HEV용 IPMSM의 토크 보상 방법

이재혁* 문정송* 박진호* 이정효* 최준혁** 원충연*
성균관대학교*, 전자부품연구원**

Torque Compensation Method of IPMSM for HEV

Jae-Hyuk Lee*, Jung-Song Moon*, Jin-Ho Park*,
Jung-Hyo Lee*, Jun-Hyuk Choi**, Chung-Yuen Won*
Sungkyunkwan University*, Korea Electronics Technology Institute**

ABSTRACT

하이브리드 자동차(HEV)용 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 Lookup-Table을 이용한 토크제어는 전류 및 온도 등과 같은 외부 환경에 의한 파라미터 변동으로 인해 전체적인 구동 성능이 떨어지게 된다. 따라서 본 논문에서는 전류 및 자속 값을 이용하여 지령 토크에 대한 전류 지령치를 보상함으로써 출력 토크를 보상하였다. 구동 성능은 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

1. 서론

HEV는 엔진이 최고 효율을 갖는 출력 상태를 유지하고 그 외의 부족한 동력을 견인 모터가 보조하여 고효율 운전을 가능하게 하는 시스템이다.[1] HEV 시스템에서 운전 속도는 주 동력원인 엔진에 의해서 결된된다. 따라서 견인 모터는 속도 제어를 할 수 없고 토크 제어를 통하여 동력을 보조하게 된다. 기존의 토크 제어 방법을 살펴보면 크게 토크 지령과 속도에 따른 전류 Lookup-Table을 작성하여 이를 기준으로 지령을 발생하는 방법[1]과 일정 파라미터를 추정하여 전류 지령치를 계산하는 방법[2]이 있다. 그러나 파라미터를 추정하여 전류 지령을 계산하는 방법은 많은 연산량을 요구하게 된다. 따라서 이러한 방식의 HEV 시스템은 동특성이 떨어질 뿐만 아니라 그 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 산업계에서 가장 많이 사용되고 신뢰도가 높은 Lookup-Table을 이용한 방식을 적용하였다. 그러나 이 방법은 참고문헌 [3]에서와 같이 운전 중에 변동하는 모터의 파라미터에 대한 해결책을 제시할 수 없는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존에 넓은 운전 영역에서의 인덕턴스를 Lookup-Table로 작성하여 보상하는 방법[4]이 연구되었는데, 이렇게 얻은 인덕턴스 값은 실제 운전 중 외부 환경 요소에 의해 변동되는 인덕턴스 값과 차이가 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 인덕턴스 차이를 보상하기 위한 제어 알고리즘을 제안하였다.

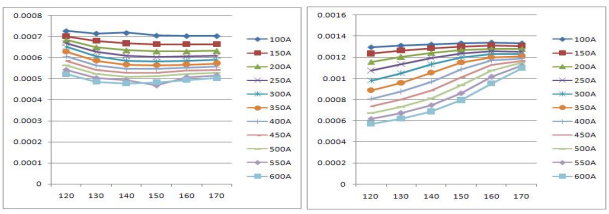
2. HEV용 IPMSM의 파라미터 변동

운전 중 변동되는 IPMSM의 파라미터는 온도에 따른 전기자 권선 저항 값과 영구자석이 발생하는 자속 값, 그리고 MTPA 제어로 설정되는 전류각 β의 변동에 대한 인덕턴스 값으로 나눌 수 있다. 먼저 일반적으로 사용되는 전기자 권선의 재료인 구리에 대한 전기적 저항 특성을 고려하여야 한다. 온도에 따라서 권선 저항 값이 변동하게 되며 권선에 흐르는 전류의 주파수가 높을수록 권선 저항 값이 커지는 경향이 있다.[5]

한편 영구자석에서 발생되는 자속 값은 온도에 따른 감자특성을 갖는다. 일반적으로 산업계에서 사용하는 IPMSM의 경우 권선에 의한 열이 직접적으로 영향을 주지 않으며 영구자석이 철심 내부에 취부 되어 있기 때문에 외부 환경에 대한 온도 영향이 적다고 알려져 있다. 하지만 HEV와 같은 자동차분야에서는 온도 환경이 일반적인 산업 분야보다 매우 열악하므로 온도에 따른 감자특성을 고려해야 한다.

또한 인덕턴스의 온도에 따른 변동은 내부 철심의 투자율 변동이 원인이다. 그러나 전동기의 인덕턴스는 철심에 대한 영향보다는 공극의 크기에 큰 영향을 받으므로 이러한 변동이 비교적 크지 않은 것으로 알려져 있다.

그러나 전류각에 따른 인덕턴스의 변동은 그 차이가 크다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 실험용 IPMSM의 전류각 β에 따른 인덕턴스의 변동을 Lookup-Table로 작성하여 사용하였다. IPMSM은 영구자석의 비투자율로 인해 자기저항이 q축 보다 d축이 크므로 L_d의 변화가 L_q의 변화보다 작은 것을 확인할 수 있다. 이렇게 돌극비가 큰 IPMSM의 경우 L_q는 동작 조건에 따라 수 백% 이상 변할 수 있으며, q축의 전류 값이 클수록 인덕턴스 값이 적어지는 경향을 보인다.[5]



(a) β각에 따른 L_d변화 (b) β각에 따른 L_q변화

그림 1. IPMSM의 전류각 β에 따른 인덕턴스 변화

그러나 그림 1에서 도시한 것과 같이 모든 파라미터를 Lookup-Table로 작성하여 이러한 변동에 대응하는 방법은 토크 지령치와 동일한 출력토크를 발생하는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 견인 모터의 전류와 d,q축 자속을 이용하여 운전 중 출력되는 토크를 계산하고 지령 토크와 비교하여 전류 지령치를 보상하는 알고리즘을 제안한다.

3. HEV용 IPMSM의 출력 토크 보상 알고리즘

참고문헌 [3]에서 연구된 HEV용 IPMSM의 토크 제어에서 운전 중 변동하는 파라미터에 대응할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 2와 같이 토크 보상 알고리즘을 추가하여 토크 제어를 수행하였다.

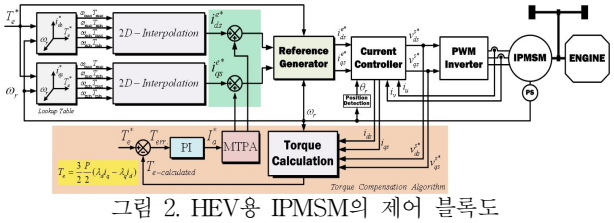


그림 2. HEV용 IPMSM의 제어 블록도

일반적인 IPMSM의 토크는 식 (1)과 같다.

$$T_e = P_n\{\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\} \tag{1}$$

여기서 P_n은 극 쌍수이며 λ_f는 영구자석에서 발생하는 자속 값이다. 식 (1)에 나타난 토크를 구성하는 파라미터 중 인덕턴스 값을 정확하게 알 수 없으므로 본 논문에서는 일반적인 전압 방정식으로부터 식 (2), (3)와 같이 L_d, L_q값이 아닌 자속 값을 이용한 수식을 적용하였다.

$$v_d^* = R_s i_d - \omega_r \lambda_q \tag{2}$$

$$v_q^* = R_s i_q + \omega_r \lambda_d \tag{3}$$

v_d^*와 v_q^*는 식 (2), (3)과 같이 표현되지만 전기자 저항에 의한 전압강하 성분은 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 식 (4), (5)과 같이 전류 제어기의 출력인 v_d^*, v_q^*를 전동기 실제 속도 ω_r로 나누어 d,q축에서 발생되는 자속 값 λ_d, λ_q으로 표현 할 수 있다.

$$\lambda_d = v_q^* / \omega_r \tag{4}$$

$$\lambda_q = -v_d^* / \omega_r \tag{5}$$

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \tag{6}$$

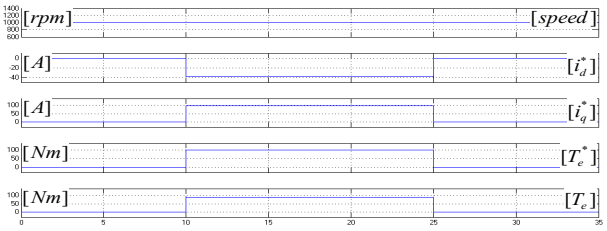
본 논문에서는 식 (6)의 수식을 이용하여 현재 출력되고 있는 토크를 계산하였으며, i_d, i_q는 실제 운전 중 견인 모터에 인가되는 전류 값이다. 이렇게 계산한 토크 값을 지령 토크와 비교하여 그 차이만큼이 PI제어기를 통해 I_a^*로 출력하게 되고 이 값은 식 (7)과 식 (8)의 MTPA 제어 수식에 의해 i_d, i_q로 출력되어 Lookup-Table에서 출력되는 전류 지령 값에 더해줌으로써 출력 토크를 보상할 수 있게 된다.

$$i_d^* = \frac{\lambda_f - \sqrt{\lambda_f^2 + 8(\hat{L_q} - \hat{L_d})^2 I_a^{*2}}}{4(\hat{L_q} - \hat{L_d})} \tag{7}$$

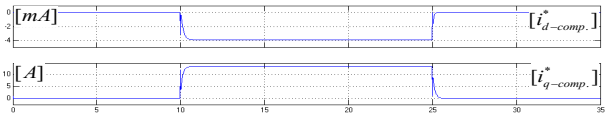
$$i_q^* = sign(I_a^*)\sqrt{I_a^{*2} - i_d^{*2}} \quad \begin{matrix} (I_a^* \geq 0 : sign(I_a^*) = 1) \\ (I_a^* < 0 : sign(I_a^*) = -1) \end{matrix} \tag{8}$$

4. 시뮬레이션

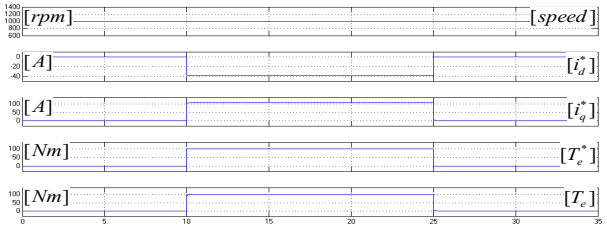
MATLAB Simulink로 시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 IPMSM의 파라미터는 참고문헌 [3]과 같으며, 2절의 알고리즘과 같은 순서로 구성하여 파라미터를 변동시킨 후에 보상알고리즘을 적용하기 전과 후를 비교하여 구동 성능을 확인하였다.



(a) 1000[rpm] 100[Nm] 구동(보상 전)



(b) 알고리즘을 통한 d,q축 보상 전류



(c) 1000[rpm] 100[Nm] 구동(보상 후)

그림 3. 시뮬레이션 결과

5. 결론

본 논문에서는 HEV용 IPMSM의 파라미터 변동에 의한 출력 토크를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법의 구동 성능은 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] B. H. Bae, N. Patel, S. Schulz, and S. K. Sul "New Field Weakening Technique for High Saliency Interior Permanent Magnet Motor", in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting., Vol. 2, pp. 898-905, 2003.

[2] Y. Jeong, S. K. Sul, S. Hiti, and K. M. Rahman "Online Minimum-Copper-Loss Control and Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine for Automotive Application", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 42, No. 5, pp. 1222-1229, Sep./Oct. 2006.

[3] 박진호, 이정효, 최준혁, 원충연, "하이브리드 자동차용 IPMSM의 토크 제어," 전력전자학술대회논문집, pp. 61-62, 7월 2010.

[4] S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Effects and compensation of magnetic saturation in flux-weakening controlled permanent magnet synchronous motor drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 30, No. 6, pp.1632-1637, Dec. 1994.

[5] 설승기, 전기기기제어론. 홍릉과학 출판사, 2007.