

전류위상각 변화에 따른 IPMSM 토크특성 분석

허진, 정인성, 김영균, 성하경
전자부품연구원

Analysis of Torque Performance for IPMSM According to Current Phase Angle

Jin Hur, In-Soung Jung, Young-Kyoun Kim, Ha-Gyeong Sung
Intelligent Mechatronics Research Center, KETI

Abstract - Interior Permanent Magnet Synchronous Motors(IPMSM) are expanding the application extent for industrial applications. Because that High efficiency and wide speed range are required in applications of electric vehicles, spindle drives and compressors and so on. The performance of IPMSM are deeply affected by the current phase control. Therefore, this paper deals with the analysis of the torque performance according to the variation of the current phase angle.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 효율 및 가변속 운전범위가 넓은 전동기로서 산업계의 각 분야에서 적용하는 경향이 확대되고 있다. 특히, 전기자동차, 하이브리드 전기자동차 등의 구동용을 비롯하여 냉장고 및 에어컨 컴프레서에 이르기까지 그 응용분야는 급속도로 증가하고 있다. 따라서 IPMSM의 성능과 출력밀도를 높여려는 연구가 지속적으로 수행되고 있다 [1].

일반적으로 IPMSM을 고성능으로 운전하기 위해서 전류벡터제어를 실시한다. 전압형 인버터로 구동해서 전류 피드백 제어를 실시하면, 전류와 전류위상을 자유롭게 제어할 수 있으며, 전류가 일정할 때, 전류위상만을 변화시켜도 IPMSM의 제반특성이 변하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 IPMSM의 전압방정식을 이용하여 기초적인 특성을 확인하고, 전류 위상변화에 따른 IPMSM의 제반 토크특성을 분석하였다.

2. IPMSM 기초이론

2.1 IPMSM 모델링

일반적으로 IPMSM의 3상 전압방정식을 이용하여 특성을 해석하기 위해서는 복잡하므로 동기 속도로 회전하는 회전자를 기준한 동기좌표계(d-q축)를 이용하여 2상 전압방정식을 사용한다.

따라서, 철손을 무시한 모델로서 전압방정식의 관계를 정리하면 다음과 같다 [1].

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \tag{1}$$

$$i_d = -I_a \sin \beta, \quad i_q = I_a \cos \beta \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$V_o = \sqrt{v_{od}^2 + v_{oq}^2} = \omega \Psi_a = \omega \sqrt{(L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2} \tag{5}$$

$$V_o = \sqrt{v_{od}^2 + v_{oq}^2} = \sqrt{(R_s i_d - \omega L_q i_q)^2 + (R_s i_q + \omega L_d i_d + \omega \Psi_a)^2} \tag{6}$$

여기서, β : 전류위상각, p : 미분연산자
 R_s : 상저항, Ψ_a : 영구자석 쇄교자속
 i_d, i_q : d-q축 전류, v_d, v_q : d-q축 전압
 L_d, L_q : d-q축 인덕턴스, ω : 각속도

이다. 그리고 IPMSM의 토크식은 전동기의 출력으로 부터 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$T = P_n \{ \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\ = P_n \{ \Psi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \} \tag{7}$$

위 식에서 첫째 항은 회전자 d 축에 일치된 영구자석과 q 축에 일치된 고정자전류의 상호작용에 의하여 발생한 마그넷 토크로서 자속과 q 축 전류의 곱에 비례한다. 그리고 두번째 항은 즉, d-q 축의 돌극성에 의한 자기저항 토크로서 전류의 제곱에 비례한다.

2.2 IPMSM의 단위전류당 최대토크 운전특성

IPMSM은 전류를 일정하게 유지하고 전류위상 β 를 변화시켰을 때 발생토크는 마그넷 토크와 자기저항 토크의 합으로 나타난다.

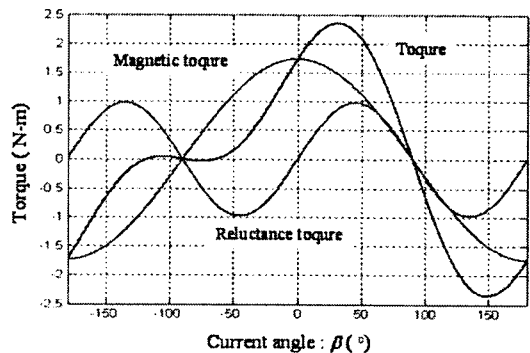


그림. 1 전류위상과 발생토크 관계

그림 1에 나타낸것 처럼 마그넷 토크는 $\beta=0$ 에서 최대가 되고, 자기저항토크는 $\beta=45, -135$ 에서 최대가 된다. 그 결과, 발생토크는 전류위상각이 $0<\beta<45$ 의 사이에서 최대가 된다. 이것은 일정 전류에 대하여 발생토크를 최대로 할 수 있는 전류 위상이 존재함을 의미한다. 따라서 이것은 전기자전류에 대하여 가장 효율적으로 토크를 발생 하는 조건이며, 항상 이러한 상태가 되도록 IPMSM을 운전하는 방식을 단위전류당 최대토크제이라고 부른다. 이 조건은 L_d, L_q 가 일정하다는 가정하에 토크식 (7)을 β 로 편미분하여 0으로 두면 다음 식과 같이 정리할 수 있다 [1].

$$\beta = \sin^{-1} \left\{ \frac{-\Psi_a + \sqrt{\Psi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d)I_a} \right\} \quad (8)$$

3. 전류위상에 따른 IPMSM의 토크특성

3.1 해석대상

본 논문에서 IPMSM의 제반특성을 해석하고, 특히 전류위상각 변화에 따른 토크특성을 분석하기 위해서 사용한 전동기는 4극 6슬롯의 압축기 구동용 IPMSM이다. 이 전동기의 주요사양은 표 1에 정리하였다. 그림 2에 IPMSM의 단면도를 나타내었으며, 그림 3에는 설계된 IPMSM의 무부하 상역기전압 파형을 나타내었다.

표 1. 해석대상 IPMSM 주요 사양

항목	내용	단위	항목	내용	단위
전압 (Vdc)	300	V	철심재질	S18	-
전류제한	9	A	영구자석	1.3	T
상수	3	ea	적층길이	70	mm
극수	4	pole	권선방식	집중권	-
슬롯수	6	slot	결선방식	병렬결선	-

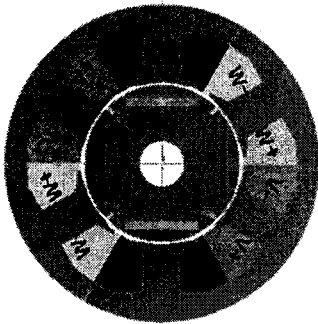


그림 2 해석대상 IPMSM 단면도

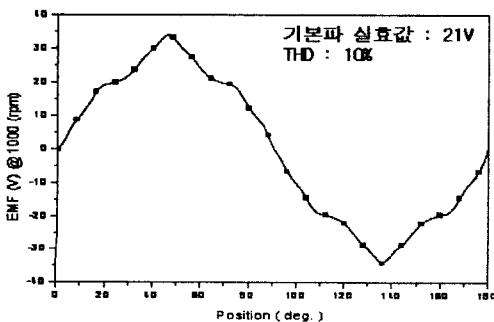


그림 3 IPMSM의 무부하 상역기전압 특성

3.2 등가회로해석

압축기 구동용 IPMSM을 설계시 요구하는 부하스펙을 만족시키기 위해서, 등가회로해석 기법을 이용하여 제반 운전특성을 해석하였다. 그림 4는 정격토크 5.9(Nm)에서 기저속도 4000(rpm)이상을 확보하고 전류제한 9(A)를 만족하도록 IPMSM의 회로정수를 결정하여 특성해석한 결과를 나타내었다. 그리고 이 결과를 근거로 압축기 구동용 IPMSM을 설계 및 제작하였다. 그림 5에는 그림 4와 같이 토크지령을 인가했을 때, 전동기 입력전압에 대한 해석결과를 나타내었다. 정격 부하 5.9(Nm)에서 기저속도는 약 4600(rpm)이고, 부하가 적을수록 기저속도가 증가하는 것을 알 수 있다.

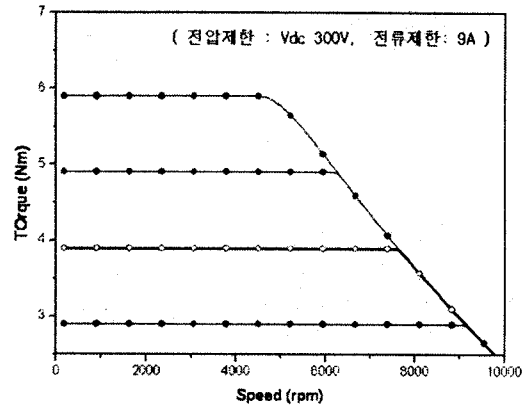


그림 4 IPMSM 운전영역내의 발생토크 지령

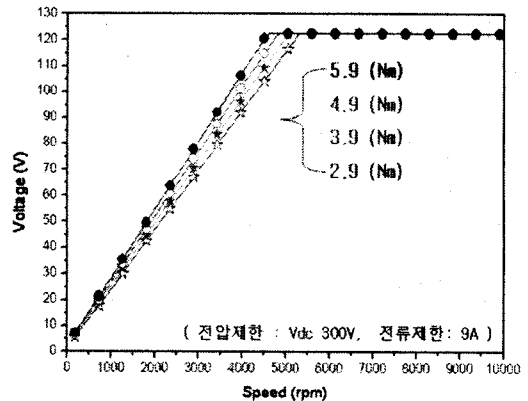


그림 5 IPMSM 운전영역내의 입력전압 특성

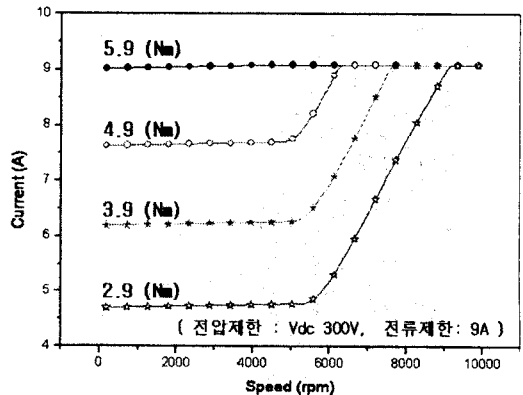


그림 6 IPMSM 운전영역내의 입력전류 특성

그림 6에는 그림 4와 같이 토크지령을 증가했을 때, 전동기 입력전류에 대한 등가회로 해석결과를 나타내었다. 정격 부하 5.9(N·m)에서 기저속도 아래에서는 단위전류당 최대토크 운전을 실시하고 기저속도 이상에서는 약자속제어를 실시하여 최대출력 운전조건으로 해석하였다. 정격토크에서 단위전류당 최대토크를 낼수 있는 전류위상은 약 20(°)로 산정되었다. 또한 정격토크 보다 작은 부하에서는 속도가 전압제한까지 도달하면 지령토크를 유지하기 위하여 전류가 제한치까지 증가하여 정토크를 유지하는 것을 해석결과로부터 알 수 있다.

그림 7에는 해석대상의 IPMSM의 전운전영역에서 동손을 계산하여 나타내었으며, 그림 8에는 IPMSM 운전범위 내의 출력(W)을 계산하여 나타내었다.

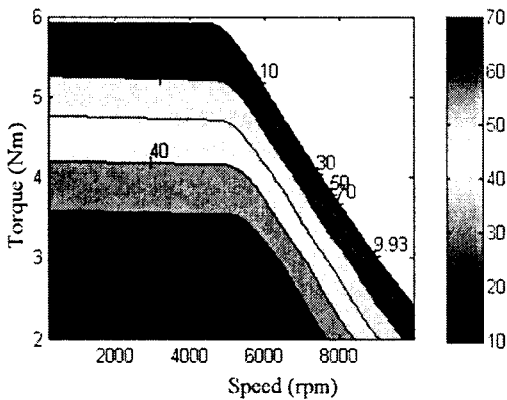


그림. 7 IPMSM 운전영역내의 동손(W)맵

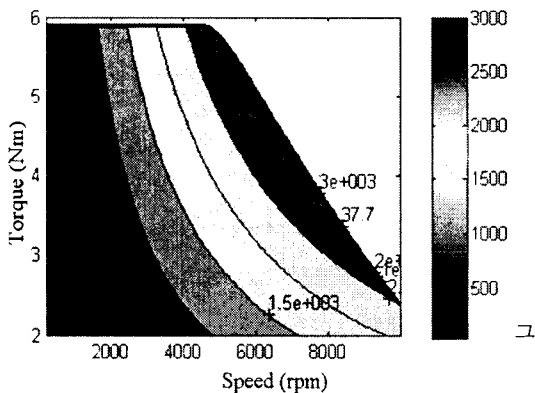


그림. 8 IPMSM 운전영역내의 출력(W)맵

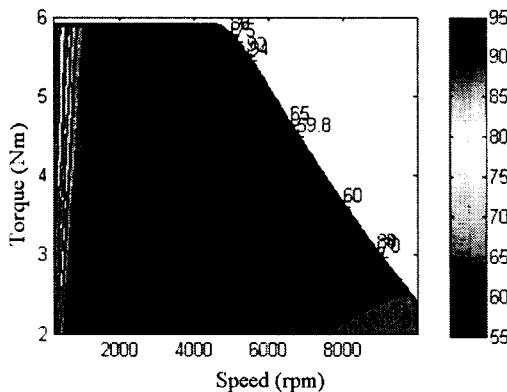


그림. 9 IPMSM 운전영역내의 효율(%)맵

그리고 그림 9에는 이 운전범위 내에서 전동기의 효율 맵을 해석하여 나타내었다.

3.3 전류위상각 변화에 따른 토크특성

그림 10에 해석대상의 IPMSM에 대해서 입력전류 9(A)를 증가하였을 때, 전류위상각변화에 따른 정토크 특성을 유한요소해석법을 이용하여 나타내었다.

그림 10의 해석결과로부터 전류위상각에 따른 평균토크 및 토크리플을 그림 11에 정리하여 나타내었다. 이때 전류위상각이 20(°)~25(°)사이에서 토크 5.85(N·m)를 만족하였으며, 등가회로 해석결과와 일치하였다. 따라서, 단위전류당 최대토크 운전이 가능한 위상은 대략 20(°)~25(°)사이로 판명되었다. 그러나 토크리플 측면에서는 25(°)~30(°)사이에서 최소 토크리플이 나타남을 그림 11로부터 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 IPMSM에 대한 제반토크특성에 대해서 기술하였다. 일반적으로 전동기 설계시 단위전류당 최대토크 운전점에 집중하는 경우가 많으나, IPMSM 적용 및 용도에 따라서 단위전류당 최대토크운전 뿐만아니라 단위전류당 최소토크리플운전점을 전동기 설계시에 고려한다면 보다 고성능의 IPMSM을 설계할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 에너지관리공단 에너지·자원기술개발사업의 연구비지원으로 수행 되었습니다

[참 고 문 헌]

[1] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫, "埋込磁石同期モータの設計と制御, Ohmsha, 2001

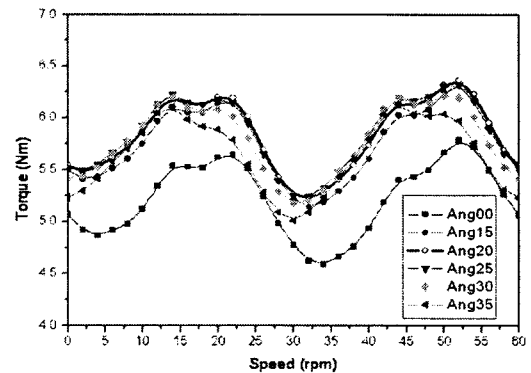


그림. 10 전류위상각 변화에 따른 정토크특성

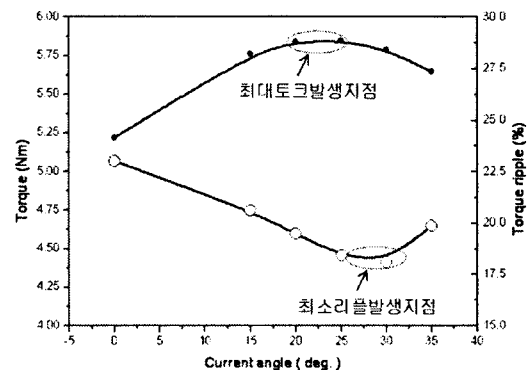


그림. 11 전류위상각 변화에 따른 제반토크특성