표면부착형 동기전동기의 철손을 고려한 벡터제어

최 영 태°* 이 득 기 ** 김 흥 근 **
°* 영진전문대학 전기과 ** 경북대학교 전기공학과

Vector Control of a Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous motor Including Iron Loss

Young-Tae Choi°* Deuk-Kee Lee** Heung-Geun Kim**
**Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Natl. Univ.
°*Dept. of Electricity. Yeung-Jin Junior College.

Abstract-To achieve the high performance speed control of synchronous permanent magnet motor, the influence of iron loss can not be negleced as the increase of driving frequency with high speed operation.

This paper proposes a maximum efficiency control algorithm for permanent magnet synchonous motors by controlling the d-axis component of the armature current at any speed and torque.
The objective of the optimum efficiency controller is to seek a combination of d-q axis current components which provide minimum input power (minimum losses) at a certain operating point by adding a small amout of perturbation to the d-axis current reference.

1. 서 론

표면부착형 영구자석 동기전동기(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)는 공작기계, Robot 등 정밀제어를 요하는 장비의 구동용 Servo 전동기로 사용되며, 유도전동기 보다 높은 효율과 구조의 단순성 그리고 벡터제어와 같은 우수한 제어기술로 직류전동기와 같은 토크특성을 얻을 수 있음으로 최근 많은 각광을 받고 있다.

영구자석 동기전동기 자체는 유도전동기보다 효율이 높으나 전동기 운전계통 전체의 효율특성은 전동기제어 방식에 의해 결정되므로 전동기를 효율적으로 제어하여 전동기의 손실을 구성하는 고정자 저항손과 철손을 감소시킴으로서 전동기의 효율을 더욱 향상시키기 위한 여러 연구가 진행되어 왔다.[1~5][10]

영구자석 동기전동기는 자속이 영구자석에서 발생되므로 $i_{sd}^{*}=0$로 제어를 하나, 이 경우 전동기자속이 항상 일정하므로 최적효율상태에서 운전할 수 없다. 따라서 전동기 입력전류중 자속분 전류인 d축 전류 i_{sd}^{*}를 음의 값으로 한 약계자제어를 수행한다. 이 경우 고정자 전류의 d-q축 성분은 독립적 변수로 전동기에 인가되므로 어떠한 속도하에서도 서로 다른 d-q축 전류의 조합에 따라 특정한 토크가 얻어지며 이에 따라 효율도 달라진다.[9]

d축 전류를 제어하여 전동기 입력전력을 최소화함으로 최대효율 운전을 구현하려면 정확한 전동기 등가모델과 전동기 상수의 정확한 정보가 필요하다.[6~8]

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 고정자 철손을 포함한 등가모델을 제시하고 전동기 입력전력이 최소가 되는 i_{sd}^{*}를 추정하여 전동기 효율을 최대화하는 알고리즘을 제안하고 컴퓨터로 시뮬레이션하여 제안한 최적효율제어 방법의 타당성을 확인하였다.

2. 시스템 모델링과 제어 알고리즘

2.1 시스템 모델링

본 논문에서 적용한 영구자석 동기전동기는 원통형으로 고정자 권선은 정현적으로 분포되어 있고 공극의 자속고조파는 고정자누설인덕턴스에만 영향을 주므로 철손을 고려한 영구자석 동기전동기의 상태방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + (1+\frac{R_s}{R_c}) \begin{bmatrix} v_{cd} \\ v_{cq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{cd} \\ v_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d p & -\omega L_q \\ \omega L_d & L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T=\frac{3}{2}\frac{P}{2}\{\lambda_f\, i_{sq}+(L_d-L_q)i_{sd}\, i_{sq}\} \quad (3)$$

$$\lambda_s=L_d\, i_{od}+j\, L_q\, i_{oq} \quad (4)$$

단, p는 미분연산자, v_{sd}, v_{sq}는 고정자 d, q축 전압, i_{sd}, i_{sq}는 고정자 d, q축 전류, i_{cd}, i_{cq}는 철손분전류, L_d, L_q는 고정자 d, q축 인덕턴스, R_s는 고정자 상당권선 저항, R_c는 철손저항, ω는 전기각속도, ω_r은 기계각속도, λ_f는 영구자석에 의한 상당 최대자속쇄교수를 나타내고 $i_{od}=i_{sd}-i_{cd}$, $i_{oq}=i_{sq}-i_{cq}$이다.

정상상태에서의 영구자석 동기전동기의 주손실은 고정자 동손과 철손으로 고정자 철손이 고려된 영구자석 동기전동기의 등가회로는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

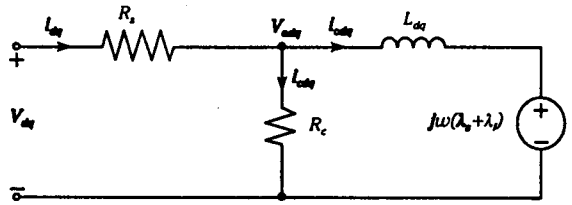


그림 1. 영구자석동기전동기의 등가회로

한편, 영구자석 동기전동기의 전체손실 W_l는 철손과 동손의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_l=\frac{1}{R_c}\,|v_o|^2+R_s\,|i_s|^2$$

$$=R_s(i_{sd}^2+i_{sq}^2)+\frac{1}{R_c}[(\omega L_q\, i_{oq})^2+\omega^2(L_d\, i_{od}+\lambda_f)^2] \quad (5)$$

이 손실값이 최소가 되는 조건 즉 최대효율 조건은 i_{od}에 대해 미분한 값이 영이 되는 점으로 이때의 i_{od}는 다음과 같이 유도할 수 있다.[4]

$$i_{od}=\frac{\omega^2 L_d\lambda_f(R_s+R_c)}{R_sR_c^2+\omega^2L_d(R_s+R_c)} \quad (6)$$

실제 전동기 제어 전류는 d축 전류와 q축 전류 i_{sd}, i_{sq}이므로 이 값들은 식(7),(8)과 같다.

$$i_{sd}=i_{od}-\frac{\omega L_q\, i_{oq}}{R_c} \quad (7)$$

$$i_{sq}=i_{oq}+\frac{\omega(L_d\, i_{od}+\lambda_f)}{R_c} \quad (8)$$

이와같이 영구자석 동기전동기의 최대효율이 되는 i_{sd} 가 존재함을 알 수 있고, 영구자석 동기전동기의 운전조건에서 최소입력을 얻을 수 있는 i_{sd}, i_{sq} 조합을 얻을 수 있다.

2.2 최적효율 제어기

영구자석 동기전동기의 d축전류를 변화시켰을 때 손실이 최소가 되는 점이 존재함을 확인하였으므로 전동기의 어떤 출력 상황에서도 항상 최적효율로 동작시키기 위한 영구자석 동기전동기의 새로운 최적효율제어 알고리즘을 제시한다. 제안한 최적효율제어기의 목적은 정상상태에서 입력전력이최소가 되는 d축전류와 q축전류 성분을 찾는데 있다.

효율이 가장 양호한 i_{sd}^*를 얻기 위해 각부하 조건에 따라 d축 전류를 조금씩 변화시키면서 입력전력이 최소가 되는 점으로 d축 전류를 접근시키는 제어 알고리즘을 사용하여 전동기의 모든 동작 상황이나 부하조건에서 최대효율을 얻는 제어를 수행하였다.

입력전력은 인버터의 dc부스 전압과 전류로부터 계산하며 이때 얻어진 입력전력은 전동기 출력, 전동기 손실 및 인버터 손실을 포함하고 전동기손실에는 동손, 철손 그리고 표유부하손 등이 포함된다.

다음 그림 2에 영구자석 동기전동기에 대한 토크 및 속도제어함수를 갖는 최적효율제어기의 블럭도를 나타내었다.

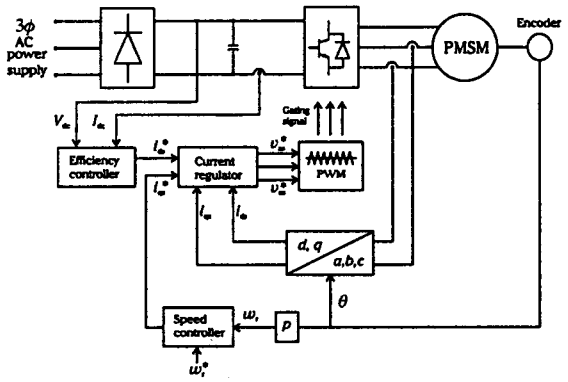


그림 2. 철손을 고려한 영구자석전동기 벡터제어 블럭도

그림 3은 최적효율 동작점을 찾기 위한 d축 전류 변화의 흐름도를 나타낸다.

전동기를 구동하여 최적효율 제어를 시작하기 전까지 제어기는 $i_{sd}^*=0$로 한 일반적인 제어방식으로 제어를 한다. 최적효율제어를 시작하면 d축 기준전류 i_{sd}^*를 $i_{sd}^*=0$에서 $\triangle i_{sd}$만큼 감소시킨 후 입력전력을 계산하여 이전 상태에서의 입력전력과 비교하고 이전 상태보다 적은 값이면 다시 $\triangle i_{sd}$ 만큼 감소시킨 후 입력을 계산하여 다시 이전상태와 비교하는 작업을 반복한다. 이와같이 d축 기준 전류를 계속 변화시키면서 입력전력을 이전상태와 비교하는 과정에서 n번째의 입력이 이전 상태의 값보다

크게 나타나는 순간 제어기는 i_{sd}^*를 n-1상태의 값으로 회복시킨 후 0~1 사이에 있는 임의의 계수 α를 Δi_{sd}에 곱하여 Δi_{sd}를 감소시킨 후 다시 동일한 과정을 반복한다. 이와같이 d축 전류의 변화량 Δi_{sd}를 최대효율 운전점에서 멀리 있는 위치에서는 큰 값을 사용하고 최대효율 운전점 부근에서는 미소한 값으로 변화시킴으로서 제어기는 빠르고 정확하게 전동기의 운전을 최대 효율 운전점으로 수렴시킬 수 있다.

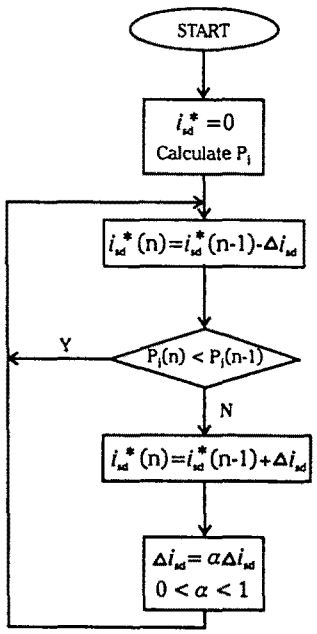


그림 3. 최적 효율 제어 알고리즘의 흐름도

3. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 제안하고 있는 최적효율 제어기법의 타당성을 검증하기 위하여 디지탈 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 이용한 전동기의 파라미터와 정격은 표 1과 같고 전압형 PWM 인버터를 사용하였다.

Rs	2.4 [Ω]	λ_f	0.281[V-s]
Rc	700 [Ω]	정격속도	1800[rpm]
Ld	0.035 [Ω]	정격토크	4.1[Nm]
Lq	0.109 [H]		

표 1. 시뮬레이션에 사용된 전동기 파라미터와 정격

시뮬레이션을 통해 정격운전 조건에서 d축전류를 영으로 두었을 때와 d축 전류를 변화시켰을 때의 입력전력의 변화를 비교하고 최대효율 제어가 수행되고 있음을 검증하였다.

그림 4는 정상상태에서 $i_{sd}^*=0$ 로 한 영구자석 동기전동기 제어시의 입력전력 및 효율과 최적효율 제어 알고리즘을 적용한 제어시의 입력전력 및 효율의 변화상태를 나타내었다.

그림 5는 부하토크를 100%로 유지하면서 i_{sd}^*를 계속적으로 변화시킨 최적 효율 제어에서의 속도변화에 따른 효율과 입력의 변화로서 최적효율제어를 통해 입력값이 낮아지고 효율이 개선되었다.

$i_{sd}^*=0$로 한 속도제어시 속도가 증가될수록 고정자 철손은 증가되고 효율은 낮아졌으나 최적효율제어시에는 d축 전류 및 q축전류가 효율최적점으로 제어되고 d축 전기자 반작용의 감자작용에 의해 단자전압이 낮아지므로 철손이 작아지며 특히 고속에서는 효율이 상당히 개선됨을 알 수 있다.

그림 6은 전동기 속도를 정격속도 1800 rpm으로 운전하는 상태에서 부하토크 변화에 따른 효율변화 추이를 살펴본 것이다.

최적효율 제어기가 입력을 최소화 하는 동안 회전자 속도는 1800 rpm, 부하토크는 정격의 100%를 유지하였고 이 최적효율제어기를 사용함으로 전동기 효율은 $i_{sd}^*=0$로 한 d축 전류 일정제어 운전시보다 3.3% 향상되었음을 알 수 있다.

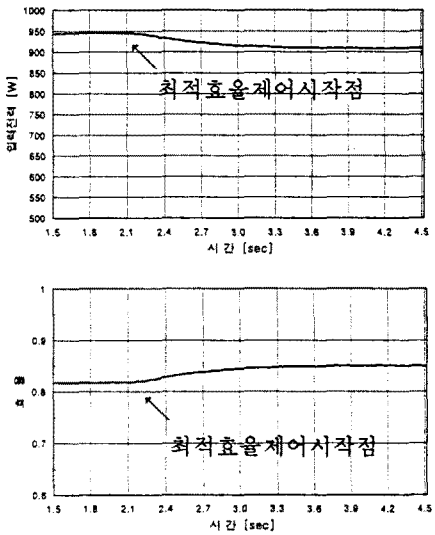
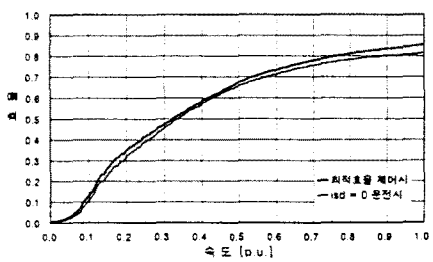


그림 4 $i_{sd}=0$제어와 최적효율제어의 효율특성비교



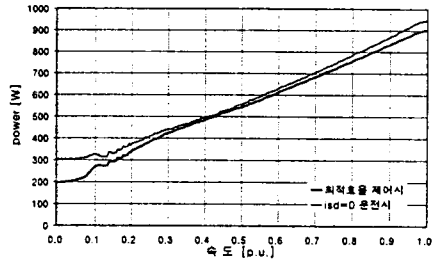


그림 5. 정격부하 운전시 속도 변화에 대한 효율과 입력전력의 변화특성

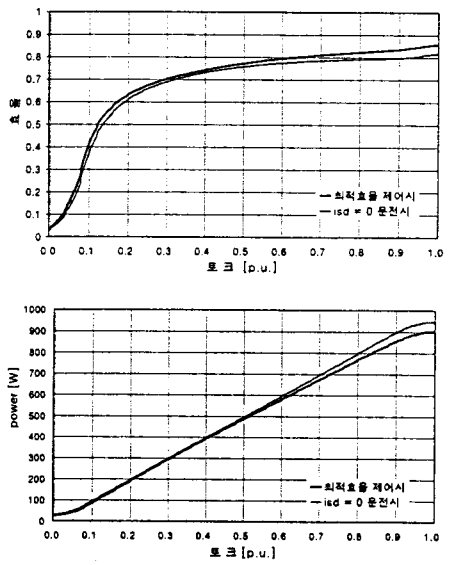


그림 6. 정격속도 운전시 부하토크 변화에 대한 효율과 입력전력의 변화특성

4. 결 론

본 논문에서는 영구자석동기전동기의 정상운전에서 d축 기준전류 i_{sd}^{*}에 미소량의 변화를 주어 최소입력 전력 즉 최대효율 운전을 할 수 있는 d축, q축 전류성분을 찾아내어 최적효율 온라인(on-line) 제어를 수행하는 알고리즘을 제시하였다.

dc 부스 전류와 dc 부스 전압값으로부터 계산한 입력전력은 전동기 출력, 전동기 손실 및 인버터 손실을 포함하고 있으나 전동기 출력은 일정하며 인버터 손실은 거의 없으므로 입력의 최소는 전동기의 효율이 최대가 되는 것을 의미한다.

제시한 효율제어 알고리즘에 대해 실제 사용되는 전동기의 파라미터를 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 3.3%의 효율개선 효과가 있음을 확인하였다.

[참고문헌]

[1] R.S.Colby, and D.W.Novotny, "Efficient Operation of Surface-Mounted PM Synchronous Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl.,Vol.IA 23, No.6, pp.1048~1054, Nov/Dec.,1987.

[2] R.F.Schiferl R.S.Colby and D.W.Novotny "Efficiency Considerations in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", EECON, 1987.

[3] R.S.Colby and N.W.Novotny, "An Efficiency Optimizing Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 24,No.3, pp.462~469, May/June, 1988.

[4] Y. Tong, S.Morimoto, Y.Takeda, and T. Hirasa, "Maximum Efficiency Control for Permanent Magent Synchronous Motors", IEEE Conf. Rec. of IECON'91, pp.283~288,1991.

[5] S.Morimoto, Y.Taketa, K.Hatananka, and T. Hirasa, "Design and Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor for High Torque and High Efficiency Operation", IEEE Conf. Rec. of IAS'91,pp.176~181,1991.

[6] L.Xu,X.Xu,T.A.Lipo and D.W.Novotny, "Vector Control of a Synchronous Reluctance Motor including Saturation and Iron Losses", IEEEE Trans on Ind. Appl., vol. IA,27, no. 5, pp 977~985, Sept/Oct, 1991

[7] L.Xu and J.Yao, "A Compensated Vector Control Scheme of a Synchronous Reluctance Motor including Saturation and Iron Losses", IEEE Conf.Rec. of IAS,'91 pp. 298~304, 1991.

[8] R.E.Betz, M.Jovanovic, R. Lagerquist and T.J.E. Miller, "Aspects of the Control of Synchronous Reluctance Machines Including Saturation and Iron Losses"IEEE Conf. Rec. of IAS '92, pp,456~463, 1992

[9] 전태원, "전기자동차 구동용 영구자석형 동기전동기의 온라인 최적효율제어" 대한전기학회 논문지, 제 43권 4호, pp. 586~593, 1994. 4.

[10] T.Matsuo, A. E-Antably and T.A.Lipo, "A New Control Strategy for Optimum Efficiency Operation of a Synchronous Reluctance Motor", IEEE Conf. Rec. of IAS 96, pp.109~116, 1996