

## 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템의 전류 주입 방식 기반의 새로운 입력 전류고조파 저감 회로의 설계 및 제어

유현재\*, 설승기\*  
서울대학교\*

### A new circuit design and control to reduce input harmonic current for a three-phase ac machine drive system having a very small DC-link capacitor

Hyunjae Yoo\*, Seung-Ki Sul\*  
Seoul National University\*

**Abstract** - 본 논문에서는 소용량의 직류단 캐패시터를 가지는 교류 전동기 구동 시스템의 전류 주입 방식 기반의 새로운 입력 전류 고조파 저감 방법에 대해 논의한다. 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템의 가격 및 부피의 경쟁력을 유지하면서 주어진 고조파 규제를 만족시킬 수 있도록, 최소의 비용 추가로 입력 전류의 고조파를 저감하기 위한 새로운 회로를 제안하고, 제안된 회로를 이용하여 최적의 성능을 얻을 수 있는 제어 방법을 소개한다. 제안된 회로 구성 및 제어 방법의 타당성은 실험을 통하여 검증한다.

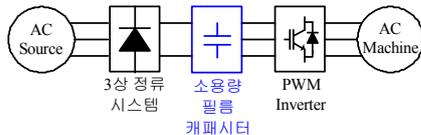
#### 1. 서 론

최근 중 소용량(수~수십kW) 교류 전동기 구동 시스템에 있어 가격 및 부피의 경쟁력을 향상 시키기 위해 직류단 캐패시터의 용량을 줄이는 연구가 활발히 진행되고 있다. 전동기 구동 시스템에 있어 직류단 캐패시터가 작으면 캐패시터 자체의 크기 및 가격이 절감될 뿐만 아니라 초기 충전 회로를 제거할 수 있어 추가적인 가격 및 부피 절감을 이룰 수 있으며, 신뢰성을 향상시킬 수 있고 입력 전류의 고조파를 저감할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 응용 분야에 따라 점점 강화되고 있는 고조파 규제 표준들을 만족시키기에는 여전히 무리가 있으며, 이러한 고조파 규제 표준들을 만족시키기 위해서는 여전히 무리가 있으며, 이러한 고조파 규제 표준들을 만족시키기 위해서는 여전히 무리가 있다. 따라서, 본 연구에서는 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템의 입력 전류 고조파를 저감하기 위한 전류 주입 방식 기반[1-3]의 새로운 회로 구성을 제안하고자 하며, 주어진 회로 구성으로 최적의 성능을 얻기 위한 제어 방법을 제안한다. 또한, 제안된 방식의 경제성 비교 및 고조파 규제 만족 여부를 실험으로 확인하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템

소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템의 구성은 아래 그림 1과 같다. 직류단에 대용량의 전해 캐패시터 대신 소용량의 필름 캐패시터를 활용하여 부피 및 가격의 경쟁력을 높이고, 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 또한 구조가 간단하고 가격 경쟁력이 우수한 3상 정류 시스템을 입력단에 사용하였을 때, 입력 전류 고조파 함유율을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.



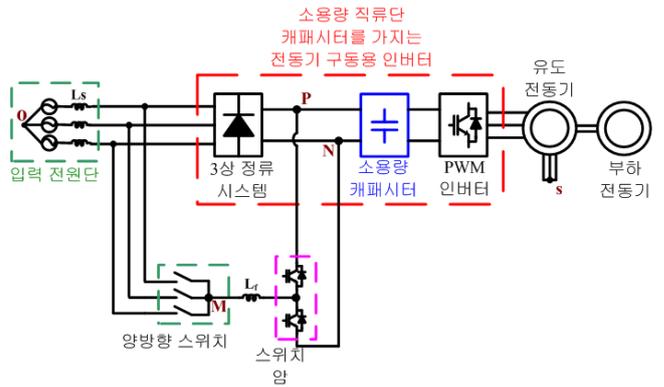
<그림 1> 시스템 구성

##### 2.1.1 적용 분야

직류단 캐패시터는 입력단과 출력단 사이의 순시적인 전력 불균형에 의한 전압 변동을 완화하기 위한 주기성 외에도, 전동기 구동 시스템의 PWM 동작에 따른 펄스 형태의 전류 공급뿐만 아니라 전원단의 순간 정전 시 캐패시터에 저장된 에너지만으로 부하에 전력을 공급하여 직류단 전압 변동을 허용 범위 안에 있도록 하는 역할을 한다. 따라서, 직류단 캐패시터의 용량을 그림 1과 같이 크게 줄이더라도, 이러한 역할들을 담당할 수 있어야 시스템의 안정적인 동작을 보장할 수 있게 된다. 최근 이에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되어 많은 문제점들을 해결해오고 있다. 또한, 순간 정전 시에 에너지 공급 기능은 근본적으로 불가능하지 않으나 팬이나 펌프 등의 부하에서는 순간 정전 시에 시스템을 정지 후 재기동하더라도 사용자가 큰 불편을 느끼지 못할 수 있다. 그러므로 이러한 응용에 있어서는 직류단 캐패시터를 줄임으로써 많은 이득을 얻을 수 있다. 그러나, 이러한 응용에서도 주어진 고조파 규제를 만족하지 못한다면 실제로 산업계에 적용하기에는 무리가 따를 것이다.

##### 2.2 제안된 입력 전류 고조파 저감 회로

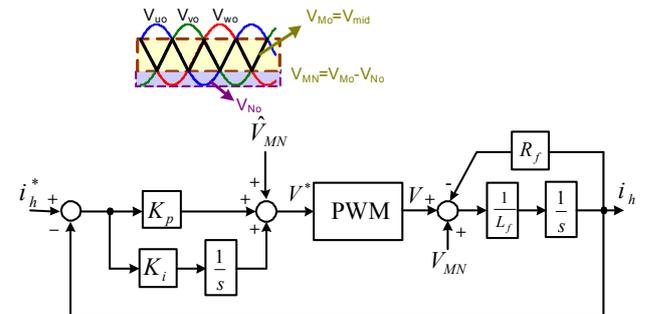
소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템에 적용할 제안된 입력 전류 고조파 저감 회로는 아래 그림 2에 나타난 것처럼 하나의 스위치 암(arm)과 단상 인덕터, 3개의 양방향 스위치로 구성된다. 단상 인덕터의 추가만으로 3상 전류의 고조파를 저감할 수 있으며, 가격 및 부피의 경쟁력이 있는 능동 소자들을 적극 활용하였다. 또한, 회로를 구성하는 소자들의 전류 정격은 주입하고자 하는 고조파 전류만 부담하면 되므로 약 0.35pu가 된다. 이는 비엔나 정류기(VIENNA rectifier)[4]에 사용되는 양방향 스위치의 전류 정격의 약 1/3크기가 된다. 또한 비엔나 정류기는 입력 전류를 직접 제어하므로 전류 정격이 1pu인 3상 인덕터가 필요하게 되지만 제안된 회로 구성은 전류 정격이 1/3 크기인 단상 인덕터만 필요하므로 주어진 고조파 규제만 만족시킬 수 있다면 비엔나 정류기에 비해 경제적이다 할 수 있다.



<그림 2> 회로 구성

##### 2.2.1 전류 제어

제안된 입력 전류 고조파 저감 회로를 구성하는 3개의 양방향 스위치는 입력 전류단에 직접 연결되므로 위 그림 2에서 'M'점의 전위는 'N'점을 기준으로 순시적으로 변동하게 된다. 아래 식 (1)은 이를 고려하지 않았을 때의 전류 제어 시스템의 전달함수를 수식으로 표현한 것이다. 이 경우, 비례-적분 전류 제어기의 대역폭을 매우 크게(800Hz이상) 설정하더라도 외란 전압으로 표현되는  $V_{MN}$ 이 2차의 대역 통과 필터를 통과하여 실제 전류에 영향을 주게 되므로 원하는 전류 제어 동특성을 얻기 어렵게 된다. 아래 그림 3은 이를 전향 보상의 형태로 전류 제어 시스템에 적용한 것을 나타내는 블록 선도이다.



<그림 3> 제안된 전류 제어 시스템의 블록 선도

$$i_h = \frac{K_p s + K_i}{s^2 L_f + (R_f + K_p)s + K_i} i_h^* - \frac{s}{s^2 L_f + (R_f + K_p)s + K_i} V_{MN} \quad (1)$$

### 2.2.2 최적 전류 지령 생성

제안된 고조파 저감 회로를 적용한 경우, 최적의 입력 전류 고조파 저감 성능을 얻기 위한 최적 주입 전류 지령은 아래 식에 의해 간단히 구해질 수 있다.

$$\frac{-i_{mid}}{I} = \frac{-v_{mid}}{V_p} \quad (2)$$

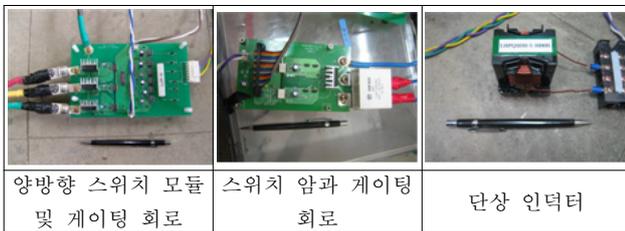
여기서  $v_{mid}$ 는 입력 3상 전압 중에서 상전압의 크기가 중간값인 상(Phase)의 전압,  $i_{mid}$ 는 같은 상의 전류를 각각 의미한다. 이는 양방향 스위치가 항상 전원 전압의 크기가 중간값인 상에 연결이 되어 전류 불연속 구간을 채워주는 역할을 하는 것으로, 식(2)에 의해 기존의 방법들이 복잡한 수식에 의해 얻었던 최적 전류 지령을 비교적 간단히 얻을 수 있는 장점이 있다.

### 2.3 실험 결과

제안된 회로 구성 및 제어 방법의 타당성을 검증하기 위해 아래 표.1 및 그림 4와 같이 실험 세트를 구성하여 실험을 실시하였다.

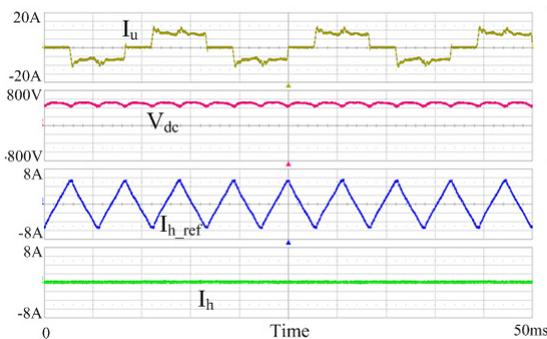
표. 1 실험에 사용된 전동기 및 전력 변환 시스템 사양

내용	값
전동기 형태	유도 전동기
정력 출력	5Hp(3.7kW)
정격 주파수	60Hz
입력 선간 전압	380Vrms
직류단 커패시터 용량	7.6uF
제안된 회로 스위치 암 정격	1200V(50A)
제안된 회로 단상 인덕터 용량	5mH
운전 부하 크기	0.83pu

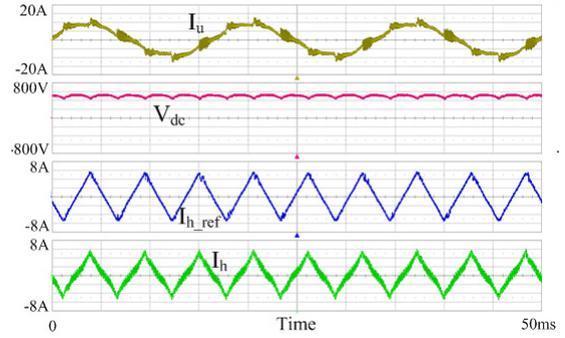


〈그림 4〉 실험 세트 사진들

아래 그림 5는 제안된 입력 전류 고조파 저감 방식을 구현하여 실험한 결과이다. 먼저 비교를 위해 그림 5(a)에 기존의 소용량 직류단 커패시터를 가지는 전동기 구동 시스템의 입력 전류, 직류단 전압, 주입 전류 지령과 실제 주입 전류를 각각 나타내었다. 입력 전류 파형은 직류단 커패시터가 매우 작으므로 준 구형파 형태를 띄며 일정 출력 운전에서 따라 직류단 전압의 맥동 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 제안된 입력 전류 고조파 저감 회로를 추가하여 제안된 전류 제어 방법을 적용한 결과로 주입된 전류에 의해 입력 전류의 고조파 성분이 크게 줄어들었음을 알 수 있다.

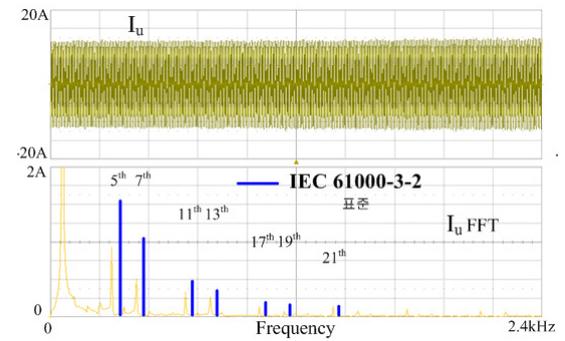


(a)보상 전류 주입이 없을 때.



(b)보상 전류를 주입 했을 때. <그림 5> 실험 결과

아래 그림 6은 제안된 방법을 적용하여 입력 전류 고조파를 저감한 결과를 주파수 분석한 것으로 소용량 직류단 커패시터를 가지는 전동기 구동 시스템의 적용 대상이 되는 고조파 규제(IEC 61000-3-2)를 만족함을 알 수 있다.



〈그림 6〉 실험 결과 주파수 분석

## 3. 결 론

본 논문에서는 소용량 직류단 커패시터를 가지는 전동기 구동 시스템의 적용 범위를 확장하기 위해 필수적인 고조파 규제의 통과를 위한 새로운 고조파 저감 회로를 제안하고 그 제어 방법에 대해 소개하였다. 제안된 회로 구성은 소용량 직류단 커패시터를 가지는 전동기 구동 시스템이 가지는 가격 및 부피의 경쟁력을 최대한 유지하는 것을 목표로 하여 가격 및 부피의 경쟁력이 점점 증가하고 있는 능동 소자를 적극적으로 활용하여 구성하였다. 제안된 회로 구성 및 제어 방법의 타당성을 실험으로 입증하였으며, 주어진 고조파 규제 만족 여부도 실험으로 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

[1] J. Itoh 외, "A novel three-phase PFC rectifier using a harmonic current injection method", IEEE Trans. on Power Electron., pp 715-722, 2008.  
 [2] N.R. Raju 외, "A low-harmonic diode rectifier-fed drive using zero-sequence coupling between machine and grid", IEEE IAS pp. 1582-1584, 2007  
 [3] 김현정 외, "새로운 영상전류 주입법에 의한 다이오드 정류기의 고조파 저감", 전력전자 학회 논문지, 2002. 12.  
 [4] J.W. Kolar 외, "A novel three-phase utility interface minimizing mine current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules", IEEE Trans. on Industry Applicat., 1997.