

축소차수 관측기를 이용한 SPMSM의 V/f제어

박순제*, 김영석*
인하대학교*

V/f Control of the SPMSM with stabilizing loop using a reduced order observer

Soon-Je Park*, Young-Seok Kim*
Inha University*

Abstract - This paper proposes a sensorless V/f control method of the interior mounted permanent magnet synchronous motor without damper winding. Arithmetic computation is simpler than vector control. And the lower cost price, dynamics and stability is guaranteed. When the loss of synchronization occurs with the load disturbances, the stability loop with a reduced order observer is applied quickly and accurately to improve the speed error.

1. 서 론

영구자석 동기 전동기는 높은 전력밀도와 고효율을 가지는 매력적인 특성으로 인해 모터제어 분야에서 광범위하게 개발 되었다. 산업계에서 서보기구와 같은 고성능 모터제어를 위해서는 높은 동특성을 얻기 위해 속도, 토크 제어에서 자속 기준 폐루프 제어가 사용된다.

그러나 펌프나 팬 같은 높은 동특성을 요구하지 않는 기기에서는 제어가 단순하고 단가가 낮은 개루프 V/f 제어가 사용된다. PMSM의 회전자에 제동권선이 없는 경우 개루프 제어에서 인가된 주파수에 따른 동기화가 불안정하기 때문에 주파수 조절이 필수적으로 요구된다.[1]

본 논문에서는 회전자 속도를 축소차수 관측기를 이용하여 추정하고, 속도 지령에 보상하여 안정화시키는 V/f속도 제어에 대해 다룬다.

2. 본 론

2.1 V/f 제어

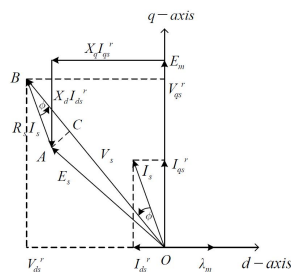
V/f 제어 방식은 고정자에 인가되는 전압과 주파수의 비율을 일정한 값을 유지하는 방식이다. 주파수 지령치를 인가하고 이 주파수에 해당하는 고정자 전압 벡터를 계산하여 그 비율을 일정한 값으로 유지한다. 제안된 제어 방식에서 영구자석 동기전동기의 고정자 쇄교 자속을 일정하게 유지한다.

2.1.1 전압 크기 제어 방법

고정자 전압지령을 계산하는 방법은 다음과 같다. 그림 1.에서 선분 OB의 길이를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = BC + CO = I_s R_s \cos\phi + \sqrt{E_s^2 + (I_s R_s \cos\phi)^2} - (I_s R_s)^2 \quad (1)$$

여기서 I_{ds}^* , I_{qs}^* 는 회전자 좌표계 d,q축 기준 고정자 전류 성분, V_s 는 고정자 전압, I_s 는 고정자 전류, R_s 는 고정자 권선 저항 성분, X_d , X_q 는 고정자 권선 리액턴스 성분, E_s 는 속도 기전력, λ_m 은 영구자석의 쇄교 자속 성분, f_0 은 인가 주파수이다.



〈그림 1〉 영구자석 동기전동기의 정상상태 벡터도

고정자 전압 벡터와 공간적으로 일치하는 유효 전류 벡터 $i_s \cos\phi$ 는 3상 전류값을 고정자 전압 기준 좌표계로 변환하여 구한다.

$$i_s \cos\phi = \frac{2}{3} \left[i_{as} \cos\theta + i_{bs} \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_{cs} \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \right] \quad (2)$$

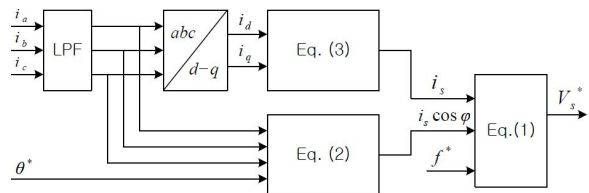
ϕ 는 전압벡터와 전류벡터의 각, θ 는 정지좌표계 기준의 고정자 전압 벡터의 위상각이다.

$$i_s = \sqrt{(i_{ds})^2 + (i_{qs})^2} \quad (3)$$

고정자 쇄교 자속의 시변값인 속도기전력 E_s 는 고정자 쇄교 자속과 영구자석의 쇄교 자속이 같다고 했을 때 다음과 같다.

$$E_s = 2\pi f_0 \lambda_s = 2\pi f_0 \lambda_m \quad (4)$$

위 식들에 근거하여 그림 2와 같이 고정자 전압 지령치를 계산한다.



〈그림 2〉 고정자 전압 벡터 계산

2.2 안정화 루프

전동기의 정상상태 운전 시, 속도가 변동하게 되면 순간적으로 회전자에 동기 탈조 현상이 나타난다. 동기화를 실패하였을 때 시스템의 안정화를 위하여 전압벡터의 각속도 보정이 필요하다. 안정화 루프를 실행하기 위해서 축소차수 관측기를 이용하여 각속도를 추정하고, 고주파 통과 필터(HPF)를 통과시켜 각속도의 변동을 구하여 지령 각속도에 보상하였다.

2.2.1 SPMSM의 수학적 모델

SPMSM의 정지좌표계에서의 전압방정식은 다음과 같다.

여기서 V_d^s , V_q^s 는 정지좌표계 d-q축 고정자 전압 성분, i_d^s , i_q^s 는 정지좌표계 d-q축 고정자 전류 성분, L_s 는 고정자권선 인덕턴스 성분, E_d^s , E_q^s 는 정지좌표계 d-q축 역기전력 성분, θ 는 회전자 위치이다.

$$\begin{bmatrix} V_d^s \\ V_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 \\ 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d^s \\ E_q^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} E_d^s \\ E_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega\phi\sin\theta \\ \omega\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.2 축소차수 관측기

상태 벡터 x , 출력 벡터 y , 입력 벡터 u 를 위의 모델에 따라 결정한다.[3]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (7)$$

$$x = \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \\ E_d^s \\ E_q^s \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} V_d^s \\ V_q^s \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix}$$

상태 변수를 측정 가능한 변수 x_m 와 추정해야할 변수 x_u 로 나누어 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x}_m \\ \dot{x}_u \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ x_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

$$y = [I \ 0] \begin{bmatrix} x_m \\ x_u \end{bmatrix}$$

SPMSM 상태모델로부터 측정 가능한 상태 변수인 전류 I 와, 추정할 상태 변수 역기전력 E 를 나누어 축소차수 관측기를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{z} = Dz + Fy + Gu \\ \hat{x}_u = z + Hy \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D &= A_{22} - HA_{12} \\ F &= DH + A_{12} - HA_{11} \\ G &= B_2 - HB_1 \end{aligned} \quad (10)$$

만약 A 의 eigen value가 좌반면에 있도록 D 가 정해지면 관측기 행렬 H, F, G 가 적절히 얻어진다.

$D = d \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 라고 할 때 변수들이 다음과 같이 정해진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + (R_s + dL_s) \begin{bmatrix} d & \omega \\ -\omega & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -d - \omega \\ \omega - d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d^s \\ E_q^s \end{bmatrix} \quad (11)$$

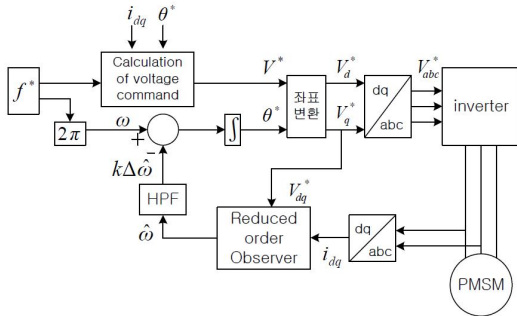
$$\begin{bmatrix} \hat{E}_d^s \\ \hat{E}_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + L_s \begin{bmatrix} d & \omega \\ -\omega & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} \quad (12)$$

추정한 역기전력 E_d^s, E_q^s 를 arctangent기법을 이용하여 회전자 위치를 추정한다.

$$\hat{\theta} = \text{atan2}(\hat{E}_q^s, \hat{E}_d^s) \quad (13)$$

2.3 제안된 V/f 제어의 전체 시스템

전체 시스템 블록도가 그림 3에 나타나 있다. 주파수 지령에 맞는 전압 벡터 지령을 계산하기 위해 d-q축 고정자 전류와 주파수 지령 및 회전자 각도를 사용하였고, 지령 회전 각속도를 보상하기 위하여 축소차수 관측기를 이용해 각속도를 추정하였다.



<그림 3> 제안된 V/f 제어 시스템

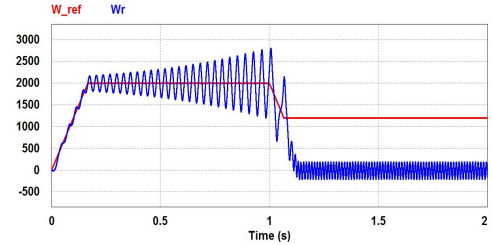
2.4 모의 실험

모의 실험은 PSIM 프로그램을 기반으로 Microsoft Visual Studio를 이용하여 C언어로 DLL을 사용하여 알고리즘을 구현하였다. 사용된 SPMSM의 파라미터는 다음과 같다.

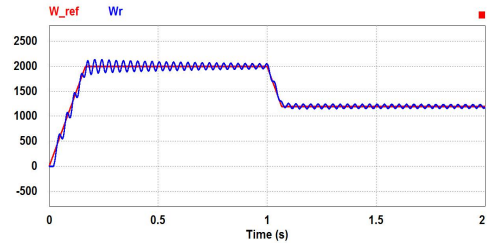
<표 1> 영구자석 동기전동기의 파라미터

파라미터	값
정격 용량	2.5 [kW]
정격 속도	2000 [rpm]
고정자 저항	0.22 [Ω]
고정자 인덕턴스	1.41 [mH]
극쌍수	4
역기전력 상수	77 [V _{p-p, line} / krpm]
관성모멘트	0.01 [kg/m ²]

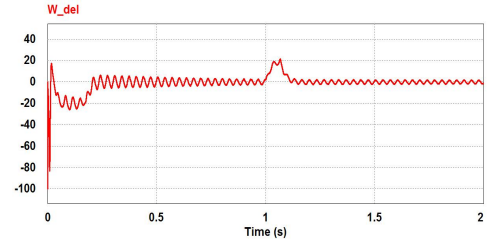
샘플링 주기는 10μs이며, 인버터의 스위칭 주파수는 10kHz이다. 저역 통과 필터와 고역 통과 필터는 bilinear difference transformation을 적용한 디지털 필터로 구현하였다.



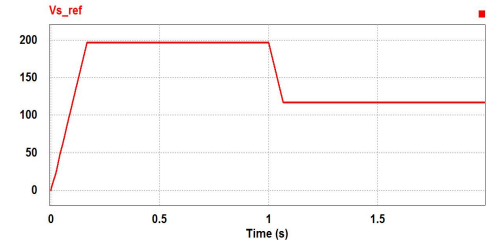
<그림 4> 각속도 지령치를 보상하지 않았을 때 PMSM의 속도파형



<그림 5> 각속도 지령 보상에 따른 PMSM의 속도파형



<그림 6> 관측기의 추정속도의 변동분 파형



<그림 7> 고정자 전압 지령 파형

3. 결 론

본 논문에서는 축소차수 관측기를 이용한 SPMSM의 V/f 제어를 제시하였고 모의 실험을 통하여 검증하였다.

제동 권선이 없음에도 불구하고 축소차수 관측기를 이용하여 회전 각속도 지령을 보상함으로써 동기 탈조 현상을 개선할 수 있었다. 일반적으로 많이 사용되는 백터 제어에 비하여 단순한 계산 과정과 안정적인 동특성을 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. D. Chandana Perera, "A Sensorless, Stable V/f Control Method for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.39, pp. 783-791, 2003
- [2] Marek Stulrajter, "Permanent Magnet Synchronous Motor Control Theory", Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, vol.58, pp. 79-84, 2007
- [3] Joohn-Sheok Kim, "High Performance PMSM Drives without Rotational Position Sensors Using Reduced Order Observer", IEEE IAS Ann. Meet, pp. 75-82, 1995