9th International Conference on Power Electronics, ICPE 2015 (IEEE ECCE Asia)*, Seoul, Korea, pp. 48-53.
- [7] R. W. De Doncker and J. P. Lyons, "The auxiliary resonant commutated pole converter", *IEEE IAS Annual Meeting, Conference Proceedings*, Vol. 2, pp. 1228-1235, Oct. 7-12, 1990.
- [8] H. Takano, T. Domoto, J. Takahashi, and M. Nakaoka, "Auxiliary resonant commutated soft-switching inverter with bidirectional active switches and voltage clamping diodes", *IEEE IAS Annual Meeting, Conference Proceedings*, Vol. 3, pp. 1441-1446, Sept. 30-Oct. 4, 2001.
- [9] A. Williams, A. Gattozzi, and R. F. Thelen, "Applications of an Auxiliary Resonant Commutated Pole Converter", *IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC 2007*, pp. 661-665, Feb. 25-March 1 2007.
- [10] T. Doudousakis, C. Sirio, and P. E. Lee, "Achieving ZVS in a Two Quadrant Converter Using a Simplified Auxiliary Circuit with Novel Control", *IEEE Power Electronics Specialist Conference, PESC 2008*, 15-19 June 2008.
- [11] K. Shinsuke, Y. Miura, T. Ise, and Y. Hosokawa, "A Novel Soft-Switching Inverter for High Power Application with Simple Control", *IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia 2012*, June 2-5, 2012.
- [12] B. L. C. Martinez, Rui Li, Ke Ma and Dehong Xu, "Hard switching and soft switching inverters efficiency evaluation", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1752-1757,

## 저 자 소 개



### 이 윤 석 (Yoon-Seok Lee)

1987년 6월 27일생. 2012년 명지대 전기공학과 졸업. 2012년~현재 동 대학원 전기공학과 석·박사 통합과정

E-mail : lys1909@hanmail.net



### 김 재 혁 (Jae-Hyuk Kim)

1988년 12월 18일생. 2013년 명지대 전기공학과 졸업. 2013~현재 동 대학원 전기공학과 석·박사 통합과정

E-mail : pwm0125@naver.com



### 한 병 문 (Byung-Moon Han)

1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 미 Westinghouse 선임연구원. 현재 명지대 전기공학과 명예교수.

E-mail : erichan@mju.ac.kr