

에어컨 시스템의 컨버터와 인버터 제어기술 동향

1. 서론

위니아딤채는 진화하는 고객의 라이프 스타일에 맞춰 고객의 삶의 질을 향상시키기 위해 가전제품을 제조/판매하는 종합가전기업으로 고객만족을 실현하기 위해 신 가전 개발 및 제품 포트폴리오를 확대하고 있으며, 국내를 넘어 글로벌 기업으로 나아가기 위해 총력을 다하고 있습니다.

당사는 에어컨 전문브랜드인 '위니아' 출시에 이어, 국내 김치냉장고 대중화를 이끈 '딤채'를 개발해 필수 가전 영역을 새롭게 개척했으며, 나아가 딤채의 기술력을 반영한 프리미엄 냉장고를 출시하며 이제는 명실상부한 대한민국 주요 가전 회사로 자리매김 했습니다.

위니아딤채는 계열사 위니아대우와 함께 국내 TOP 3 종합가전기업으로서 김치냉장고와 전기발송 등의 주방가전과 에어컨·공기청정기·제습기 등의 에어컨 제품군을 지속적으로 출시하고 있으며, 국내 최초로 IoT 디스플레이를 적용한 김치냉장고 '딤채'를 선보이는 등 IoT·AI를 적용한 신 가전 개발에도 앞장서고 있습니다.

당사는 2019년 7월 대우위니아그룹 창립 20주년을 계기로 사명을 '대우위니아'에서 '위니아딤채'로 변경하였고 고객감동 실현을 위해 제2의 도약을 추진하고 있습니다. 이제는 한 가족이 된 그룹의 가전계열사인 위니아대우와 함께 양사의 핵심 기술을 공유하고 끊임없는 연구 개발을 통해 세계 굴지의 가전제품으로 우뚝 설 수 있도록 차별화된 제품을 지속적으로 개발해 제2의 딤채 신화를 만들어 나갈 수 있도록 노력하고 있습니다.

2. 위니아 가정용 에어컨 제품 소개

위니아 가정용 에어컨은 크게 스탠드와 벽걸이 에어컨이 있으며, 스탠드 에어컨은 스탠드와 벽걸이 조합 모델인 '멀티' 그리고 스탠드 단독 모델인 '싱글' 로 구성되어 있습니다.

스탠드 에어컨에는 돌레바람(17/19평형), 돌레바람i(17/19평형), 웨이브(16/17평형) 모델이 있습니다. 첫 번째로, 돌레바람은 피부에 닿는 에어컨 바람이 싫은 고객을 위해 개발된 제품이며, 둥근 돌레바람 창을 통해 양 옆으로 바람이 토출되기 때문에 냉기가 직접 피부에 닿지 않으며 춥지 않고 시원한 실내공간을 만들어 줍니다. 두 번째로, 돌레바람i 에어컨은 실내를 춥지 않고 시원하게 만들어 준다는 점에서 돌레바람에어컨과 모티브가 같습니다. 돌레바람i는 전면 직사각형 토출구를 통하여 바람이 토출되며, 돌레바람 모드 선택 시 슬라이드 창을 통해 나온 냉기가 피부에 직접 닿지 않으면 시원한 실내공간을 만들어 줍니다. 마지막으로 웨이브 모델은 파도의 물결 모양을 본떠 만든 디자인 제품으로, 에어컨 본연의 기능에 충실한 냉방과 절전에 초점을 맞춘 제품입니다.

위니아 벽걸이 에어컨은 냉방, 제습 등 에어컨 본연의 기능에 충실한 제품으로 크게 냉방전용(Cooling only)과 냉난방(Heatpump) 모델이 있습니다. 냉방전용 모델에는 정속형(6/10평형), 인버터형(7/11평형) 에어컨이 있으며, 냉난방 모델은 인버터(7/11/13/16평형) 에어컨이 있습니다. 인버터 모델은 빠른 냉방과 전기료 절감을 위한 인버터 시스템 기능이 있어, 정속형에어컨 대비 급속냉방과 최소 에너지로 실내 희망온도를 일정하게 유지하여 전기료 절감 효과가 있습니다.



그림 1 위니아딤채 가정용 에어컨 제품

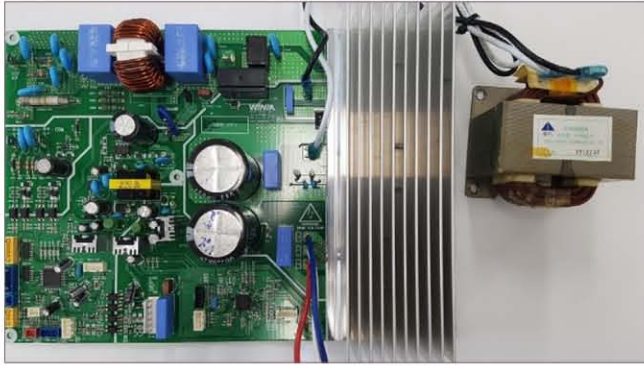


그림 2 가정용 에어컨 실외기 PBA

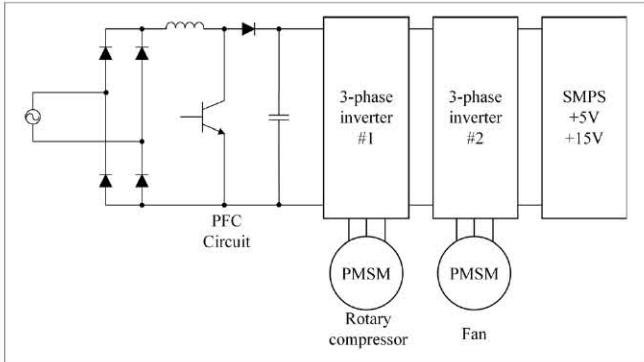


그림 3 에어컨 실외기 PBA의 세부 구성

3. 에어컨 실외기에 적용되는 전력전자 기술

가정용 에어컨의 실외기에는 그림 2와 같은 전력변환 회로가 탑재되며, 그림 3과 같이 역률 보정(Power Factor Correction, PFC) 회로, 전해 커패시터로 구성된 DC-Link, 로터리 컴프레서 구동을 위한 인버터와 팬 모터 구동을 위한 인버터 회로, 그리고 제어 전원(+5V, +15V) 공급을 위한 SMPS 회로로 구성됩니다. 가정용 에어컨 실외기 PBA의 전기적 용량은 에어컨의 냉방 능력에 따라서 대략 1kW~3kW급으로 냉장고, 세탁기 등의 가전제품에 비해 역률 보정 회로의 역할이 상대적으로 크다고 볼 수 있습니다. 3상 인버터는 압축기 구동용 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)과 실외기 Fan 구동용 PMSM 제어를 목적으로 사용되며, 센서리스 벡터 제어(Sensorless Vector Control) 방식이 일반적으로 사용되고 있습니다. 본 절에서는 역률 보정 회로와 인버터 회로의 기술 현황에 대해 자세히 살펴보려고 합니다.

3.1 PFC 기술 동향

에어컨에서 전력을 효과적으로 사용하기 위해서는 역률(power factor)이 높아야 한다. 역률은 다음과 같이 유효 전력을 피상 전력으로 나눈 값으로 정의된다.

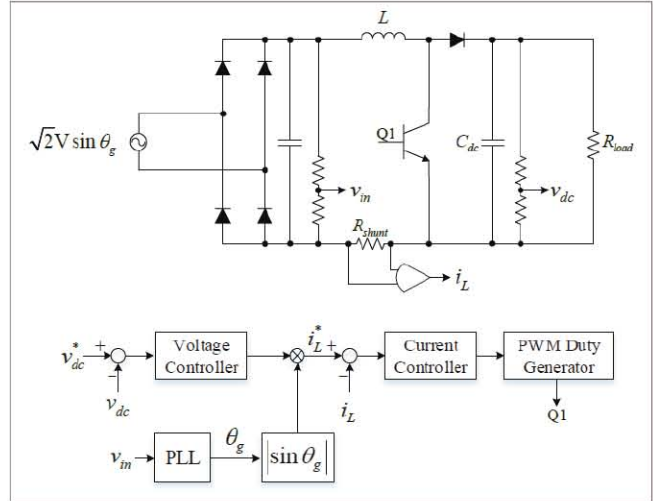


그림 4 부스트 타입 PFC 컨버터 및 제어 구조

$$\text{power factor} = \frac{(\text{average power})}{(\text{rms voltage}) (\text{rms current})}$$

역률은 위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 0과 1사이에 있는 값으로 그 값이 낮으면 전력의 전달 효율이 떨어지며, 이 값을 높이도록 전력사업자 또는 국가가 규제 또는 관리하고 있다. 역률은 아래의 식으로 다시 표현할 수 있다.

$$PF = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos(\theta_v - \theta_i)$$

= distortion factor * displacement factor

역률을 규제하는 규격은 크게 IEC 61000 규격과 IEEE 519 규격으로 나눌 수 있다. 일반적으로 에어컨은 역률 규제 IEC61000-3-2 또는 IEC61000-3-12의 규제를 따른다.

그림 4는 일반적인 역률 개선 회로를 나타내었다. Power Factor Correction 회로는 부스트 컨버터를 사용하는 것이 일반적이다. 이는 출력 전압이 입력 전압 최대치보다 크게 하면 모든 입력 전압 범위에서 제어가 가능하며 전류의 왜곡이 없고, 입력 전류가 연속으로 EMI에도 유리하다.

그림 4는 PFC를 위한 제어 블록 다이어그램을 포함하고 있다. PFC 제어기는 출력 전압인 DC Link 전압을 제어하기 위한 전압 제어기와 전압 제어기 출력인 전류 지령에 따라 입력 전류를 제어하는 전류제어기로 구성된다¹¹⁾. 일반적으로 PFC 제어기는 DC Link 전압 제어기 내부에 입력 전류제어기를 갖는 듀얼-루프(dual-loop) 제어기 형태를 취한다. 전류제어기의 Bandwidth는 PWM 주파수 1/20~1/40 정도의 수준으로 100~1kHz 정도의 수준을 가진다. 반면 전압 제어기의 경우 계통 주파수보다 Bandwidth가 높을 경우 Harmonic 전류가 발생되어 계통 전압 주파수의 1/10 정도 수준에서 결정한다.

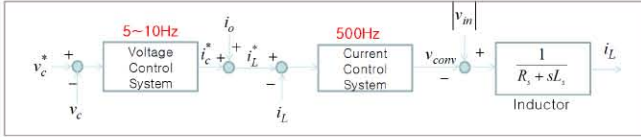


그림 5 듀얼-루프 구조의 제어기

전압제어기의 출력인 전류 명령을 계통 입력 전압과 동기시키기 위하여 입력 전압의 형상을 곱하여 주어 입력 전류 명령을 만든다.

한편 PFC 컨버터에서 입력 전류를 제어하기 위한 회로는 크게 Bridge 회로가 있는 Boost Converter, Bridgeless Converter, 그리고 Interleaved Boost Converter 회로로 나누어 볼 수 있다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같은 Bridge 형태의 경우 쉽게 회로를 구현할 수 있는 장점은 있으나, 동시에 도통되는 스위치가 많아 도통 손실이 커져 효율이 다소 낮은 단점이 있다. 반면 Bridgeless 형태의 회로를 사용하면, 동시에 도통되는 스위치가 2개로 도통 손실이 낮아 효율이 높으나, 공통 모드 잡음이 크게 발생된다고 보고된 바 있다^[2]. 이 문제를 해결하기 위하여 그림 7과 같이 계통 측에 두개의 다이오드를 추가하는 방법의 회로도 있어 공통 모드 잡음을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 동일 전류 맥동을 갖기 위하여 두 배의 인덕터 용량이 필요한 단점이 있다^[2].

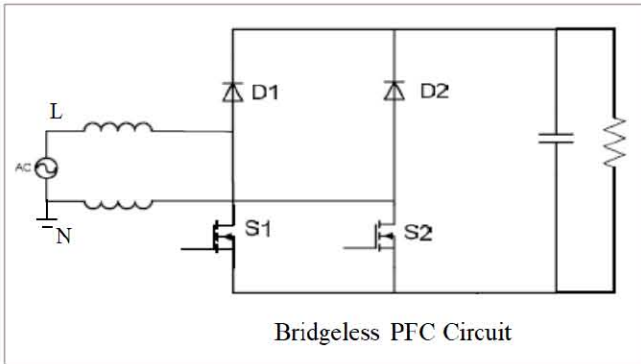


그림 6 브리지리스 PFC 컨버터

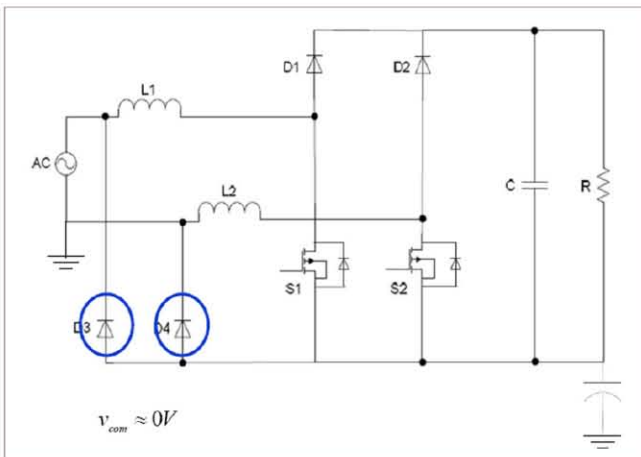


그림 7 공통 모드 잡음을 낮춘 브리지리스 컨버터

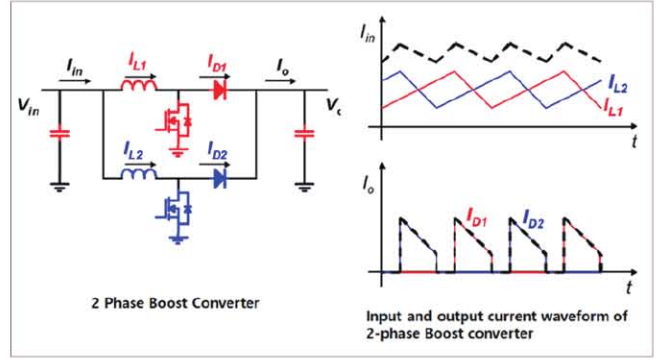


그림 8 2상 인터리브드 PFC 컨버터

한편 최근에는 수동 소자의 체적을 줄이기 위하여 스위칭 주파수가 점차 고주파화 되고 있다. 이를 통하여 부스트 컨버터의 필터 인덕터의 사이즈의 저감이 가능하다. 그러나 스위칭 주파수가 점차 고주파화 됨에 따라, 150kHz~30MHz까지 인 전도 대역 잡음 발생 가능성이 커진다. 이에 따라 인터리브드 방식으로 제어하여 전류 맥동의 저감을 통하여 잡음을 저감하는 방식의 적용이 확대되고 있다^[3].

3.2 인버터 기술 동향

에어컨에서 인버터는 압축기 구동용 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)과 팬 구동용 PMSM을 제어하는 역할을 담당한다. PMSM 제어 방식으로는 그림 9와 같이 D 축 및 Q 축 전류를 독립적으로 제어하는 FOC(Field Oriented Control) 방식이 적용되고 있으며, PMSM의 회전자 위치 검출 방식으로 센서리스(Sensorless) 위치/속도 추정 방식이 사용되고 있다.

PMSM의 FOC 구현을 위해서는 인버터에 의해 PMSM에 공급되는 상 전류 측정이 필요한데, 인버터의 비용을 낮추기 위해서 셉트(shunt) 저항을 이용한 전류 측정/복원 방식이 일반적으로 사용되고 있다. 특히 1-셉트만을 이용한 전류 측정 방식이 널리 사용되고 있다. 그림 10은 1-셉트 전류 검출의 원리를 설명하는 것으로, 유효 전압 벡터가 인가되는 구간에서 1-셉트에 흐르는 전류로부터 PMSM의 상 전류를 검출할 수 있다. 유효 전압 벡터의 폭이 작은 경우 1-셉트에서의 전류

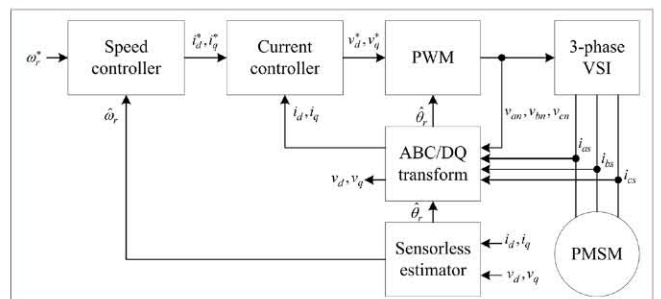


그림 9 센서리스 벡터 제어 시스템

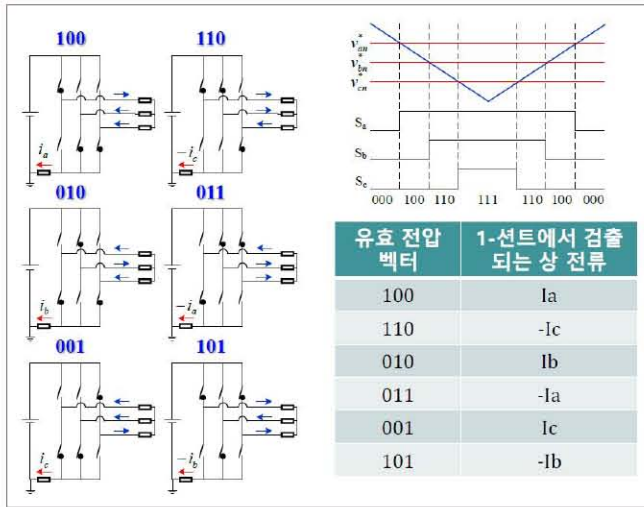


그림 10 1-선트 전류 검출의 기본 원리

검출이 불가능하기 때문에, 이러한 경우 전압 벡터를 변조하여 전류를 검출하는 방식이 사용되고 있다^[4]. 그러나 전압 벡터의 변조로 인하여 상 전류 맥동이 증가하고, 이로 인해 PMSM에서 진동/소음이 증가하는 경향이 있다. 압축기의 경우 1-선트 전류 검출로 인한 진동/소음 영향이 적다고 볼 수 있다. 그러나 팬 모터의 경우 진동/소음의 영향이 크게 나타날 수 있으며, 이러한 경우 1-선트 보다는 3-선트 방식의 전류 검출 방식을 사용한다.

에어컨 인버터에서는 일반적으로 PFC 회로가 추가되어 인버터 가격 상승의 원인이 된다. PFC 회로를 대체할 목적으로 인버터 직류 링크 단의 수백~수천 uF 용량의 전해 캐패시터 뱅크를 10uF 정도의 필름 캐패시터로 바꾸고 그림 11과 같이 인버터의 출력 제어를 통해 역률 제어를 수행하는 방식(캐패시터리스 인버터)이 한때 시도되기도 했는데, 압축기 구동 PMSM에서 입력 전원의 2배 주파수에 해당하는 토크 맥동이

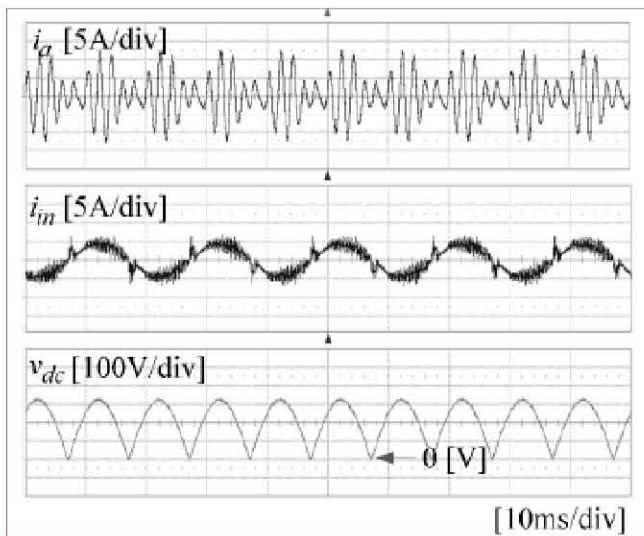


그림 11 캐패시터리스 인버터의 전류 및 전압 파형^[6]

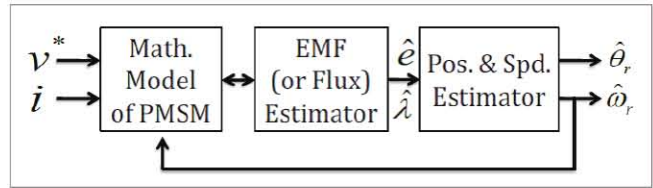


그림 12 센서리스 위치/속도 추정기의 구성^[7]

발생하고 인버터에서의 peak 전류가 크게 증가하는 문제가 있는 것으로 알려져 있다^{[5],[6]}.

압축기 구동용 PMSM의 센서리스 위치/속도 추정 기술로는 모델 기반의 역기전력 또는 자속 추정 방식이 널리 이용되고 있다. 그림 12는 모델 기반 센서리스 위치/속도 추정기의 구성을 보여준다.

모델 기반 센서리스 위치/속도 추정기의 특성은 센서리스 알고리즘에 사용되는 PMSM의 수학적 모델에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다^[7]. 정지 좌표 계 전압 방정식을 이용하여 역기전력을 추정하는 센서리스 알고리즘의 경우 PMSM의 운전 속도가 증가할수록 회전자 위치의 실제 값과 추정 값 사이의 오차가 증가하는 문제가 있다. 정지 좌표 계 전압 방정식을 이용하여 자속을 추정하는 센서리스 알고리즘의 경우에는 적분기에서 직류 성분의 오차가 누적되는 것을 방지하기 위해 필터가 사용되는데, 이로 인해 필터의 차단 주파수 이하 영역에서 센서리스 위치/속도 추정기의 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다. 동기 좌표 계 전압 방정식을 사용하여 역기전력을 추정하는 센서리스 알고리즘의 경우 실제 속도와 추정 속도 사이의 오차 항목을 무시하기 때문에 압축기 저속 운전과 같이 부하 변동에 의해 속도에 맥동이 비교적 크게 발생하는 경우 센서리스 제어 성능이 저하될 수 있다. 따라서 모델 기반 센서리스 위치/속도 추정기는 각각의 수학적 모델에 따른 특성 차이를 고려하여 설계할 필요가 있다. 또한 모델 오차의 영향을 많이 받기 때문에 파라미터 변동을 센서리스 제어 알고리즘에서 적절히 보상해 주어야 한다. 특히 압축기 구동용 PMSM의 경우 Q축 인덕턴스가 자기 포화에 의해 크게 변화하기 때문에 상 전류를 기준으로 센서리스 제어 모델에 사용되는 인덕턴스 값을 실시간으로 보정해 줄 필요가 있다.


모델 기반 센서리스 위치/속도 추정 알고리즘을 사용하여 에어컨 압축기를 기동하는 경우 일반적으로 강제 정렬-동기 가속-센서리스 절환의 단계를 거치게 된다. 에어컨에서는 압축기가 운전을 정지한 후 재기동을 하는 경우 압축기의 흡입부와 토출부 사이의 압력이 평형이 될 때까지 대략 3분 정도에서 5분 정도의 대기 시간을 가지게 된다. 그러나 실외기의 외부 온도 조건에 따라 대기 시간이 경과한 후에도 압력 평형이 되지 않는 경우가 존재하며, 이 경우 압축기를 기동하

는 경우 구동용 PMSM 에 제법 큰 부하가 인가되어 기동 실패를 유발하기도 한다. 영구자석 매입형 구조의 PMSM을 사용하는 경우 신호 주입 방식의 센서리스 위치/속도 추정 알고리즘을 사용하여 기동 성능을 개선할 수도 있다. 그러나 에어컨 압축기의 경우 부하 및 기동 특성을 적절히 이용하면 모델 기반의 센서리스 위치/속도 추정 알고리즘만으로도 원만한 기동 제어 성능을 구현할 수 있다.

에어컨 압축기의 경우 운전 영역이 최대 7200r/min에 도달한다. PFC 제어를 통해 인버터 DC-Link 전압을 380[V]로 유지하는 경우에도 압축기가 고속으로 운전되는 영역에서는 인버터의 출력 전압이 포화 될 수 있다. 이러한 경우에는 일반적으로 전압 제한 방식의 약자속 제어 방식이 사용되고 있다⁹⁾.

에어컨에 사용되는 로터리 압축기는 냉매 압축용 롤러의 개수에 따라서 트윈 로터리 방식과 싱글 로터리 방식으로 분류된다. 트윈 로터리 압축기의 경우 저속 운전 영역에서 부하 변동에 의한 진동이 적게 발생하나, 싱글 로터리 압축기의 경우 기구적 특성으로 인하여 저속 운전 영역에서 부하 변동에 의해 진동이 크게 발생한다. 싱글 로터리 압축기를 사용하는 경우 센서리스 벡터 제어 알고리즘에 포함된 속도 제어기에서 반복 제어기 또는 테이블 등을 이용하여 적절한 토크 지령을 발생시킴으로써 부하 변동에 의한 진동 발생을 억제할 수 있다⁹⁾.

4. 결론

기후 변화에 따른 이상 고온이 자주 발생하면서 에어컨의 소비가 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 정부에서는 에어컨의 고효율화 정책을 꾸준히 추구하고 있으며, 이에 따라 에어컨의 에너지 효율 등급 역기 강화되고 있는 추세이다. 전력전자 기술이 에어컨에 도입되면서 과거 정속형 압축기를 사용한 에어컨 대비 인버터 에어컨의 에너지 효율이 크게 상승하였으며, 이로 인해 에어컨에서 전력전자 기술의 중요성이 크게 부각되었다. 앞으로도 전력전자 기술이 에어컨 제품의 혁신을 이끌 것으로 예상된다. 

참고문헌

- [1] H. S. Choi, Fairchild semiconductor, Power Factor Correction (PFC).
- [2] Q. Li, M. A. E. Andersen, and O. C. Thomsen, "Conduction losses and common mode emi analysis on bridgeless power factor correction, PEDS2009.
- [3] C. Wang, "Investigation on interleaved boost converters and applications," Ph. D Thesis of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [4] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, U. Jaeger, and P. Thøgersen, "Single current sensor technique in the DC link of three-phase PWM-VS inverters: a review and a novel solution," Industry Applications IEEE Transactions on, Vol. 33, No. 5, pp. 1241-1253, 1997.
- [5] H. S. Jung, S. J. Chee, S. K. Sul, Y. J. Park, H. S. Park, and W. K. Kim, "Control of three phase inverter for AC motor drive with small dc-link capacitor fed by single phase AC source," in IEEE 2012 Energy Conversion Congress and Expo (ECCE), pp. 2985-2991, 2012.
- [6] K. W. Lee, "Compensation of periodic magnetic saturation effects for the high-speed sensorless control of a PMSM driven inverter output power control-based PFC strategy," Journal of Power Electronics, Vol. 15, No. 5, pp. 1264-1273, Sep. 2015.
- [7] K. W. Lee and J. Ha, "Evaluation of back-EMF estimators for sensorless control of permanent magnet synchronous motors," Journal of Power Electronics, Vol. 12, No. 4, pp. 605-615, Jul. 2012.
- [8] J. M. Kim and S. K. Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," in IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 33, No. 1, pp. 43-48, Jan./Feb. 1997.
- [9] 조관열, "로타리 압축기의 진동저감을 위한 영구 자석 동기전동기의 토크제어," 한국교통대학교 논문집, Vol. 42, No. 1, pp. 277-283, 2007.

정병웅(鄭秉雄) 유니아딴채 인버터개발팀장

1993년 부산대 전자공학과 졸업. 2003년 부산대 지능기계시스템과 졸업(석사).
1993년~2012년 LG전자 수석연구원. 2013~2016년 TCL전자 기술교문.
2017~현재 유니아딴채 인버터개발팀장.



이광운(李光雲) 목포해양대 해양메카트로닉스학부 교수

1993년 고려대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1999년 동 대학원 졸업(공학박). 2000년~2007년 삼성전자 책임연구원.
2008년~현재 목포해양대 해양메카트로닉스학부 교수.

