

대용량에 적합한 영전류 턴-오프 특성을 가진 새로운 공진 폴 인버터

김민홍* 서범석 현동석
한양대학교 전기공학과

A Novel Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter Topology with Zero Current Turn-off for High Power Applications

Min-Hong Kim*, Bum-Seok Suh, Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper proposes a novel Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter (ARCPI) topology. The conventional ARCPIs make the hard switching at turn-off likewise the conventional PWM inverters. Therefore, turn-off switching losses may be so serious and can be so much considerable in high power level. The proposed ARCPI can solve this problem with high frequency transformers, switches, and capacitors. All the switches in the expanded auxiliary circuit achieves the soft switching and operates only during the commutating intervals. The characteristics and the analysis for each operation mode are described in detail and the validity is verified by the simulations and the experimental results.

1. 서론

대용량 인버터에서 스위칭 손실은 중, 소용량 인버터에 비하여 전체 시스템에 상당한 제약 요소가 된다. 스위칭 손실은 인버터 시스템의 효율을 저하시키는 주된 요인이 되며 스위칭 주파수에 한계를 준다. 또한, 부가적인 냉각장치 수반을 야기한다. 지금까지 스위칭 손실을 줄이고자 하는 연구가 광범위하게 이루어져 왔는데, 기존의 PWM 인버터의 경우 스너버회로를 이용하여 스위칭 손실을 현저히 줄였다. 그러나, 대용량 GTO인버터의 경우 스너버회로의 사용에 따라 다음과 같은 문제점을 초래한다. 첫째, 스너버회로 설계에 따라 인버터의 신뢰성 및 특성이 좌우되므로 스너버회로 설계 기술에 상당한 주의를 기울여야 한다. 둘째, 스너버에서 발생하는 손실이 매우 크므로 전체 시스템 효율을 저하 시킨다. 셋째, 스너버에너지를 줄이기 위해서는 스너버에 저장된 에너지를 회생시키기 위한 별도의 전원장치가 필요하다. 넷째, 스너버회로의 사용으로 인하여 시스템의 대형화를 초래하게 된다.

최근, 이 문제를 해결하기 위해 공진 현상을 이용한 새로운 방법들이 제시되고 있다 [1]-[4]. 이 중 ARCPI는 [3], [4] 대용량에 적합한 것으로 보여지는데, 이는 기존에 제시된 Resonant dc-Link Inverters (RLI) [1]나 Actively Clamped Resonant dc-Link Inverters (ACRLI) [2]의 단점

즉, 연속적인 공진으로 인한 공진 인덕터에서의 도통 손실의 증가, PWM 능력의 부재, 소자 전압 또는 전류 정격의 상당한 증가를 해결하였다. ARCPI는 주 소자의 영전압 스위칭과 작은 전류 스트레스, 보조 소자의 영전류 스위칭등의 장점이 있고, 주 소자의 전압, 전류 정격이 시스템 정격과 거의 일치하기 때문에 대용량(0.5 ~ 1MVA)에 효과적으로 적용될 수 있다. 그러나 ARCPI는 그림 1에서 보듯이 턴-오프 과정이 하드 스위칭과 유사하므로 대용량의 경우 커다란 스위칭 손실을 야기하는 문제점을 가진다 [5].

본 논문에서는 영전류 턴-오프 특성을 가진 새로운 공진 폴 인버터를 제시한다. 제시한 인버터는 기존의 ARCPI의 턴-온 과정과 유사하게 턴-오프 시 영전압, 영전류 구간을 확보할 수 있다. 제안한 회로에 대한 분석과 동작 원리가 본 논문에 상세히 기술되어 있고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하고자 한다.

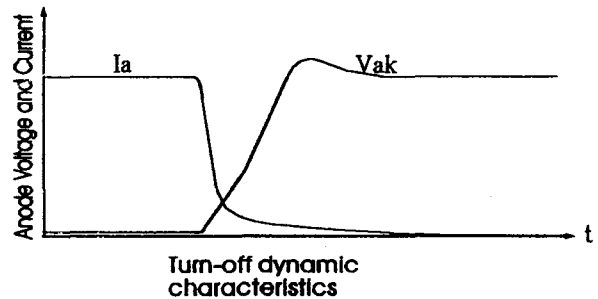


그림 1 기존의 ARCPI 턴-오프 파형 (GTO)

2. 회로 구성 및 동작 원리

2-1. 회로 구성

그림 2에 새로이 제안한 영전류 턴-오프 특성을 가진 ARCPI 회로를 나타내고 있다. 제안한 회로는 두개의 고주파 변압기와 콘덴서, 그리고 네 개의 보조 스위치가 추가되어 있다. 고주파 변압기의 경우 자화 인덕터를 공진 인덕터로 사용하기 위하여 Co-axial 변압기가 [6], [7] 사용

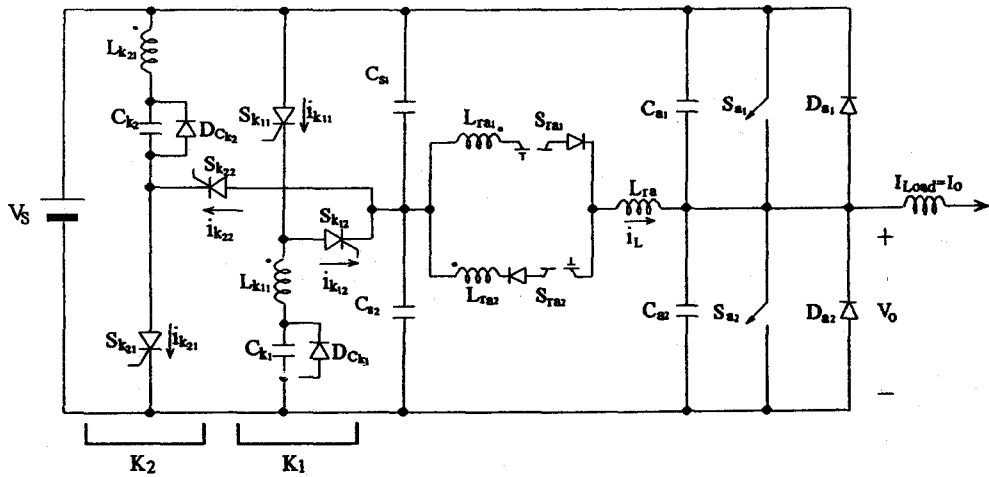


그림 2 새로이 제안한 영전류 턴-오프 특성을 가진 ARCPI

되고, 보조 회로의 스위치의 경우 저가의 다이리스터를 사용할 수 있지만, S_{ra1}, S_{ra2} 의 경우 안정적인 구동과 빠른 턴-온, 턴-오프를 위해서는 다이리스터와 유사한 특성을 가진 MCTs가 적합하다고 사료된다.

기존의 ARCPI 에서 보조 회로로 K1, K2가 추가되어 있는데, K1 leg의 경우 변압기를 통하여 인버터 윗단 스위치의 턴-오프 시에 보조 회로로 구동하며, K2 leg의 경우 아랫단 스위치 턴-오프 시에 보조 회로로 구동한다. Co-axial 변압기의 2차측은 출력 단자를 3개로 하여 3상 인버터로의 확장이 가능하다. 다이오드 D_{ck1}, D_{ck2} 는 한번의 턴-오프 스위칭 주기 이후 커패시터 C_{k1}, C_{k2} 의 초기화를 위하여 충전된 에너지를 방전할 때, 음으로 충전되는 것을 방지하기 위한 클램프 다이오드로 동작한다. 스위치 턴-온 시 공진 인덕터는 $L_{ra} + L_{ra1} (=L_{ra2})$ 로 구성되고 턴-온 동작 모드에 대한 구체적인 설명은 참고 문헌 3, 4에 자세 히 설명되어 있다. 턴-오프 동작 모드 설명을 간략화 하기 위한 가정은 아래와 같다.

- 1) 회로에 사용된 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 부하 전류 I_{Load} 는 양의 I_o 이고, 스위칭 전이 과정 동안 일정하게 유지 된다.
- 3) 변압기의 권선비는 1:1이고, 결합 계수는 1이다.
- 4) $C_{a1}=C_{a2}=C_a, C_{k1}=C_{k2}=C_k$.
- 5) $L_{ra1}=L_{ra2}=(1-k)L, L_{ra}=kL$. (k 는 공진 인덕터 상수)

2-2. 동작 원리

그림 3에 턴-오프 동작 파형을 나타내었고, 각 모드에 따른 인버터 윗단 스위치의 턴-오프 과정이 그림 4에 설명되어 있다.

- 1) 모드 1 ($0 \sim t_0$): 부하 전류는 S_{a1} 을 통하여 흐르고 있다.
- 2) 모드 2 ($t_0 \sim t_1$): 스위치 S_{ra1} 과 S_{k11} 을 동시에 턴-온 하면, 변압기 1차측과 2차측에 전압 V_s 가 유기되고 L_{ra} 에 전압 $V_s/2$ 가 걸리면서 $i_L(t)$ 가 증가하기 시작한다. 이에 따라 S_{a1} 에 흐르는 부하 전류는 같은 비율로 감소한다.

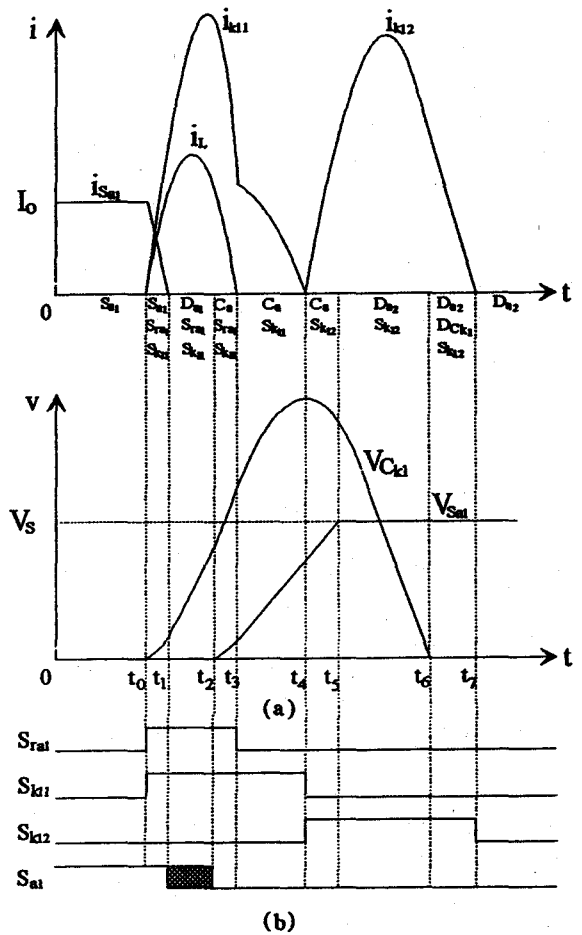


그림 3 턴-오프 동작 파형(a) 전압, 전류 파형, (b) 스위치 턴-온, 턴-오프 게이트 신호 파형

- 3) 모드 3 ($t_1 \sim t_2$): $i_L(t)$ 가 I_o 이상으로 증가하면, $i_L(t)I_o$ 는 D_{s1} 을 통하여 흐르게 되고, 이 때 S_{a1} 의 전압과 전류는 영이 되므로, 이 시간 동안 S_{a1} 을 턴-오프 시킨다. $i_L(t)$ 의 최대치는 다음과 같이 결정된다.

$$I_{L,peak} = \frac{V_s}{2 \cdot \omega \cdot L} \left\{ \frac{1}{k} + 1 \right\} \sin \alpha t' - \frac{V_s}{2 \cdot L} t'$$

$$t' = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left\{ \frac{k}{1+k} \right\} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{k(1-k)} \cdot C_k \cdot L} \quad \text{where } C_k = C_{k1} = C_{k2}$$

$I_{L,peak}$ 는 I_o 이상이 되어야 하므로, 파라메타 설정 시 주의해야 한다.

4) 모드 4 ($t_2 \sim t_3$): $i_L(t)$ 는 I_o 이하로 떨어지게 되고, 전류 $I_o - i_L(t)$ 는 C_{a1} 과 C_{a2} 로 흐르면서 V_{sa1} 이 상승하기 시작한다.

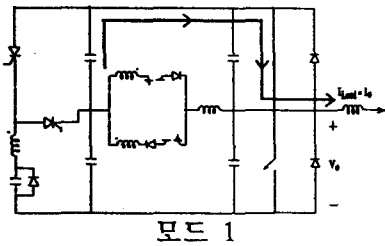
5) 모드 5 ($t_3 \sim t_4$): $i_L(t)$ 는 영이 되어 S_{n1} 은 턴-오프가 되

고, 부하 전류 I_o 는 C_{a1} 과 C_{a2} 를 통해 흐르면서 V_{sa1} 을 V_s 에 이르게 한다. t_4 에서 S_{k11} 은 자연소호 된다.

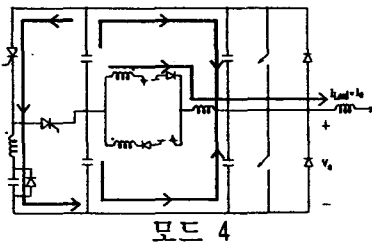
6) 모드 6 ($t_4 \sim t_6$): t_5 에서 V_{sa1} 은 V_s 에 이르고, 부하 전류 I_o 는 다이오드 D_{k1} 를 통하여 환류하기 시작한다. S_{k12} 를 턴-온 하여 C_{k1} 에 충전된 에너지를 인덕터 L_{k11} 을 통하여 방전하기 시작한다. S_{k12} 를 턴-온 하는 시점인 t_6 는 S_{k11} 이 자기소호 능력이 있는 스위치의 경우 문제가 되지 않지만, 자기소호 능력이 없고 턴-오프 시간 t_{off} 이 긴 다이리스터를 사용할 경우, 턴-오프 시간 t_{off} 을 고려하여 지연되어야 할 필요가 있다.

7) 모드 7 ($t_6 \sim t_7$): 콘덴서 C_{k1} 이 완전히 방전한 후, 전류 $i_{k12}(t)$ 는 다이오드 D_{k1} 을 통해 영에 이른다.

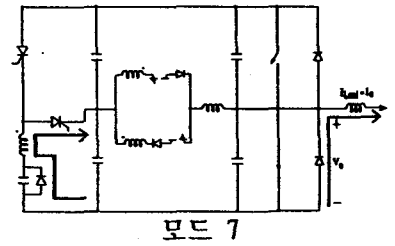
8) 모드 8 ($t_7 \sim$): 부하 전류 I_o 는 다이오드 D_{a2} 를 통해 흐른다.



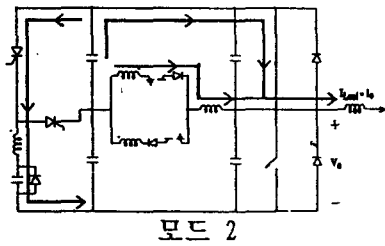
모드 1



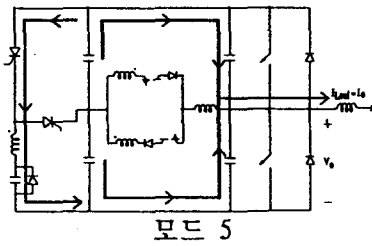
모드 4



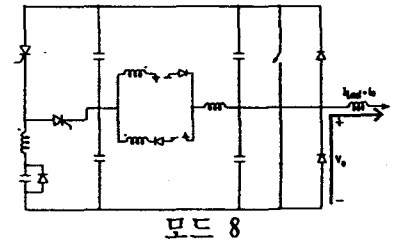
모드 7



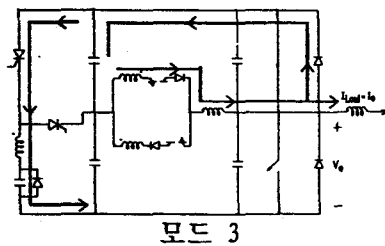
모드 2



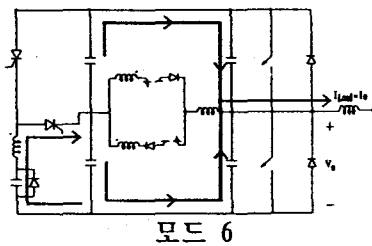
모드 5



모드 8



모드 3



모드 6

그림 4 제안한 회로의 동작 모드

3. 시뮬레이션 및 실험

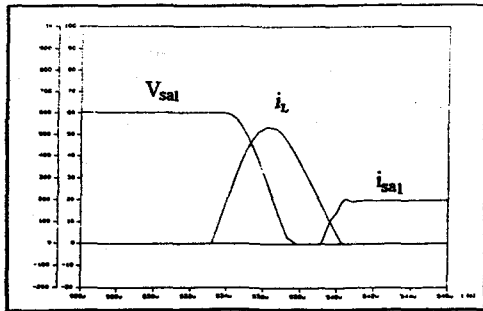
제안한 회로의 동작을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험을 위한 인버터 턴-오프 시간은 대략 6 μ s이다. 이에 따른 시스템 파라메타 값은 표 1과 같다. 실험 시에 주 소자로 IGBT를 사용하였고 보조 회로에 사용된 소자는 그림 2에 나타낸 것과 같이 다이리스터와 MCT를 사용하였다.

그림 5는 제안한 회로의 시뮬레이션 파형을 보여 주고 있다. 그림 5(a)에서 보듯이 턴-온 과정이 기존의 ARCPI와 같음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 턴-오프 파형을 보여 주고 있다. 턴-온 시와 마찬가지로 영전압, 영전류

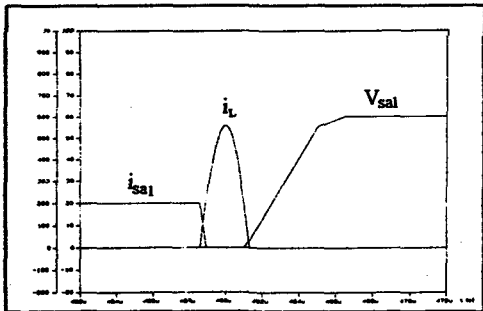
표 1 제안한 회로의 시뮬레이션 및 실험 조건

파라메타	설정치
V_s	600V
I_o	20A
$C_a (=C_{a1}=C_{a2})$	70nF
$C_k (=C_{k1}=C_{k2})$	300nF
L	15 μ H
$L_k (=L_{k11}=L_{k12})$	9.5 μ H
k	0.37

구간이 확보됨을 알 수 있다. 그림 6은 실험 파형을 보여 주고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 실제 실험 결과가 시뮬레이션 결과와 일치함이 확인 되었다. 따라서, 본 논문에서 제안하고 있는 회로는 턴-온, 턴-오프 시 스위칭 손실을 거의 영으로 줄일 수 있는 특징을 갖는 것으로 확인 되었다.

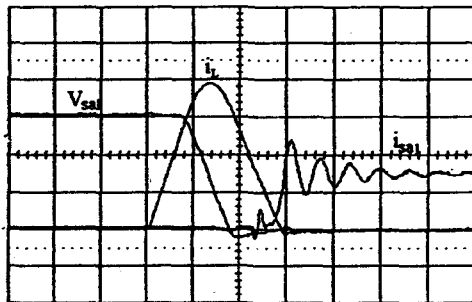


(a)

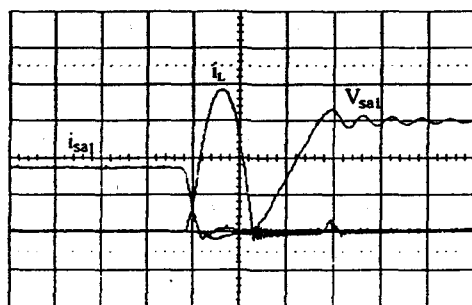


(b)

그림 5 제안한 회로의 전압, 전류 시뮬레이션 파형 (100 V/div., 10 A/div., 2 us/div.) (a)턴-온, (b)턴-오프



(a)



(b)

그림 6 제안한 회로의 전압, 전류 실험 파형 (200 V/div., 10 A/div., 2 us/div.) (a) 턴-온, (b) 턴-오프

4. 결론

본 논문에서는 영전류 턴-오프 특성을 가진 새로운 공진 폴 인버터가 제시 되었으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 동작 원리에 대한 타당성을 검증하였다. 제시된 회로는 턴-온, 턴-오프 시 주 소자의 영전압, 영전류 스위칭이 가능하고, 보조 소자도 영전류 스위칭이 가능하므로, 스위칭 손실을 현저히 줄일 수 있는 특징을 가진다. 제안한 회로에서 보조 회로를 위한 비용은 대용량(0.5 ~ 1MVA) 인버터에 사용되는 스너버 회로와 냉각장치에 비하면 매우 작다. 따라서, 제시된 회로는 GTOs나 IGBTs를 이용한 대용량 인버터 응용 분야에 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고 문헌

- [1] D. M. Divan, "The Resonant DC Link Converter - A New Concept in Static Power Conversion," *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol. 25, No. 2, March/April, pp. 317-325, 1989.
- [2] D. M. Divan and G. Skibinski, "Zero Switching Loss Inverter for High Power Applications," *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol. 25, No. 4, July/August, pp. 634-643, 1989.
- [3] W. McMurray, "Resonant Snubbers with Auxiliary Switches," *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol. 29, No. 2, March/April, pp. 355-361, 1993.
- [4] R. W. De Docker and J. P. Lyons, "The Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter," *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp.1228-1235, 1990.
- [5] R. W. De Doncker, O. Demirci, S. Arthur, and V. A. Temple, "Characteristics of GTO's and High Voltage MCT's in High Power Soft-Switching Converters," *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp. 1539-1545, 1991.
- [6] M. H. kheraluwala, D. W. Novotny, and D. M. Divan, "Design Considerations for High Frequency Transformers", *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 734-742, 1990.
- [7] M. S. Rauls, D. W. Novotny, and D. M. Divan, "Design Considerations High Frequency Co-Axial Winding Power Transformers", *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp. 946-952, 1991.