

영구자석 동기전동기의 온도변화를 고려한 최대토크에 관한 연구

현 동석 심 준석 백 광선 김 남준

한 양 대 학 교

A Study On Maximum Torque Of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Temperature Variation

Dong-suk Hyun Joon-suk Sim Kwang-sun Baek Nam-joon Kim

Hanyang University

ABSTRACT

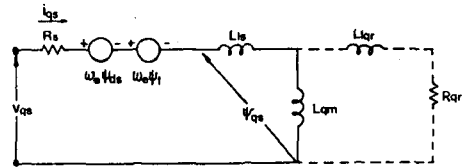
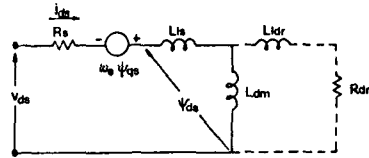
In this paper, maximum torque per current ratio of the interior permanent magnet synchronous machines including compensation of Ne-Fe-B magnets in negative temperature sensitivity is described. This compensation can be achieved by measuring of motor temperature only.

I. 서 론

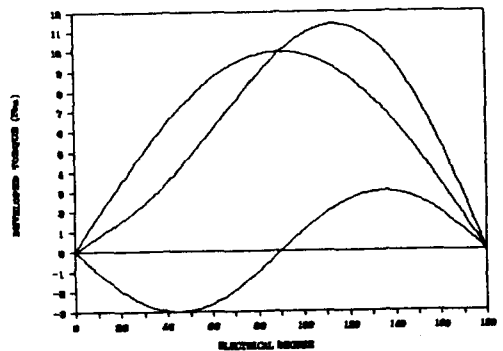
영구자석 동기전동기는 최근 산업용 구동 시스템의 응용분야에 그의 사용이 확산되고 있다. 이와 같은 영구자석 전동기의 사용은 근래에 와서 개발된 고에너지밀도를 가지고 있으면서도 가격이 저렴한 Neodymium-iron-boron(Ne-Fe-B) 영구자석의 개발로 인하여 더욱 증가되고 있다. 이는 기존의 영구자석기기에서 사용되었던 Samarium-Cobalt나 Ferrite 등에 비하여 효율과 가격면에서 훨씬 유리한 조건을 갖고 있기 때문에 이를 사용한 영구자석 동기기의 개발은 당연한 추세라고 생각된다.[2][3] 그러나 Ne-Fe-B 영구자석의 강점에 비하여 커다란 단점으로 지적되는 것으로 온도의 상승에 따라 항자력과 잔류자속밀도의 크기가 Samarium-Cobalt나 Ferrite들에 비하여 상대적으로 큰 비율을 갖고 감소하므로 이 영구자석의 사용에는 온도의 변화를 고려하여야만 한다. 일반적으로 영구자석 동기전동기는 온도의 상승에 따라 권선저항의 증가, 권선절연특성의 감소, 영구자석 자속의 감소 등의 현상이 일어난다. 이러한 Parameter들의 변화는 전동기의 제어특성에 영향을 미치게 되므로 이들의 온도에 따른 변화를 고려하여야 한다.[4][5] 본 연구에서는 Ne-Fe-B 영구자석을 사용한 IPM 동기전동기를 대상으로 하여 기존에 제안된[1] 최대토크에 대한 전류비의 이론에 Ne-Fe-B 영구자석의 온도특성에 따른 자속변화를 고려하여 새로운 최적의 토크에 대한 전류를 유도하고, 이를 특정 Parameter의 IPM 동기전동기에 대해 시뮬레이션하여 제안된 이론이 타당함을 증명하고 4상한 동작 영역 모두에서 효과적임을 보인다.

II. 본 론

[그림 1]은 영구자석 동기전동기의 Synchronous rotating reference frame에 대한 등가회로이다. 여기서 회전자는 영구자석으로 이루어져 있고 회전자 내에 존재할 수 있는 와전류가 적층철심을 사용한 구조에 의해 무시되어 회전자 등가회로가 개발된다.



[그림 1] 영구자석 동기전동기의 등가회로
Fig. 1 Equivalent Circuit Of IPMSM



[그림 2] IPM 동기전동기의 발생 토크
Fig. 2 Developed Torque Of IPMSM

이 등가회로로부터 IPM 동기전동기의 전압 및 토크에 대한 식은 다음과 같다.[5]

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + pL_{d}di_{ds} - \omega_e \psi_{qs} \quad \text{--- (1)}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + pL_{q}di_{qs} + \omega_e \psi_{ds} + V_f \quad \text{--- (2)}$$

$$T_e = \frac{3P}{2\omega_e} \left(\frac{V_s V_f}{X_{ds}} \sin\delta + V_s^2 \frac{X_{ds} - X_{qs}}{2X_{ds}X_{qs}} \sin 2\delta \right) \quad \text{--- (3)}$$

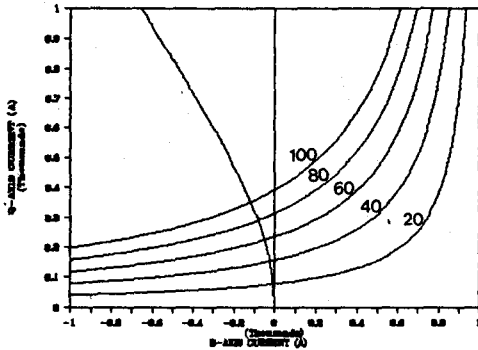
발생토포크 T_e 는 순수하게 Field에 의한 성분과 돌극성에 의한 릴렉턴스분으로 이루어져 있고 이를 [그림 2]에 나타냈다. 이러한 토포크 성분에 의해 최대토포크로 동작되는 ϕ 는 90° 에서 180° 사이에 형성되어 최대토포크 대 전류의 영역이 2상한에서 존재하게 됨을 알 수 있다. 그러므로 운전영역은 2상한이 된다. 토포크 수식을 d-q축 전류로 전개하면[1]

$$T_e = 1.5P(\psi f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad \text{--- (4)}$$

위의 토포크 수식을 정규화시켜 정리하면

$$T_e = i_{qn}(1 - i_{dn}) \quad \text{--- (5)}$$

와 같이 되고 각각의 정규화된 토포크에 대한 i_{dn} , i_{qn} 의 궤적은 [그림 3]과 같다.



[그림 3] 일정토포크에서의 D-Q축 전류
Fig. 3 D-Q Axis Current On Constant Torque

[그림 3]의 i_{qn} 과 i_{dn} 의 여러 조합 중에서 최소 전류로 운전할 때 단위전류당 최대토포크를 발생하게 되는데 이와 같은 최소전류를 구하기 위하여 Lagrange승수를 사용한다.

$$T_e = T_o \quad \text{--- (6)}$$

$$\phi = i_{qn}(1 - i_{dn}) - T_o = 0 \quad \text{--- (7)}$$

$$J = i_{dn}^2 + i_{qn}^2 \quad \text{--- (8)}$$

$T_e = T_o$ 를 만족하면서 J 를 최소로 하는 i_{dn} , i_{qn} 을 구하기 위해서는 다음식을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial J}{\partial i_{dn}} + \lambda \frac{\partial \phi}{\partial i_{dn}} = 0 \quad \text{--- (9)}$$

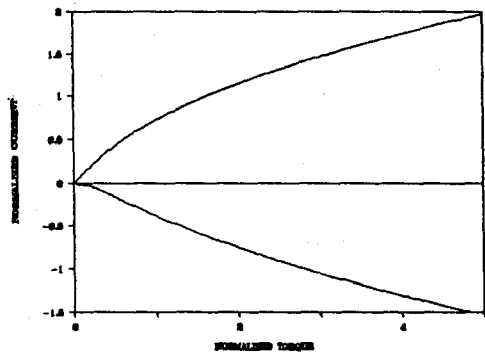
$$\frac{\partial J}{\partial i_{qn}} + \lambda \frac{\partial \phi}{\partial i_{qn}} = 0 \quad \text{--- (10)}$$

식(9), (10)으로 부터 각각의 최소전류에 의한 토포크식은 다음과 같다.

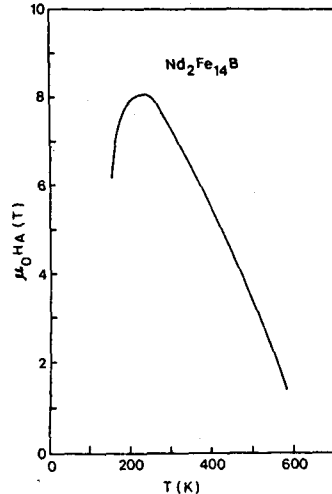
$$T_{en} = \sqrt{(i_{dn}(i_{dn}-1))^2} \quad \text{--- (11)}$$

$$T_{en} = \frac{i_{qn}}{2} (1 + \sqrt{1 + 4 i_{qn}^2}) \quad \text{--- (12)}$$

식(11), (12)에 의한 i_{qn} , i_{dn} , T_e 의 상관적 궤적은 [그림 4]와 같다. 그런데 정상상태의 운전중에서 전동기 내부의 온도상승으로 인하여 자속의 변화와 저항의 증가를 가져와 전류와 자속의 감소를 일으키게 되어 최대의 토포크 대 전류의 제어가 이루어지지 못하게 된다.

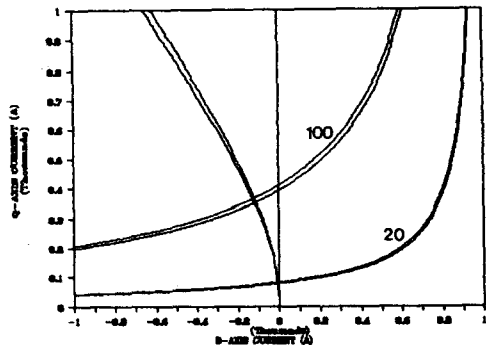


[그림 4] 최대 토포크 대 전류
Fig. 4 Maximum Torque vs. Current



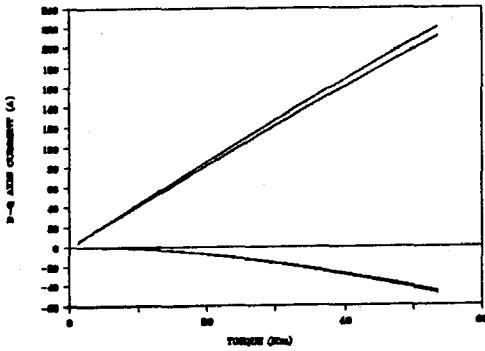
[그림 5] Ne-Fe-B의 온도변화에 따른 자속밀도변화
Fig. 5 Flux Density Variation of Ne-Fe-B On Temperature Variation

[그림 5]는 Ne-Fe-B의 온도에 따른 자화곡선을 나타낸다. Ne-Fe-B의 온도에 따른 변화율은 대략 $0.08 \text{ Percent}/^\circ\text{C}$ 정도의 Negative Temperature Sensitivity를 갖는다. 따라서 정상상태에서 전동기의 내부온도상승이 미치는 영구자석의 ψ_f 의 감소는 최적토포크를 내는 경우에 보상되어야 할 필요가 있게 된다.



[그림 6] 온도변화를 고려한 일정토포크
Fig. 6 Constant Torque On Temperature Variation

[그림 6]은 기존 토크 곡선과 온도에 따른 자속변화로 인한 감소곡선, 이에 상당하는 각각 최대의 토크에 대한 전류 곡선을 보여준다.



[그림 7] 온도변화를 고려한 최대 토크에 대한 전류
Fig. 7 Maximum Torque vs. Current
On Temperature Variation

[그림 7]은 이와 같은 온도에 따른 자속 Ψ_f 의 변화를 보상하는 새로운 d-q축 전류의 토크에 대한 곡선을 보여준다. 이 새로운 최대 토크에 대한 전류 곡선은 온도 변화에 따라 최적토크를 내기 위해 d축 및 q축 전류치가 늘어나야 됨을 알 수 있다. 이상과 같은 Ne-Fe-B의 온도에 따른 특성변화를 고려하여 영구자석의 온도 측정만으로 새로운 d-q축 전류의 토크에 대한 수식을 전개하면 다음과 같다. 정상상태에서의 토크는 식(13)과 같은 온도의 상승에 따라 토크의 관계식에 변화분을 포함한 수식으로 전개하면 다음과 같다.

$$T_e = 1.5P(\Psi_f i_{q0} + (L_d - L_q) i_{d0} i_{q0}) \quad -- (13)$$

$$T_e + \Delta T_e = 1.5P((\Psi_{f0} + \Delta \Psi_f)(i_{q0} + \Delta i_q) + (L_d - L_q)(i_{d0} + \Delta i_d)(i_{q0} + \Delta i_q)) \quad -- (14)$$

식(13)과 식(14)로부터 ΔT_e 는

$$\Delta T_e = 1.5P(\Delta \Psi_f i_{q0} + \Psi_{f0} \Delta i_q + \Delta \Psi_f \Delta i_q + (L_d - L_q)(i_{d0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta i_d + \Delta i_d \Delta i_q)) \quad -- (15)$$

이다. 또, 같은 상태에서 최소전류를 J_0 라 하면

$$J_0 = i_{d0}^2 + i_{q0}^2 \quad -- (16)$$

이고 온도 상승후의 전류는

$$J_0 + \Delta J = (i_{d0} + \Delta i_d)^2 + (i_{q0} + \Delta i_q)^2 \quad -- (17)$$

이다. 식(16)과 식(17)로부터

$$\Delta J = 2i_{d0} \Delta i_d + \Delta i_d^2 + 2i_{q0} \Delta i_q + \Delta i_q^2 \quad -- (18)$$

이 된다.

식(15)와 식(18)로부터 조건에 따라 Lagrange 승수를 전개하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\Delta J)}{\partial(\Delta i_d)} + \lambda \frac{\partial(\Delta T_e)}{\partial(\Delta i_d)} = 0 \quad -- (19)$$

$$\frac{\partial(\Delta J)}{\partial(\Delta i_q)} + \lambda \frac{\partial(\Delta T_e)}{\partial(\Delta i_q)} = 0 \quad -- (20)$$

이로부터 $\Delta i_d, \Delta i_q$ 는

$$\Delta i_d = - \frac{Q^2 i_{d0} / T + (\Delta \Psi_f - Q) i_{q0}}{Q^2 / T + (L_d - L_q) i_{q0}} \quad -- (21)$$

$$\Delta i_q = \left(\frac{Q}{T} \frac{2(L_d - L_q) i_{d0} i_{q0} + \Psi_{f0} i_{q0}}{Q^2 / T + (L_d - L_q) i_{q0}} - 1 \right) i_{q0} \quad -- (22)$$

$$\Psi_f = \Psi_{f0} + \Delta \Psi_f$$

$$T = (L_d - L_q) i_{q0}, \quad Q = \Psi_f + (L_d - L_q) i_{d0}$$

이 된다. 따라서 변화된 자속에 따라 토크를 보상하는 전류 i_d, i_q 는 다음과 같다.

$$i_d = i_{d0} + \Delta i_d = i_{d0} - \frac{Q^2 i_{d0} / T + (\Psi_{f0} - Q) i_{q0}}{Q^2 / T + (L_d - L_q) i_{q0}} \quad -- (23)$$

$$i_q = i_{q0} + \Delta i_q = \frac{Q}{T} \frac{2(L_d - L_q) i_{d0} + \Psi_{f0}}{Q^2 / T + (L_d - L_q) i_{q0}} i_{q0} \quad -- (24)$$

이와 같은 보상된 전류 i_d, i_q 로부터 새로운 최적 토크를 구하면

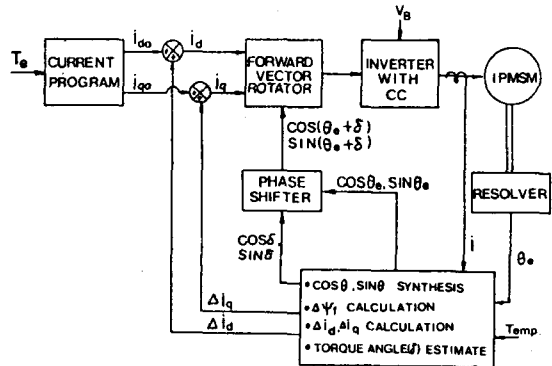
$$T_e = 1.5P \frac{Q}{T} \frac{2(L_d - L_q) i_{d0} + \Psi_{f0}}{Q^2 / T - (L_d - L_q) i_{q0}} (\Psi_f - (L_d - L_q) \frac{\Psi_{f0} i_{q0}}{Q^2 / T + (L_d - L_q) i_{q0}}) i_{q0} \quad -- (25)$$

이 된다. 결국 이 수식은 온도에 따른 자속변화를 보상하기 위하여 온도의 측정 만으로도 최적 토크를 구할 수 있음을 보여 준다.

III. 시뮬레이션

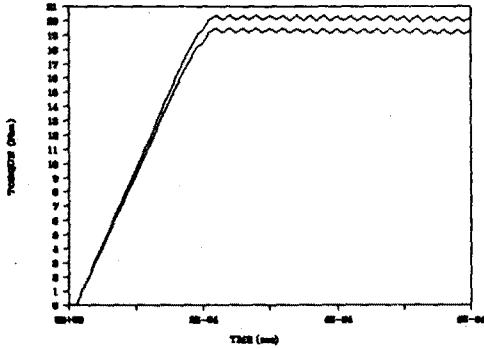
다음과 같은 Parameter를 갖는 IPM 동기전동기를 대상으로 하여 [그림 8]의 Block Diagram을 통해 시뮬레이션을 한다.

- Base speed(ω_b) = 710.48 (rad/sec)
- Magnetic flux(Ψ_f) = 0.0808(Wb)
- D-axis inductance(L_d) = 0.0001450(H)
- Q-axis inductance(L_q) = 0.0002252(H)
- Battery voltage(V_B) = 150(V)



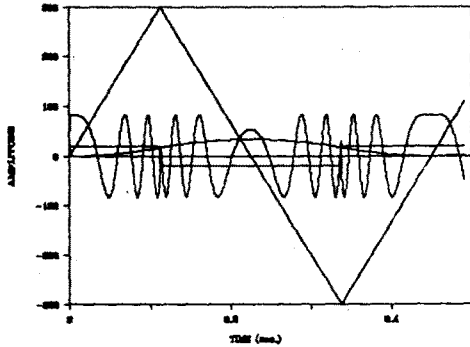
[그림 8] 제어 Block Diagram
Fig. 8 Control Block Diagram

[그림 8]에서 보면 토오프지령이 Current Program에 의하여 각각의 d-q축 전류로 변환되고 이 전류는 정상상태에서 영구자석의 온도특성에 따라 변화되는 자속분을 포함하는 전류로 바뀌어 Inverter에 인가되는 형태를 갖는다.



[그림 9] 발생 토오프 곡선
Fig. 9 Developed Torque Curve

[그림 9]는 자속의 변화를 보상한 경우와 보상을 하지않는 경우 각각의 발생토오프를 보여준다.



[그림 10] 4상한 영역 동작
Fig. 10 Four Quadrant Operation

[그림 10]은 본 연구에서 제시한 최적 토오프 대 전류 알고리즘에 따라 IPM 동기전동기를 4상한 영역에서 동작시켰을 때의 상태를 보여준다.

[표1] 각 토오프에 대한 전류 비교
Table 1 Current Comparion on Torque

TORQUE (Nm)	온도보상시 Is1(A)	PI보상기 Is2(A)	전류비 (%) $\frac{Is2-Is1}{Is1}$
10	48.5758	48.9446	0.76
20	94.6707	97.6071	3.10
30	138.5225	145.2655	4.85
40	177.6988	191.7771	7.92
50	212.7864	237.0077	11.38
60	245.6599	280.8315	14.32

[표1]은 특정토오프 지령에 대해 PI보상기를 동작시킨 경우와 온도의 변화에 따른 자속의 변화를 보상한 경우의 전류 그리고 온도보상을 1로 했을 때 전류치의 비를 보여준다.

IV. 결 론

본 연구에서는 Ne-Fe-B 영구자석의 IPM 동기전동기를 대상으로 온도에 따른 온전특성을 도출하여 보았다.

단위전류당 최대 발생토오프를 최적온전조건으로 하였을 때 최적온전조건을 만족하는 d-q축 전류는 부하토오프 및 전동기 온도에 좌우됨을 알 수 있었다. 최적온전시 전동기의 종합자속 역시 온도와 부하토오프의 함수가 되므로 임의적인 자속극성을 사용할 수 없음을 보였다. 최적온전조건으로부터 정식화한 온도보상전류를 사용할 경우가 일정한 Current program을 사용한 경우보다 시스템을 최적화 할 수 있었으며 발생토오프가 클수록 차이가 현저하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 제어 시스템을 간소화할 수 있으므로 속도나 위치 제어 시스템으로의 응용이 용이할 것으로 사료된다.

< 참고 문헌 >

- [1] T.M. Jahns, G.B. Kliman, and T.W. Neuman, "Interior permanent magnet synchronous motors for adjustable-speed drives," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. IA-22, pp.803-813, July/August, 1986
- [2] Bimal K. Bose, "High-performance inverter-feed drive system of an interior permanent magnet synchronous machine," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. Ia-24, pp.987-997, November/December, 1988
- [3] Bimal K. Bose, Paul M. Szcseany, "Micro-computer-based control and simulation of an advanced IPM synchronous machine drive system for electric vehicle propulsion," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.35, pp.547-559, November, 1988
- [4] Takashi Kengo, "Permanent magnet and brushless DC motors", Sogo Electronics Publishing company, 1984
- [5] "DC motors speed controls servo system" Electro-craft corporation, USA, 1972
- [6] 현동석, 심준석, 황광오, 이창섭, "브러시리스 DC 모터의 최대토오프 온전에 관한 연구", 전기전자공학술대회 pp.133-136, 1988