

PI-IP 혼합제어기를 이용한 IPMSM의 약자속 운전 영역에서 전류 제어 시 과도상태 응답 특성 개선

하성필*, 박진호*, 이재혁*, 원충연*
성균관대학교*

Improvement of Dynamic characteristics in the flux weakening region of IPMSM using PI-IP hybrid controller

Sung-Pil Ha*, Jin-Ho Park*, Jea-Hyuk Lee*, Chung-Yuen Won*
Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

본 논문에서는 IPMSM의 약자속 제어 영역에서 토크제어를 하기위한 전류제어기를 PI-IP 혼합제어기로 구성하였다. 약자속 제어 영역에서 토크제어 시 d축과 q축의 인덕턴스 차이로 인해 전류제어 응답의 차이가 발생하여 전압여유분 확보에 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 개선하고자 PI-IP 혼합제어기를 적용하여 약자속 영역에서의 d축과 q축의 전류 제어기의 응답특성을 달리하여 토크제어 시 과도상태에서 발생하는 문제점을 개선하였다.

1. 서 론

고속영역에서 IPMSM의 속도는 전동기의 정격 전류와 PWM 인버터의 출력에 제한이 되며 약자속 제어시 전동기의 d축과 q축의 인덕턴스 차이로 인해 전류제어기의 응답의 차이로 q축 전류의 증가에 따른 d축 전압을 확보하지 못해 발생하는 역기전력이 전압 제한을 초과하여 회생 전류가 발생하는 문제점이 일어난다. 본 논문에서는 일정 출력 영역에서 토크 제어 시 i_q 와 i_d 의 변화에 따른 회생 전류의 발생에 대한 문제점을 보완하기 위해 i_d 와 i_q 를 PI-IP 혼합 제어기를 사용함으로써 i_q 의 증가하기 위한 d축 전압 여유분을 확보하는 방법을 제안 하였다.

2. 본 론

2.1 IPMSM의 약자속 제어

IPMSM에서 정격 속도 이상의 일정 출력 영역에서 속도 제어시 약 자속 제어 방법을 이용한다. 다음 식 (1), (2)는 전압과 전류 제한을 나타낸 식이다.

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \leq V_{om} \quad (1)$$

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \quad (2)$$

여기서 I_{am} 은 일정 출력 영역에서 모터의 정격 전류에 대한 전류 제한 값을 의미하고 V_{om} 은 인버터의 출력 가능한 최대

전압 제한 값이다. 식(1)의 전압 제한은 유기 전압으로 나타 낼 수 있으며 다음 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_o = \omega \sqrt{(L_d i_d + \psi_a)^2 + (L_q i_q)^2} \leq V_{om} \quad (3)$$

d축 전류와 q축 전류, 영구 자속에 의해 발생하는 역기전력의 크기는 유기전압 V_{om} 에 제한이 되고 약자속 제어 시 역기전력의 크기를 감소 시켜 일정 출력 영역에서 속도 증가에 따른 전압 여유분을 확보해야 하는 필요성이 있다.^[1]

2.2 PI-IP 혼합 제어기를 이용한 전류 제어기

일정 토크 영역에서 IPMSM을 약자속 제어할 때 출력 토크를 변화하거나 부하가 발생하면 과도 상태가 발생한다. IPMSM의 전류 변화는 d축과 q축의 인덕턴스 차이로 전류 제어기의 응답특성이 달라지는 특징이 있다. 이때 d축 전류 제어기보다 q축 제어기의 응답 특성이 빠를 경우 약 자속 제어시 토크 지령을 인가하면 d축과 q축 전류 제어기의 응답성에 차이로 인해 q축 전류에 의해 역기전력이 발생하고 회생 전류가 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 약자속 제어 초기에 발생하는 전압 강하에 대한 전압 여유분을 확보해야 한다. 그림 1은 q축 전류의 증가에 따른 d축 전압의 음의 방향으로 증가하여 전압 여유분을 $i_d - i_q$ 평면에 나타내었다.

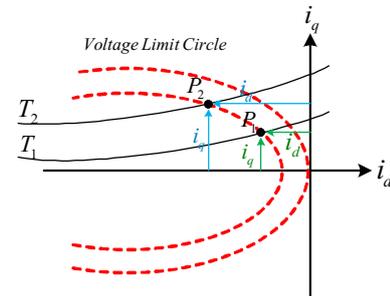


그림 1 약자속 제어 영역에서 토크 지령 방법

Fig. 1 Determination of torque reference in flux weakening control region.

약자속 제어 영역에서 P_1 에서 P_2 로 토크가 증가 할 때 d축 전류가 음의 방향으로 증가하고 d축 전류는 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 q축 전류 제어기의 속도가 d축 전류 제어

기보다 응답 속도가 빠르면 전압 여유분을 확보가 어려움이 있다. 본 논문에서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 일정 출력 영역에서 i_d 와 i_q 를 각각 PI-IP 혼합 제어기를 사용하였다. 그림 2는 시스템 전체 블록도를 나타내었다.

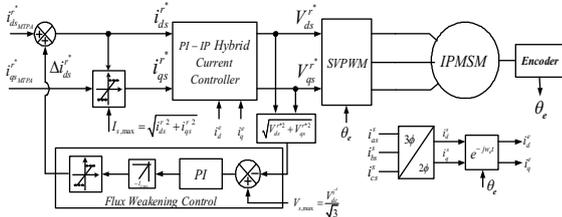


그림 2 PI-IP 혼합 전류 제어기를 이용한 약자속 제어
Fig 2. The weakening Control using PI-IP hybrid current controller

기존 PI 제어기로 i_{dq} 이득 값을 각각 설정할 수 있지만 동일 대역폭에서 영점의 영향으로 d축 전류 응답 특성을 고려한 q축 전류 이득 값을 선정하는데 어려움이 있다. PI-IP 혼합 제어기는 IP 제어기의 특성도 동시에 이용할 수 있기 때문에 PI 제어기에서 생기는 단점을 보완 할 수 있다. 다음 그림 3은 PI-IP 혼합제어기를 이용한 전류 제어기 블록도 이다.

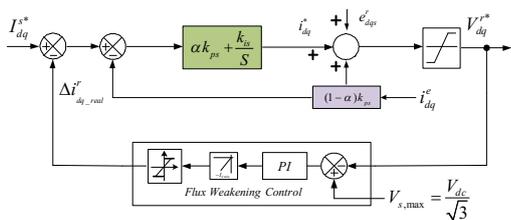


그림 3 PI-IP 혼합 제어기를 이용한 전류 제어기
Fig 3. The current controller using PI-IP Hybrid controller.

3. 시뮬레이션

그림 4와 그림 5는 정격 10[kW]의 IPMSM을 4000[rpm]의 속도에서 30[Nm]의 지령토크를 인가하였을 때의 시뮬레이션 결과 파형이다. 그림 4는 PI 제어기를 이용한 전류제어기의 출력으로써 d-q축 전류 응답 특성을 보면 d축 전류의 응답 특성이 더 느린 것을 확인할 수 있다. 이는 d축 전류에 의한 전압 여유분의 확보가 이루어지기 전에 q축 전류의 증가로 인하여 과도상태에서 전류제어기가 포화되는 것을 확인할 수 있다. 이 때 전동기는 식 (3)으로부터 $V_o < V_a$ 조건이 되어 과도 상태에서 순간적으로 발전기 동작을 하게 된다. 따라서 전동기가 적용되는 시스템에 부하로 작용할 수 있는 단점이 된다. 그림 5는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 PI-IP 혼합제어기를 이용하여 전류제어기를 구성한 시뮬레이션 결과이다. d-q축 전류를 각각 다른 비율로 혼합제어기를 구성함으로써 d축 전류에 의한 전압 확보가 충분히 이루어지면서 q축 전류가 증가되어 전류제어기의 포화를 방지할 수 있었으며 과도상태 및 정상상태의 응답특성이 개선되었음을 확인할 수 있다.

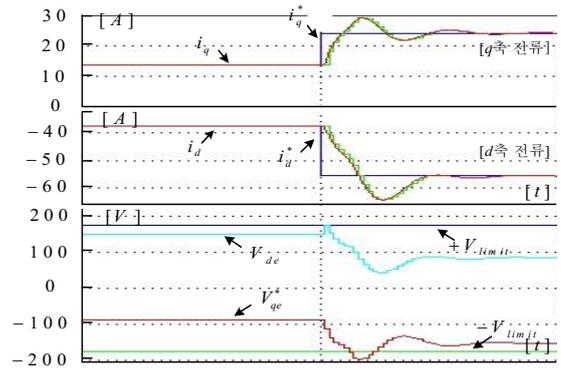


그림 4 PI 제어기를 적용한 전류 제어 결과
Fig 4. The result of current control using PI controller.

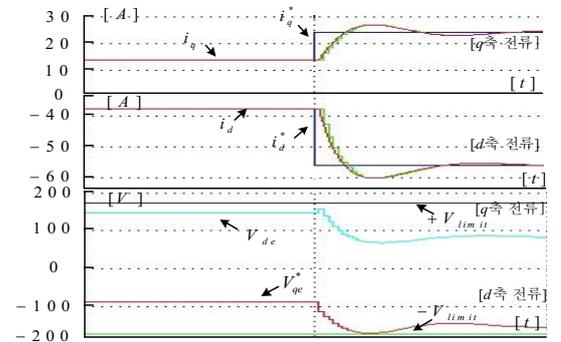


그림 5 PI-IP 혼합 제어기를 이용한 전류 제어 결과
Fig. 5. The result of current control using PI-IP hybrid controller.

4. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 토크제어를 하기 위한 전류 제어기를 PI-IP 혼합제어기로 구성하였다. 기존의 PI 제어기를 이용하였을 때 전류 지령에 대한 d-q축 전류 응답특성이 서로 달라 d축 전류에 의한 전압 여유분 확보가 충분히 이루어지지 않은 상태에서 q축 전류에 의한 토크 제어가 시작되어 과도 상태에서 전류제어기가 포화되는 문제점이 있었다. 따라서 혼합제어기를 이용하여 최대 오버슈트 및 d축 전류의 속도성을 고려하여 각각 다른 비율로 d-q 전류를 제어함으로써 과도상태 응답특성이 개선되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인 하였다.

본 논문은 한국 에너지 기술 평가원의 에너지 인력 양성 사업의 연구 결과입니다.(No.2010-410-100-630)

참고 문헌

- [1] S.M. Sue, C.T. Pan, "Voltage-Constraint-Tracking-Based Field-Weakening Control of IPM Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 55 pp. 340-347, 2008
- [2] "DC, AC, BLDC 모터 제어" 김상훈 북두출판사 2010
- [3] "매입 자석 동기 모터의 설계 및 제어" 교보문고 2010