

가변속 펌프 시스템에 적합한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 예측에 관한 연구

최다운, 이 건, 조운현
동아대학교

An Effective Method for Performance Prediction of Switched Reluctance Motor for a Variable Speed Pumping System

Da-Woon Choi, Jian Li and Yunhyun Cho
Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 가변속 펌프 시스템에 적합한 SRM의 최적 구동을 위한 예측 방법에 대해 나타내었다. 회전자의 위치에 따른 쇄교 자속 곡선 모델링을 통하여 제안된 방법에 의해 전류의 최적 인가 시점을 테이블로 구성하였으며, 이를 기반으로 SRM 제어기 및 알고리즘을 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 통해 결과값을 나타내었다.

1. 서 론

SRM은 직류 전동기의 가장 큰 단점인 기계적 브러시를 제거하고, 영구자석형 BLDC 및 유도전동기의 가변속 운전을 대체할 전동기로 집중적으로 연구가 진행되고 있는 실정이다, SRM은 고정자 및 회전자가 모두 돌극형으로 고정자 부분에만 권선이 감겨있는 구조로서 제작이 용이하고 양산시 제작 단가가 저렴한 장점을 가지고 있다. 또한 회전자의 위치에 따라 온-오프만으로 제어가 가능하여 토크 대 속도 특성이 직류 전동기의 전형적인 특성을 가지므로 제어성이 매우 좋다. 최근에는 세탁기, 진동청소기 등의 가전제품 및 FAN, Blower 등의 산업용기기 및 전기자동차 견인용 전동기로서의 가능성에 대해서도 점차로 연구가 진행되고 있다. 이에 본 논문에서는 가변속 펌프 시스템에 적합한 SRM의 여자 전류에 따른 코어 저장에너지 변동을 모델링하여 최적 동작점을 예측하는데 목적이 있다. 제어기 구성을 위해서 먼저 수학적으로 모델링하여 SRM 제어 알고리즘을 구성하고 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

2. 본 론

2.1 최적 동작점에 대한 분석

SRM의 최대 출력 에너지와 토크를 나타내기 위해 전동기 포화영역에서의 제어는 많은 논문들을 통해 연구되어지고 있다. 그러나, 전동기의 고정자 권선을 고려하면, 여자 전류의 양은 제한되어 있다. 전동기 최적 동작점을 분석하기 위해 먼저 SRM의 회전자 위치와 인가 전류에 대한 쇄교 자속선도를 모델링 한 후 회전자와 고정자 간의 정렬 위치와 비정렬 위치에서의 자속 곡선을 각각 나타내었다. 이를 통하여 코어 저장에너지의 최대 증가 부분을 계산할 수 있게 되며, 따라서 고정자 권선이 인가되는 최적의 여자 전류를 구할 수 있게 된다.[2] 회전자와 고정자 간의 정렬 위치에서의 쇄교 자속 $\lambda_a(i)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_a(i) = L_{a1} + L_{a2}i + L_{a3}i^2 + L_{a4}i^3 + L_{a5}i^4 + L_{a6}i^5 \quad (1)$$

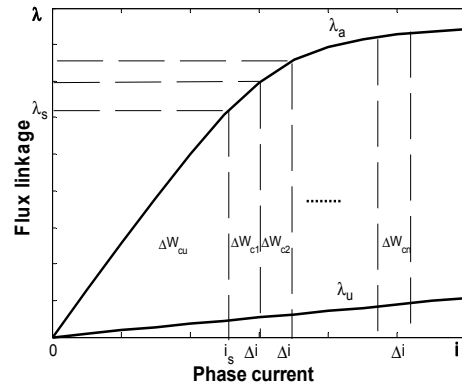
여기서 L_{a1} , L_{a2} , L_{a3} , L_{a4} , L_{a5} , L_{a6} 는 다항식의 계수를 나타낸다. 또한 회전자와 고정자 간의 비정렬 위치에서의 쇄교 자속 $\lambda_u(i)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_u(i) = L_u i \quad (2)$$

$L_u i$ 는 비정렬 위치에서의 코일 인덕턴스를 나타내며, 크기는 거의 일정하다. 코어 저장 에너지의 변화는 비정렬 위치와 정렬 위치 사이 쇄교 자속 곡선을 인가전류에 대한 적분을 통해 계산되어진다. 그리고 코어 저장 에너지는 다음과 같이 기계적 출력으로 변환할 수 있다.

$$\Delta W_e = \Delta W_{cu} + \Delta W_{c1} + \Delta W_{c2} + \dots + \Delta W_{cn} \quad (3)$$

코어 저장에너지의 최대점을 이용하여 전동기 최적의 동작점을 나타낼 수 있다.



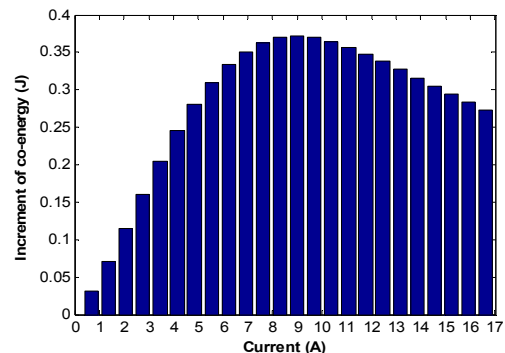
<그림 1> 여자 전류에 따른 코어 저장에너지 변동 곡선

그림 1에서 나타낸 회전자 위치에 따른 쇄교 자속 곡선에 대한 모델링 함수를 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\lambda_u(i) = 0.0082i \quad (4)$$

$$\lambda_a(i) = 1.0288E-4 + 0.0738i + 0.03189i^2 - 0.00835i^3 + 7.13629E-4i^4 - 2.09098E-5i^5$$

전류 변화 $\Delta i = 0.2A$ 를 한 스텝으로 두고 쇄교 자속 곡선을 적분하게 되면, 인가 전류에 대한 코어 저장에너지를 구할 수 있으며 이는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 전동기가 포화영역에서 동작 할 때, 코어 저장에너지는 증가하지 않고 오히려 감소하게 되는데 이는 정렬 위치에서의 자기 회로는 포화가 되고 단지 쇄교 자속만 급격히 증가하기 때문이다. 그러나 비정렬 위치에서는 자기회로가 포화 상태가 일어나지 않고 쇄교자속은 전류에 대해 선형적으로 증가하게 된다.

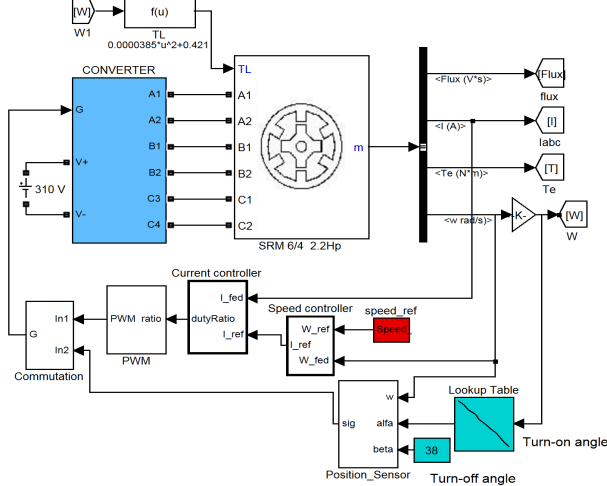


<그림 2> 제안된 방법에 의해 계산된 전류에 따른 코어에너지 증가분

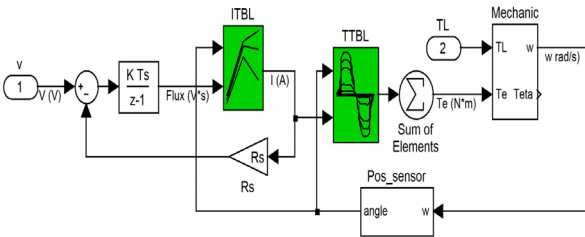
3.1 모델링과 시뮬레이션

전동기의 동특성을 예측하기 위해, 자기적 특성에 기인하여 시뮬레이션을 수행하였으며 이는 매트랩/시뮬링크를 기반으로 나타내었다. (그림 5). 시뮬레이션 모델은 PWM 전류제어를 이용한 소프트 초평, 정류 방법, 속도제어 및 스위치 턴 온각 예측기 등으로 구성되어 있다. 전동기의 부하 토크 T_L 는 실제 펌프 시스템에 대한 동작 특성을 고려하여 나

타내었다.



〈그림 3〉 6/4 스위치 릴럭턴스 전동기의 Simulink 모델



〈그림 4〉 룩업 테이블을 이용한 SRM 모델링

전동기 모델은 그림 4에 나타난 것과 같이 전류와 토크에 관한 룩업 테이블을 구성하였다. 그림 3에서 인버터에 의해 발생하는 전압은 전동기 3상에 인가되며 상 전압에서 저항손을 뺀 전압에 대해 적분을 하게 되면 각 상에서의 쇄교 자속을 구할 수 있다.

$$\lambda(i, \theta) = \int (v - R_s i_s) dt \quad (5)$$

쇄교 자속 곡선과 회전자 위치에 따라 상응되는 전류를 테이블로서 나타낼 수 있으며, 또한 회전자 위치에 따른 인가 전류를 통해 각 상에서의 발생 토크는 이전에 저장된 토크 테이블을 통해 나타낼 수 있다.[3] 펌프 부하에 따른 6/4 SRM에 작용하는 부하 토크는 아래 식 6과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_L = 0.0000385\omega^2 + 0.421 \quad (6)$$

여기서 ω 는 각 속도 rad/s 를 나타내며, T_L 은 부하 토크 $N \cdot m$ 를 나타낸다. 전동기와 부하의 기계적 동 특성은 다음과 같이 동적 방정식으로 나타낼 수 있다.

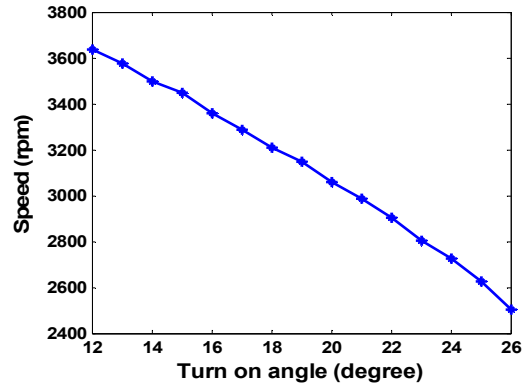
$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (7)$$

J 는 전체 관성을 나타내며, B 는 마찰계수를 나타낸다. 전동기를 최적 점에서 구동하기 위해 먼저, 최적 동작을 위한 기준 전류 I_p 를 정한 후 스위치 턴 온각을 변경하여 정상상태에서 전동기 속도를 관찰한다. 턴 온각의 변경에 따른 전동기 속도 관계는 그림 5에 나타내었으며, 이는 룩업 테이블을 이용하여 스위치 턴 온각 예측기를 구성하였다. 반복적인 실험으로 다양한 턴 오프각에 따른 전류 파형을 고려하여, 38° 적절한 각으로 고정하였다. 그림 6에서 보여지는 것과 같이 최대 동작점에서 여자되는 3상 전류에 대한 시뮬레이션 값은 거의 같다. 그리고 3상에 의해 발생하는 토크 또한 그림 7에서 보여주고 있다.

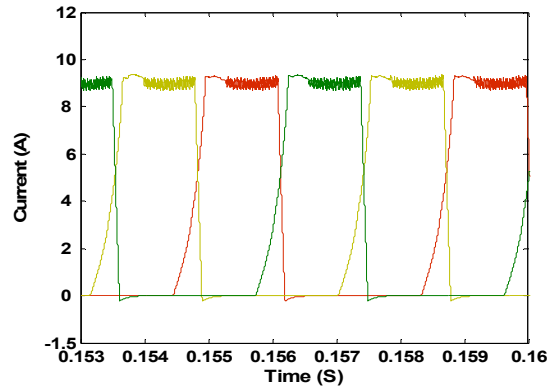
3. 결 론

본 논문에서는 SRM의 최적 구동 예측에 대한 효과적인 방법을

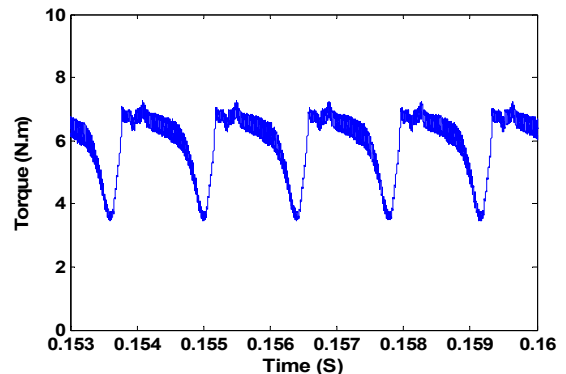
보여주고 있다. 전동기 최대 출력을 얻기 위하여, 최적 구동점을 분석하였으며 매트랩 시뮬링 환경에서 모델링 된 전동기를 이용하여 최적점에서 여자하기 위한 제한된 제어 기법이 연구되었다. 시뮬레이션 결과는 펌프 부하를 가지는 설계된 전동기가 최적 동작점에서 동작하기 위한 특성을 나타내고 있다.



〈그림 5〉 턴 온각에 따른 전동기 속도 변화



〈그림 6〉 시뮬레이션을 통한 최적 동작점에서의 3상 전류



〈그림 7〉 시뮬레이션을 통한 토크 곡선

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] Shang-Hsun Mao and Mi-Ching Tsai, "An analysis of the optimum operating point for a switched reluctance motor", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 282, 53-56, 2004
- [2] F.Souares and P.J.Costa Branco, "Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment", IEEE Trans.Aerospace and Electronic Systems, 37, 3, 2001