'95 대한전기학회 하계학술대회 논문집(1995. 7. 20~22)

전류궤환에 의한 영구자석 동기 전동기의 약계자 제어

윤 병 도* · 김 윤 호* · 김 종 구** · 최 원 범* · 이 병 송*

* 중앙대학교 전기공학과, ** 현대 중공업

Field Weakening Control of IPMSM Using Current Feedback

Byung-Do Yoon* · Yoon-Ho Kim* · Jong-koo Kim**

Weom-Beom Choi* · Byung-Song Lee*

Dept. of Electrical Eng. Chung-Ang University*

Hyundai Heavy Industries Co., Ltd**

Abstract

This paper describes current controlled PWM technique of IPM synchronous motors for a wide variety of speed control applications. They are however limited in their ability to operate in the power limited regime where the available torque is reduced as the speed is increased above its base value. This paper reviews the operation of the IPMSM drives when they are constrained to be within the permissible envelope of maximum inverter voltage and current to produce the rated power and to provide this with the highest attainable rotor speed. This paper proposes a new field-weakening control algorithm using phase current feedback to improve the torque characteristics and to reduce the torque ripple of IPMSM in the constant power region. The improved torque characteristics of speed control strategy with current feedback control algorithm is analyzed and the performance is investigated by the computer simulation results.

1.서론

현대 산업분야에서 교류 서어보 시스템의 PWM 인버터로 구동되는 영구자석 동기전동기(PMSM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 개발된 영구자석 동기전동기는 회전자에 영구 자석이 설치된 위치에 따라 내심형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor:IPMSM)와 표면 자석형 영구자석 동기전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor: SPMSM)로 분류할 수 있다.

본 논문에서 적용한 교류 서어보 전동기는 내심형 영구자석 동기 전동기 (IPMSM)로서 회전자가 영구자석으로 구성되어 관성이 작고 냉각이 용이하며 효율면에서 유도 전동기 보다 유리하다. IPMSM은 기계적으로 강인하므로 고속운전의 적용에 유리하며, 유효공극이 작아 전기자 반작용의 효과에 중요한 특성을 가지고 있다. 이러한 점은 일정 토오크영역에서 뿐만아니라, 정격속도 이상의 약계자 영역(일정 출력)에서의 제어도 가능하게 한다.[1][2]

본 논문에서는 이러한 IPMSM의 특성을 바탕으로하여 시스템의 전압 및 전류제한의 범위 내에서 토오크 특성의 개선을위한 기법으로 전류궤환에의한 기존의 3상 전류명령과 실제 상전류성분의 궤환에의한 오차분을 보상하는 약계자 제어 기법을 제안한다.

제안된 알고리즘은 시뮬레이션의 결과로서 타당성을 입증한다.

2.영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

영구자석 동기 전동기는 계자가 직류 전원에 의하여 여자되는 권선 계자형 동기 전동기의 구조와 유사하며, 동기 각속도 ω_e 로 회전하는 d - q좌표계에 의한 전압 방정식으로 표현하면 식(1)과같다.

$$V_{qds} = r_s i_{qds} + \omega_e \lambda_{dqs} + p\lambda_{qds} \quad (1)$$

여기서,

$$\lambda_{dqs} = [\ \lambda_{ds} - \lambda_{qs}\ ]^T$$

식(1)을 d-q 성분별로 나타내면,

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} + p\lambda_{qs}$$
$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} + p\lambda_{ds} \quad (2)$$

여기서,

$$\lambda_{qs} = L_q i_{qs}$$
$$\lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \lambda_m \quad (3)$$

식(3)에서 λ_m은 영구자석에의한 쇄교자속 벡터이며, L_d, L_q는 d-q 축 자기인덕턴스이다.

영구자석 동기전동기의 발생토오크 T_e는

$$T_e = (P/2)[\ \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}\ ] \quad (4)$$

이다.

식(3)의 관계를 고려하면 토오크 T_e는 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$T_e = (P/2)[\ \lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}\ ] \quad (5)$$

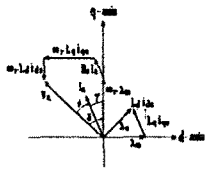


그림 1. IPMSM의 벡터圖

Fig. 1. Vector diagram of IPMSM.

PMSM의 벡터圖는 그림 1.과 같고, 일정 토오크 동작모드및 정격속도 이상의 고속운전에의 적용을 위한 전류위상각 γ를 제어하기위한 벡터도를 나타낸다. 그림 1.에서 전류위상각 γ를 고려한 전기자 전류 i_{ds} , i_{qs}는 식(6)과 같다.

$$i_{ds} = -I_a \sin\gamma\ ,\ i_{qs} = I_a \cos\gamma \quad (6)$$

전류 I_a와 위상각 γ를 이용하여 토오크 T_e를 다음과 같이 표현할수 있다.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right)\left[\ \lambda_m I_a \cos\gamma + \frac{1}{2}(L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\gamma\right] \quad (7)$$

식(7)의 첫째항은 여자(Excitation)토오크이며, 둘째항은 리럭턴스 토오크이다.

3.약계자 제어 알고리즘

3-1.일정 토오크및 최적 약계자제어 알고리즘

일정 토오크에서는 전류 위상각 γ를 제어함으로써 정격속도명령에대하여 리럭턴스 토크를 이용한 최대토크 운전이 가능하고, 그 이상의 속도명령에 대하여는 약계자 운전을 하므로써 고속운전을 할 수 있다. 전류명령 I_a와 γ 의 관계에서 전류당 최대토오크를 얻기위한 위상각 γ 는 발생 토오크 식(7)에서 $dT/d\gamma = 0$ 와 $d^2T/d\gamma^2 < 0$의 관계에서 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = \sin^{-1}\frac{-\lambda_m+\sqrt{\lambda_m^2+8(L_q-L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q-L_d)I_a} \qquad (8)$$

최대 토오크운전에서 위상각 γ 는 부하변동에 따른 I_a의 관계에 따라 제어된다. 따라서 최대 토오크 제어에서 식(8)은 I_a의 함수이고, 전류 위상각 γ 를 제어하므로써 리럭턴스 성분을 효과적으로 이용하여 최대 전류 제한 범위를 고려한 최적의 토오크 운전이 가능하고,일정 토오크 영역및 약계자 영역에서의 운전에 적용할 수 있다. 일정 토오크 영역에서의 최대 토오크제어및 약계자 제어에서는 토오크 명령의 크기에따라 전류위상각이 변화하게 된다.

약계자 영역 제어의 정상상태에서 저항을 무시한 전압방정식은 식(2)로부터 식(9)와 같이 유도될 수 있다.

$$V_a=\sqrt{(\omega_e \lambda_m + \omega_e L_d i_{ds})^2+(\omega_e L_q i_{qs})^2} \qquad (9)$$

또한,식(6)의 관계에서 식(10)과 같이 나타낼 수 있고,

$$i_{qs}=\sqrt{i_a^2-i_{ds}^2} \qquad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하여 정리하면 식(11)과 같다.

$$V_a=\omega_e\sqrt{(L_d^2-L_q^2)\,i_{ds}^2+2\lambda_m L_d i_{ds}+\lambda_m^2+L_q^2 i_a^2} \qquad (11)$$

여기서, 인버터 포화전압을 V_{lim} ,전동기의 정격전류를 i_{lim}라하면, 식(11) 은 속도와 자속축 전류만으로 나타내어질 수 있고, 이를 다시 d축 전류명령에 대한 식으로 나타내면 식(12)와 같다.

$$i_{ds}^*=\frac{-\lambda_m L_d+\sqrt{\lambda_m^2 L_d^2-(L_d^2-L_q^2)(\lambda_m^2+L_q^2 i_{lim}^2-(V/\omega_e)^2)}}{L_d^2-L_q^2} \qquad (12)$$

식(12)의 관계에서 약계자 제어시의 토오크 명령 T_{ef}^*는 식(13)과 같다.

$$T_{ef}^*=\frac{P}{2}(\lambda_m\sqrt{i_a^2-i_{ds}^{*2}}+(L_d-L_q)\,i_{ds}^*\sqrt{i_a^2-i_{ds}^{*2}}) \qquad (13)$$

3-2.전류궤환에의한 약계자제어 알고리즘

약계자 제어 운전영역에서 ,전류제한 궤적은 일정하지만, 전압제한 궤적은 전압제한 범위 V_{lim}가 최대의 값을 유지하여 더이상 증가할 수 없는 상태로 포화되며, q축 및 d축 리액턴스는 속도의 증가에 따라 비례적으로 증가하게 된다.

전압궤적의 포화현상은 전류제어기의 포화현상을 초래하고 정상상태에 있어서 d축및 q축 전류성분의 오차가 존재하게 되며, 결과적으로 실제 발생 토오크는 속도 제어기에서 발생하는 토오크 명령에 이르지 못하여 오차를 발생하게된다. 이러한 전류 제어기의 포화에 따른 오차를 보상하므로서 정상상태의 전류명령에 추종하게하여 토오크를 향상시키기 위한 기법으로 실제전류 i_{qs}, i_{ds}를 궤환하여 전류오차를 보상하기위한 제어 블럭도는 그림 2.와 같다.

그림 2.의 블럭도에서 식(12)의 d축 전류명령 i_{ds}^* 값에 실제전류 i_{ds}가 추종하게 하므로서 오차를 보상하게 되며 궤환된 실제전류 i_{ds}는 식(15)와 같다.

$$i_{ds}=\sqrt{(2/3)}[\,i_a\cos(\theta_r)+i_b\cos(\theta_r-\frac{2\pi}{3})+i_c\cos(\theta_r+\frac{2\pi}{3})] \qquad (15)$$

식(15)와 같은 궤환된 실제전류 i_{ds}와 q축 전류명령 및 d축 전류명령 i_{qs}^*, i_{ds}^*의 오차를 PI 제어기의 입력으로 하여 제어기의 출력에 따르는 최대 전류명령값 Iqmax를 전동기의 최

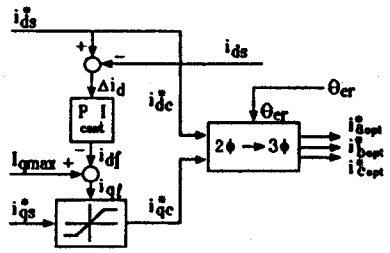


그림 2. 전류궤환에의한 약계자 제어 블럭도

Fig. 2. Block diagram of current feedback.

대허용 전류로 설정하여 실제전동기 토오크의 명령의 상한및 하한 값이 되도록 전류 제한기를 설정한다. 또한, 설정된 최대 전류명령값 Iqmax는 d축 전류명령 i_{ds}^* 및 실제의 d축 전류값과의 비교에의한 오차분의 전류 Δi_d를 입력으로하는 PI 제어기의 출력과 연산하여 토오크분의 전류명령 i_{qc}^*를 출력하게 된다. 이러한 전류오차 보상블럭도의 출력 i_{dc}^*와전류제한기의 출력 i_{qc}^*가 최적 약계자 제어 알고리즘의 최종적인 전류명령으로 $2\phi \rightarrow 3\phi$ 변환 과정을 통하여 3ϕ의 상전류 명령 $i_{a\,opt}^*$, $i_{b\,opt}^*$, $i_{c\,opt}^*$ 로 히스테리시스 전류 제어기의 입력이 된다.

그림 2.의 블럭도와 같은 전류궤환에의한 약계자 제어기법을 적용하면 전기자 전류 및 단자전압의 원선도는 그림 3.과 같이 도시할 수 있고, 전류제한 범위의 Q점은 Q'점으로 이동하게되며, D점은 D'점으로 이동하게 되어 전압제한 범위가 일정한 상태로 유지되는 일정 토오크 영역에서 q축 전류 i_{qs} 와 d축 전류 i_{ds}는 전압제한 범위내에서 운전된다.

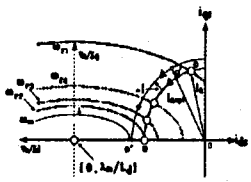


그림 3. 전기자 전류및 단자전압 원선도

Fig. 3. Current limit and voltage limit circle diagram .

또한, 속도명령값이 정격 속도이상으로 증가하는 일정 출력영역에서는 전압제한 궤적은 전압제한 범위 V_{lim}가 최대의 값을 유지하여 더이상 증가할 수 없는 상태로 포화되며, q축 및 d축 리액턴스는 속도의 증가에따라 비례적으로 증가하게 되므로 전압제한에 의한 범위 수직축 (V_a/X_q) 과 수평축 (V_a/X_d) 의 크기는 감소하게된다. 그리고, 일정출력 영역에서 전압제한 범위가 속도에 따라 축소될지라도 최적 약계자 제어 알고리즘을 적용할 경우 최대토오크 운전영역과 마찬가지로 전류제한 범위의 Q점은 Q'점으로 이동하게 되며, D점은 D'점으로 이동하게 되어 전압제한 범위와 전류제한 궤적이 교차하는 범위의 영역에서 운전된다. 전압제한의 궤적은 속도의 증가에 따라 서서히 축소되어 속도 ω_{r1}에서 전류제한 궤적과 접하는 속도 ω_m 의 범위에서 운전되므로 전류궤환에 의한 제어기법을 적용할 경우 전동기의 속도범위는 ω_{r2} 에서 ω_m 까지의 운전이 가능하게 된다.

이러한 특성은 d축 전류성분의 궤환에의한 전류오차분의 보상으로 식(16)과 같은 개선된 토오크 T_e^*가 되어 토오크 명령에 따라 속도 오차를 보상하여 추종하도록 하며, 속도범위의 확장을 기할 수 있음을 입증한다.

$$T_e^*=\frac{P}{2}(\lambda_m\, i_{qc}+(L_d-L_q)\,i_{dc}^*\, i_{qc}) \qquad (16)$$

이에 따른 q축 전류분은 식 (3.27) 와 같이 표현된다.

$$i_{qc}^{*}=\frac{T_e^{*}}{\frac{P}{2}(\lambda_m+(L_d-L_q)i_{dc}^{*})} \quad (17)$$

그리고, 시스템 제어 블록도에 따른 전류명령의 입력은 식 (18)과 같고, 위상각은 식 (19)와 같다.

$$I_{aopt}=\sqrt{i_{dc}^{*2}+i_{qc}^{*2}} \quad (18)$$

$$\gamma=\tan^{-1}(\frac{i_{dc}^{*}}{i_{qc}^{*}}) \quad (19)$$

또한, 시스템에 인가되는 일정 토오크 및 약계자 영역의 상전류 명령은 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} i_{aopt}^{*} &= I_{aopt}\sin(\theta_r+\gamma) \\ i_{bopt}^{*} &= I_{aopt}\sin(\theta_r+\gamma-2\Pi/3) \\ i_{copt}^{*} &= I_{aopt}\sin(\theta_r+\gamma+2\Pi/3) \end{aligned} \quad (20)$$

그림2.의 블럭도의 전류궤환에의한 약계자 제어 알고리즘을 적용할 경우 식(12)의 d축 전류명령 i_{dc}^{*}값에 실제전류 i_{dc}가 추종하게하므로서 오차를 보상하게 된다. 그러나, 역기전력의 영향에의한 실제전류의 미소한 오차분은 완전히 보상하지 못하게되고, 이에따른 토오크 성분의 특성이 나쁘게 나타나므로 이를 개선하기위한 기법으로 상전류 보상을 위한 실제의 궤환된 상전류 성분을 전류오차 보상블럭의 출력 i_{dc}^{*}와 i_{qc}^{*}의 $2\phi\rightarrow3\phi$ 변환 과정에의한 3ϕ의 상전류명령 i_{aopt}^{*}, i_{bopt}^{*}, i_{copt}^{*} 와의 비교에의한 새로운 전류명령 i_{naopt}^{*}, i_{nbopt}^{*}, i_{ncopt}^{*}에의하여 오차분을 상전류 명령값에 보상하여 역기전력의 영향을 최소화하고, 토오크 특성을 향상시킬 수 있다. 이러한 상전류 보상 알고리즘의 블럭도는 그림 4. 와같다.

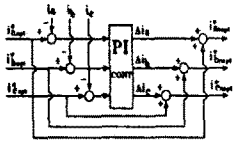


그림4. 상전류 오차 보상 블럭도.

Fig.4.Block diagram of Phase current error compensation.

이들 관계식은 식(21)와같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{anopt}^{*} &= I_{anopt}\sin(\theta_r+\gamma) \\ i_{bnopt}^{*} &= I_{anopt}\sin(\theta_r+\gamma-2\Pi/3) \\ i_{cnopt}^{*} &= I_{anopt}\sin(\theta_r+\gamma+2\Pi/3) \end{aligned} \quad (21)$$

이러한 상전류 보상 알고리즘 적용의 경우 영구자석 동기전동기의 인버터 용량을 고려한 전기자 전류및 단자전압의 제한에 대한 원선도는 그림5.와같다.

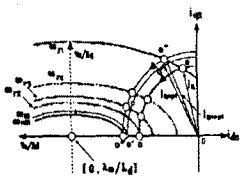


그림 5. 전기자 전류및 단자전압의 원선도

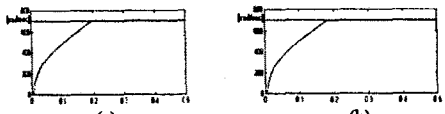
Fig.5. Current limit and voltage limit circle diagram.

그림 3.의 전기자전류 및 단자전압의 원선도에서 전류제한 범위의 Q'점은 Q"점으로 수직 이동하게 되어 토오크분 전류인 q축 전류명령 i_{qc}^{*}와 역기전력의 영향을 크게입는 실제전류 i_{qs}의 미소한 오차를 감소시키고, 토오크 성분의 증가및 리플성분이 감소되는 효과를 기할 수 있다. 또한, 토오크 성분 전류 i_{qs}의 오차 보상에따른 토오크 성분의 증가로 최대속도 운전 범위도 ω_m의 범위에서 ω_{mn}으로 확장할 수 있다.

4.시뮬레이션 결과 및 검토

시뮬레이션은 제안된 약계자 알고리즘을 토대로하여 시행 하였다. 그림 6.은 전류궤환에의한 약계자 제어 기법에의한 정격속도 이상의 속도명령 700[rad/sec]의 속도응답 특성을 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 실제 상전류명령의 궤환에의한 약계자 제어 알고리즘은 전류 오차의 보상에 의한 토오크 성분의 증가 및 리플을 감소 시키는 효과를 기할 수 있고, 이에따른 빠른 속도응답 특성을 나타낸다. 그림 7.은 토오크 특성을 나타낸다. 전류오차분의 보상으로 발생 토오크 성분의 증가 및 토오크 리플의 감소 효과를 기할 수 있다. 그림 8.과 그림 9.는 i_{qs}^{*}, i_{ds}^{*} 전류명령 및 i_{qs}, i_{ds} 전류파형으로 정상상태시 전류명령에 실제전류가 잘 추종하여 최적 약계자 알고리즘의 적용시 토오크 특성의 개선을 기할 수 있음을 입증한다.



(a) (b)

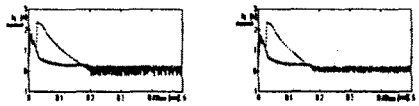
그림 6. 전류궤환(a) 및 상전류 보상(b)에의한 속도응답

Fig.6. Speed response of current feedback(a) and phase compenion.(b)

(a) (b)

그림 7. 전류궤환(a) 및 상전류 보상(b)에의한 토오크 응답

Fig.7.Torque response of current feedback(a) and phase compensation.(b)



(a) (b)

그림 8. 전류궤환(a) 및 상전류 보상(b)에의한 i_{qs} 전류파형

Fig.8. i_{qs} current response of current feedback(a) and phase compensation.(b)

(a) (b)

그림 9. 전류궤환(a) 및 상전류 보상(b)에의한 i_{ds} 전류파형

Fig.9. i_{ds} current response of current feedback(a) and phase compensation.(b)

5.결론

본 논문에서는 내심형 영구자석 동기전동기로 구동되는 서보 시스템의 고속운전 토오크 특성을 개선하기 전류궤환에의한 약계자 제어를 적용한 운전 기법에 대하여 제안하였다.

1. 서보 시스템의 인버터 용량의 제한 및 전류제한 특성을 고려한 단자전압 및 전류 원선도에 대하여 고찰하였다.

2.최적 약계자 알고리즘에 의한 d축 및 q축 전류 궤환과 상전류 보상기법을 통하여 일정 토오크 영역에서는 최대 토오크로 운전하기위한 전류 위상각으로 적용하고, 일정 출력영역에서는 오차보상에 의한 전류 위상각을 전환하여 적용하므로서 토오크 특성 및 속도응답 특성이 개선됨을 시뮬레이션의 시행으로 확인 하였다.

參考 文獻.

[1] Peter Vas " Vector Control of AC Machines. " pp.87 - 97, 1990.

[2] P.Pillay and Krishnan " Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives " IAS Annual Meeting, pp.380 - 390, 1987.