

영구자석형 동기기의 속도 썬치 방법 개선

이은우, 박철현, 김정빈
LS산전 전력전자연구소

Improvement of Speed Search of Permanent Magnet Synchronous Machine

Eun-Woo Lee, Cheol-Hyun Park, Jeong-Bin Kim
Power Electronics R&D Center, LS Industrial Systems Co., Ltd

ABSTRACT

모터의 효율 규제에 따른 영구자석형 동기전동기의 사용확대에 따라서 유도기에 적용되었던 기술들이 동기기에도 필요하게 되었다. 이 중에서 정전시 전동기가 자유회전하는 상태에서 복전된 후에 전동기를 재기동할 때 회전자의 현재 속도부터 지령속도로 제어해주는 방법을 속도썬치라고 한다. 유도기에 사용되었던 방법을 동기기에 그대로 적용하기에는 무리가 있어 영구자석이 회전에 발생하는 역기전력을 이용한 회전자 위치 및 속도 판별 방법에 대해서 설명하고 기존의 방법을 최소 자승법을 사용하여 개선하였다.

1. 서론

정전이 되어 인버터 입력측으로부터 전력의 공급이 없어지면 인버터에서 대응할 수 있는 기술로는 두 가지가 있다. 하나는 저전압 트립을 막는 기술로서 KEB(Kinetic Energy Backup)나 Ride-Through라 통칭되는 방법을 사용하는 것으로서 저전압 트립 레벨보다 높은 레벨을 설정하고 이 레벨에 도달하게 되면 전동기를 회생운전하여 DC링크가 강하하지 않도록 하는 기술이다. 다른 하나는 속도썬치(Speed Search)기능이다. KEB기능을 사용시에도 저전압 트립이 발생하는 경우, 인버터는 출력을 차단하고, 전동기는 자유회전(Free-Run)한다. 자유회전상태에서 인버터에 전력이 다시 공급되면 전동기의 현재속도를 추정하여 부드럽게 재기동하는 기술을 속도썬치(Speed Search) 또는 플라잉 스타트(Flying Start)라고 한다. 본 논문에서는 산업계에서 사용되는 기존 발표된 논문^[1]을 기반으로 하여 구현시 문제점 해결 및 자사 제품에 적용한 사례를 소개한다.

2. 이론적 배경

2.1 단락 시험 방식의 선택

단락시험은 그림 1과 같이 상단의 스위치를 도통시키는 방식과 하단의 스위치를 도통시키는 방식을 사용할 수 있다. 선트 저항을 사용한 전류 센싱 방식에서는 전류를 측정하기 위해서는 하단 스위치로 전류 패스를 만들어 주어야 하기 때문에 하단스위치 단락 방식을 사용해야 한다.

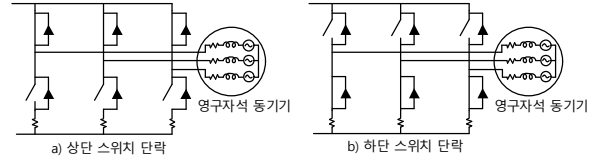


그림 1. 단락 시험

2.2 전류 벡터와 동기각 계산 방법

동기좌표계 모델링은 수식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega_r \lambda_f \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

단락시험시 $V_d = V_q = 0$ 이고, Laplace변환을 이용하여 전류를 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda_f}{L_d} (1 - \cos \omega_r t) \\ -\frac{\lambda_f}{L_q} \sin \omega_r t \end{bmatrix} \quad (2)$$

단락시험시 정지좌표계 상의 전류벡터의 위상($\theta_{\alpha\beta}$)을 알 수 있고, (2)에 의해서 동기좌표계를 기준으로한 전류벡터의 위상을 알 수 있으므로 그림 2와 같이 동기좌표계의 위상(θ_e)을 알 수 있다.

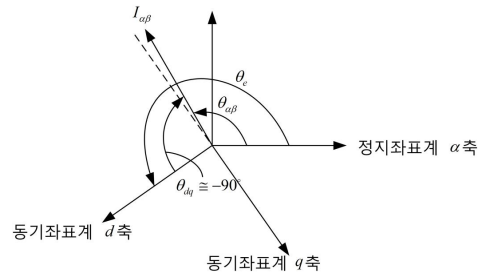


그림 2. 전류 벡터 관계도

2.3 최소 자승법 적용

회전하는 회전자의 속도를 측정하기 위해서 위치의 변화율을 계산하면 된다. 기존의 방법에서 단락시험을 2번 수행하는 방법과 3번 수행하는 방법이 제안되었다. 3번 수행하는 방법은 단락시험의 간격이 길 경우에도 단락시험 간격을 일정하게 하지 않고 첫번째와 두번째 단락시험 간격을 다르게 함으로써 단락시험을 짧게 한 것과 같은 효과를 얻음으로써 빠르게 회전하는 회전자의 속도를 계산할 수 있다.^[1] 실제 구현해 본 결과 전류 샘플링시 측정 잡음에 의한 오차에 의해서 정밀한 속도를 얻기가 어려운 문제가 있었고, 5회의 단락시험을 수행 후, 일차직선으로 근사화하여 기울기를 구하는 방식으로 속도를 계산하였다. (3)에서 θ 는 단락시험을 통해 얻은 전류벡터의 정지좌표계상의 각도이고, T_p 는 단락시험의 주기이다.

$$\begin{bmatrix} \theta(0) \\ \theta(1) \\ \vdots \\ \theta(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ T_p & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 4T_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(4)는 최소자승법 계산을 통해서 구한 속도값이다.

$$\omega = \frac{1}{10T_p} (-2\theta(0) - \theta(1) + \theta(3) + 2\theta(4)) \quad (4)$$

샘플링 주기의 2배 이상의 주파수는 복원할 수 없으므로, (5)와 같은 식이 성립한다.

$$\omega T_p = 2\pi f T_p < \pi \quad (5)$$

단락시험 주기가 2.6ms인 경우, 측정 가능한 최대 회전속도는 (6)과 같다.

$$f_{max} = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{2 \times 2.6m} = 192Hz \quad (6)$$

3. 실험 결과

영구자석 전동기의 구동을 위해 [2]에서 제안된 자속추정기가 사용되었다. 표 1에 사용된 전동기의 제정수를 나타내었다. 그림 3에 단락시험 실험파형을 나타내었다. 5회의 단락시험을 수행한 후, 각도와 속도를 계산한다. 이 실험에서 측정된 속도는 185Hz이다. 각도와 속도는 센서리스 알고리즘의 자속과 속도추정값, 전류제어기의 적분기 초기값, 속도제어기의 피드백값에 설정한 후, 센서리스 알고리즘으로 넘어간다. 센서리스 알고리즘으로 넘어갈 때, 각도와 속도의 설정이 잘못되었을 경우에는 과전압이나 과전류 트립이 발생할 수 있다. 본 실험에서는 전동기의 정격속도가 200Hz이기 때문에, 이를 고려하여 단락시험 주기를 2.2ms로 정하였다. 이 때 최대 측정가능한 회전자의 속도는 227Hz가 된다. 단락시험시 측정된 각도는 약 144도씩 변하는 것을 알 수 있다. 이 각도의 변화가 180도를 넘으면 안되며 넘지 않도록 단락 주기를 줄여 주어야 한다.

고속에서는 역기전력이 커서 단락시에 충분한 전류가 흐르게 되고 이는 전류측정 노이즈에 대해서 강한 특징을 갖지만, 저속에서는 단락시 전류벡터의 크기가 작아진다. 단락주기 이내의 정한 시간 동안에 전류벡터의 크기가 전동기 정격 대비 설정한 %값 이상이 되지 않을 경우, 전동기가 정지한 것으로 판단하고 영속에서 가속해야 한다.

단락시험 간격을 정할 때, 단락이 시작되기 전에 전류가 영으로 수렴하여 흐르지 않는 상태가 되어야 한다. 단락이 끝나면 전류가 상단 스위치의 역방향 다이오드를 턴온시키면서 흐르게 되어 UV선간의 DC링크 전압이 걸리게 된다. 역기전력이 작은 저속에서는 DC링크 전압과 역기전력의 차이가 크기 때문에 전류가 영으로 빠르게 수렴하는 반면에 고속에서는 느리게 수렴하는 특성이 있다. 단락시험 주기와 영속으로 판단하기 위한 전류레벨 등을 적절히 설정하는 것이 필요하다. 전류레벨이 너무 낮을 경우에는 노이즈에 의해서 전류벡터를 잘못 측정하게 되기 때문에 AD센서나 전류측정회로의 잡음레벨을 판단하여 결정해야 한다.

그림 4에서는 정격속도의 20%에 해당하는 40Hz에서 정지한 후에 재기동하여 속도썰치 성능을 시험하였다. 역기전력이 작아서 전류벡터의 크기가 작지만 속도썰치가 가능함을 알 수 있다.

측정각의 경우, 마지막 단락 시험에서 얻은 각도와 센서리스 알고리즘이 수행되는 시점이 다를 경우, 이 시간동안 회전자가 회전한 각도를 계산해서 보상해 주어야 한다.

표 1 영구자석 전동기 제정수

정격용량	4.0 kW	정격전압	220 V
R_s	0.35 ohm	정격전류	14.14 A
L_d	3.66 mH	극수	4극
L_q	5.90 mH	정격속도	6000 r/min
역기전력상수	0.132 Wb	최대속도	7000 r/min

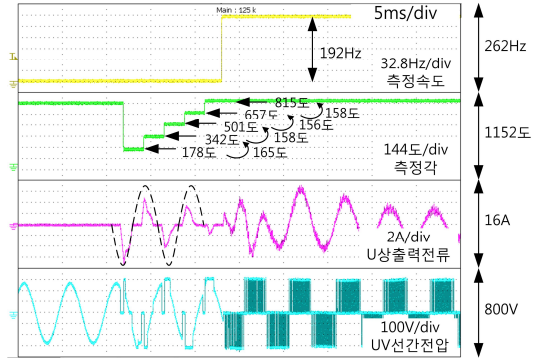


그림 3. 200Hz운전시 단락시험 파형

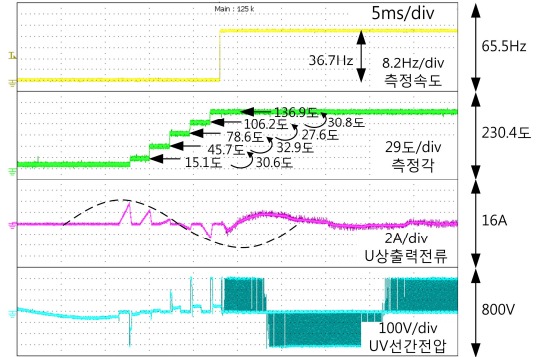


그림 4. 40Hz운전시 단락시험 파형

4. 결론

본 논문에서는 고효율의 장점을 가지며 사용확대 추세에 있는 동기기의 속도 썰치 방법에 대해서 논의하였다. 전류측정시 노이즈를 고려하여 최소자승법을 이용하여 속도를 계산하였다. 200Hz의 정격속도를 가지는 영구자석형 전동기를 이용하여 정격의 20~100% 속도범위에서 각도와 속도를 측정할 수 있도록 속도썰치 운전할 수 있음을 실험을 통해서 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Shun Taniguchi et al., "Starting Procedure of Rotational Sensorless PMSM in the Rotating Condition," IEEE Trans. on Ind. App., vol. 45, no. 1, pp. 194-202, JAN/FEB 2009.
- [2] 김광민, 김선자, 김정하, "자속추정기를 사용한 IPM Sensorless 제어방법" 전력전자학회, 전력전자학술대회 논문집, pp. 98-100, 2006.6