# 약계자 영역에서의 토크분 전류제어 오차를 이용한 자속 보상

정세종*, 김성기*, 김승환*, 한기준*, 정명길*, 이세현*
*현대중공업

# Flux Compensation Method Using Torque Current Error in Field Weakening Region

Se-Jong Jeong*, Sung-Ki Kim*, Seung-Hwan Kim*, Ki-Joon Han*, Myung-Gil Jung*, and Se-Hyun Lee*
*Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

농형 유도전동기의 센서리스 벡터제어시 기존의 약계자 알고리즘은 오토튜닝 오차에 의해 자속기준값이 크게 계산되어질 때, 역기전력과 전압제한값에 의해 최대전류를 출력할 수 없다. 본 논문에서는 약계자 영역에서 토크분 전류제어 오차를 이용하여 자속 기준값을 보상함으로써 전류부족에 의한 속도강하를 방지하는 알고리즘을 소개하였고, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.

## 1. 서론

농형 유도전동기의 벡터제어는 자속을 발생시키는 전류와 토크를 발생시키는 전류를 고정자에서 공급한다. 전동기에 정격전압과 주파수를 인가하면 정격속도에서 정격자속이 발생하고 이 때 정격 부하를 인가하면 정격 전류가 흐른다. 전동기를 정격 주파수 이상으로 운전하고자 한다면, 자속에 의한 역기전력을 이기고 정격 전류를 흘릴 수 있는 전압을 만들어 주어야 한다. 하지만 역기전력은 자속의 크기와 주파수에 비례하고 인버터의 수전전압은 전동기의 정격전압에 맞추는 방법이 일반적이므로, 운전주파수에 따라 자속기준값을 줄여 역기전력을 줄임으로써 최대토크를 얻을 수 있는 약계자 운전이 필요하다. 그리고, 직류단 전압강하와 소자의 전압강하등을 고려하면 정격주파수 이하에서도 약계자제어가 필요한 경우가 발생하게 된다. 이러한 약계자 영역에서 센서리스 벡터제어로 운전할 경우 직류단 전압과 전동기의 파라메터를 이용하여 최대토크를 발생시킬 수 있는 자속을 계산해야 되는데, 계산된 파라메터에 오차가 포함되어 자속분 전류를 위한 전압이 커지게 되면, 토크분 전류를 위한 전압이 부족하게 되어 토크가 부족하게 되고 전동기 속도저하의 원인이 된다. 본 논문에서는 자속분 전류기준값이 크게 계산되어 출력전류가 기준값을 추종하지 못할 경우 토크분 전류제어 오차를 이용하여 자속 기준값을 보상함으로써 전류부족에 의한 속도강하를 방지하는 알고리즘을 소개하였고, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.

## 2. 본론

### 2.1 약계자제어 알고리즘[1]

인버터가 전동기에 인가할 수 있는 최대 고정자 전압은 주

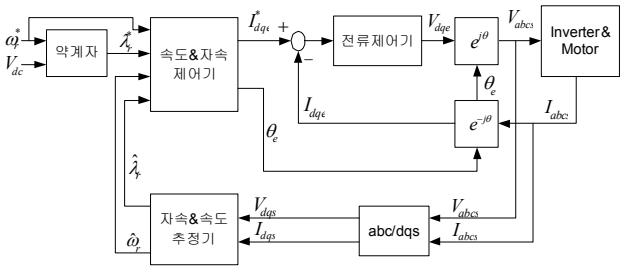


그림 1. 센서리스 벡터제어 제어 블럭도

로 직류 링크전압에 의해 결정되고, 전압변조방식을 공간전압벡터로 구현할 경우 선형적으로 얻을 수 있는 최대 선간 전압은 인버터의 수전 전압이 되며, 이 값을 직류전압으로 나타낼 경우 식 (1)과 같다.

$$V_{smax} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (\eta \text{는 제어 여분}) \tag{1}$$

따라서 전동기 제어를 위한 전압기준값은 식 (2)를 만족해야 하며, 인버터 전류는 소자와 전동기의 정격전류를 고려하여 식 (3)을 만족해야 한다.

$$(V_{de})^2 + (V_{qe})^2 \le V_{smax} \tag{2}$$

$$(R_{de})^2 + (R_{qe})^2 \le 2_{max} \tag{3}$$

그리고, 최대 출력 토크는 식 (2)와 식 (3)의 조건하에서 식 (4)를 최대로 하는 전류이다.

$$T_e = \frac{3P_{de}}{2} \quad d_e \quad q_e \tag{4}$$

전동기의 동기좌표계 전압방정식에서 전류와 자속의 변화가 없는 정상상태를 가정하고 식 (5)와 식 (6)과 같이 간단하게 표현될 수 있다. 식에서 주파수가 증가할 때 전압을 증가시켜야 하지만 전압은 제한값 이상으로 올릴 수 없으므로 그림 1에서와 같이 주파수와 직류단 전압정보를 이용하여 자속을 줄이는 약계자 제어가 필요하다.

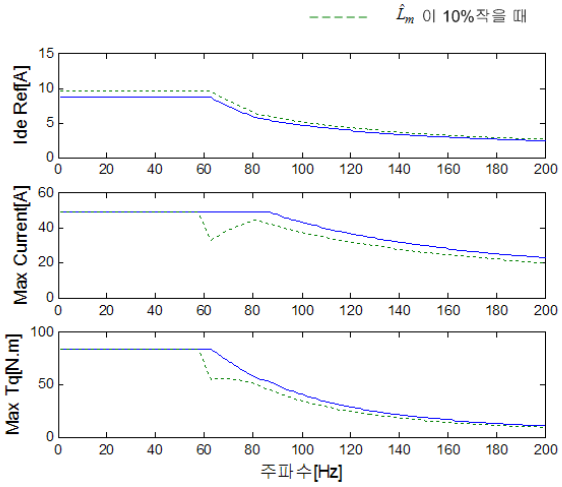


그림 2. 자속분 전류에 따른 최대 전류와 최대 출력토크

$$[illegible] \quad (5)$$

$$[illegible] \quad (6)$$

11KW 380V 23A정격인 전동기를 대상으로 주파수에 따라 식 (1)에서 (4)를 만족하며 최대토크를 출력할 수 있는 자속분 전류를 구하면 그림 2와 같다. 인버터의 전류용량은 48.8[A]로 가정하였다. 그림은 전동기 파라메터의 오차가 없을 때와 추정된 상호인덕턴스가 10%작을 때의 자속분 전류에 따른 최대 전류와 최대 출력토크를 나타내고 있는데, 상호 인덕턴스가 작게 추정되었을 때는 자속분 전류가 크게 되어 출력 전류값이 줄어들게 되고 결과적으로 최대토크가 줄어들게 됨을 알 수 있다.

일반적으로 전동기 파라메터의 추정은 데드타임이나 표피효과(Skin Effect)등의 영향으로 오차를 수반하며, 특히 비회전으로 추정할 경우, 인가하는 전압이 작기 때문에 파라메터의 오차가 더욱 커지게 된다. 그리고 파라메터 오차에 의해 자속분 전류가 크게 계산되어 질 경우 전류제어에 정상상태 오차가 발생한다. 즉, 식 (2)의 전압제한에 의해 전류를 흘릴 수 있는 충분한 전압을 만들지 못하기 때문이다.

### 2.2 토크분 전류오차를 이용한 자속보상

제안하는 약계자 알고리즘은 자속분 전류가 크게 추정될 경우 전류제어가 되지 못하는 점을 이용한다. 전류제어기를 전향보상항과 비례적분제어기로 다음과 같이 구성한다.

$$[illegible] \quad (7)$$

$$[illegible] \quad (8)$$

만약 부하토크가 커져서 최대전압을 출력하고 있는데도 토크분 전류가 기준값을 추종하지 못하는 경우 자속기준값을 줄여 자속분 전류를 줄이게 되면 식 (8)의 전향보상항이 작아지므로써 q축 전류제어가 가능해진다. 그리고, 인버터가 감속하거나 부하가 줄어들어 최대전압이하의 전압을 출력할 때 자속 보상항을 줄여준다.

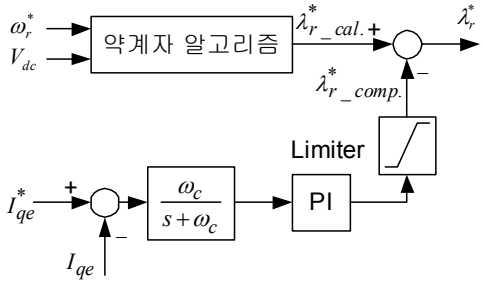


그림 3. 제안한 알고리즘의 블럭도

## 3. 시뮬레이션 결과

제안하는 알고리즘은 11KW 380V 23A정격인 전동기를 대상으로 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제어방식은 센서리스 벡터제어방식을 사용하였고, 제어기에 사용되는 상호인덕턴스 값을 실제값보다 10%작게 주고 60Hz에서 130%의 토크를 인가하였다.

그림 4는 자속기준값을 보상하지 않는 제어파형으로 토크분 전류가 기준값을 추종하지 못함으로써 토크가 부족해 속도가 60Hz로 올라가지 못하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 제안된 알고리즘의 제어 파형으로 부하가 걸리는 순간 토크분 전류와 기준값에 오차가 발생하지만 자속을 줄임으로써 정상상태 오차가 제거되고 가속토크가 발생하여 속도가 60Hz로 상승함을 알 수 있다.

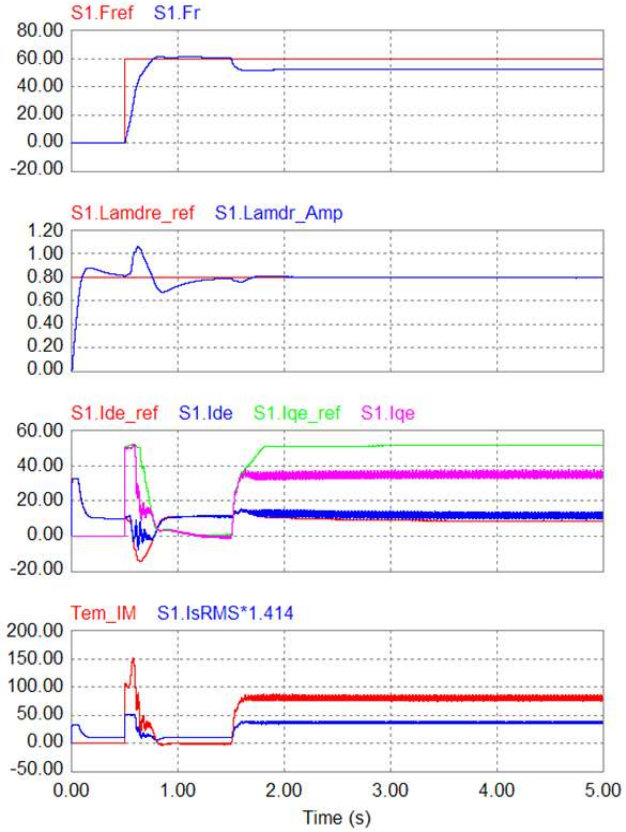


그림 4. 상호인덕턴스가 10%작을 때 시뮬레이션 결과

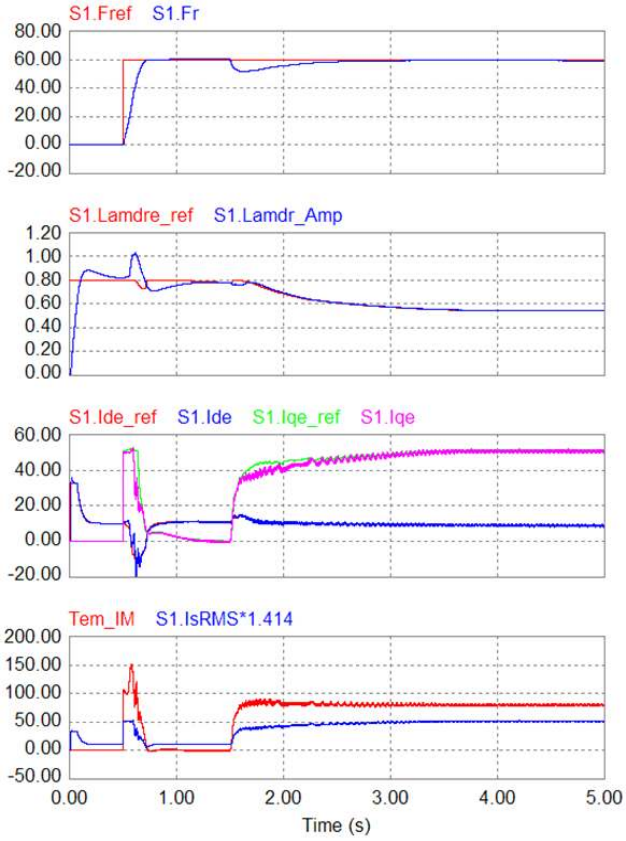


그림 5. 자속기준값을 보상한 시뮬레이션 결과

## 4. 결론

정격속도 이상의 영역에서 전동기를 제어할 경우 추정된 전동기 파라메터에 오차가 존재하여 자속분 전류가 크게 될 경우 전압제한 조건에 의해 전류제어가 원활히 수행되지 못하고 결과적으로 속도기준값을 추종하지 못한다. 제안된 방법은 이러한 영역에서 전류제어가 가능토록 하여 속도제어가 가능함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

## 참 고 문 헌

[1] 설승기, “전기기기 제어론”, 브레인 코리아, 2002.

[2] A. Gastli, “Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single phase test”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, 1999

[3] Seung-Ho Song, Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "Transient torque maximizing strategy of induction machine in field weakening region", Power Electronics Specialists Conference, IEEE, Volume 2, May. 1998, pp.1568-1574