

인버터 에어컨의 입력 역률 개선 및 하모닉 저감에 관한 연구

김성환[○], 이인호, 유지운, 김태덕*, 배영돈*, 박윤서*
 고려대학교 전기공학과, *삼성전자 생활시스템 연구소

A Study on the Input Power Factor Correction & THD Reduction of Inverter Airconditioner

Seong-Hwan Kim[○], In-Ho Lee, Ji-Yoon Yoo,
 Tae-Duk Kim*, Young-Dawn Bae*, Yoon-Ser Park*
 Dept. of Electrical Eng., Korea University
 Living System R&D Center, *Samsung Electronics

Abstract The demands of minimizing the reactive power and reducing the current harmonics are increasing nowadays. The inverter airconditioner needs high power and it operates with wide load range. Conventionally, an huge LC passive filter is used in airconditioner to improve the P.F and to reduce current harmonics which doesn't gives good results. In this paper, a design of active power factor correction(PFC) circuit for inverter airconditioner is described. To improve the P.F and to reduce the THD, an average current controlled active PFC is designed and tested. Experimental results show that the developed system achieves almost unity P.F and low THD for all load range.

1. 서 론

현재 사용되고 있는 일반적인 인버터 에어컨의 AC/DC 컨버터부는 정류 다이오드와 큰 평활 커패시터로 구성되어 상용 AC 전원을 DC로 변환하여 인버터에 DC전원을 공급한다. 이러한 구조의 AC/DC 컨버터부는 큰 평활 커패시터의 영향으로 정현파가 아닌 높은 펄스 형태의 입력 전류가 흐르게 되어, 낮은 역률과 많은 진류 고조파를 포함하게 된다. 이러한 펄스 형태의 전류는 높은 피크 전류에 의한 손실과 스트레스를 발생시키고, 입력 고조파에 의하여 Noise와 EMI, 입력 전압 파형 왜곡등의 문제가 발생한다.[1][2] IEC 555-2 규격은 입력 진류 고조파에 의해 발생하는 문제점을 제한하기 위하여 AC/DC 컨버터의 입력 진류 고조파를 규제한다.[3] 따라서 IEC 555-2 규격을 만족시키기 위하여 AC/DC 컨버터에 역률 개선 방식을 적용하여야 한다. 기존의 인버터 에어컨은 입력 라인에 LC 수동 필터를 사용하고 있지만 에어컨의 용량이 3kW 정도에 이르기 때문에 필터의 크기와 무게가 매우 크고, 최대 역률 0.85정도이며 진류 고조파가 IEC 555-2의 규격을 만족하지 못하므로 역률 개선 효과가 현저한 능동 역률 제어 방식의 역률 개선 회로를 필요로 한다.

본 연구에서는 3kW 용량을 갖는 인버터 에어컨에 능동 역률 제어 방식을 적용한 역률 개선 회로를 사용하여 입력 역률 개선과 진류 고조파를 감소시켜 IEC 555-2 규격에 만족하는 입력 전원부를 설계하며, 특히 역률과 THD에 가장 큰 영향을 미치는 인덕터를 현재 개발된 코어를 사용하여 설계하여 새로운 크기 및 형태의 인덕터 코어를 개발하는데 필요한 경비 및 시간을 줄일 수 있도록 하였다.

2. 능동 역률 개선 회로

그림 1은 인버터 에어컨의 주 전원 회로이다. 입력 AC 전원은 수동 필터를 거쳐 정류 다이오드에 의해 정류되고 평활 커패시터에 의해 인버터의 DC 전원으로 공급된다. 이와 같은 구조를

가지는 인버터 에어컨의 입력 전원부는 역률 개선 효과가 0.85정도로 제한되며 수동 필터의 인덕터 크기 및 무게가 매우 커지는 문제점이 있다. 따라서 역률 개선 효과 및 인덕터 크기 감소를 위하여 능동 역률 개선 회로를 사용한다.

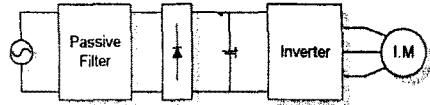


그림 1. 인버터 에어컨 전원부 블록도

그림 2는 능동 역률 개선 회로를 사용한 인버터 에어컨의 전원부 블록도이다.

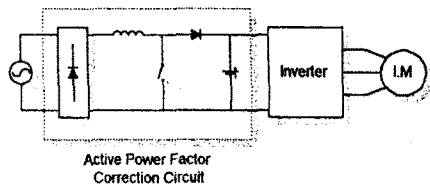


그림 2. 능동 역률 개선 회로를 사용한 인버터 에어컨 전원부 블록도

능동 역률 개선 회로는 DC/DC 컨버터를 전류 모드로 제어하여 입력 전류를 입력 전압과 동상인 정현파로 만들어 입력 전원부의 역률을 개선한다. 이 때 사용되는 DC/DC 컨버터에는 Buck, Boost, Flyback 등 여러 가지가 있으나 전류 제어의 용이성, 제어 회로의 용이성, EMI 및 노이즈 발생 특성과 인버터 에어컨의 부하 용량을 고려하여 Boost 컨버터를 사용한다.[1][4] 전류 제어기에는 히스테리시스 제어, 피크 전류 제어 및 평균 전류 제어 방식 등이 사용되며, 본 연구에서는 일정 스위칭 주파수를 가지면서 전류 제어 특성이 우수한 평균 전류 제어기를 구성한다.[5]

능동 역률 제어 Boost 컨버터의 역률 개선 효과 및 THD는 인덕터와 스위칭 주파수에 많은 영향을 받는다. 인덕터의 인덕턴스 값이 크고 스위칭 주파수가 높을수록 입력 전류의 리플이 감소하게 되어 진류 고조파가 감소하고 역률이 증가한다. 스위칭 주파수는 입력 전류의 리플 크기와 직접적인 관련이 있으며, 스위칭 주파수가 낮으면 인덕터의 인덕턴스가 작거나 부하가 작은 경우 순시 입력 전압이 낮은 범위에서 불연속적인 입력 전류가 흐르게 되어 전류의 왜곡이 발생하고 고조파가 증가하게 된다. 인버터 에어컨의 경우 부하 변동 범위가 500 ~ 3kW로 넓게 변화하기 때문에 전 부하 범위에서 고 역률과 고조파 저감을 위해

서 스위칭 주파수를 최대한 높게 설정하여야 한다. 하지만 스위칭 주파수는 스위칭 소자의 스위칭 특성에 의하여 제한된다. 3kW 용량을 만족하는 스위칭 소자로는 IGBT를 사용할 수 있으며, IGBT의 스위칭 주파수는 수십 kHz로 제한된다.

인덕터의 설계는 스위칭 주파수, 입력 전류 크기와 입력 전류 리플에 의해 결정된다. 인덕터에 흐르는 전류가 매우 크기 때문에 인덕터 코일의 지름이 커지며 따라서 코어에 권선할 수 있는 권수가 제한되므로 인덕턴스도 입력 전류의 피크 값에 의해 제한된다. 이에 따라 인덕터 코어의 선정과 인덕터 전류 리플 범위를 결정하는 것이 인덕터 설계의 가장 중요한 변수가 된다. 인덕터 코어는 Ferrite 재질을 주로 사용하며, 수십kHz의 스위칭 주파수에서 3kW의 용량을 필터링할 수 있는 코어는 상당 부분 제한된다. 이중 현재 개발되어 있는 FPQ5050 코어의 경우 약 1.8kW 정도에서 포화되기 때문에 3kW의 용량을 만족하기 위하여 2개의 FPQ5050 코어를 사용한다. 인덕턴스 값은 최대 전류 리플 $\Delta I(A)$, 용량 $P(kW)$, 입력 전압 $V_{in}(V_{rms})$, 스위칭 주파수 $f(kHz)$, 출력 전압 $V_o(Vdc)$ 와 그 때의 시비율(Duty factor)에 의해 결정된다. 최대 피크 전류는 최소 입력 전압일 때 발생하며, 그 값은 식 (1)과 같다.

$$I(pk) = \frac{\sqrt{2} \times P}{V_{in}(min)} \quad (1)$$

최저 입력 전압에서의 시비율은 식 (2)와 같고, 이에 따라 인덕턴스 값은 식 (3)으로 결정된다.

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \quad (2)$$

$$L = \frac{V_{in} \times D}{f \times \Delta I} \quad (3)$$

상기와 같은 과정에서 인덕터가 설계되면 실제 회로에서 인덕터 리플 전류에 의한 입력 전류 고조파가 IEC 555-2 규격에 만족하는지 검토하고, 규격을 벗어나는 경우 리플의 값을 줄일 수 있도록 인덕터를 재 설계할 필요가 있다.

3. 하드웨어의 설계

능동 역률 개선 회로의 설계는 크게 파워부와 제어부로 구분된다. 파워부의 설계는 표 1의 사양에 의거하여 Boost 컨버터로 설계한다. 개발된 능동 역률 개선 회로의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 능동 역률 개선 회로의 사양

항목	설계 기준
V_{in}	180 ~ 270Vac
Max. Power	3kW
V_o	380Vdc
Switching Freq.	30kHz
Current ripple	20%

스위칭 주파수를 최대한 크게 설정하여야 하나, 스위칭 소자의 스위칭 주파수 특성과 스위칭 손실, 효율등의 문제로 적절한 값을 선택하여야 한다. 스위칭 주파수를 20kHz로 설정하였을 경우 1.5kW 이상의 용량에서는 높은 역률과 낮은 고조파를 포함하지만 500W ~ 1kW의 낮은 용량에서는 순시 입력 전압이 낮은 부분에서 불연속적인 입력 전류가 흐르게 되어 전류 파형이 왜곡되고 역률이 0.9정도로 낮아지게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 인버터 에어컨의 전 부하 동작 범위에서 고역률을 얻을 수

있도록 스위칭 주파수를 30kHz로 설계하였다.

표 1의 능동 역률 개선 회로의 사양에서 입력 전류의 리플을 20%로 설정한 경우 식 (3)에 의거하여 인덕터는 600 μ H로 설계한다. 입력 용량 3kW에서 600 μ H의 인덕터가 포화되지 않기 위하여 코어는 충분한 크기를 가져야 하나 현재 시판중인 코어중 3kW 용량을 만족하는 코어는 극히 드물며 PQ 코어중 최대 크기인 FPQ5050의 경우 600 μ H 설계시 약 1.8kW에서 포화된다. 따라서 3kW에서 포화되지 않는 인덕터를 제작하기 위하여 FPQ5050 코어 2개를 사용하여 각각 300 μ H로 설계하여 직렬 연결 600 μ H의 인덕터를 제작하였다.

스위칭 소자의 선정은 최대 정격 전압과 전류가 최대 전압, 전류의 이상의 용량을 갖는 소자를 선정하여야 한다. 현재 개발되어 있는 3kW의 용량을 만족할 수 있는 스위칭 소자로는 IGBT를 사용할 수 있으며, 정격 용량과 스위칭 주파수를 만족할 수 있는 IR사의 IRGPCS50U를 선정하였다. Boost 능동 역률 개선 회로에서 스위칭 손실은 주로 다이오드의 역회복 특성때문에 발생한다. 스위치가 턴-온 되었을 때, 스위치에는 인덕터 전류와 다이오드 역회복 전류가 흐르게 되어 전류 스파이크가 발생하고 턴-온 손실이 증가한다. 따라서 다이오드는 역회복 시간이 가능한 작은 소자를 선정하여야 하며, 역회복 시간이 50ns인 IXYS사의 DSEI-505E를 선정하였다.

제어기는 내부에 전압 에러 앰프, 전류 에러 앰프 및 애널로그 굽생기를 포함하고 있는 UC3854를 이용하여 구성하였다. 전류 제어를 위한 입력 전류 센싱은 센싱 저항을 이용하는 방법과 2개의 전류 트랜스포머를 사용하여 스위치 전류와 다이오드 전류를 검출하는 방법이 있다. 전류 트랜스포머를 사용하는 방법은 전류 센싱에서 발생하는 손실을 줄일 수 있으나 가격이 증가하고, 능동 역률 개선 회로의 시비율이 일정하지 않고 넓은 범위로 변화하기때문에 코어가 포화되지 않기 위해서는 복잡한 전류 리셋 회로를 필요로 하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 센싱 저항을 사용하여 입력 전류를 센싱하였으며, 센싱 저항의 크기는 최대 입력 전류일때 센싱 저항 양단의 전압이 1V가 되도록 구성하여 0.04 Ω 로 설계하였다. 능동 역률 개선 회로의 출력 전압은 Boost 컨버터의 특성상 최대 순시 입력 전압보다 높아야 하며 본 연구에서는 380V로 설계하였다.

4. 실험 결과

표 1과 같은 사양에 의거하여 인버터 에어컨의 AC/DC 전 인 장치를 설계하여 역률 및 THD를 측정하였다. 이 결과를 기존의 LC 수동 필터를 사용한 경우와 비교하여 역률 개선 및 THD 저감 효과를 고찰한다.

그림 3은 LC 수동 필터를 사용한 인버터 에어컨의 부하 1.5kW에서의 입력 전압, 전류 파형이다. 입력 전류가 완전한 정현파가 아닌 높은 피크를 갖는 펄스 형태를 나타낸다.

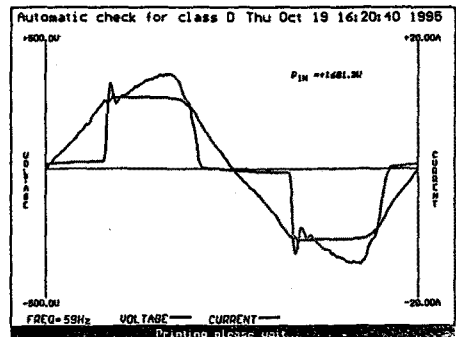


그림 3. LC 수동 필터를 사용한 입력 전압, 전류 파형

그림 4는 이 경우 입력 전류 고조파와 IEC 555-2 테스트 결과이다. 대부분의 고조파 하모닉이 IEC 555-2의 제한치를 초과함을 볼 수 있다.

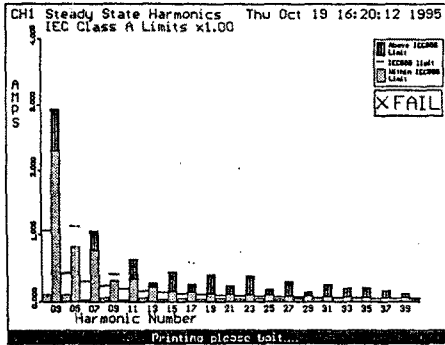


그림 4. LC 수동 필터를 사용한 경우의 입력 전류 고조파

그림 5는 능동 역률 개선 회로를 사용한 경우 인버터 에어컨의 부하 2.9kW에서의 전압, 전류 파형이다. 입력 전류가 입력 전압과 동상의 정현파로 제어되고 있음을 볼 수 있다.

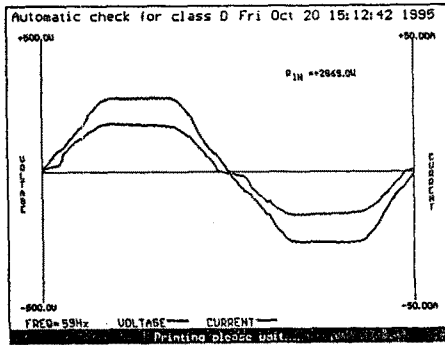


그림 5. 능동 역률 개선 회로 사용시 입력 전압, 전류 파형

그림 6은 이때의 입력 전류 하모닉과 IEC 555-2 테스트 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 입력 전류의 모든 고조파 하모닉이 IEC 555-2의 제한치를 만족한다.

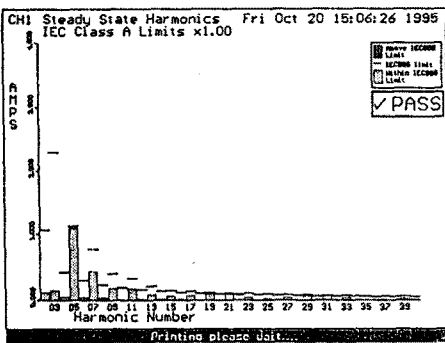


그림 6. 능동 역률 개선 회로 사용시 입력 전류 고조파

그림 7과 그림 8은 부하 변화에 따른 역률과 총 고조파 왜형률(THD)를 나타내었다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 제작된 시스템은 인버터 에어컨의 동작 부하 범위인 500 ~ 3kW 전 범

위에서 높은 역률과 낮은 THD를 나타낼 수 있다.

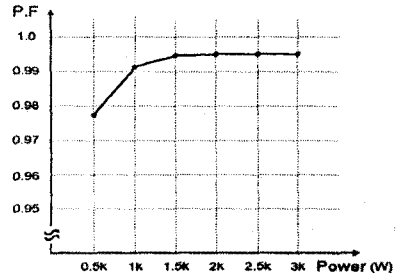


그림 7. 인버터 에어컨의 부하 변화시 역률

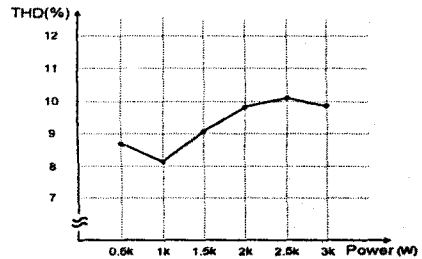


그림 8. 인버터 에어컨의 부하 변화시 총고조파 왜형률

5. 결론

인버터 에어컨의 입력 역률 개선과 고조파 저감을 위하여 능동 역률 개선 회로를 사용한 입력 전원부를 설계, 제작하였으며 실험을 통하여 성능을 확인하였다. 또한 역률 개선과 고조파 저감에 가장 큰 영향을 미치는 인덕터를 현재 개발된 코어를 사용하여 설계하여 새로운 형태의 인덕터 코어 개발에 필요한 경비 및 시간을 줄일 수 있도록 하였다. 제작된 시스템은 인버터 에어컨의 전 동작 부하 범위에서 1에 가까운 역률과 약 10% 정도의 낮은 총 고조파 왜형률을 나타내었으며 입력 전류 고조파를 제한하기 위한 IEC555-2 규격에 만족하였다.

참고 문헌

- [1] Lloyd H. Dixon Jr., "High Power Factor Preregulators for Off-Line Power Supplies", Unitorde Switching Regulated Power Supply Design Seminar Manual 1991, pp. E2-1 - E2-16
- [2] B. Alizadeh, "EMI & Thermal Consideration in Off-Line Boost Converter-based Power Factor Controllers" Power Conversion June 1991 Proceedings, pp. 149 - 156
- [3] Jon Klein and Mehmet K. Nalbant, "Power Factor Correction - Incentives, Standards and Techniques", PCIM magazine, June, 1990, pp. 26 - 31
- [4] Fernandes S. Dos Reis, "Determination of EMI Emission in Power Factor Preregulators by Design", IEEE PESC, 1994, pp. 203 - 212
- [5] James J. Spangler and Anup K. Behera, "A Comparison Between Hysteretic and Fixed Frequency Boost Converters Used For Power Factor Correction", IEEE APEC, 1993, pp. 281 - 286