

# 출력특성향상을 위한 영구자석 동기기의 약자속제어기에서의 제정수 오차 분석

권태석, 설승기

서울대학교 전기,컴퓨터공학부

## Abstract

본 논문에서는 안티 와인드업(Anti Windup) 제어 성분을 이용하는 약자속(Flux Weakening) 제어기에 있어, 약자속 제어기의 제정수 변화가 전체 제어 성능에 미치는 영향에 관하여 분석하고, 그 결과에 근거하여 제정수 변화의 영향을 줄일 수 있는 방법을 제시하였다. 약자속 제어기는 제정수의 변동에 비교적 강인하나 전류제어기가 제정수의 영향을 받아 성능이 저하(Degradation) 될 수 있다. 이러한 성능의 저하는 가상의 능동 저항 성분을 전류 제어기에 도입함으로써 완화될 수 있다.

## 1. 서론

하이브리드 자동차나 전기 자동차 등의 구동 시스템은 전체 차량의 무게와 차량 내 여유 공간 등을 고려하면, 그 크기와 무게에 엄격한 제한을 받는다. 이와 같은 특성을 고려하여 볼 때, 전력밀도(Power Density)가 높은 영구 자석 동기 전동기는 차량의 구동용 전동기로 적합한 특성을 지니고 있다. 또한 차량이 요구하는 부하 특성을 만족시키기 위하여는 넓은 운전 속도 영역과 기저속도(Base Speed) 이하에서의 큰 토크가 필요하다. 이와 같은 요구에 대응하기 위해서는 영구자석 동기 전동기의 약자속 운전이 필수적이다. 약자속 운전이 가능한 속도 영역과 기저 속도 이하에서 발생 가능한 최대 토크의 크기는 전동기의 설계 및 제작 단계에서 결정되지만, 전동기가 가지고 있는 능력을 최대한 활용하기 위하여는 적절한 제어 방법이 필요하며, 특히 약자속 영역에서의 제어 방법에 따라 전동기의 능력곡선(Capability Curve)은 크게 바뀌게 된다. 따라서, 공간과 무게의 제약이 있는 시스템에서 약자속 제어 방법은 전체 시스템의 전력 밀도를 결정하는 중요한 인자가 된다.

최근, 약자속 영역에서 영구자석 전동기의 출력 특성을 향상시킬 수 있는 약자속 제어 알고리즘이 발표되었다[1]~[2]. 약자속 영역에서 전동기의 출력 특성을 향상시키기 위하여는 주어진 직류단 전압을 최대한 이용하여 전압 합성을 하여야 하는데, 기존에 발표된 대부분의 약자속 제어 방법은 출력전압의 크기를 제한하여 제어하는 방식을 사용하고 있어, 그림 1에서 보는 바와 같이 사용 가능한 전압의 일부를 사용하지 못하거나, 출력이 불가능한 전압 벡터를 전류제어기에서 출력하게 된다.

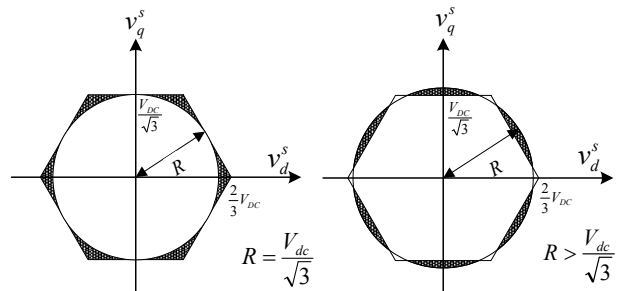


그림 1 전압 제한 육각형과 전압 크기

기존의 방법과 달리, [1]~[2]에서 제안된 방법은 전압의 크기 대신에 전류 제어기의 출력 전압과 파변조 블록의 출력 전압간의 차이인 안티 와인드업 성분을 직접 제한하여 약자속 운전에서 사용함으로써, 약자속 영역에서의 전동기 출력을 기존의 방법보다 5% 이상 향상시킬 수 있다. 또한, 이 방법은 직류단 전압을 최대한 이용할 수 있는 6 스텝 운전과는 달리, 전 운전 영역에서 전류 제어가 가능하게 되어 더 빠른 동특성(Dynamics)을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 [1]~[2]에서 발표된 약자속 제어기의 제정수 변화에 대한 영향을 분석하고 그 결과를 제시한다. 또한 분석 결과에 근거하여, 제정수 변화가 전체 시스템에 미치는 영향을 줄일 수 있는 방법에 대하여도 논하기로 한다.

## 2. 본론

### 2.1 약자속 제어기

그림 2에 본 논문에서 고찰하고자 하는 약자속 제어기의 블록도를 나타내었다.

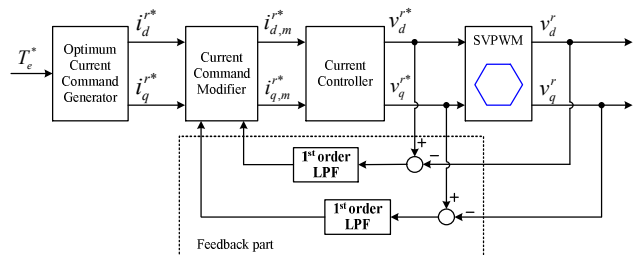
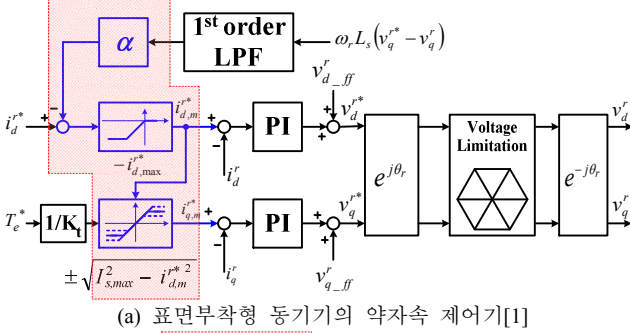


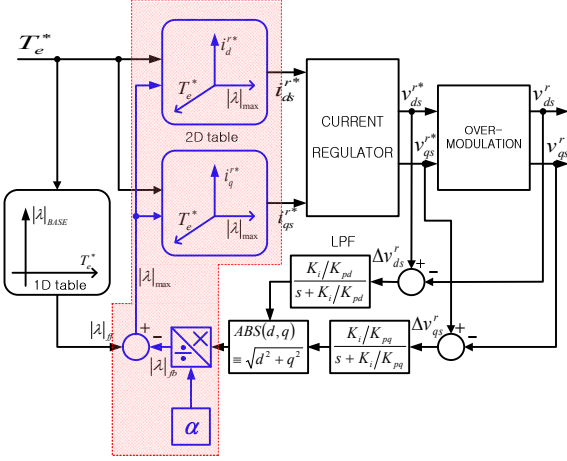
그림 2 [1]~[2]에서 제안된 약자속 제어기의 블록도

그림 2에서 보듯, [1]~[2]에서 제안된 약자속 제어기는 최적 전류 지령 생성부, 전류 지령 수정부, 그리고 제한부로 이루어져 있다. 최적 전류 지령 생성부는 토크 지령에 대하여 전류당 최대 토크(MTPA: Maximum Torque Per Ampere)를 발생하는 전류 지령을 생성하는 역할을 담당한다. 즉, 그림 3.(a)에서와 같이 표면 부착형(Surface

Mount) 영구자석 기기에서는  $d^r$  축 전류를 0로 하고,  $q^r$  축 전류를 토크 지령에 따라 결정하게 되며, 그림 3.(b)에 나타낸 매입형 영구자석 기기에서는 수치 해석적, 또는 실험적으로 구한 MTPA 곡선을 따라 전류 지령을 생성하게 된다. 전류 지령 수정부는, 그림 3의 빗금 친 부분으로 구성되어 있으며, 그림에서와 같이, 궤환부에서 얻어진 신호와 전류 제한 조건 등을 이용하여 약자속 제어를 수행하게 된다.



(a) 표면부착형 동기기의 약자속 제어기[1]



(b) 매입형 동기기의 약자속 제어기[2]

그림 3 표면 부착형 및 매입형 영구자석 동기기의 약자속 제어기

궤환부는 다음과 같이 구성된다. 전류 제어기가 일반적인 비례적분(PI) 제어기 형태의 제어기와 역기전력을 전향 보상하는 형태로 이루어져 있고, 제정수의 오차가 없다고 하면, 1차 저역 통과 필터를 통과한 전압 오차는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{vd} \equiv \frac{\omega_d}{s + \omega_d} (v_d^{r*} - v_d^r) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \left( \frac{sK_{pd} + K_{id}}{s} (i_{d,m}^{r*} - i_d^r) - (sL_{ds} + R_s) i_d^r + \Delta E_d \right),$$

$$e_{vq} \equiv \frac{\omega_q}{s + \omega_q} (v_q^{r*} - v_q^r) = \frac{\omega_q}{s + \omega_q} \left( \frac{sK_{pq} + K_{iq}}{s} (i_{q,m}^{r*} - i_q^r) - (sL_{qs} + R_s) i_q^r + \Delta E_q \right),$$

(1)

여기서  $K_{pd}$ ,  $K_{pq}$ ,  $K_{id}$ ,  $K_{iq}$ 는 전류 제어기의 비례 이득과 적분이득이고,  $L_{ds}$ ,  $L_{qs}$ ,  $R_s$ 는 영구자석 전동기의 인덕턴스와 저항이다.

전류 제어기의 비례 적분 이득을 극영점(Pole-Zero) 상쇄방식으로 설계하고, 1차 저역 통과 필터의 차단 주파수를  $\omega_d = K_{id} / K_{pd}$ ,  $\omega_q = K_{iq} / K_{pq}$ 와 같이 설정하면, 식 (1)은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{vd} = \frac{K_{id}}{sK_{pd} + K_{id}} (v_d^{r*} - v_d^r) = \frac{K_{id}}{s} (i_{d,m}^{r*} - i_d^r) - R_s i_d^r \approx \frac{K_{id}}{s} (i_{d,m}^{r*} - i_d^r),$$

$$e_{vq} = \frac{K_{iq}}{sK_{pq} + K_{iq}} (v_q^{r*} - v_q^r) = \frac{K_{iq}}{s} (i_{q,m}^{r*} - i_q^r) - R_s i_q^r \approx \frac{K_{iq}}{s} (i_{q,m}^{r*} - i_q^r),$$

(2)

식 (2)의 두 번째 항에서 저항을 포함하는 성분은 약자속 운전이 통상 높은 속도에서 일어난다는 점을 고려하면, 무시될 수 있다. 따라서, 궤환부를 통해 궤환되는 신호는 전류 제어기의 적분기 출력에 해당하는 값이 되며, 그림 2의 약자속 제어기는 적분기의 출력 값에 따라 약자속 제어의 정도를 결정하게 됨을 알 수 있다.

## 2.2 제정수 오차의 영향

앞 절에서 살펴본 약자속 제어기에서 최적 전류 지령 생성부와 전류 지령 생성부는 전동기 제정수의 오차에 큰 영향을 받지 않는다. 이 경우, 전동기 제정수의 오차는 MTPA운전에 영향을 줄 뿐, 약자속 운전 자체에는 영향을 주지 못하며, MTPA 운전점을 실험적으로 구하여 참조표를 사용하는 경우, 제정수의 오차를 최소화할 수 있다.

궤환부의 경우, 제정수의 오차가 존재한다고 하면, 식 (1)은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{vd} = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} (v_d^{r*} - v_d^r) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \left( \frac{sK_{pd} + K_{id}}{s} (i_{d,m}^{r*} - i_d^r) - (sL_{ds} + R_s) i_d^r + \Delta E_d \right),$$

$$e_{vq} = \frac{\omega_q}{s + \omega_q} (v_q^{r*} - v_q^r) = \frac{\omega_q}{s + \omega_q} \left( \frac{sK_{pq} + K_{iq}}{s} (i_{q,m}^{r*} - i_q^r) - (sL_{qs} + R_s) i_q^r + \Delta E_q \right),$$

단,  $\Delta E_d \equiv -\omega_r (\hat{L}_{qs} - L_{qs}) i_q^r$ ,  
 $\Delta E_q \equiv \omega_r ((\hat{L}_{ds} - L_{ds}) i_d^r + \hat{\Lambda}_m - \Lambda_m)$ .

(3)

다시  $\omega_d = K_{id} / K_{pd}$ ,  $\omega_q = K_{iq} / K_{pq}$ 와 같이 설정하면,

$$e_{vd} = \frac{K_{id}}{sK_{pd} + K_{id}} (v_d^{r*} - v_d^r) = \frac{K_{id}}{s} (i_{d,m}^{r*} - i_d^r) - \frac{K_{id}(sL_{ds}/R_s + 1)}{sK_{pd} + K_{id}} R_s i_d^r + \frac{K_{id}}{sK_{pd} + K_{id}} \Delta E_d,$$

$$e_{vq} = \frac{K_{iq}}{sK_{pq} + K_{iq}} (v_q^{r*} - v_q^r) = \frac{K_{iq}}{s} (i_{q,m}^{r*} - i_q^r) - \frac{K_{iq}(sL_{qs}/R_s + 1)}{sK_{pq} + K_{iq}} R_s i_q^r + \frac{K_{iq}}{sK_{pq} + K_{iq}} \Delta E_q,$$

(4)

와 같이 식 (4)를 얻을 수 있다. 식 (4)의 우변 두 번째 항은 저항 성분의 전압 강하에 의한 항으로 약자속 운전이 통상 높은 속도에서 일어난다고 하면, 무시될 수 있다. 식 (4)의 세 번째 항은 역기전력의 전향 보상이 완벽하게 일어나지 않아서 생긴 것으로, 일종의 외란(Disturbance)으로 생각할 수 있다.

다음 그림 4와 같은 외란( $e$ )를 가진 전형적인 PI제어기를 생각해 볼 때, 적분기의 출력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

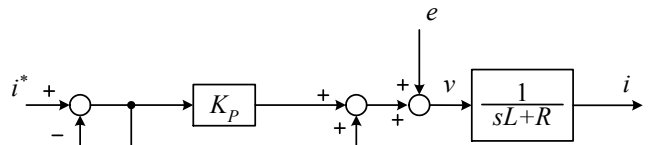


그림 4 외란을 포함하는 전형적인 PI제어기

$$\frac{K_I}{s} (i^* - i) = \frac{K_I}{s} \left( i^* - \frac{sK_P + K_I}{s^2L + s(K_P + R) + K_I} i^* \right) - \frac{K_I}{s^2L + s(K_P + R) + K_I} e.$$

(5)

이를 식 (4)의 적분항에 대입하면, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{vd} = \frac{K_{id}}{s} \left( i_{d,m}^{r*} - \frac{sK_{pd} + K_{id}}{s^2 L_{ds} + s(K_{pd} + R_s) + K_{id}} i_{d,m}^{r*} \right) - \frac{K_{id}(sL_{ds}/R_s + 1)}{sK_{pd} + K_{id}} R_s i_d^r + \frac{sK_{id}(sL_{ds} + R_s)}{(sK_{pd} + K_{id})(s^2 L_{ds} + s(K_{pd} + R_s) + K_{id})} \Delta E_d,$$

$$e_{vq} = \frac{K_{iq}}{s} \left( i_{q,m}^{r*} - \frac{sK_{pq} + K_{iq}}{s^2 L_{qs} + s(K_{pq} + R_s) + K_{iq}} i_{q,m}^{r*} \right) - \frac{K_{iq}(sL_{qs}/R_s + 1)}{sK_{pq} + K_{iq}} R_s i_q^r + \frac{sK_{iq}(sL_{qs} + R_s)}{(sK_{pq} + K_{iq})(s^2 L_{qs} + s(K_{pq} + R_s) + K_{iq})} \Delta E_q.$$

(6)

식 (6)의 두 번째 항은 저항에 의한 전압 강하에 따른 항으로 무시될 수 있으며, 세 번째 항의 보드선도(Bode Plot)를 나타내면 그림 5와 같다.

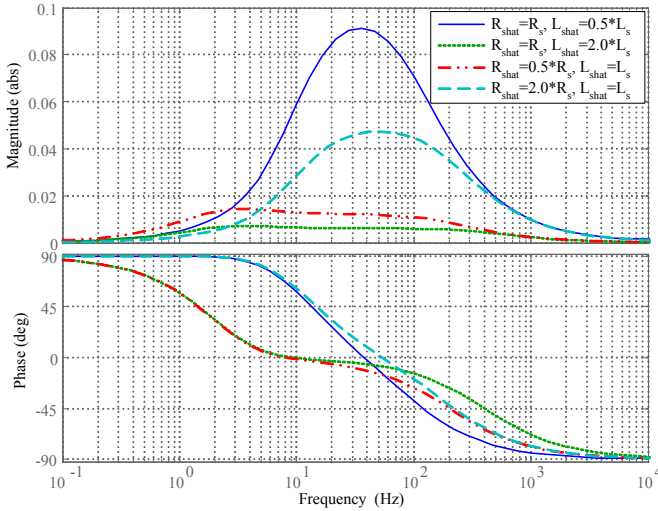
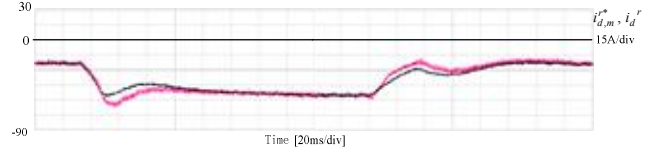


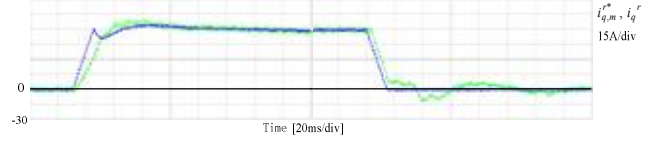
그림 5 식 (6)의 세 번째 항의 보드 선도

그림 5는 저항의 추정 값이 참 값의 0.5배와 2배일 때, 그리고 인덕턴스의 추정 값이 참 값의 0.5배와 2배일 때의 식 (6)의 세 번째 항의 보드 선도를 나타낸 것이다. 대개 저항의 오차는 전동기의 온도 변화에 의한 것으로, 추정 값이 참 값보다 작은 경우가 많고, 인덕턴스의 오차는 전동기의 자기적 포화 현상에 의한 것으로 추정 값이 참 값보다 큰 경우가 많다. 따라서 그림 5로부터 제정수의 오차는 그림 2의 약자속 제어기의 성능에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 하지만, 전류 제어기 자체가 제정수의 오차에 의한 영향을 받게 되므로, 이로 인한 전체 제어기의 전류 응답 왜곡을 완전히 피할 수는 없다.

그림 6은 인덕턴스의 추정 값이 참 값의 1.5배인 경우 그림 3의 (a)에 나타난 약자속 제어기의 동작에 대한 실험 파형이다. 영구자석 동기는 부하 기기에 의하여 최고속도에서 정속(Constant Speed) 운전되고 있으며, 토크 지령을 인가한 후 잠시 후에 제거하였다. 그림에서 보듯, 과도 상태에서의 전류 응답이 다소 왜곡되어 있음을 알 수 있다.



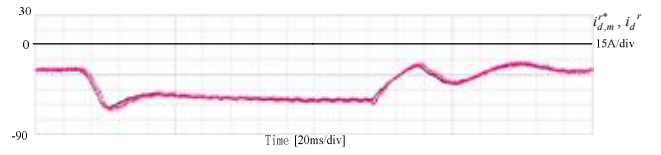
(a) d축의 전류 지령과 실제 전류



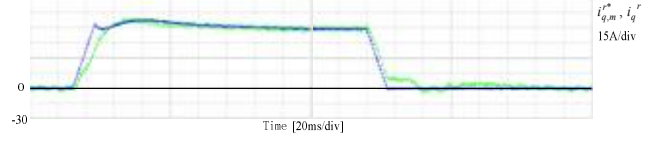
(b) q축의 전류 지령과 실제 전류

그림 6 인덕턴스의 추정 값이 참 값의 1.5배일 때 약자속 제어기의 동작

이와 같은 전류 제어기의 응답은 가상 저항 기법[3]을 이용하여 향상시킬 수 있다. 그림 7은 그림 6과 같은 실험 조건에서 능동 저항 기법을 사용하여 얻은 파형이다.



(a) d축의 전류 지령과 실제 전류



(b) q축의 전류 지령과 실제 전류

그림 7 인덕턴스의 추정 값이 참 값의 1.5배일 때 가상 저항 기법을 적용한 약자속 제어기의 동작

그림 7로부터 능동 저항 기법을 적용하면 제정수 오차에 의한 전류 응답의 왜곡을 완화시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 3. Conclusion

본 논문에서는 전동기 제정수 오차가 약자속 제어기에 미치는 영향에 관하여 분석하였고 그 결과를 제시하였다. 분석 결과로부터, 전동기 제정수의 오차는 [1]~[2]에서 제안된 약자속 제어기의 동작에 큰 영향을 주지 않으며 약자속 제어 자체는 제정수의 오차에 강인하지만, 전류 제어기 자체가 제정수 오차에 의해 영향을 받게 되므로 그 영향을 완전히 배제할 수 없음을 알 수 있다. 이와 같은 전류 제어기의 성능 저하는 능동 저항 기법을 통하여 보완할 수 있으며, 실험을 통하여 이를 증명하였다.

### Reference

- [1] T. Kwon, and S. Sul, "Novel Anti-windup of a Current Regulator of a Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor for Flux-Weakening Control," IEEE Trans. on IA, vol.42, no.5, pp1293-1300, Sep/Oct 2006.
- [2] G. Y. Choi, M. S. Kwak, T. S. Kwon, and S. K. Sul, "Novel Flux-Weakening Control of an IPMSM for Quasi Six-Step Operation," in Conf. Rec., IEEE IAS07.
- [3] H. Kim, R.D. Lorenz, "Synchronous frame PI current regulators in a virtually translated system," in Conf. Rec., IEEE IAS04.