

계자권선형 동기전동기의 고속 운전을 위한 전향 보상 제어

김한빛, 김도현, 이준석
단국대학교

Feedforward Compensation Control for High-Speed Operation of a Wound Field Synchronous Motor

Han-Vit Kim, Do-Hyeon Kim, June-Seok Lee
Dankook University

ABSTRACT

본 논문에서는 계자권선형 동기전동기(Wound Field Synchronous Motor, WFSM)의 고속 운전을 위한 전향 보상 제어를 제안한다. 일반적으로 정격 속도 이상의 고속 영역에서는 전동기에 인가되는 전압이 인버터의 최대 출력으로 제한되므로 이를 일정하게 유지시키기 위해 PI 제어기를 사용한다. 그러나, 고속 영역 진입 시, 제어기의 대역폭이 작은 경우 속도 증가에 따른 제어 성능이 저하된다. 따라서 본 논문에서는 고속 운전 시, 제어기의 성능을 향상시키기 위한 전향 보상 제어를 제안한다. 전향 보상 성분은 고속 운전 조건인 전압 제한 조건과 전류 제한 조건을 이용하여 수식적으로 도출하였으며, WFSM의 제어적 특징으로 인해 존재하는 두 가지의 고속 운전 방법에 따라 d축 전류의 전향 보상 성분과 계자 전류의 전향 보상 성분으로 나타낼 수 있다. 결과적으로, 전향 보상 제어를 통해 이득의 변화 없이 제어 성능이 증가하므로 작은 대역폭을 사용할 수 있어 노이즈에 강인하며 시스템의 안정도가 향상된다. 제안하는 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

대표적인 비 회토티류 전동기인 계자권선형 동기전동기(Wound Field Synchronous Motor, WFSM)는 영구자석을 사용하지 않아 회토티류 공급 및 가격 문제로부터 자유로우며, 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)와 유사하게 높은 출력성능을 가진다. 따라서, WFSM은 계자측 전력전달을 위해 브러시와 슬립링이 필수적임에도 불구하고 우주, 선박, 항공, 차량 등의 다양한 응용분야에서 사용되고 있다[1]. WFSM의 회전자는 계자 권선에 전류를 흘려 전자석을 생성하며 이로부터 발생된 계자 자속을 사용한다. 따라서, 영구자석의 자속을 제어할 수 없는 IPMSM과 달리, 계자 전류를 조절하여 계자 자속을 직접 제어할 수 있다. 결과적으로, WFSM은 세 가지의 제어변수(d축 전류, q축 전류, 계자 전류)가 존재하여 제어 다양성을 증가시키고, 고속 운전을 위해 두 가지의 제어방법을 사용할 수 있다[2]. 하지만, 일반적으로 고속 운전에서 PI 제어기를 사용하여 고정자 전압을 제어하므로 대역폭에 따라 제어 성능이 결정되며 작은 대역폭을 사용한다면 제어 성능이 저하된다. 또한, 스위칭 주파수와 전류 샘플링 주기로 인해 대역폭의 증가는 제한되며 큰 대역폭 사용하는 경우 시스템이 노이즈에 취약하게 된다.

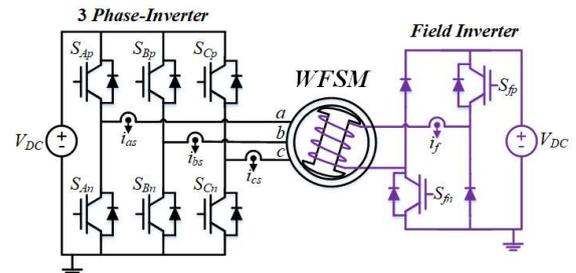


그림1 WFSM 토폴로지
Fig.1 Topology of WFSM

본 논문에서는 고속 운전 시, 시스템의 안정도를 향상시키기 위한 전향 보상 제어 방법을 제안한다. 고속 운전 방법에 따른 두 가지의 전향 보상 성분은 고속 운전 조건을 연립하여 수식적으로 도출하였으며, 제안하는 방법의 타당성은 Pless 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. WFSM의 고속 운전 방법

2.1 WFSM 토폴로지

그림 1과 같이, WFSM은 3상 인버터와 계자 자속 제어를 위한 계자 회로로 구성된다. 전동기를 구동하기 위해서, 일정한 자속이 공급되어야 하므로 계자 회로는 일정한 계자 전류를 생성해야 한다. 따라서, 계자회로 토폴로지로 다이오드 정류기, Buck 컨버터, H-Bridge 인버터 등을 적용할 수 있다. 또한, 계자 자속은 단방향으로만 발생하므로 본 논문에서는 스위치 2개를 다이오드 2개로 대체한 Unipolar 방식의 H-Bridge 인버터를 계자 회로로 사용하였다.

2.2 WFSM의 두 가지 고속 운전 방법

정격 속도 이상의 고속 영역에서는 역기전력이 속도에 따라 증가하여 3상 인버터의 최대 출력 전압보다 커지면 토크를 만들기 위한 여유전압이 부족하게 된다. 따라서, 전동기가 사용할 수 있는 고정자 전압은 인버터 최대 출력 전압(\$V_{smax}\$)로 제한된다. 더불어, 전동기에 인가할 수 있는 전류는 최대 고정자 전류(\$I_{smax}\$)로 제한되므로 고속 운전을 위한 전동기의 전압 제한 타원과 전류 제한 원을 동기 좌표계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{de}^2 + V_{qe}^2 \leq V_{smax}^2 \quad (1)$$

$$I_{de}^2 + I_{qe}^2 \leq I_{smax}^2 \quad (2)$$

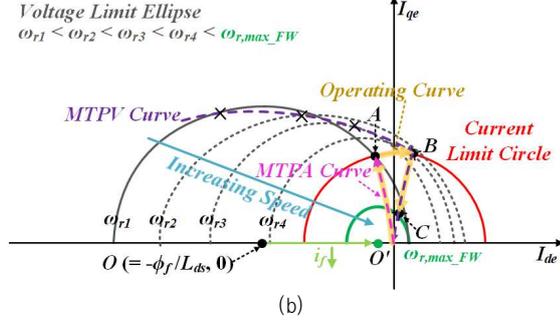
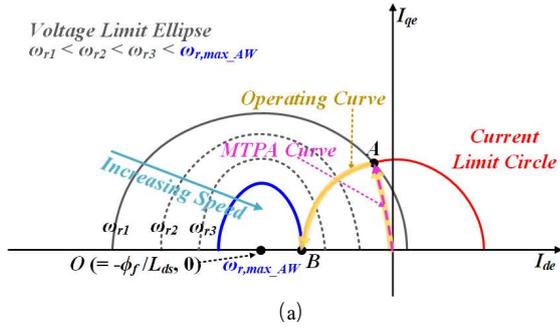


그림2 고속 운전 방법에 따른 운전곡선 변화($\phi_f > L_{ds}I_{de}$ 인 경우) (a)고정자 자속 감소 제어방법, (b)계자 자속 감소 제어방법
Fig.2 Variation of Operating Curve as High-Speed Operating Methods
(a)The AW Control Method, (b)The FW Control Method

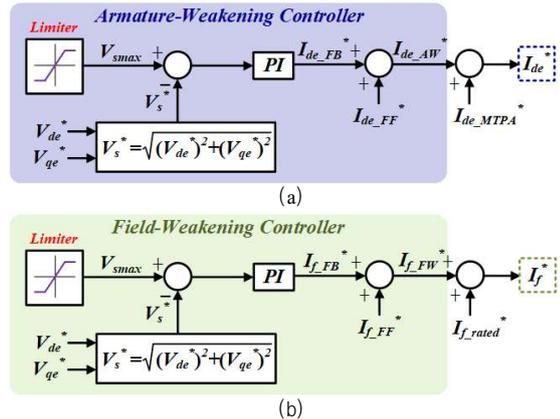


그림3 전향 보상 제어를 사용한 고속 운전 제어 블록도 (a)고정자 자속 감소 제어방법, (b)계자 자속 감소 제어방법
Fig.3 High-Speed Operating Control Diagram Using FeedForward Compensation Control (a)The AW Control Method, (b)The FW Control Method

여기서, V_{de} , V_{qe} 는 d-q축 고정자 전압, I_{de} , I_{qe} 는 d-q축 고정자 전류이다. 식 (1)에서, 고정자 저항에서의 전압강하를 무시하고 역기전력 성분만을 대입하여 속도에 따른 전체 역기전력 성분은 고정자 전압 방정식을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{s\max} = \omega_r \sqrt{(\lambda_{qe})^2 + (\lambda_{de})^2} = \omega_r \sqrt{(L_{qe}I_{qe})^2 + (L_{de}I_{de} + \phi_f)^2}, \quad (3)$$

여기서, ω_r 는 회전자속, λ_{de} , λ_{qe} 는 d-q축 고정자 자속, L_{de} , L_{qe} 는 d-q축 고정자 인덕턴스, ϕ_f 는 계자 자속이다. 결과적으로, 고속 영역에서는 식 (1)과 (2)를 만족하기 위해서 λ_{de} 의 발생방향과 반대방향으로 자속을 발생시켜 공극의 유효 자속을 감소시켜야 한다. IPMSM과 달리, WFSM의 ϕ_f 은 계자 전류에 의해 제어되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_f = L_{md}I_f = L_{md} \frac{2}{3} \cdot \frac{N_f}{N_s} \cdot I_f, \quad (4)$$

여기서, L_{md} 는 d축 자화 인덕턴스, I_f 는 계자전류, N_f/N_s 는 회전자와 고정자의 권선 비이다. 식 (4)에서 위 첨자(*)는 고정자 측에서 본 계자측 파라미터를 의미한다^[3]. 따라서, WFSM의 고속 운전 방법은 음의 I_{de} 를 주입하는 고정자 자속 감소 제어방법(Armature-Weakening Control Method, AW)과 I_f 를 감소시키는 계자 자속 감소 제어방법(Field-Weakening Control Method, FW)이 존재한다.

3. WFSM의 고속 운전을 위한 전향 보상 성분

3.1 d축 전류의 전향 보상 성분

I_{de} 의 전향 보상 성분($I_{de_FF}^*$)을 계산하기 위해서, 고속 영역에서 AW 제어방법의 운전곡선은 그림 2(a)와 같이 나타낼 수 있다. 역기전력이 속도와 함께 증가하면, 음의 I_{de} 가 인가되어 공극에서 유효 자속이 감소하므로 최대 토크를 위한 전류조합으로 운전한다. 즉, 고속 영역에서의 운전곡선은 전류 제한 원의 원주를 따라 이동하며 운전점은 전압 제한 타원과 전류 제한 원의 교점으로 식 (2)와 식 (3)을 연립하면 다음과 같이 I_{de} 에 대한 2차 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$(L_{qs}^2 - L_{ds}^2)I_{de}^2 - 2L_{ds}\phi_f I_{de} - (\phi_f^2 + L_{qs}^2 I_{s\max}^2 - (V_{s\max}/\omega_r)^2) = 0, \quad (5)$$

결과적으로, 식 (5)의 해를 통해 $I_{de_FF}^*$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (6)에서, 위 첨자(*)는 지령 값을 의미한다.

$$I_{de_FF}^* = \frac{L_{ds}\phi_f - \sqrt{L_{ds}^2\phi_f^2 + (L_{qs}^2 - L_{ds}^2)(\phi_f^2 + L_{qs}^2 I_{s\max}^2 - (V_{s\max}/\omega_r)^2)}}{(L_{qs}^2 - L_{ds}^2)}. \quad (6)$$

그림 3(a)은 AW 제어방법을 사용하는 경우의 제어 블록도를 나타낸다. 전향 보상 제어를 적용하는 경우, PI 제어기의 출력($I_{de_FB}^*$)에 $I_{de_FF}^*$ 가 더해져 AW 제어기의 출력 지령($I_{de_AW}^*$)을 만든다. 따라서, AW 제어방법을 사용한 고속 영역에서는 $I_{de_AW}^*$ 와 최대 토크 출력을 위한 최적의 d축 전류 지령($I_{de_MTPA}^*$)의 합을 최종 d축 전류 지령(I_{de}^*)으로 사용함으로써 속도를 증가시킬 수 있다.

3.2 계자 전류의 전향 보상 성분

I_f 의 전향 보상 성분($I_{f_FF}^*$)을 계산하기 위해서, 고속 영역에서 FW 제어방법의 운전곡선은 그림 2(b)와 같이 나타낼 수 있다. 속도 증가 시, I_f 가 감소함에 따라 전압 제한 타원의 중심이 원점으로 이동하므로 그림 2(a)와 운전곡선의 경향이 다르다. 하지만, ϕ_f 의 감소로 인해 공극에서 유효 자속이 감소하여 최대 토크를 위한 전류조합으로 운전하는 것은 그림 2(a)와 동일하다. 따라서, FW 제어방법에 전향 보상 제어를 적용하기 위한 $I_{f_FF}^*$ 은 $I_{de_FF}^*$ 와 동일하게 전압 제한 타원과 전류 제한 원의 교점을 나타낼 수 있다. 즉, I_{de} 에 대한 2차 방정식으로 정리된 식 (6)에 식 (4)를 대입하고 I_f 에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{md}^2 I_f^2 + 2L_{ds}L_{md}I_{ds}I_f - (L_{qs}^2 - L_{ds}^2)I_{ds}^2 + L_{qs}^2 I_{s\max}^2 - (V_{s\max}/\omega_r)^2 = 0. \quad (7)$$

결과적으로, 식 (7)의 해를 통해 $I_{f_FF}^*$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{f_FF}^* = \frac{-L_{ds}I_{ds} + \sqrt{L_{qs}^2 I_{ds}^2 + (V_{s\max}/\omega_r)^2}}{L_{md}} \cdot \left(\frac{3}{2}\right) \cdot \left(\frac{N_s}{N_f}\right). \quad (8)$$

그림 3(b)은 FW 제어방법을 사용하는 경우의 제어 블록도를

표 1 시뮬레이션에서 사용한 WFSM 파라미터 및 구동 조건

Table 1 WFSM parameters and driving condition for simulation

파라미터	값	파라미터	값
R_s	0.748[Ω]	L_{md}	2.66[mH]
R_f	6.72[Ω]	L_{mq}	2.71[mH]
N_s/N_f	6/75	L_{ls}	0.68[mH]
Pole	16	L_{lf}	24.68[mH]
V_{DC}	300[V]	I_{f_rated}	6[A]
V_{smax}	50[V]	I_{smax}	13.5[A _{rms}]

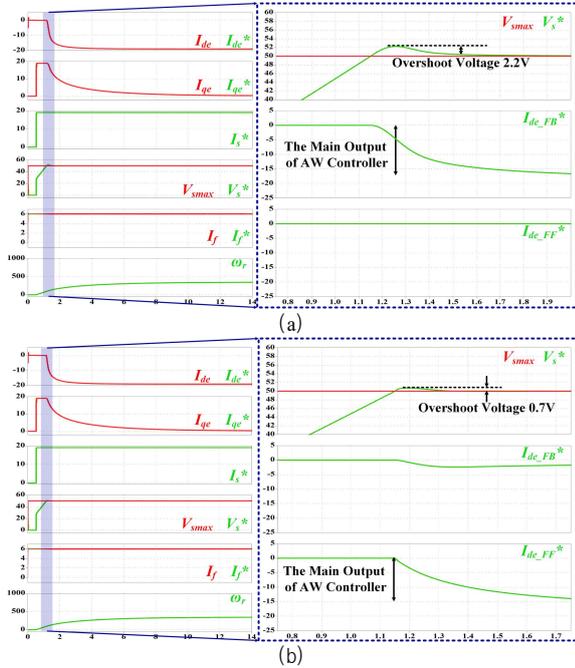


그림 4 전향보상제어 적용 여부에 따른 AW 제어방법의 시뮬레이션 결과 ($\phi_f > L_{ds}I_{de}$ 인 경우) (a)미적용, (b)적용
Fig.4 Simulation Results of AW Control Method with Feedforward Compensation (a)Not applying, (b)Applying

나타낸다. 전향 보상 제어를 적용하는 경우, PI 제어기의 출력 ($I_{f_FB}^*$)에 $I_{f_FF}^*$ 가 더해져 FW 제어기의 출력 지령($I_{f_FW}^*$)을 만든다. 결과적으로, FW 제어방법을 사용한 고속 영역에서는 $I_{f_FW}^*$ 와 정격 계자 전류 지령($I_{f_rated}^*$)의 합을 최종 계자 전류 지령(I_f^*)으로 사용함으로써 고속 운전이 가능하다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 기법의 타당성을 검증하기 위해서, 표 1의 WFSM 파라미터와 Plecs를 사용하여 WFSM 고속 운전 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 각각 AW 제어방법과 FW 제어방법을 사용한 경우의 고속운전을 위한 전향보상제어 시뮬레이션 결과이다. 그림 4와 같이 AW 제어방법을 사용한 고속운전에 전향보상 제어를 적용할 경우, 속도 증가에 따라 식 (6)을 통해 $I_{de_FF}^*$ 이 계산되므로 PI 제어기 출력의 부담이 줄어 $I_{de_FB}^*$ 이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전향보상 제어를 적용하여 대역폭에 관계없이 제어성능을 증가시켜 고속 영역 진입 시에 발생하는 과전압의 크기가 약 1.5V 감소하였다. 그림 5와 같이 FW 제어방법을 사용한 고속운전에 전향보상 제어를 적용할 경우, 속도 증가에 따라 식 (8)을 통해 계산된 $I_{f_FF}^*$ 의 영향으로 피드백 제어기의 $I_{f_FB}^*$ 가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 더불어,

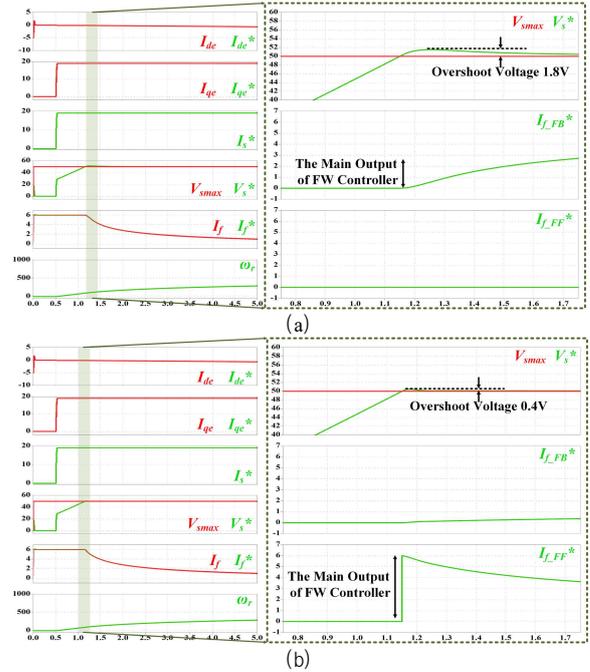


그림 5 전향보상제어 적용 여부에 따른 FW 제어방법의 시뮬레이션 결과 ($\phi_f > L_{ds}I_{de}$ 인 경우) (a)미적용, (b)적용
Fig.5 Simulation Results of FW Control Method with Feedforward Compensation (a)Not applying, (b)Applying

전향보상 제어로 인해 고속 영역 진입 시에 발생하였던 과전압을 대역폭의 변화 없이 약 1.4V 감소시킬 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 WFSM의 고속운전을 위한 전향보상 제어방법을 제안하였다. 제안된 기법은 WFSM의 제어적 특징으로 인한 두 가지의 고속운전 기법의 전향보상 성분을 수식적으로 도출하였다. Plecs를 사용하여 WFSM 고속운전 시뮬레이션을 통해 도출된 수식을 사용한 전향보상 제어가 적용하였으며, 대역폭에 관계없이 안정적인 제어 성능을 확인하며 제안하는 기법의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 RS-2022-00144203)

참고 문헌

- [1] M. Bash and S. Pekarek, "Modeling of salient-pole wound-rotor synchronous machines for population-based design," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 1-1.
- [2] H. -V. Kim, D. -H. Kim and J. -S. Lee, "Comparison of Flux-Weakening Control Methods for Wound Field Synchronous Motor," 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, USA, 2024, pp. 2403-2408.
- [3] D. Hwang and B. -G. Gu, "Field Current Control Strategy for Wound-Rotor Synchronous Motors Considering Coupled Stator Flux Linkage," in IEEE Access, vol. 8, pp.