

전동기의 고속 운전 영역에서의 전류 제어 안정화에 대한 연구

임정식, 설승기
서울대학교 전기, 컴퓨터 공학부

A Research on the Stability of the Current Controller at High Speed Region

Jung-Sik Yim and Seung-Ki Sul
School of Electrical Engineering and Computer Science
Seoul National University

ABSTRACT

운전 속도 영역이 넓은 응용분야에서 극수가 많은 전동기를 설계하는 경우, 고속 운전 영역에서는 동기 좌표계 회전 주파수가 샘플링 및 스위칭 주파수에 가까워진다. 이 경우 하위 전류 제어 회로(inner current control loop)가 불안정해지면서 전류가 발산하는 현상이 발생한다. 본 논문에서는 전동기의 고속 운전 영역에서 하위 전류 제어 회로가 불안정해지는 이유를 분석하고, 기존에 쓰이던 전류 제어기의 구조를 개선하여 고속에서도 전류 제어를 안정화시키는 방법을 제안한다.

1. 서론

최근 고속, 고출력 조건에서의 전동기 사용이 늘어나고 있다. 특히 운전 속도 영역이 넓은 응용분야에서 영속, 혹은 저속에서의 큰 토크를 얻기 위하여 많은 극수를 가진 전동기를 설계하는 경우, 동기 좌표계 최대 회전 주파수가 1kHz 이상에 이르기도 한다. 그러나 고출력을 요구하는 응용분야에서는 전력 전자 반도체 소자의 정격 제한 때문에 스위칭 주파수를 크게 높일 수 없다. 특히 동기 좌표계 회전 주파수의 비와 스위칭 주파수의 비,

$\frac{f_r}{f_s}$, 가 10에 미치지 못하는 경우, d-q 동기 좌표계 전류 제어기가 발산하는 현상이 발생한다.

동기 좌표계 회전 주파수와 스위칭 주파수의 비율이 낮은 경우에 대한 기존의 연구는 주로 철도 분야에서 진행되었다. 철도 분야는 유도 전동기와 GTO (Gate Turn Off Thyristor)를 사용하여 왔으며, GTO의 스위칭 주파수가 낮아 최대 회전 속도

에서의 $\frac{f_r}{f_s}$ 이 10보다 작은 경우가 많다. 기존의 연구는 주로 유도 전동기의 전압-토크 관계식을

얻어 내어 하위 전류 제어 회로를 생략하는 방향으로 진행되었다. [1] 또한 상전류의 저주파 리플(ripple) 성분을 줄이기 위한 동기 PWM 방법에 대한 연구가 진행되기도 했다.[2]

본 논문에서는 전동기의 고속 운전 영역에서 하위 전류 제어 회로가 불안정해지는 이유를 분석하고, 기존에 쓰이던 전류 제어기의 구조를 개선하여 전류 제어를 안정화시키는 방법을 제안한다. 그리고 모의실험(simulation)과 실험을 통해 제안한 방법을 검증한다.

2. 본론

2.1 기존의 비례 적분 제어기의 안정성 문제

그림 1은 매입형 영구 자석 전동기의 하위 전류 제어 회로에 기존의 비례적분 제어기(상태계환 비간섭 비례적분 제어기, state-feedback decoupling PI controller)를 사용하였을 경우의 모의실험 결과이다. 그림의 점선은 동기 좌표계 회전 주파수를 나타내는 것으로, 0점은 1.5 kHz를 나타낸다. 이 모의 실험에서는 d축 전류를 -250A, q축 전류를 0A로 제어하면서 전동기를 2초간 가속한 후, 2초

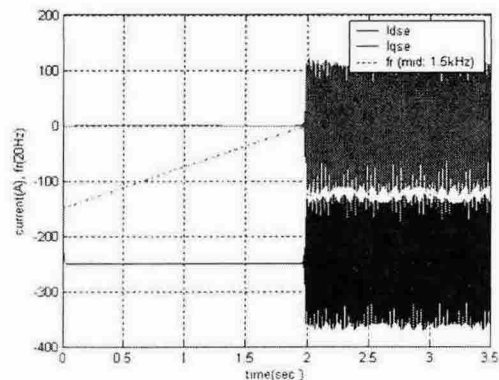


그림 1 모의실험 결과 (기존의 비례 적분 제어기)

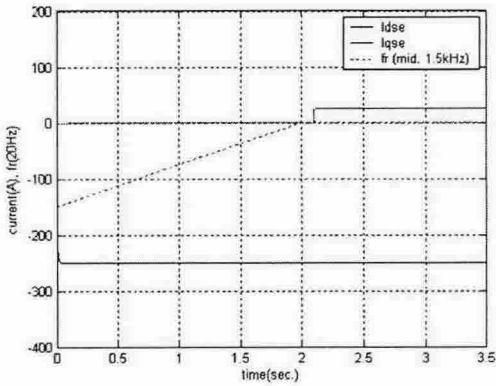


그림 2 모의실험 결과 (역기전력을 뺀 모델 사용)

부터는 전동기를 정속 운전시켰다. 그 후 2.1초부터 q축 전류 지령치를 25A로 변화시켰다. 전류 제어 회로의 대역폭은 100 Hz로 설정하였고, 제어기의 샘플링 주파수, 인버터의 스위칭 주파수는 모두 10 kHz로 설정하였다.

그림 1에서 확인할 수 있는 것처럼, 기존의 비례적분 제어기를 사용한 하위 전류 제어 회로는 $\frac{f_r}{f_s}$ 이 10 이하인 운전 영역에서 지령치 변화에 민감한 반응을 보이며, 지령치의 변화에 따라 불안정한 운전 영역에서 동작하는 모습을 보여준다.

고속 운전 영역에서는 대부분의 전압 지령치가 상호간섭 상쇄항으로부터 나온다. 그림 2는 순수 비례적분 제어기의 동특성을 알아보기 위해 매입형 영구 자석 동기기 모델에서 상호간섭 성분을 제외한 모의실험 결과이다. 그림 2는 상호간섭 상쇄항이 상호간섭 성분을 제대로 상쇄시키지 못해 하위 전류 제어 회로를 진동하게 만들고 있음을 보여준다. 모의실험에서 제정수 오차는 없었으므로, 시지연 성분을 문제의 원인으로 생각해볼 수 있다.

2.2 해결 방법

그림 3은 시지연 성분을 보상해주기 위해 상호간섭 상쇄항에 예측 전류를 사용했을 때의 모의실험 결과이다. 예측 전류, $\hat{i}_d^r[n+1]$ 와 $\hat{i}_q^r[n+1]$,는 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d^r[n] \\ \lambda_q^r[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds}^r[n] \\ i_{qs}^r[n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_f \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_d^r[n+1] \\ \hat{i}_q^r[n+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_d^r[n] \\ \hat{i}_q^r[n] \end{bmatrix} + T_{samp} \cdot \left(\begin{bmatrix} v_{ds}^r[n] \\ v_{qs}^r[n] \end{bmatrix} - R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{ds}^r[n] \\ i_{qs}^r[n] \end{bmatrix} - \omega_r[n] \cdot \begin{bmatrix} -\lambda_q^r[n] \\ \lambda_d^r[n] \end{bmatrix} \right). \quad (1)$$

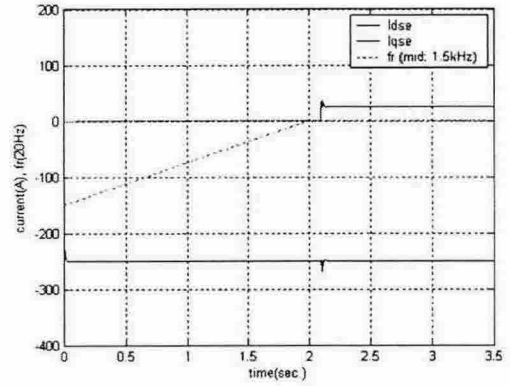


그림 3 모의실험 결과 (상호간섭 상쇄항에 예측 전류 사용)

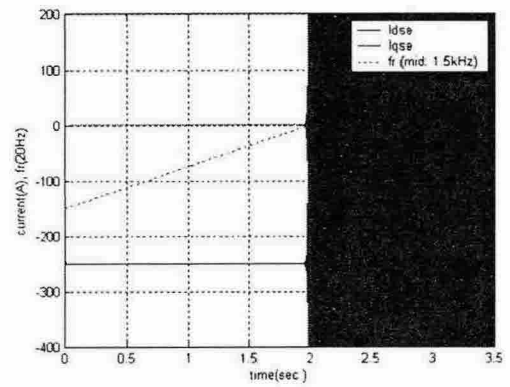


그림 4 모의실험 결과 (상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기)

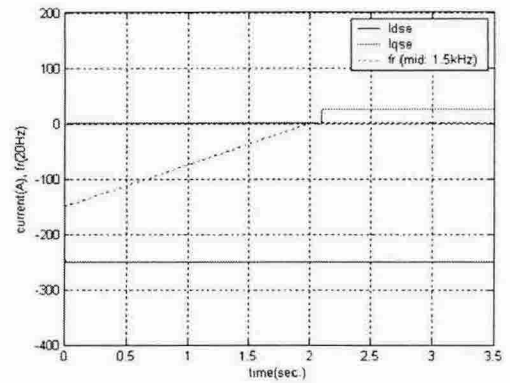


그림 5 모의실험 결과 (상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기 + 능동마찰항에 예측 전류 사용)

q축 전류 지령치가 변했을 때 약간의 진동을 보여주지만, 그림 1의 결과에 비해 하위 전류 제어기가 안정해졌음을 알 수 있다.

단순히 시지연을 보상해주는 대신, 상호간섭을 적분 이득으로 보상하는 상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기(complex PI controller)를 사용할 수도 있다. [3] 그림 4는 그 결과이다. 상태궤환 비간섭 비례적분 제어기에서 시지연으로 인해 상호간섭 성분이 제대로 상쇄되지 않았던 것을 생각해보면, 그

림 4에서 전류가 발산하는 것은 시지연으로 인해 능동마찰(active damping) 성분이 제대로 동작하지 못했기 때문으로 생각할 수 있다. 따라서 능동마찰 성분에 (1)에서 구한 예측전류를 사용하는 방법을 생각해볼 수 있다. 그림 5는 그 결과이다. 여러 제어기들 중 가장 나은 성능을 보여주고 있다.

2.3 실험 결과

표 1은 각 제어기별로 전류가 발산하기 시작하는 동기좌표계 회전 속도를 구한 후, 그 값을 비교한 것이다. 실험 장치의 기계적인 속도 제한 때문에

$\frac{f_s}{f_r}$ 의 최소값은 4.54로 제한되어 있다. 마지막으로 제안되었던 방법, 즉 상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기를 사용하면서, 능동마찰항에는 예측 전류를 사용하는 방법을 사용했을 경우, 최대 속도에 이르러서도 전류가 발산하지 않았다.

그림 6은 동기각 회전 주파수가 400 Hz, 샘플링

주파수가 2 kHz, 즉 $\frac{f_s}{f_r}=5$ 인 경우, 상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기를 사용하고, 능동마찰항에 예측 전류를 사용했을 때의 실험 결과이다. 제안된

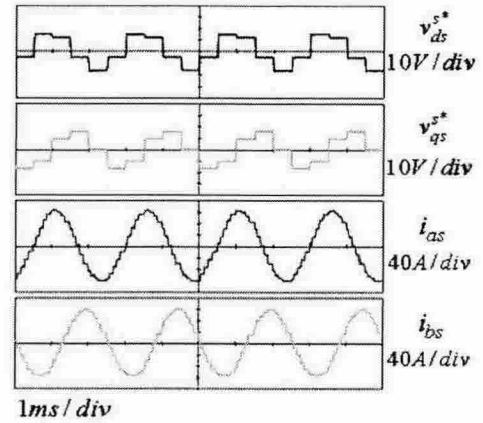
전류 제어기를 사용하는 경우, $\frac{f_s}{f_r}=5$ 인 경우에도 전류 제어가 안정적으로 되고 있는 모습을 확인할 수 있다.

3. 결론

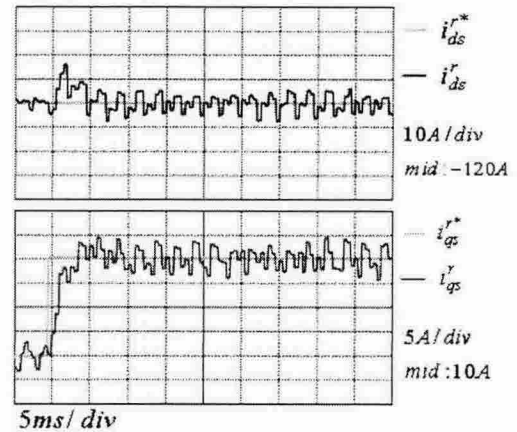
본 논문에서는 고속에서 하위 전류 회로가 불안정해지는 이유를 분석하고, 고속에서도 전류 제어를 안정화시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 모의실험과 실험을 통해 제안된 방법 중 상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기를 사용하면서, 능동마찰항에 예측 전류를 사용하는 방법이 가장 나은 성능을 보

표 1 각 실험 결과 - 각 제어기별 $\frac{f_s}{f_r}$ 최소값

제어기 종류	$\frac{f_s}{f_r}$ 최소값
상태회환 비간섭 비례적분 제어기	10.31
상태회환 비간섭 비례적분 제어기 + 상호간섭 상쇄항에 예측전류 사용	7.81
상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기	7.5
상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기 + 능동마찰항에 예측전류 사용	4.54 (제한치)



(a)



(b)

그림 6 실험 결과 (상호오차적분 비간섭 비례적분 제어기) (a) 정상 상태 파형 (b) 계산 응답 파형

여준다는 사실을 확인하였다. 실험 결과는 제안된 방법이 $\frac{f_s}{f_r}=5$ 인 상황에서도 안정하다는 사실을 보여 주었다.

참고 문헌

- [1] Andreas Steimel, "Direct Self-Control and Synchronous Pulse Techniques for High-Power Traction Inverters in Comparison", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 51, NO. 4, AUGUST 2004
- [2] Joachim Holtz and Bernd Beyer, "Fast Current Trajectory Tracking Control Based on Synchronous Optimal Pulsewidth Modulation", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 31, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 1995
- [3] Lennart Hamefors and Hans-Peter Nee, "Model-Based Current Control of AC Machines Using Internal Model Control Method", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 34, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 1998