

재료비 절감을 위한 병렬구조를 갖는 인버터 에어컨용 역률제어회로

鄭龍采, 鄭潤澈, 權京顏

Power Factor Correction Circuit For Inverter Air-Conditioner With A Parallel Configuration To Reduce The Material Cost

Yong-Chae Jung, Yun-Chul Jung and Kyung-Ahn Kwon

요 약

본 논문에서는 3마력의 컴프레샤 모터를 갖는 대용량의 인버터 에어컨의 원가절감과 성능향상을 위해서 병렬구동방식을 사용한 역률제어회로를 제안하였다. 역률개선 LC필터를 제거하고 출력캐패시터와 인버터 스위치의 정격축소를 통해서 재료비를 줄이기 위해서 적절한 설계절차를 제시하였다. 이렇게 결정된 소자를 사용하여 6(kW) 소비전력을 갖는 프로토타입 회로를 구성하고 제안된 회로의 동작을 확인하기 위해서 실험을 하였다.

ABSTRACT

In this paper, the power factor correction circuit using a parallel drive method is proposed so that the high power inverter air-conditioner with 3{hp} compressor motor may obtain the cost down and the improved performance. The adequate design procedures are presented to reduce the material costs by eliminating the power factor improving LC filter and derating output capacitor and inverter switches. Using the determined components, the proto-type circuit with 6{kW} power consumption is built and tested to verify the operation of the proposed circuit.

Key Words: Power factor correction, Parallel drive method, Cost down, 3{hp} compressor motor

1. 서 론

성에너지에 대한 국제적인 관심이 상당히 고조되고 있으며 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 추세에 발맞춰 에어컨, 세탁기, 냉장고 등의 가전제품에도 인버터 기술을 적용하여 에너지 절약 및 고효율화를 추구하고 있다. 특히 일본에서는 1982년에 처음으로 인버터 에어컨이 나온 이래로 현재는 90% 이상이 인버터 에어컨이다. 우리나라에서는 90년대 중반부터 비로서 인버터 에어컨을 생산하고 있으나 비싼 가격 때문에 아직까지는 폭넓게 확산되고 있지는 못하는 실정이다.

에너지 절약을 위해서 적용했던 인버터 방식에서는 주로 정류부 다음에 큰 전해캐패시터를 사용하고 있기 때문에 인입

선에 펄스성 전류가 흐르게 된다. 이러한 전류 때문에 역률이 낮아지고 고조파전류가 많아져서 국가적으로는 송전효율을 떨어뜨리고 가정에서는 에어컨 사용시 실효전력의 부족으로 누전차단기가 떨어지는 현상들이 발생한다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서 기존의 인버터 에어컨에는 LC 수동필터를 사용하여 역률을 0.6에서 0.9정도로 올리고 있다. 하지만 이 필터는 60Hz용이기 때문에 상당한 공간을 차지할 뿐만 아니라 가격 또한 비싸다. 게다가 소비전력이 커지면 이러한 문제점은 더욱 부각이 되며 고조파에 대한 국제규제에도 만족하지 못하고 있다.

현재 고조파에 대한 규제는 가전제품에 한해서 EN 60555-2라는 규제가 유럽에서만 적용되고 있으나 점차로 각 국으로 확대될 전망이다. 게다가 2001년에 유럽에서는 상기

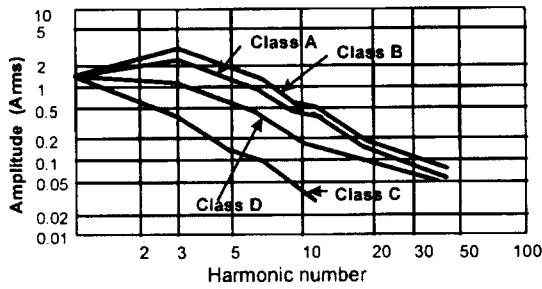


그림 1 각 제품분류별 고조파 규제치 (EN 61000-3-2)
Fig. 1 The harmonics limits for each classifying class

규제를 대치하는 EN 61000-3-2라는 규제를 통해서 16[A] 이하의 모든 기기에 고조파 규제가 확대시행될 예정이다. 그림 1에는 이 규제에 대한 제품분류별 규제치를 보여주는데 전 원주파수의 40차 고조파까지를 규제하고 있다. 가전제품 중 백색가전이라는 냉장고, 세탁기, 에어컨 등은 대부분 Class A에 해당되며 유럽에 수출을 하기 위해서는 이러한 규제를 꼭 만족해야 한다.

따라서 최근에는 비싸고 큰 부피를 차지하는 LC 수동필터를 제거하고 고조파에 대한 국제규제도 만족할 수 있는 역률 제어회로를 인버터 에어컨에 삽입하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며^[1-3] 히다찌를 비롯한 일본의 몇몇 업체에서는 이미 Boost 방식의 역률제어회로를 제품에 적용하고 있다. 하지만 패키지 에어컨과 같은 대용량 에어컨에는 아직 적용하지 못하고 있는 실정이다. 이는 16[A]이상의 기기에 해당되는 국제규제인 IEC 61000-3-4는 아직까지는 권장사항이고 실행될려면 아직 많은 시간을 요하고 있기 때문에 더욱 관심을 적게 갖고 있다. 하지만 앞에서 언급했듯이 기존의 인버터 에어컨에 적용된 LC필터는 역률을 개선하는 효과는 있지만 이 필터에 걸리는 전압 때문에 정류된 DC전압이 낮아져서 원하는 출력 RPM을 얻을 수 없는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 3마력의 컴프레샤 모터를 갖는 패키지 에어컨에 있어서 원가절감 및 성능향상을 위해서 병렬구동방식을 이용한 역률제어회로를 제안하였다. 제안된 병렬구동에 의해서 역률제어회로의 각 소자 가격을 줄일 수 있다. 게다가 적절한 설계절차를 통해서 출력캐패시터와 인버터 스위치의 정격 축소를 할 수 있어서 기존의 인버터 에어컨과 비교해서 원가절감을 할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 실험을 통해서 입력전력이 6[kW]정도인 proto샘플을 제작하고 동작특성을 분석하였다.

2. 제안된 회로의 구성 및 동작

그림 2는 본 논문에서 제안한 병렬구동방식을 이용한 인버터 에어컨용 역률제어회로를 보이고 있다. 이 회로에서는 역

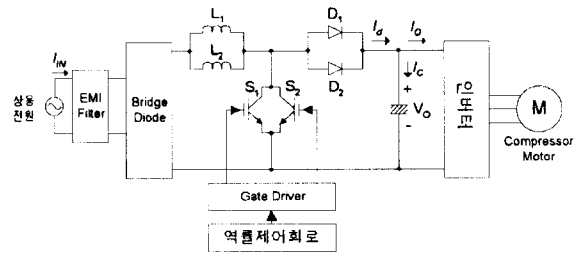


그림 2 제안된 병렬구동방식의 역률제어회로를 갖는 인버터 에어컨
Fig. 2 The proposed inverter air-conditioner with the power factor correction using a parallel drive method

률제어회로의 모든 소자들이 모두 병렬로 구성되어 있어 병렬구동방식이란 말을 사용하였다. 이렇게 각 소자들을 병렬로 구성한 이유는 제안된 방식과 같이 개별소자를 두 개 사용하는 것이 한 개의 모듈형 소자를 사용하는 것보다 가격이 저렴하기 때문이다. 또한, 아몰포스 코어를 사용하는 역률제어용 초크코어를 병렬로 사용한 것은 현재까지 상품화가 가능한 크기가 제한이 되기 때문이다.

제한된 회로의 기본 구성이 승압형 컨버터이므로 출력전압은 항상 입력전압의 피크치보다 커야한다. 그리고 역률제어를 위한 동작은 기존의 승압형 컨버터와 동일하고 두 개의 스위치 S_1 과 S_2 는 항상 동시에 온/오프를 한다. 따라서 두 스위치가 온되면 두 개의 초크코아에는 에너지를 저장하고, 오프되면 부하로 전달하는 과정을 통해서 역률제어와 승압동작을 동시에 행하게 된다.

3. 각 소자의 설계절차

각 소자를 최적으로 설계하기 위해서 제안된 인버터 에어컨의 최대 입력전력과 입력전류를 아래와 같은 조건들을 사용하여 계산하였다.

- 컴프레샤 모터의 정격 : 3마력 @60[Hz]
- 컴프레샤 모터의 효율 : 88[%]
- 입력전압 : 220[V] ±15%
- 운전주파수 : 30 ~ 104[Hz]
- 최대 입력전류 조건 : 입력전압=187[V]
- 과부하조건 : 정격의 115[%]
- 인버터/역률제어회로 효율 : 95/97[%]

이상과 같은 조건에서 컴프레샤 모터의 입력전력 즉 인버터의 출력전력은 다음식과 같다.

$$P_{M-IN-60} = 3[hp] \times 746[W / hp] / \eta_M = 2,543[W] \quad (1)$$

위의 수식은 모터가 60[Hz]로 동작할 때의 값이고 최고 운전주파수인 104[Hz]에서는 식(2)와 같이 운전주파수의 비만큼 곱해주어야 한다.

$$P_{M-IN-104} = P_{M-IN-60} \times 104 / 60 = 4,408[W] \quad (2)$$

인버터의 효율과 15[%] 과부하 조건을 고려하면 인버터의 입력전력은 다음식과 같다.

$$P_{INV-IN} = P_{M-IN-104} \times 1.15 / 0.95 = 5.336[W] \quad (3)$$

여기에 역률제어회로의 효율을 고려하면 인버터 에어컨의 입력전력은 다음식과 같다.

$$P_{IN} = P_{INV-IN} / 0.97 = 5,501[W] \quad (4)$$

따라서 약간의 마진을 고려하여 입력전력을 6[kW]로 정하였다.

입력전압이 187(Vrms)에서 가장 큰 입력전류가 흐르는데 이 값은 32.1[Arms]이다.

(1) IGBT 및 다이오드의 선정 : rms값으로 보면 40[A]이상의 소자로 선정하면 되지만 입력전류에 흐르는 리플전류와 다이오드의 역회복특성 등을 고려하면 최대전류는 90[A]이상으로 선정해야 한다. 여기에 온도조건 및 병렬구동에 따른 감쇄 등을 고려하여 600[V]/50[A]의 소자를 선택하였다. 따라서 IGBT는 도시바의 GT50J322 2개로 선정했고 다이오드는 해리스의 RHRG5060 2개로 선정했다.

(2) 인덕터의 선정^[1-2] : 30%의 리플전류를 고려하여 인덕터에 흐르는 최대 전류는 52.2[A]이다. 이 경우 인덕터를 구하는 식은 다음과 같다.

$$L = \frac{V_{IN,min}(peak) \cdot D}{f_s \cdot \Delta I} \quad (5)$$

$$= \frac{187\sqrt{2} \cdot 0.339}{25 \times 10^3 [Hz] \times 13.5[A]}$$

여기서 D는 최소입력전압의 피크치($V_{IN,min}(peak)$)에서의 duty factor이고 f_s 는 스위칭주파수이다. 따라서 본 논문에서는 유유코아에서 나오는 아몰포스 코어인 AMC-60S-C를 사용하여 530[μH]/30[A]의 인덕터를 만들어서 두 개를 병렬로 사용하였다.

표 1 제안된 방식과 기존 방식의 비교
Table 1 Comparison between the proposed method and the conventional one

구분	I_{IN}	I_d	I_o	I_c	DC Capacitor	인버터 스위치
기존의 인버터 에어컨	34.8	34.8	19.0	29.2	2700[μF] 400[V] 2개	30[A] IPM
제안된 인버터 에어컨	32.1	21.8	13.34	17.24	2200[μF] 450[V]	20[A] IPM

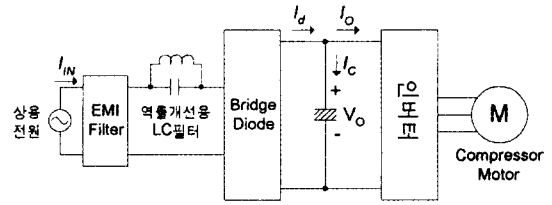


그림 3 기존의 인버터 에어컨 구성도
Fig. 3 Block diagram of the conventional inverter air-conditioner

(3) 출력 전해캐패시터의 선정 : 이것을 선정하기 위해서는 리플전류와 용량을 결정해야 한다. 이 리플전류는 모터부하일 경우는 다소 차이는 있지만 저방부하라는 가정하에서 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$I_c = \sqrt{I_d^2 - I_o^2} \quad (6)$$

여기서 I_d 는 다이오드의 rms전류이고, I_o 은 부하로 흐르는 rms전류이다. 출력전압은 400[V]로 정했기 때문에 부하전류 I_o 은 식(7)과 같다.

$$I_o = P_{INV-IN} / V_o = 5,336 / 400 = 13.34[A_{rms}] \quad (7)$$

다이오드 전류는 duty의 함수인데 평균 duty를 D_{ave} 라고 하면 이 전류는 다음과 같다.

$$I_d = I_{IN} \cdot \sqrt{1 - D_{ave}} \quad (8)$$

여기서 D_{ave} 는 다음식으로부터 구할 수 있다.

$$D_{ave} = 1 - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{I_o}{\sqrt{2} I_{IN}} = 0.5384 \quad (9)$$

따라서 I_d 는 21.8[Arms]이고 I_c 는 17.24[Arms]이다. 한편 캐패시터의 용량은 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$C = \frac{I_c}{\omega \cdot \Delta V} = 1,620[\mu F] \quad (10)$$

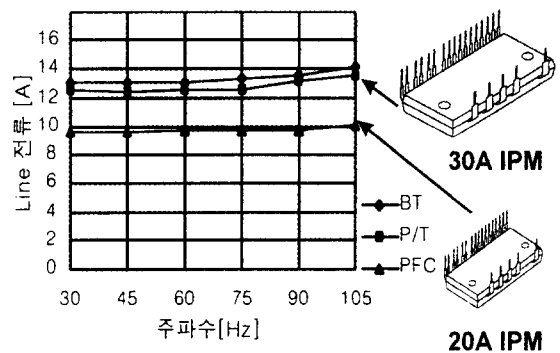


그림 4 PFC 유무에 따른 컴프레샤 선전류
Fig. 4 Compressor line current with or without PFC circuit

여기서 ω 는 입력전원주파수의 2배의 각주파수이며 ΔV 는 허용리플전압이며 10%로 정하였다. 마진을 고려하여 캐패시터는 2200(μ F)/450V로 정하였다.

이상에서의 결과와 기존의 인버터 에어컨과의 비교표는 표1과 같다. 여기서 기존의 인버터 에어컨은 그림 3과 같은 구조를 가지고 있으며 계산결과는 위의 절차와 비슷한 과정으로 얻을 수 있었다. 표1을 보면 알 수 있듯이 그림 4와 같이 역률제어회로의 유무에 따라서 라인전류가 약30%가량 감소 하므로 인버터 스위치로 30(A) IPM대신에 20(A) IPM을 사용할 수 있게 되었다. 또한 출력 전해캐패시터의 리플전류가 상당히 줄어들어 2,700(μ F)/400V 2개를 사용하던 것을 2,200(μ F)/450V 1개로 대체할 수 있어서 원가 절감이 가능하다는 것을 알 수 있다. 게다가 기존의 인버터 에어컨에 들어가는 역률개선용 LC필터를 삭제할 수 있어서 역률제어회로의 추가비용을 제하고도 약만원정도의 원가절감을 얻었다.

4. 실험결과

앞 절에서 설계된 소자들을 사용하여 그림 5와 같이 제안된 병렬구동 인버터 에어컨용 역률제어회로를 만들었다. 소비전력은 최대 6(kW)이고 입력은 단상 220(V) 전원이다. 그림 6은 저항부하 시 입력전력이 6,480(W)일 때의 출력 DC전압과 입력전류의 파형을 보이고 있는데 역률은 0.998이고 THD는 6.6(%)이다. 그림 7과 표2는 입력전력에 따른 출력 DC전압의 peak-to-peak 리플전압을 보이고 있는데 설계대로 10(%)이내의 값을 가지고 있다. 그림 8은 출력전압의 응답특성을 보이고 있는데 인버터부의 스위칭 소자의 안정성을 보장해 주고 컴프레샤와의 적절한 matching을 위해서 underdamped 응답특성을 갖도록 전압루프를 설계하였다.

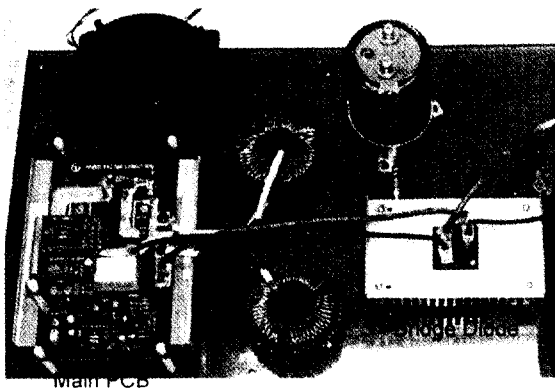


그림 5 제안된 회로의 구성사진
Fig. 5 The configuration photograph of the proposed circuit

표 2 출력 DC 전압의 Peak-to-peak 리플전압
Table 2 The peak-to-peak ripple voltage of the output DC voltage

입력전력 [W]	1000	1500	2000	2500	3000	
Ripple Voltage (peak-to-peak)	4.9V	6.1V	8.0V	9.8V	11.5V	
입력전력	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Ripple Voltage	13.4V	15.1V	16.8V	18.4V	20.2V	21.9V

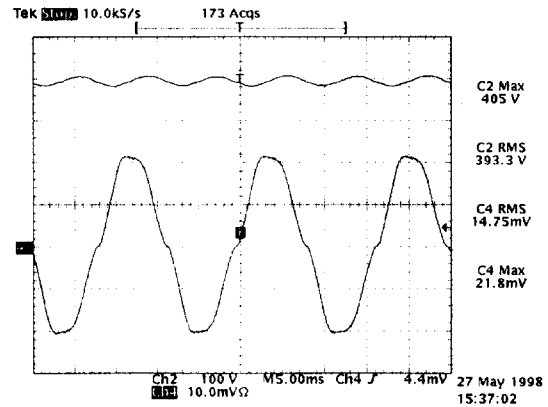


그림 6 실험파형 (위:출력전압, 아래:입력전류 @Pin=6,480W)
Fig. 6 Experimental Waveforms (Upper:Output Current, Lower:Input Current @Pin=6,480W)

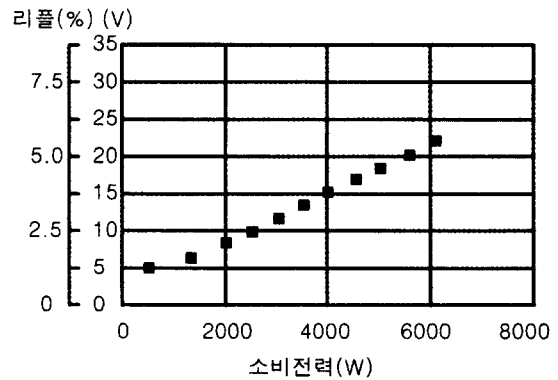


그림 7 출력 DC 전압의 Peak-to-peak 리플전압 그래프
Fig. 7 The peak-to-peak ripple voltage graph of the output DC voltage

또한 역률제어회로 동작의 안정성을 확보하기 위해서 그림 9는 소비전력이 2(kW)일 때 게이트 저항에 따른 다이오드의 역회복전류를 보이고 있다. 그림 9(a)는 게이트 저항이 12(Ω)일 때의 파형으로 이때의 역회복전류는 20(A)

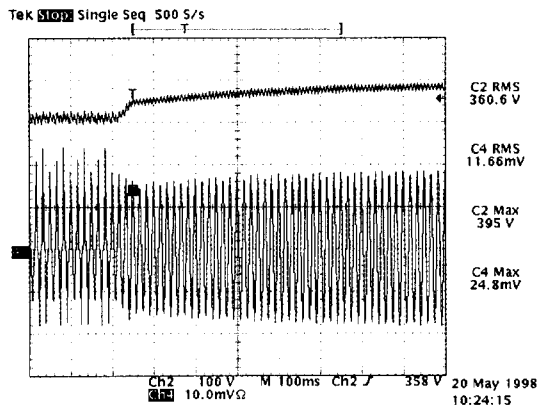


그림 8 출력전압의 스텝응답특성 (위:출력전압, 아래:입력전류)
 Fig. 8 The step response characteristic of the output voltage (Upper:Output Voltage, Lower:Input Current)

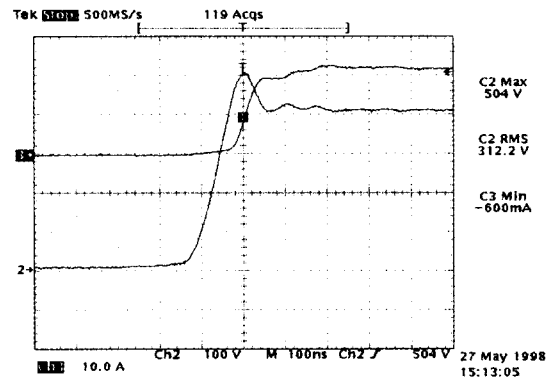
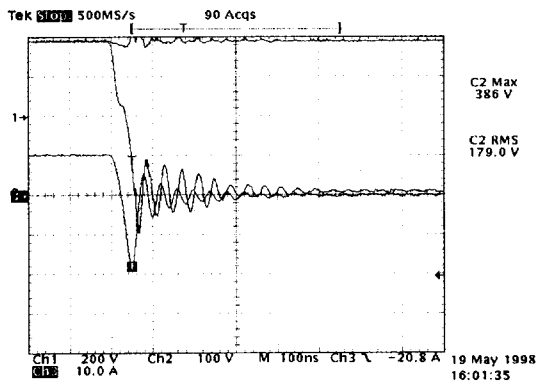
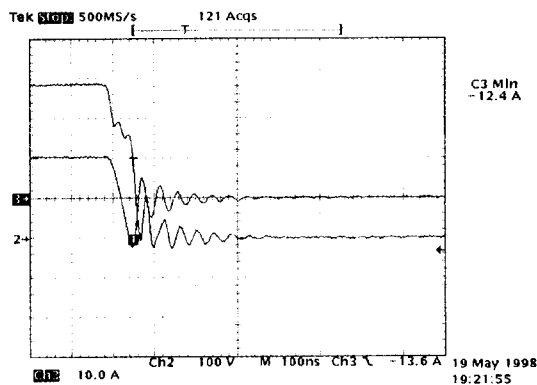


그림 10 보조캐패시터가 없을 때 스위치 전압 (아래:스위치전압)
 Fig. 10 The switch voltage without an auxiliary capacitor (Lower:Switch Voltage)



(a) $R_g=12[\Omega]$ 일 때



(b) $R_g=39[\Omega]$ (온저항) / $8[\Omega]$ (오프저항) 일 때

그림 9 게이트 저항별 다이오드의 역회복 특성 (위:스위치전압, 아래:다이오드전류)
 Fig. 9 The diode reverse recovery characteristic for each gate resistance (Upper:Switch Voltage, Lower: Diode Current)

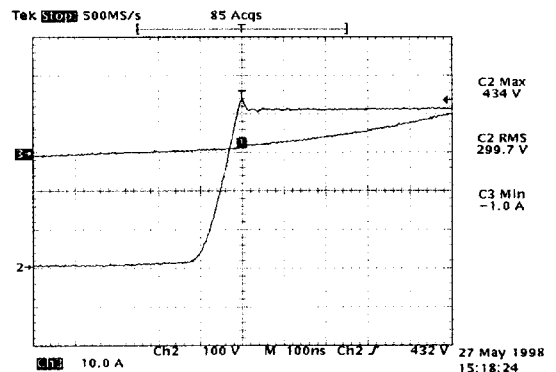


그림 11 보조캐패시터가 있을 때 스위치 전압(아래:스위치전압)
 Fig. 11 The switch voltage with an auxiliary capacitor (Lower:Switch Voltage)

이다. 반면에 그림 9(b)는 게이트의 온저항이 $39[\Omega]$ 이고 오프저항은 $8[\Omega]$ 인 경우로 역회복전류는 $12.4[A]$ 로 상당히 줄어들었음을 알 수 있다. di/dt 가 같다고 가정하면 역회복전류는 다이오드의 오프시 전류값의 제공근에 비례하므로 최대전력시로 환산해보면 $6[kW]$ 에서 약 $20[A]$ 이다.^[4] 이값은 IGBT 및 다이오드 선정시 중요한 데이터로 쓰여진다.

그림 10은 소비전력이 $2[kW]$ 일 때 IGBT 양단의 전압과 형을 보이고 있는데 오프시 라인인덕턴스에 의한 오버슈트가 $500[V]$ 까지 상승하기 때문에 마진이 상당히 축소되었다. 이는 인버터 에어컨 구조상 출력 캐패시터까지의 도선 길이가 상당히 길기 때문이다. 따라서 IGBT의 이미터 단자와 다이오드의 캐소드 단자 사이에 아주 가깝게 $1[\mu F]$ 캐패시터를 삽입하였다. 그림 11은 이 경우의 실험파형으로 오버슈트를 약 $30[V]$ 로 줄여서 안정성을 확보하였다. 이 캐패시터는 EMI특성에도 큰 도움을 준다.

5. 결 론

본 논문에서는 대용량 인버터 에어컨에서 Cost Down 및 성능향상을 위해서 병렬구동 방식을 이용한 역률제어회로를 사용하였다. 각 소자들을 병렬구동함에 따라서 원가절감이 가능하였고 최적의 설계절차를 거쳐서 회로를 구성하였기 때문에 출력캐패시터와 인버터의 스위치를 derating할 수 있었다. 따라서 역률제어회로를 사용했음에도 불구하고 원가가 절감된다는 것을 보여주었다. 3마력의 컴프레샤 모터를 내장한 인버터 에어컨을 구동하기 위해서 소비전력이 6(kW)인 역률제어회로를 구성하여 실험을 통해서 동작을 확인하고 신뢰성 확보를 위한 게이트 저항선정과 overvoltage를 줄이는 캐패시터의 삽입 등을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] Philip C. Todd, "UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design", Unitrode Application Note U-134, pp. 10-303~10-322.
- [2] Lloyd H. Dixon, "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies", Unitrode Application Note U-140, pp. 10-398~10-411.
- [3] Lloyd H. Dixon, "High Power Factor Switching Preregulator Design Optimization", Unitrode Switching Regulated Power Supply Design Seminar Manual SEM-700, pp. 13-1~12
- [4] Ned Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, Power Electronics - Converters, Applications and Design, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 1995.

< 저 자 소 개 >



정용채(鄭龍采)

1966년 2월 28일생. 1989년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업. 1991년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1995년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1995년~현재 LG전자 홈 어플라이언스연구소 전력전자팀 선임연구원.



정윤철(鄭潤澈)

1963년 1월 15일생. 1986년 2월 연세대학교 의용전자공학과 졸업. 1988년~1990년 중외기계(주). 1990년~현재 LG전자 홈 어플라이언스연구소 전력전자팀 선임연구원.



권경안(權京顏)

1962년 8월 22일생. 1985년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업. 1997년 8월 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1985년~1988년 삼성전자 종합연구소. 현재 LG전자 홈 어플라이언스연구소 전력전자팀 책임연구원.