

3상 소프트 스위칭 인버터의 전력손실에 관한 해석

°김주용°, 문상필°, 김은수°, 서기영°, 김영문°
 경남대학교°, 마산대학°

Analysis on power loss of three-phase soft switching inverter

J.Y.Kim°, S.P.Mun°, Y.S.Kim°, K.Y.Suh°, Y.M.Kim°
 Kyungnam University°, Masan College°

Abstract - This paper proposes a new prototype auxiliary resonant DC link(ARDCL)snubber circuit and deals with its power loss on the basis of actually measured conduction loss characteristic of switching device module. Voltage-type soft switching three phase inverter using proposed ARDCL snubber circuit is presented along with its performance evaluations. And, the power loss analysis of three phase hard and soft switching inverter are carried out from the point of simulation and experimental results.

있어서 성능이 높은 파형을 유도하여 제어하지만 소프트 스위칭의 스위칭 전류시간이 기존의 하드 스위칭 방식보다 지연시간이 큰 경우에는 전압벡터의 보상이 되지 않는 단점이 발생한다.

1. 서 론

최근 전력변환 장치의 고주파에 대해 파워 반도체 스위칭 디바이스의 전력손실의 증대, 전자노이즈, 필터 리액터의 절연 파괴에 대한 해결 방안이 많이 연구되어지고 있다. 그 중에서 공진 스너버에 의한 ARDCL 방식은 다른 방식에 비해 부품수가 적고, 회로구성이 간단하여 소용량 무정전전원장치나 CVCF 인버터와 계통 연계된 시스템, 고역률 액티브 컨버터, DC브러시리스모터 구동형 VVVF 인버터 등에 적용되어지고 있지만 보조공진회로의 소프트 스위칭 방식이 하드 스위칭 방식에 비해 전류시간이 길어 인버터 변조율의 상한의 한계가 발생하며, 회로의 도통손실이 시스템 전체를 고효율화로 동작 시키는데 커다란 문제점을 발생시킨다. 이러한 문제점을 해결 하기 위해 본 논문에서는 새로운 ARDCL 스너버 회로를 이용한 3상 전압형 인버터 시스템을 제안하고자 한다. 그리고 ARDCL 회로부의 기본 동작 시에 발생하는 전력손실을 분석하여 공간전압 벡터 변조 소프트 스위칭방식을 적용한 3상 전압형 인버터의 전력변환율의 특성을 나타내고자 한다. 이러한 모든 사항은 실험 결과와 시뮬레이션 결과에 의해 그 타당성을 증명하고자 한다.

2. 제안한 보조공진 DC링크 회로의 해석

그림 1은 ARDCL회로의 제어신호 시스템을 나타낸 것이며, 그림 2는 제안한 보조공진 DC 링크 회로와 3상 전압형 인버터를 이용한 전체 회로를 나타낸 것이다. 제안한 회로는 직류전원전압 V_d 와 ARDCL 스너버회로, 3상 인버터, 3상 저역통과 필터, 3상 저항부하로 구성되며, 전류원 I_0 는 공간전압 벡터 변조를 이용하여 샘플링 주기 T_s 내에서 전류등가모형을 나타낸 것이며, S_{INV}/D_{INV} 는 인버터의 브리지 상·하 암(Arm)의 스위치 각상을 의미한다. 그리고 인버터 주 회로의 각 스위칭은 파워 디바이스를 병렬로 접속시켰으며, C_d 은 부분 공진이 일어나는 커패시터로서 S_{INV}/D_{INV} 의 출력 기생용량이 일부 포함되어져 있다. 일반적으로 스위칭 패턴의 펄스 폭은 전압벡터 보상법을 이용하여 Open-loop시에

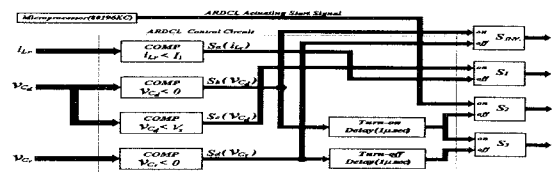


그림 1. 보조공진 직류 링크 스너버회로의 제어신호 시스템
 Fig. 1. Control signal system of ARDCL snubber circuit

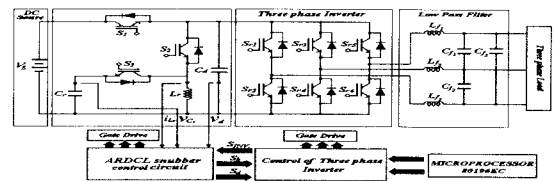


그림 2. 제안한 보조공진 DC링크회로와 3상 전압형 인버터
 Fig. 2. Three-phase voltage type inverter and proposed ARDCL snubber circuit

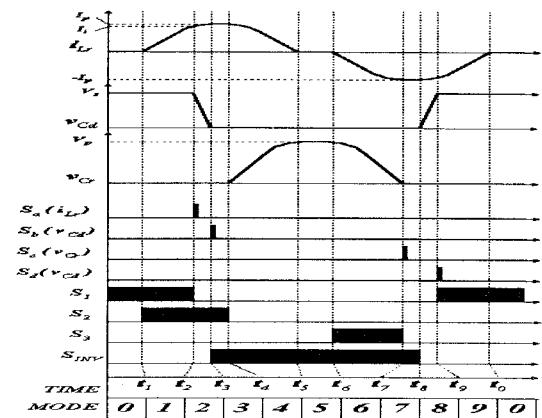


그림 3. 보조스위치의 게이트 펄스 신호와 각부의 동작
 Fig. 3. Operation of each part and auxiliary switch gate pulse signal

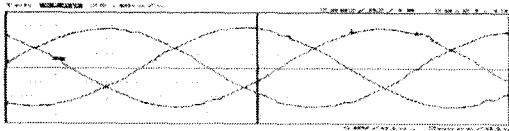
이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 인버터 회로에 마이크로 프로세서(Microprocessor 80196KC)제어시스템을 사용하여 스위칭의 패턴방식을 공간벡터로 변조하는 방법으로 출력벡터를 산출하여 스위칭 패턴과 펄스 폭을 제어하였다. 그림 3은 보조 스위치의 게이트 신호

와 각 부의 동작모드를 나타낸 것이다.

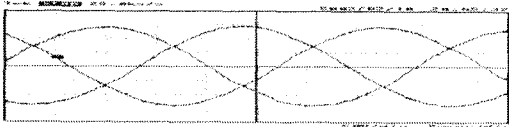
2.1 실험 결과 및 고찰

표 1. 제안한 시스템의 회로 정수
Table 1. Circuit parameters of proposed system

▷ 보조 공진 DC 링크 회로부		
직류전압	V_s	200[V]
공진 콘덴서	C_r, C_d	120[nF], 75[nF]
동작 주파수	f_s	24[kHz]
공진 인덕터	L_r	10[μH]
공진 인덕터 내부저항	R_r	0.2[Ω]
IGBT정격	V_{ce}	600[V]
	I_c	75[A]
▷ 3상 전압형 인버터부		
캐리어신호주파수	f_r	8[kHz]
출력 주파수	f_0	60[Hz]
필터용 인덕터	L_{f1}, L_{f2}, L_{f3}	560[μH]
필터용 인덕터 내부저항	R_f	450[mΩ]
필터용 콘덴서	C_{f1}, C_{f2}, C_{f3}	40[μF]
듀티율	D	25[%]
3상 부하(Δ결선)	R_L	25~8[Ω]



(a)



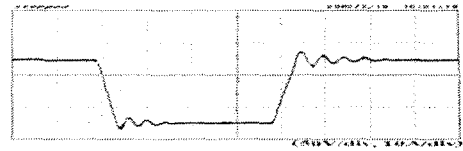
(b)

그림 4. 3상 전압형 인버터의 출력선간 전압의 실험 파형
(a) 하드 스위칭
(b) 소프트 스위칭

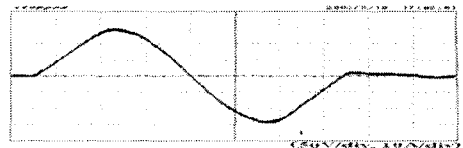
Fig. 4. Experimental waveform of output line voltage for three phase voltage type inverter
(a) Hard switching
(b) Soft switching

표 1은 실험에 사용된 회로의 정수를 나타낸 것이며, 3상 전압형 인버터의 전력 손실의 특성 분석은 실험에 의한 결과에 의해 회로에 적용하였으며, 실험에 사용된 IGBT 모듈(600V-75A)의 도통 손실의 특성 값은 공진 리액터 내부저항의 실측값을 사용하였다. 그림 4는 3상 전압형 PWM 인버터 동작 때의 출력 선간 전압의 실험 파형을 나타낸 것이다. 그림 4에서 (a)는 하드 스위칭일 때의 부하 선간 전압의 실험 파형이며, 그림(b)은 소프트 스위칭일 때의 부하 선간 전압의 실험 파형을 나타내고 있다. 그림 5는 제안한 ARDCL 스너버 회로부를 기본 동작 시켰을 때의 공진 커패시터 전압의 파형과 공진 인버터 파형, 스위치의 전압, 전류의 파형을 나타내고 있다.

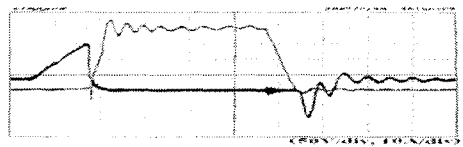
그림 5에서 알 수 있듯이 DC 모션전압이 제로전압 기간 일 때 스위칭 패턴을 변화시키면 주 회로부의 스위치가 ZVS/ZCS로 턴-오프하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 전력손실이 상승하였을 때 공진 리액터의 내부저항에 의한 손실이 저하되는 원인은 몇 가지로 들 수 있는데 먼저 공진 커패시터 Cd에서 부하 측에 흐르는 전류가 증가되어, 공진 리액터 Lr에 흐르는 전류가 감소되기 때문이다. 그리고 ARDCL회로방식의 정상상태에서 보조 스위치 S1이 ON 될 때 발생하는 전력의 손실이 크므로 전력용량에 대해서 전체적인 전류값이 낮아진다. 이러한 손실 저하 원인을 해결하고자 부분공진 회로를 삽입하여 부하 전류값에 대해서 초기전류를 일정하게 함으로서 공진 초기 전류값을 제어하였다. 그림 6은 스위치 턴-온 시의 스위치 양 단간의 전압, 전류의 실험 파형을 나타낸 것이다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 제안 보조공진 DC링크회로의 실험 파형
(a) 직류 모션전압
(b) 공진 인덕터 전류
(c) 스위칭 파형(S1)

Fig. 5. Experimental waveforms of the proposed ARDCL snubber circuit
(a) DC bus-line voltage
(b) Resonant inductor current
(c) Switching waveform(S1)

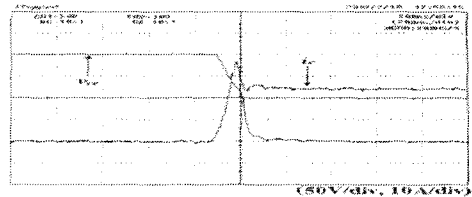


그림 6. 인버터 주스위치의 턴-온시 스위칭 파형
Fig. 6. Switching waveform of main switch inverter at turn-on

2.2 전력변환장치의 손실 해석

그림 7은 콜렉터 전류값에 대한 턴-온시의 전력 손실량을 나타낸 것이다. 그림 8에 콜렉터 전류값에 대한 턴

-오프시의 전력 손실량을 나타낸 것이며, 그림 9는 에노드 전류에 대한 다이오드 트리거 회복전류(回復電流)에 의한 전력 손실량을 나타낸 것이다. 그림 7, 8, 9에 나타낸 인버터의 스위칭의 손실분은 제안한 회로에서 측정된 데이터를 함수로 표현하여 나타낸 것이다.

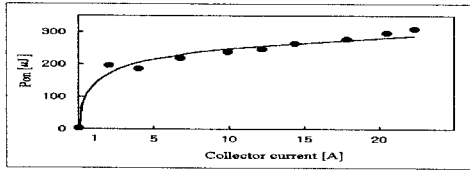


그림 7. 턴-온시의 스위칭 손실량
Fig. 7. Switching loss value at turn-on

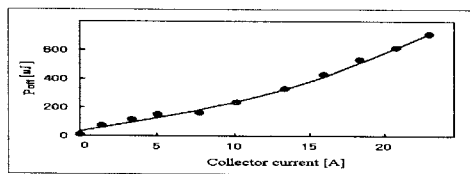


그림 8. 턴-오프시의 스위칭 손실량
Fig. 8. Switching loss value at turn-off

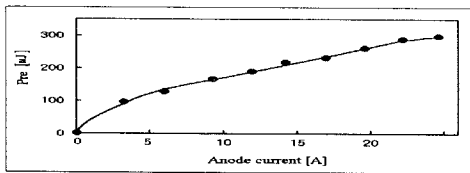


그림 9. 회복전류에 의한 스위칭 손실량
Fig. 9. Switching loss value by recovery current

그림 10은 ARDCL 스너버 회로부의 입력전력과 효율의 특성을 나타낸 것이다. 그림 10에 나타낸 것처럼 전력효율은 전력용량에 대해서 오른쪽으로 올라가는 특성을 가지며, 전력영역에서 제안한 회로는 고효율 98.2[%]로 동작되는 것을 확인하였다. 그림 11은 보조공진 DC링크 회로부의 IGBT모듈과 공진 리액터의 내부저항, 테일 전류에 발생하는 전력손실을 분석한 결과를 나타낸 것이며, 그림 12는 3상 전압형 인버터의 입력전력에 대한 효율의 특성을 나타낸 것이다.

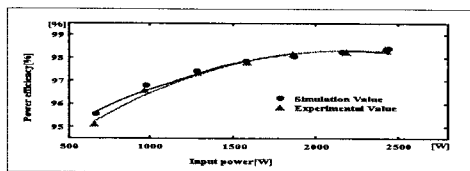


그림 10. ARDCL회로의 입력전력과 효율의 특성
Fig. 10. Characteristic of input power and efficiency at ARDCL circuit

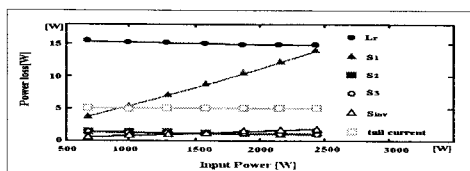


그림 11. 보조공진 DC링크 회로의 전력 손실분석
Fig. 11. Power loss analysis of ARDCL circuit

그림 13은 소프트 스위칭시의 전력 손실을 나타낸 것이다. 그림 13에서 알 수 있듯이 ARDCL 회로부의 손실이 전체 손실의 50[%]를 차지하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 손실을 감소하기 위해서 DC 모선의 제로 전압 홀드제어기능과 로스레스 스너버 콘덴서의 동작기능을 조합하여 시스템을 구성함으로써 효율을 향상시켰다.

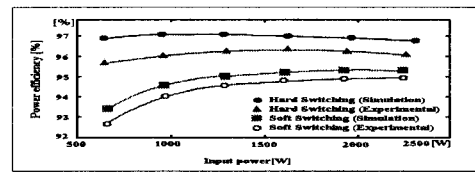


그림 12. 인버터의 입력전력과 효율의 특성
Fig. 12. Characteristic of input power and efficiency at inverter

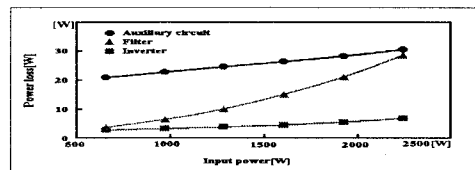


그림 13. 소프트 스위칭일 때의 전력손실 분석
Fig. 13. Power loss analysis of soft switching

3. 결 론

보조공진회로의 소프트 스위칭 방식이 하드 스위칭 방식에 비해 전류기간이 길어 인버터 변조율의 상한의 한계가 발생하며, 회로의 도통손실이 시스템 전체를 고효율화로 동작시키는 데 커다란 문제점을 발생시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 새로운 ARDCL 스너버 회로를 이용한 3상 전압형 인버터 시스템을 제안하였다. 그리고 제안한 보조 공진 DC링크 회로와 3상 전압형 인버터를 이용한 시스템의 전력 손실을 분석하였다. 또한 출력전압의 공간백터 기법에 의해서 전류의 기간을 보상한 3상 전압형 소프트 스위칭 인버터를 동작시켜 출력전압의 파형 및 역률, 전력손실을 개선시켰다. 이러한 모든 사항은 시뮬레이션과 실험결과에 의해서 그 타당성을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 黒川, 小西, 岩岡, 中岡, “三相 電壓形ソフスイッチングインバータの損失分析と高性能化の検討” SPC-99-102, 1999.
- [2] 岡士, “チータ可變速ドライブにおける應用例について”, 電氣學會雜誌, Vol. 110, pp.653-655, 1987.
- [3] D.M.Divan, “The Resonant DC Link Converter - A New Concept in Static Power Conversion”, Conf. Rec. of IEEE Ind. Appl. Soc. Anun. Meeting, pp. 648-650, 1986.
- [4] 長井, 佐藤, 伊東, 森田, “高効率・低ノイズDCリンク共振三相インバータと轉流制御”, 電學論D, 120-D, VOL3, pp.417-422.
- [5] 佐藤, P. A. Dahono, 片岡, “共振 DC 링크인버터의損失算定法”, 電學論D, 112-D, 10, pp.950-958.
- [6] V. R. Stefanovic, “Currunt Development in AC Drives”, IPEC-Tokyo'90, pp382-390, 1990.