

# 공조 장치의 컴프레서 구동 시스템에서 원가절감을 위한 회로와 제어기술

최근 세계적인 폭염 및 공기오염 문제로 인해 에어컨과 공기청정기의 판매량이 급증하였다. 국내의 경우 최근 3년간 가전 시장에서 매년 10%가 넘는 판매액 증가를 기록하였으며, 향후 몇 년간 국내와 중국을 중심으로 에어컨, 공기청정기와 같은 공조 장치 판매량의 지속적인 증가가 예상된다. 가정용 전자기기 제품은 개별소비자가 직접 구매하여 장기간 사용하는 내구소비재로써, 이의 품질 및 신뢰성은 제조사의 브랜드가치 확립과 및 제품의 고급화를 위하여 반드시 고려되어야 한다. 이와 더불어 제품의 제조원가 절감은 기업의 수익성 향상 및 제품의 가격 경쟁력을 위하여 최우선적으로 고려되어야 할 사항 중 하나이다. 본 글에서는 공조 장치의 컴프레서 구동 시스템에서 원가절감을 위한 회로와 제어기술을 소개하고자 한다.

## 1. 서론

최근 세계적인 폭염 및 대기 오염 문제 발생에 의하여 에어컨, 공기청정기와 같은 공조 장치의 수요가 증가하고 있다<sup>[1]</sup>. 그중 에어컨과 같은 공조 장치는 냉매의 압축을 위해 컴프레서의 사용이 필수적이다. 컴프레서 구동 시스템은 그림 1과 같이 교류(Alternating current, AC) 전원을 직류(Direct current, DC) 성분으로 변환하기 위한 정류기 부와 3상 AC 모터의 구동을 위한 인버터 부로 구성되어 있다<sup>[2]</sup>.

정류기 측에서는 AC 성분을 DC 성분으로 정류하는 과정에서 리플 성분 전력이 발생한다. 이와 같은 리플 성분이 직류단에 포함될 경우 인버터를 이용한 모터 구동 시 모터에 토크 리플을 발생하여 소음, 제어 불안정성 및 손실을 유발한다<sup>[3]</sup>. 리플 성분을 제거하기 위해 직류단에는 일반적으로 대용량의 커패시터가 사용되며 이는 전력변환시스템의 소형화 및 저가 격화를 저해하는 요소가 된다<sup>[4]</sup>.

AC 모터의 구동을 위해 사용되는 인버터는 직류단에 연결되어 AC 모터 구동을 위한 3상 전류를 생성한다. 모터 구동 시스템은 적용 분야에 따라 여러 대의 전동기를 동시에 구동해야 하는 경우가 존재한다<sup>[5],[6]</sup>. 대표적으로 팬, 자동문, 컨베

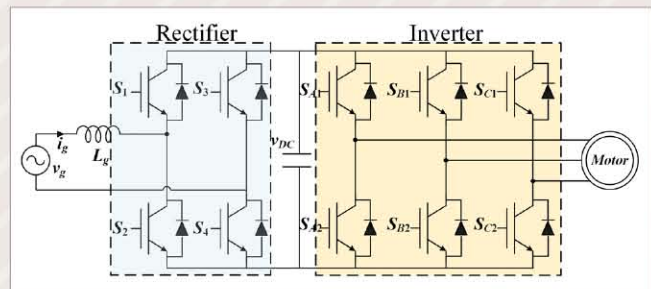


그림 1 컴프레서 구동 시스템

이어 벨트, 무빙워크와 같은 적용 분야가 있으며, 공조 장치의 컴프레서는 팬의 구동이 필요한 시스템이다. 일반적으로 여러 대의 전동기를 구동하기 위해서는 모터 수에 상응하는 수의 인버터가 필요하며 이는 다중 모터 구동이 필요한 시스템의 구성비용을 증가시킨다<sup>[7]</sup>.

본 글에서는 공조장치의 컴프레서 구동 시스템에서 원가절감을 위한 회로 및 제어기술로써 Capacitor-less (Cap-less) 컨버터 회로와 단일 인버터를 이용한 듀얼 모터 구동 시스템을 소개하고자 한다.

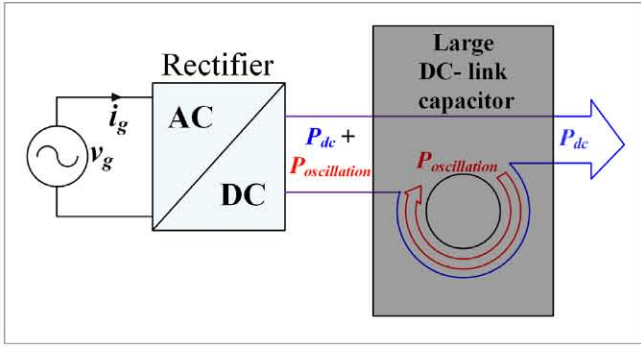


그림 2 정류기의 리플 전력 필터링 과정

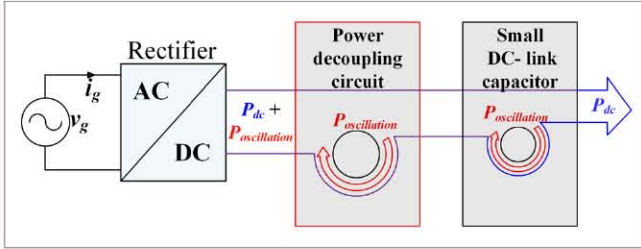


그림 3 Cap-less 컨버터의 리플 전력 필터링 과정

## 2. Cap-less 컨버터

Cap-less 컨버터는 직류단에 작은 용량의 커패시터를 적용한 컨버터를 의미한다. 일반적으로 직류단에 용량이 작은 커패시터를 사용할 경우 AC 성분의 필터링 성능이 저하된다. Cap-less 컨버터는 추가 회로 구성을 통해 직류단 커패시터의 필터링 부담을 분배할 수 있어 직류단에 용량이 작은 커패시터의 적용이 가능하며, 추가 회로를 적절히 선정하여 시스템의 부피와 제조원가를 감소시킬 수 있다<sup>[8],[9]</sup>. 게다가 전해 커패시터에 비해 단위 부피 당 정전용량이 작지만 매우 긴 수명을 가지는 필름 커패시터의 사용이 가능하게 되어 시스템의 신뢰성 또한 향상시킬 수 있으므로 시스템의 유지 보수 비용이 절감된다<sup>[10],[13]</sup>.

### 2.1 단상 Cap-less 컨버터

그림 2와 그림 3은 대용량 커패시터가 적용된 단상 정류기와 추가 회로가 추가된 단상 정류기의 리플 성분 전력의 필터링 과정을 각각 나타내고 있다. 일반적인 단상 정류기는 입력 전압과 입력 전류가 이상적인 사인파 형태일 경우 리플 성분 전력이 직류단 측에 전달된다. 이상적인 경우의 입력 전압과 입력 전류는 식 1과 같고 입력 전력은 식 2와 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$\begin{aligned} v_g(t) &= V_g \sin \omega t \\ i_g(t) &= I_g \sin(\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

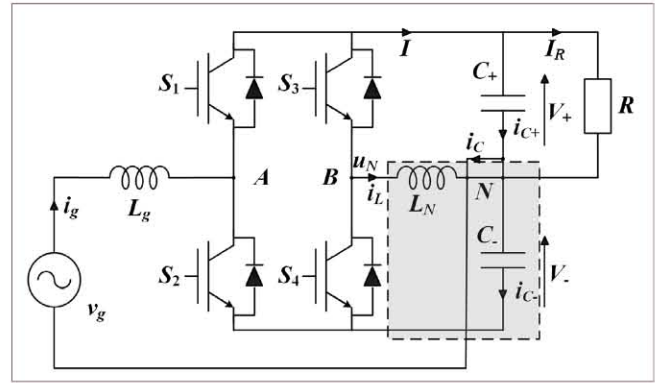


그림 4 Four-switch 정류기와 이중 분할 DC-link로 구성된 회로

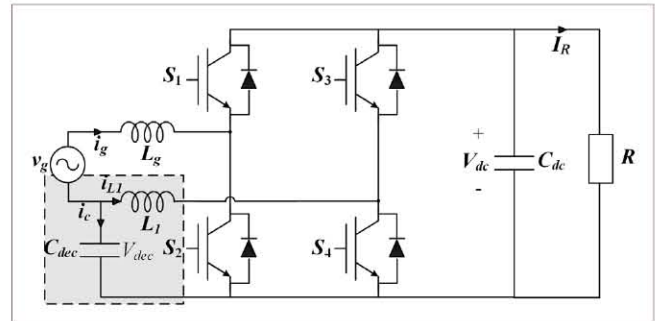


그림 5 Active power decoupling 단상 PWM 정류기

$$P_{in} = v_g(t) i_g(t) = \frac{V_g I_g}{2} \cos \varphi - \frac{V_g I_g}{2} \cos(2\omega t - \varphi) \quad (2)$$

식 2의 두 번째 항으로 표현된 리플 성분 전력이 정류기 출력단으로 필터링 과정 없이 전달될 경우 직류단 전압은 DC 성분 전압뿐 아니라 AC 성분 전압을 포함하게 된다. 이와 같은 AC 성분을 필터링하기 위해 대용량 커패시터의 적용이 필요하며 대용량 커패시터로는 주로 전해 커패시터가 적용된다. 필요 커패시터 용량을 줄이기 위해서는 추가적인 회로의 적용을 통해 직류단 커패시터의 리플 성분 필터링 부담을 감소시켜야 한다.

그림 4는 Four-switch 정류기와 이중 분할 DC-link로 구성된 Cap-less 컨버터를 나타낸다<sup>[4]</sup>. 해당 회로는 2개의 하프-브리지 컨버터에 인덕터  $L_N$ 을 추가하고, 커패시터를 2개로 분할하여 구성할 수 있다. 이 회로는 좌측에 위치한 스위치  $S_1, S_2$ 로 구성된 Rectification leg와 우측 스위치  $S_3, S_4$ 로 구성된 Neutral leg로 이루어져 있으며 각 레그는 독립적으로 동작한다. Rectification leg의 경우 일반적인 하프-브리지 컨버터로써 동작하게 되며 계통전류를 제어하여 DC-bus 전압( $V_+ + V_-$ )을 조절한다. Neutral leg와 인덕터  $L_N$ 은 Buck 컨버터로써 동작하게 되며 부하  $R$ 에 인가될 DC 출력전압  $V_+$ 의 리플 소거 제어를 수행한다. 이와 같이 제어할 경우 하단 커패시터  $C_-$ 에서 대부분의 리플 성분을 흡수하게 된다. 상단 커패시터  $C_+$ 에는 리플 성분이 거의 전달되지 않도록 제어되기 때문에 작은

용량의 커패시터를 적용할 수 있다. 하단 커패시터  $C$ 는 대부분의 리플 성분을 흡수해야 하지만  $C$ 에는 부하가 연결되지 않기 때문에 하단 커패시터 전압의 리플이 커도 무방하다. 따라서 하단 커패시터  $C$ 에도 작은 용량의 커패시터를 적용할 수 있다.

그림 5는 Active power decoupling 단상 PWM 정류기를 나타낸다<sup>15)</sup>. 이 회로는 H-bridge 컨버터에 인덕터 및 커패시터를 각각 하나씩 추가하여 구성할 수 있다. 기본적인 동작은 H-bridge 컨버터와 동일하나 스위치  $S_3$ 과  $S_4$ 로 구성된 우측 leg는 H-bridge 컨버터의 한 leg로써의 동작과 buck-boost 컨버터로써의 동작을 동시에 수행한다. H-bridge 컨버터는 입력 전류의 역률 제어 및 사인파 형태로의 제어를 수행하고, buck-boost 컨버터는 추가된 커패시터로 리플 성분 에너지가 전달되도록 제어한다. Active power decoupling 단상 PWM 정류기도 Four-switch 정류기와 마찬가지로 부하에 연결된 DC-link 커패시터는 리플 성분을 필터링할 필요가 없으므로 소용량 커패시터의 적용이 가능하다. 리플 성분 흡수를 위해 추가된 커패시터는 부하에 연결되어있지 않아 전압 변동이 발생해도 무방하므로 소용량 커패시터의 적용이 가능하다.

### 2.2 3상 Cap-less 정류기

컴프레서 구동 시스템에서 3상 전류를 정류하기 위한 회로는 원가절감을 위하여 다이오드 정류기가 주로 활용된다<sup>16)</sup>. 다이오드 정류기를 통해 정류된 전류는 6차 고조파 형태의 리플 성분이 존재하고 이를 보상하기 위해 일반적으로 대용량의 전해 커패시터가 사용된다. 직류단 커패시터로 소용량의 커패시터가 적용되는 경우에는 정류 과정에서 발생하는 리플 성분을 흡수할 수 있는 추가 회로가 필요하다<sup>17)</sup>.

그림 6은 추가 회로가 적용된 3상 Cap-less 정류기를 나타낸다<sup>18)</sup>. 추가 회로는 인덕터와 커패시터, 2개의 IGBT 스위치로 구성된다. 추가 회로는 buck-boost 타입의 DC-DC 컨버터로 동작하게 되며 리플 성분을 흡수하기 위해 기본적으로 부스트 컨버터로 동작한다. 추가 회로 적용 시 다이오드를 통해 정류된 전류는 식 3과 같고 소용량 커패시터 적용 시  $I_{dc}$ 는 작은 값을 가지므로 식 정류된 전류는 식 4와 같이 근사화할 수 있다.

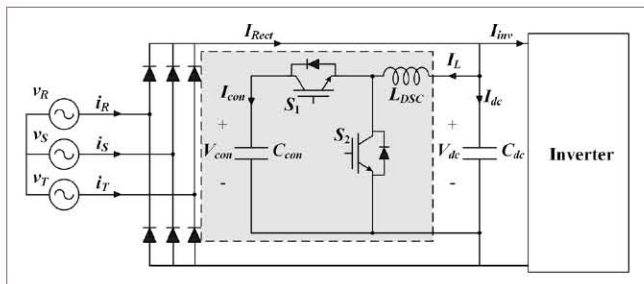


그림 6 3상 Cap-less 정류기

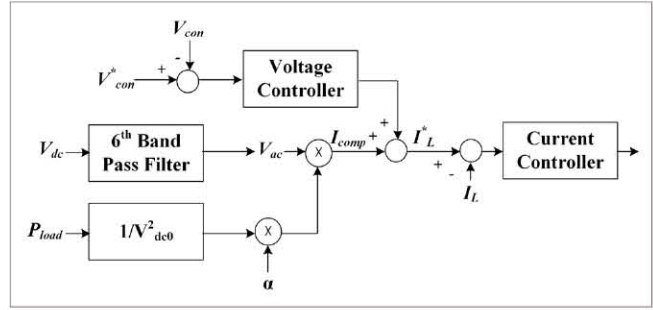


그림 7 3상 Cap-less 정류기의 추가 회로 제어를 위한 제어 블록도

$$I_{Rect} = I_{inv} + I_L + I_{dc} \quad (3)$$

$$I_{Rect} \approx I_{inv} + I_L \quad (4)$$

인버터로 흐르는 전류는 인버터로 전달되는 전력을 직류단 전압으로 나누어 계산할 수 있고 소용량 커패시터가 적용된 시스템의 경우 식 5와 같이 직류 성분과 교류 성분으로 분리할 수 있다.

$$I_{inv} = \frac{P_{inv}}{V_{dc}} = \frac{P_{inv}}{V_{dc0} + V_{ac}} \approx \frac{P_{inv}}{V_{dc0}} - \frac{P_{inv} \cdot V_{ac}}{V_{dc0}^2} \quad (5)$$

$V_{dc0}$ 은 직류단 전압의 평균값이며  $V_{ac}$ 는 직류단 전압의 리플 성분을 나타낸다. 추가 회로는 이와 같은 리플 성분을 흡수할 수 있도록 인덕터 전류를 제어해야 한다. 리플 성분의 흡수를 위한 보상 전류  $I_{comp}$ 는 식 6과 같다.

$$I_{comp} = \alpha \times \frac{P_{inv} \times V_{ac}}{V_{dc0}^2} \quad (6)$$

$\alpha$ 는 보상 전류의 가중치를 나타내며 직류단 커패시터의 용량에 따라 적절히 선정된다. 리플 성분 흡수를 위한 전류가 인덕터로 지속적으로 흐를 경우 추가 회로의 커패시터 전압이 상승하게 된다. 따라서 추가 회로의 커패시터 전압을 제어하기 위한 전압 제어기 또한 적용되어야 한다. 즉, 추가 회로 인덕터 전류의 지령 값은 리플 성분 보상을 위한 전류와 커패시터 전압을 일정하게 제어하기 위한 전압 제어기 출력의 합으로 구성된다. 그림 7은 추가 회로를 제어하기 위한 제어 블록도를 나타낸다.

### 3. 단일 인버터를 이용한 듀얼 모터 구동 시스템

앞서 언급했던 것과 같이 다수의 모터를 구동하기 위해서는 그에 상응하는 수의 인버터가 필요하다. 게다가 인버터에

안정적인 DC 전원을 공급하기 위해 사용되는 입력 필터, 정류기 및 DC 링크 커패시터 또한 모터에 상용하는 수만큼 필요하다<sup>[19]</sup>. 이는 특히 가전제품과 같은 중, 소형 시스템의 구성비용 중 상당 부분을 차지한다. 시스템의 구성비용을 줄이기 위하여 하나의 인버터로 두 대의 모터를 구동하는 시스템에 대한 연구가 진행되었다<sup>[7], [19], [30]</sup>. 이와 같은 시스템은 전동기의 속도, 토크 제어의 정밀도가 떨어질 수 있으나 공조 장치의 컴프레서 구동 시스템과 같이 정밀한 제어가 요구되지 않는 분야에는 충분히 적용 가능하다.

### 3.1 단일 인버터를 이용한 병렬 듀얼 모터 구동 시스템

그림 8은 단일 인버터를 이용한 병렬 듀얼 모터 구동 시스템을 나타낸다. 모터를 병렬로 연결할 경우 하나의 인버터로부터 출력되는 전압을 두 개의 모터가 동일하게 인가받는다. 두 모터에 인가되는 전압의 크기 및 주파수가 동일하므로 두 모터는 독립적 구동이 불가능하고 동일한 속도만으로 회전한다<sup>[23]</sup>. 일반적으로 병렬 듀얼 모터 구동 시스템의 경우 마스터 모터, 슬레이브 모터를 설정하여 마스터 모터만 피드백 제어를 통해 구동하고, 슬레이브 모터는 개루프 제어를 통해 구동한다. 이와 같은 특성 때문에 하나의 인버터를 이용하여 다수의 모터를 구동하는 시스템은 먼저 유도전동기에 적용하기 위해 연구되었다. 유도전동기는 구동 시 슬립이 존재하여 개루프 제어 시에도 부하 변동이 심하지 않으므로 회전 관성이 충분히 큰 경우에는 모터가 탈조하지 않고 안정적으로 구동된다<sup>[24]</sup>.

영구자석 동기전동기는 높은 효율, 토크 특성 및 높은 전력 밀도 등의 장점으로 인해 산업용 전동기 제어 분야에 널리 사용된다<sup>[25]</sup>. 이에 따라 동기전동기를 병렬로 구동하는 시스템의 연구 또한 진행되었다. 동기전동기의 경우 유도전동기와 다르게 개루프 제어 시 불안정하다는 특징을 가지고 있어 병렬 구동 시 이와 같은 불안정성을 반드시 고려해야 한다.

영구자석 동기전동기의 개루프 제어 시 발생할 수 있는 탈조 현상을 방지하기 위해 듀얼 모터의 능동 댐핑 제어기법이 제안되었다<sup>[7]</sup>. 능동 댐핑 제어기법은 마스터 모터 제어부와 슬레이브 모터 제어부로 구성된다. 마스터 모터 제어부는

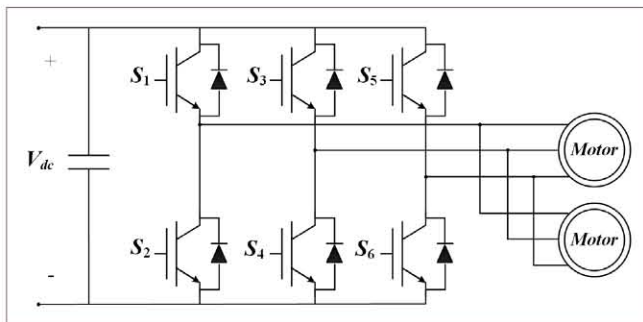


그림 8 단일 인버터를 이용한 병렬 모터 구동 시스템

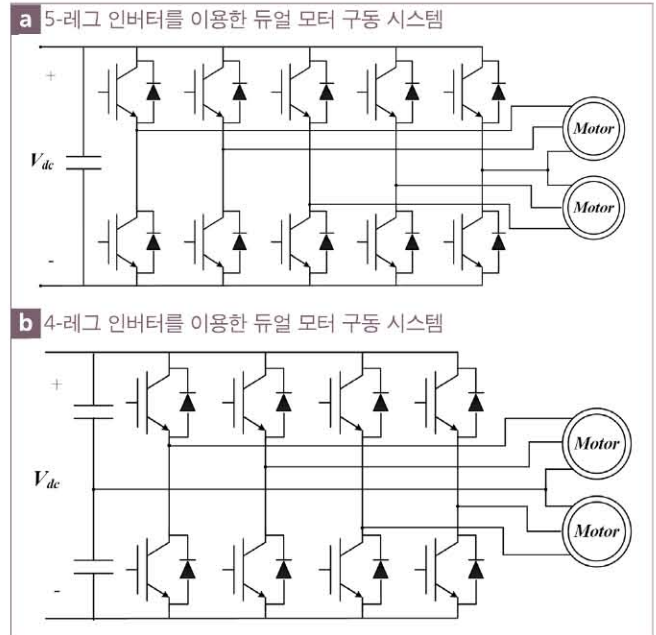


그림 9 다상 인버터를 이용한 듀얼 모터 구동 시스템

속도 제어를 포함하고 있으며 마스터 모터의 속도를 피드백 받아 지령 속도와의 오차를 0으로 제어하기 위한 토크 지령을 생성한다. 슬레이브 모터 제어부는 능동 댐핑 제어기와 MTPA (Maximum Torque Per Ampere) 제어기로 구성된다. 능동 댐핑 제어기의 경우 두 전동기의 회전 속도 차이를 0으로 만들기 위한 댐핑 토크 지령을 생성하여 모터의 탈조를 방지하고, MTPA 제어기는 단위 전류당 최대 토크를 발생시키기 위한 제어를 수행한다.

### 3.2 단일 인버터를 이용한 직렬 듀얼 모터 구동 시스템

두 모터의 병렬 운전 시스템은 같은 주파수의 전압이 각 모터에 인가되므로 모터의 독립적인 속도제어가 요구되는 분야에는 적용이 불가능하다. 모터의 독립적인 속도제어를 위해서는 서로 다른 주파수를 가지는 전압을 각 모터로 입력해야 한다. 3상 교류 전동기는 세 개의 입력단자를 가지고 있으며 두 대의 전동기를 독립적인 속도로 구동시키기 위해서는 6개의 입력단에 전류가 공급돼야 한다. 그러나 상용되고 있는 3상 2레벨 인버터의 경우 3개의 출력단자가 존재하고 DC 링크 커패시터를 2개로 나누어 중성점 출력까지 고려하더라도 최대 4개의 출력단자밖에 존재하지 않는다<sup>[26]</sup>.

상용 3상 2레벨 인버터의 출력단자 개수를 보완하기 위해 그림 9와 같이 4-레그 인버터 및 5-레그 인버터를 이용한 모터의 독립적인 운전 기법이 연구되었다<sup>[26], [29]</sup>. 그러나 다상 인버터는 상용화된 3-레그 2레벨 토폴로지가 아니므로 새롭게 인버터를 제작해야 한다는 단점이 있다.

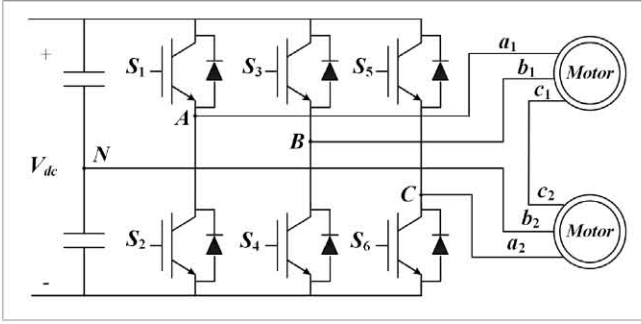


그림 10 3-레그 2레벨 인버터를 이용한 직렬 모터 구동 시스템

그림 10은 이러한 한계점을 개선하기 위해 3-레그 2레벨 인버터를 이용하여 각 모터의 독립적인 속도 및 토크 제어가 가능한 토폴로지를 나타낸다<sup>[30]</sup>. 그림 10과 같은 시스템에서, 각 모터의 속도제어에 필요한 a, b상 전류는 인버터 3상 레그와 중성점으로부터 공급받을 수 있다. 반면 모터의 c상은 서로 연결되어있기 때문에 c상 전류는 상대 모터의 a, b 상에 의해 영향을 받는다. 인버터를 통해 제어할 수 있는 각 모터의 a, b 상 전류를 이용하여 상대 모터의 c상 전류를 합성하여 공급함으로써 각 모터의 독립적인 속도제어에 필요한 전류의 공급이 가능하다. 상단 모터를 기준으로 예를 들면, 하단 모터로부터 c상 전류를 안정적으로 공급받고 있다고 가정할 경우 상단 모터의 속도제어를 위한 이상적인 전류는 식 7과 같다.

$$\begin{aligned} i_{a1} &= I_1 \sin(\theta_1) \\ i_{b1} &= I_1 \sin\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{c1} &= I_1 \sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

상단 모터의 a, b상 전류는 하단 모터의 속도제어를 위한 전류뿐 아니라 하단 모터의 c상 전류 공급을 위한 전류를 포함해야 한다. 하단 모터의 c상 전류 공급을 위한 상단 모터의 a, b상 전류는 식 8과 같다.


$$\begin{aligned} i_{a1\_c2} &= k_1 \times I_2 \sin\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{b1\_c2} &= (1 - k_1) \times I_2 \sin\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

$k_1$ 은 하단 모터의 c상 전류 합성을 위한 상단 모터 a, b상 전류의 전류 분배비를 나타낸다. 인버터의 A, B상 레그에서 생성해야 하는 전류는 상단 모터의 속도제어를 위한 전류와 하단 모터의 c상 전류를 합성하기 위한 전류의 합과 같다. 하단 모터의 a, b상 전류도 마찬가지로 방법으로 계산할 경우 인버터 C상 지령전류를 구할 수 있고 인버터 A, B, C상 지령전류는 식 9와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} i_A^* &= I_1 \sin(\theta_1) + k_1 \times I_2 \sin\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_B^* &= I_1 \sin\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + (1 - k_1) \times I_2 \sin\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C^* &= I_2 \sin(\theta_2) + k_2 \times I_1 \sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

인버터 지령전류를 식 9와 같이 설정하여 제어할 경우 두 모터의 독립적인 속도제어가 가능하다. 그러나 상대 모터에 필요한 c상 전류의 생성하기 위한 전류는 모터 자신의 속도제어와는 관련 없는 고조파 성분 전류이다. 이와 같은 고조파가 포함된 전류의 공급으로 인해 각 모터에는 속도 리플이 발생한다는 단점이 존재한다. 정밀한 제어가 필요한 분야에는 이와 같은 직렬 모터 구동 시스템의 적용이 어려우나, 팬을 부하로 하는 공조 장치의 컴프레서 구동 시스템의 경우 이와 같은 회로의 적용을 통해 제품 제조원가를 낮출 수 있다.

## 4. 결론

본 글은 공조 장치 컴프레서 구동 시스템에서의 원가 절감을 위한 회로 및 제어 기술을 소개하였다. 공조 장치의 컴프레서 구동 시스템은 어느 정도의 토크 및 속도의 리플을 허용한다는 특징을 이용하여 이의 원가절감을 위한 다수의 연구가 진행되었다. 그중 단상 및 3상 Cap-less 컨버터, 직렬 및 병렬로 결선된 듀얼 모터 구동과 같은 기술은 간단한 회로의 추가 및 소프트웨어적 제어 알고리즘의 적용만으로 커패시터, IGBT와 같은 주요 구성 요소의 부피 및 개수를 줄일 수 있다. 전력변환장치의 경제성, 기술적인 경쟁력의 확보를 위해서는 위와 같은 기술에 대한 끊임없는 연구가 필요하며, 이를 위한 산학 간의 기술교류 및 협력 또한 지속적으로 수행되어야 한다. 

## 참고문헌

- [1] 한국무역보험공사, 국내외 가전산업 동향 및 트렌드 분석, 2018.10.
- [2] Y. Zhou, W. Huang, and F. Hong, "Single-phase input variable-speed AC motor system based on an electrolytic capacitor-less single-stage boost three-phase inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 10, pp. 7043-7052, Oct. 2016.
- [3] M. A. Vitorino, R. Wang, M. B. de Rossiter Correa, and D. Boroyevich, "Compensation of DC-link oscillation in single-phase-to-single-phase VSC/CSC and power density comparison," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, No. 3, pp. 2021-2912, Apr. 2017.
- [4] W. L. Ming, Q. C. Zhong, and X. zhang, "A single-phase four-switch rectifier with significantly reduced capacitance," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 2, pp. 1618-1632, Feb. 2016.
- [5] R. Gunabalan, P. Sanjeevikumar, F. Blaabjerg, O. Ojo, and V. Subbiah, "Analysis and implementation of parallel connected two-induction motor single-inverter drive by direct vector control for industrial application," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 12, pp. 6472-6475, Dec. 2015.
- [6] F. Xu, L. Shi, and Y. Li, "The weighted vector control of speed-irrelevant dual induction motors fed by the single inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 12, pp. 5665-5672, Dec. 2013.
- [7] Y. Lee and J. Ha, "Control method of monoinverter dual parallel drive system with interior permanent magnet synchronous machines," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 10, pp. 7077-7086, Oct. 2016.
- [8] Y. Tang, F. Blaabjerg, P. C. Loh, C. Jin, and P. Wang, "Decoupling of fluctuating power in single-phase systems through a symmetrical half-bridge circuit," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 4, pp. 1855-1865, Apr. 2015.
- [9] Y. Sun, Y. Liu, M. Su, X. Li, and J. Yang, "Active power decoupling method for single-phase current source rectifiers with no additional active switches," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 8, pp. 5644-5654, Aug. 2016.
- [10] K. B. Lee and J. S. Lee, *Reliability improvement technology for power converters*, Springer, 2017, ISBN 978-981-10-4991-0.
- [11] W. Chen and S. Hui, "Elimination of an electrolytic capacitor in ac/dc light-emitting diode (LED) driver with high input power factor and constant output current," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 3, pp. 1598-1607, Mar. 2012.
- [12] Y. Qiu, L. Wang, H. Wang, Y. F. Liu, and P. Sen, "Bipolar ripple cancellation method to achieve single-stage electrolytic-capacitor-less high-power led driver," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Vol. 3, No. 3, pp. 698-713, Sep. 2015.
- [13] G. Zhu, X. Ruan, L. Zhang, and X. Wang, "On the reduction of second harmonic current and improvement of dynamic response for twostage single-phase inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 2, pp. 1028-1041, Feb. 2015.
- [14] M. A. Vitorino, L. F. S. Alves, R. Wang, and M. B. de Rossiter Correa, "Low-frequency power decoupling in single-phase applications: A comprehensive overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 4, pp. 2892-2912, Apr. 2017.
- [15] W. Qi, H. Wang, X. Tan, G. Wang, and K. D. T. Ngo, "A novel active power decoupling single-phase PWM rectifier topology," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf.*, Vol. 3, pp. 89-95, 2014.
- [16] S. Kim and J. K. Seok, "Induction motor control with a small DC-link capacitor inverter fed by three-phase diode front-end rectifiers," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 5, pp. 2713-2720, May 2015.
- [17] 인효철, "소용량 직류단 커패시터 기반 3-레벨 NPC 인버터의 입/출력 전류 품질 개선 기법," 석사 학위 논문, 아주대학교, 2018.
- [18] H. C. In, S. M. Kim, and K. B. Lee, "Design and control of small DC-link capacitor-based three-level inverter with neutral-point voltage balancing," *Energies*, Vol. 11, No. 6, pp. 1-18, Jun. 2018.
- [19] Y. S. Lim, J. S. Lee, and K. B. Lee, "Advanced speed control for a five-leg inverter driving a dual-induction motor system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 66, No. 1, pp. 707-716, Jan. 2019.

- [20] Y. Lee and J. Ha, "Control method for mono inverter dual parallel surface-mounted permanent-magnet synchronous machine drive system," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 62, No. 10, pp. 6096-6107, Oct. 2015.
- [21] J. M. Lazi, Z. Ibrahim, M. H. N. Talib, and R. Mustafa, "Dual motor drives for PMSM using average phase current technique," in Proc. IEEE Int. Conf. Power Energy, pp. 786-790, 2010.
- [22] N. L. Nguyen, M. Fadel, and A. Llor, "A new approach to predictive torque control with dual parallel PMSM system," in Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Tech., pp. 1806-1811, 2013.
- [23] 아주대학교 산학협력단, "이중 병렬 전동기의 구동 장치," 대한민국 특허 10-1889480, 10 Aug., 2018.
- [24] C. M. Verrelli, "Global exponential convergence properties for the open-loop induction motor," IEEE Trans. Control Syst. Technol., Vol. 20, No. 6, pp. 1647-1650, Nov. 2012.
- [25] 이교범, 고급전력전자공학, 문운당, 2019, ISBN 979-11-5692-402-9.
- [26] K. Matsuse, N. Kezuka, and K. Oka, "Characteristics of independent two induction motor drives fed by a four-leg inverter," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 27, No. 5, pp. 2125-2134, Sep./Oct. 2011.
- [27] S. Ito, T. Moroi, Y. Kubo, K. Matsuse, and K. Rajashekara, "Independent control of two permanent-magnet synchronous motors fed by a four-leg inverter," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 51, No. 1, pp. 753-760, Jan./Feb. 2015.
- [28] D. Dujic, M. Jones, S. N. Vukosavic, and E. Levi, "A general PWM method for a (2n+1)-leg inverter supplying n three-phase machines," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, No. 10, pp. 4107-4118, Oct. 2009.
- [29] G. J. Su and J. S. Hsu, "A five-leg inverter for driving a traction motor and a compressor motor," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 21, No. 3, pp. 687-692, May 2006.
- [30] Y. Kim and J. I. Ha, "Novel topology and control of single inverter system for two permanent magnet synchronous machines," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf., pp. 883-837, 2014.

**안상원(安相圓) 아주대 전자공학과 석사과정**

2019년 아주대 전자공학부 졸업.  
2019~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.



**이교범(李敎範) 아주대 전자공학과 교수**

1997년 아주대 전자공학과 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학).  
2003년~2006년 Department of Energy Technology, Aalborg University(덴마크).  
2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학과 교수. 당 학회 편집이사.

