

## 유도전동기 자가 진단 및 상수 추정을 위한 고주파 전류 제어기 구현

권영수, 석줄기  
영남대학교 전기공학과

## Implementation of High Frequency Current Controller for Self-Sensing Induction Motors

Young-Su Kwon, Ju-Ki Seok  
Yeungnam University

**Abstract** - High frequency voltage signal injection have been widely used but they have some problems like over current protection. High frequency current signal injection and feedback control are more stable than voltage signal injection. In this paper, high frequency current controller for self-sensing and parameter estimation of induction motors is presented.

## 1. 서 론

최근 유도전동기는 제철라인과 같은 산업 전반에 폭넓게 적용되고 있으며 성능 향상을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 그중에 가장 활발하게 진행되고 있는 연구로는 자가 진단 및 상수 추정을 들 수 있다.

유도전동기의 자가 진단은 설비의 신뢰성과 안정성을 확보하기 위해 반드시 필요하다. 대표적인 방법으로 전동 데이터를 이용하여 고장을 진단하는 방법이 많이 사용되어 왔다.[1] 전동 데이터를 이용하는 방법은 대부분의 유도전동기 고장을 검출할 수 있으나 부가적인 센서가 필요하며 전기적 고장을 검출하기가 어렵다는 단점이 있다. 부가적인 센서나 케이블을 이용하지 않고 전압과 전류의 정보를 이용하여 고장을 진단하는 방법이 제안되었으나 대부분 전원 측에 바로 연결되어 구동되는 곳에만 적용되었다.[2] 최근에는 가변속 구동 시스템에서 고주파의 신호를 주입하여 고장을 검출하는 방법이 많이 연구되고 있다.[3]

유도전동기 고성능 구동 시스템의 성능 보장을 위해서는 전동기 상수를 초기에 정확히 설정하는 것이 매우 중요하다. 유도전동기 상수 추정에 관한 연구는 크게 오프라인과 온라인 추정이라는 2가지 영역으로 나눌 수 있는데, 오프라인 설정법은 전동기의 운전 초기에 제어에 필요한 상수들을 여러 가지 데이터를 통해 얻는 방법으로 고전적인 무부하 시험과 구속시험, 전동기 명판 정보로부터 상수를 설정하는 법 등이 있다.[4] 상술한 오프라인 방법은 대략적인 전동기 상수 값을 계산하는데는 도움이 되나 이를 통해 구한 상수 값을 제어에 직접 사용하기에는 많은 무리가 있다. 최근에는 정지 상태에서 고주파 신호를 주입하여 상수를 추정하는 방법이 연구되었다.[5] 이와 같이 자가 진단이나 상수 추정 등 여러 분야에 고주파 신호 주입이 많이 사용되고 있다. 그러나 대부분 고주파의 전압을 인가하는 방법이며 이 방법은 인가되는 전압의 크기와 주파수에 따른 출력 전류를 예측할 수가 없다. 주입 전압의 크기와 주파수에 따라 전류가 결정되므로 주입 전압의 크기나 주파수를 잘못 설정할 경우 많은 전류가 흘러 시스템이 손상될 가능성이 있다. 그러므로 고주파의 전압을 주입하는 방법보다 고주파 전류 신호를 주입하고 이를 제어하는 것이 더 안정적이라고 볼 수 있다.

본 논문에서는 자가진단과 상수 추정을 위한 고주파의 전류 주입에서 발생되는 전류 샘플링 지연 및 데드타임

에 의해 발생되는 전압 왜곡에 대한 보상 방법과 고주파 전류를 제어하기 위한 전류제어기 구성을 제안하고 실험을 통해 타당성을 입증하였다.

## 2. 고주파 전류 제어에서 발생되는 문제점

## 2.1 전류측정 자연효과

일반적으로 교류 전동기 구동 시스템에서는 전류에 포함되어 있는 노이즈를 제거하기 위해 아날로그 필터를 사용하고 이 아날로그 필터는 전류 측정에 시지연을 발생시킨다. 일반적인 벡터제어에서는 전류의 주파수가 크지 않으므로 상대적으로 시지연이 차지하는 비율은 작다. 그러나 고주파 전류를 주입하는 경우에는 전류 측정 시지연이 있을 경우 실제 전류의 위상과 크게 차이가 나게 되므로 반드시 보상해 주어야 한다. 그럼 1은 전류 입력 단에 가장 많이 사용되는 2차 저역통과 필터의 회로도이다.

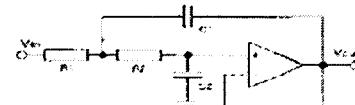


그림 1. 2차 저역통과 필터 회로도

R=R1=R2, C=C1=C2 일 때 필터의 차단 주파수는

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (1)$$

이며 전달함수는 식 (2)와 같다.

$$TF = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (2)$$

주입 주파수를  $f_h$ 라고 두면 필터의 지연시간은 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$T_d = \frac{1}{2\pi f_h} \tan^{-1} \left( \frac{2f_h f_c}{\left( 1 - \left( \frac{f_h}{f_c} \right)^2 \right)} \right) \approx \frac{\xi}{\pi f_c} (f_h \ll f_c) \quad (3)$$

지연된 전류 ( $i_{dqh\_delay}$ )의 좌표축은 실제 전류 ( $i_{dqh\_real}$ )의 좌표축에 비해  $\omega_h T_d$  만큼 뒤쳐져서 회전하고 있으므로 식 (4)와 같이 지연된 전류의 좌표축을  $\omega_h T_d$  만큼 좌표 이동한다면 실제 전류의 좌표축과 일치하게 된다.[6]

$$i_{dqh\_real}^e = i_{dqh\_delay}^e e^{j\omega_h T_d} \quad (4)$$

전류 측정 지연시간을 안다면 측정된 전류를 식(4)와 같이 변환하여 계산함으로써 전류측정 지연으로 인해 발생되는 문제점을 해결할 수 있다.

생되는 오차를 보상할 수 있다.

## 2.2 데드타임의 영향

데드타임에 의한 외란 전압 때문에 실제 전동기에는 제어기 출력전압보다 낮은 전압이 인가되며 이를 보상하기 위해 제어기에서는 더 큰 전압을 출력하게 된다. 그러므로 제어기 출력전압과 실제 전동기에 인가되는 전압은 데드타임에 의한 외란전압만큼 오차가 발생한다. 데드타임에 의한 외란 전압은 기생 커패시터의 영향과 ZCC(Zero Current Clamping)효과를 고려할 경우에는 전류의 함수로 나타난다. 그러나 ZCC효과를 배제하기 위해 고주파 전류에 직류분을 포함시켜 모든 상전류가 0 부근을 지나지 않도록 한다면 데드타임에 의한 외란 전압은 다음 식과 같이 간단하게 설정 할 수 있다. [6]

$$V_{dead} = \frac{T_{dead}}{2T_{sample}} V_{dc} \cdot \text{sgn}(i_s) \quad (5)$$

식(5)에서 계산된 외란전압을 상전압 지령치에 전향보상 해줌으로써 데드타임에 의해 발생되는 전압 왜곡을 보상할 수 있다.

## 2.3 제어 성능 감소

일반적인 벡터제어에서는 정지 좌표계의 교류성분을 동기좌표계에서 직류성분으로 변환하여 전류제어를 수행한다. 그러나 그림 2와 같은 기존 방식의 전류 제어기를 사용하여 고주파의 전류를 제어하는 경우 제어기 자체가 지연요소로 개입되므로 제어성능이 현저히 떨어지게 된다. 기준 전류에 비해 실제 전류는 크기도 감소하고 위상도 상당히 지연된다. 제어성능을 높이기 위해 대역폭을 증가시킬 경우 진동과 소음이 발생하여 시스템의 안정도가 낮아지게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 고주파의 전류를 보다 안정하게 제어 할 수 있는 새로운 형태의 전류 제어기를 제안한다.

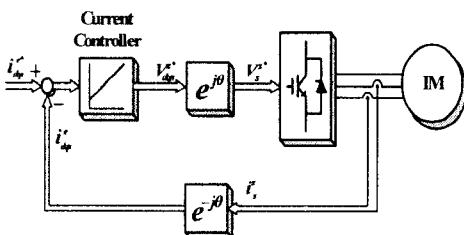


그림 2. 기존 방식의 전류 제어기 블록도

## 3. 제안한 고주파 전류 제어기의 구성

본 논문에서는 전동기의 토크발생을 방지하고 정지 상태를 유지시키기 위해 동기좌표계(=정지좌표계:전동기가 정지상태이므로 일치함) d축에만 고주파 전류를 주입하고 q축은 0으로 제어하였다. 고주파의 전류 제어기 구성을 다음과 같다.

그림 3과 같이 고주파 전류에서 대역통과필터(BPF)를 이용하여 교류성분(고주파성분)을 추출하고 대역저지필터(BSF)를 이용하여 직류성분을 추출하여 교류성분은 다시 고주파의 동기좌표계로 변환하여 직류성분으로 만든 후 각각 독립적인 제어기를 구성하였다.

교류성분의 전류 제어기 출력을 다시 역변환하여 직류성분의 전류 제어기 출력에 더해주면 결과적으로 교류성분의 전류를 직류성분의 전류 형태로 제어 할 수 있다. 교류성분을 고주파의 동기좌표계로 변환하여 직류성분을 얻기 위해서는 d축과 q축이 크기는 동일하고  $90^\circ$ 의 위상차를 가져야 한다. 그러나 실제 q축 전류는 0으로 제어하고 있어 좌표변환에 이용할 수가 없으므로 전역통과

필터(APF)를 이용하여 d축 전류의 위상을  $90^\circ$ 지연시켜 가상의 q축 전류를 생성하여 좌표변환에 이용하였다.

그리고 역변환시 나타나는 교류성분 전류 제어기 q축 전압출력은 최종 전압출력에 더해주지 않음으로써 실제 q축 전류는 직류성분 전류 제어기에서만 0으로 제어할 수 있도록 제어기를 구성하였다.

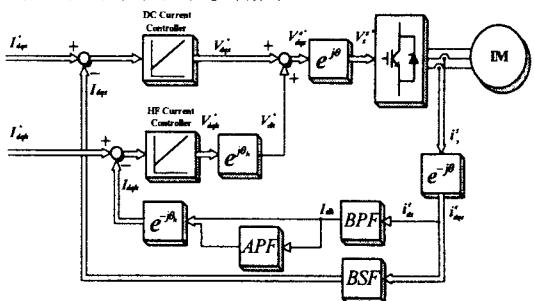


그림 3. 제안한 고주파 전류 제어기의 블록도

## 4. 실험결과

그림 4는 기존의 전류제어기를 이용하여  $300[\text{Hz}]$  의 고주파 전류 제어를 수행한 결과이다. 실제 전류는 기준 전류에 비해  $30^\circ$  이상 지연이 생기며 크기도 감소한다. 제어성능을 높이기 위해 제어기 대역폭( $\omega_c$ )을 증가시키면 그림 5와 같이 전류에 맥동이 발생하고 이를 제어하기 위해 전압이 왜곡되는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 제안한 전류 제어기를 이용하여 고주파 전류 제어를 수행한 결과이다. 낮은 대역폭에서도 실제 전류는 기준 전류를 완전히 추종하고 있으며 전압 출력 또한 안정적인 것을 볼 수 있다.

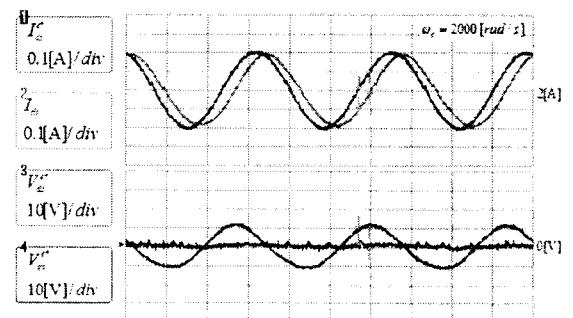


그림 4. 기존의 전류 제어기를 이용한 고주파 전류제어성능

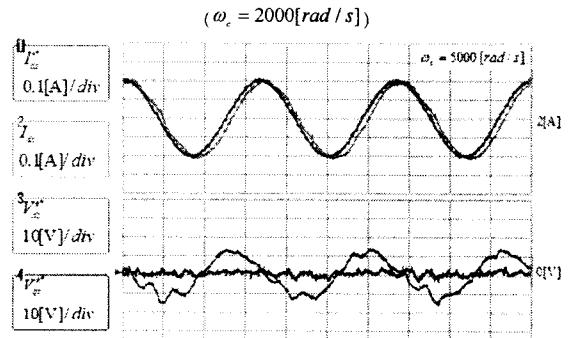


그림 5. 기존의 전류 제어기를 이용한 고주파 전류제어성능 ( $\omega_c = 5000[\text{rad}/\text{s}]$ )

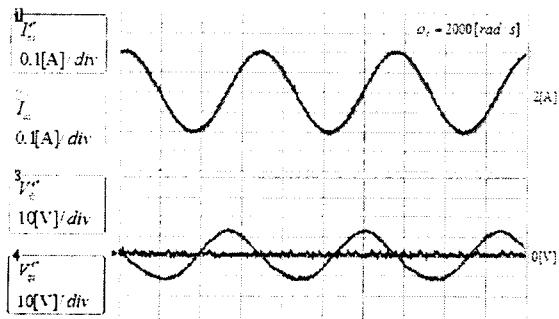


그림 6. 제안한 전류제어기를 이용한 고주파 전류 제어성능

## 5. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 자가 진단이나 상수 추정에 많이 사용되는 고주파 신호 주입 방법 중 전류 주입법과 전류 제어 시 발생되는 문제점에 대해 설명하고 제어성능이 떨어지는 기존의 전류 제어기를 대체할 수 있는 고주파 전류 제어기를 제안하였다. 또한 제안한 고주파 전류 제어기를 이용하여 실험을 수행하여 그 타당성을 입증하였다. 제안한 기법은 고주파 신호 주입을 이용하여 유도전동기의 자가 진단이나 상수 추정을 할 때 용량에 따라 원하는 전류를 제어 할 수 있어 고주파 전압을 인가하는 방법보다 안정적이다.

본 논문은 산업자원부의 (R-2005-7-067) 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임.

## [참 고 문 헌]

- [1] N.Arhtur and J.Penman, "Induction machine condition monitoring with higher order spectra," IEEE Trans. Ind. Electron, vol.47, pp.1031-1041, Oct. 2000.
- [2] S.M.A.Cruz and A. J. M.Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three phase synchronous and asynchronous motors, by the extended park's vector approach," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.37, pp. 1227-1233, Sept./Oct. 2001.
- [3] F.Briz and M.W.Degner and A.B.Diez and J.M.Guerrero, "Online Diagnostics in Inverter-Fed Induction Machines Using High Frequency Signal Injection," IEEE Trans. Ind. Applicat, vol.40, pp. 1153-1161, July/Aug.2004.
- [4] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "ECE411 Electromechanical Systems," University of Wisconsin-Madison, USA, 1986.
- [5] 석줄기, "유도전동기 벡터제어를 위한 전동기 정수 설정," 서울대학교 공과대학 전기공학과 석사 학위 논문, 1994.
- [6] 설승기, "전기기기 제어론", 브레인코리아, 2002.