

3상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터의 드웰각과 선행각 최적 설계

이태웅*, 하 빈*, 고창섭**
충북대학교

Optimization of Dwell angle and Advanced angle of 3-phase 12/10 Switched Reluctance Motor

Tae-Woong Lee*, Xia Bin*, Chang-Seop Koh**
ChungBuk University

Abstract - 본 논문은 3상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터의 구조를 설명하였고, 토크를 구하는데 중요한 값인 인덕턴스와 전류 파형을 구하기 위해 스위치드 릴럭턴스 모터의 변수를 드웰각과 선행각으로 정하였다. 두 변수의 범위에 따른 25개의 샘플링을 통해서 2차원 유한요소 해석을 이용하여 토크 리플과 평균 토크를 얻었고 그 결과를 분석하였다.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor)는 돌극 형태로 되어 있는 회전자와 고정자 사이의 공극에서 생겨나는 릴럭턴스에 의한 현상을 이용한 모터이다. 고정자 권선에 여자에너지를 인가하여 자장이 생겨나고 회전자는 릴럭턴스가 최소가 되는 위치로 이동한다. 이 현상은 자석에 의해 철이나 강판을 끌어당기는 것과 유사하다. 릴럭턴스는 자석과 금속이 접촉하고 있을 때 최소가 된다.

스위치드 릴럭턴스 모터는 다른 전동기에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 먼저 스위치드 릴럭턴스 모터는 여러 전동기 중 구조적으로 가장 간단하다. 고정자에만 권선이 감겨져 있고, 회전자에는 권선이나 자석을 가지고 있지 않다. 회전자는 모터 축에 라미네이션 되어있는 강판으로 쌓여져 있다. 이러한 구조가 스위치드 릴럭턴스 모터가 낮은 가격을 갖게 해준다.

지난 몇 년간 스위치드 릴럭턴스 모터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 몇 가지 제한사항을 가진다. DC, AC로 바로 구동 할 수 없기 때문에 회전자의 위치에 따른 여자를 위한 스위칭 소자가 필요하고 비선형적인 마그네틱 특성이 강하게 나타난다. 이러한 문제점으로 인하여 전동기 산업에서 사용되는 부분이 한정되어 있다. 그러나 스위치드 릴럭턴스 모터의 각 상은 전자기적으로 독립되어 있고 회전자에 영구자석이 없기 때문에 고속에서도 안전하게 운전할 수 있고, 구조적으로 간단하기 때문에 보수가 용이하다. 단점으로는 회전자 위치센서가 필요하고, 다른 전동기에 비해 소음과 진동이 심하다. 스위치드 릴럭턴스 모터의 알맞은 설계를 통해서 이러한 문제를 보상해주어야 한다.[1],[2]

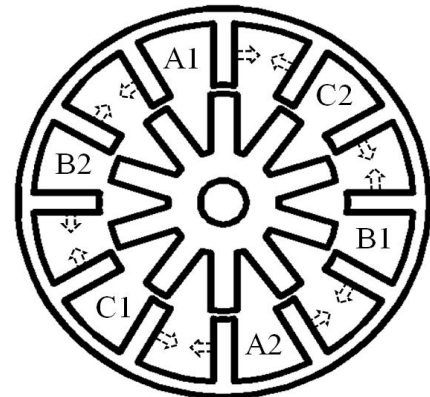
기존 스위치드 릴럭턴스 모터는 두 극사이의 긴 자속경로로 인해 철손이 발생하게 된다. 이 때 철손을 줄이기 위해서 고정자 폴을 이동시켜서 짧은 자속밀도를 갖고 스위칭 소자의 개수를 고려한 3상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터를 이용한다.[3][4]

본 논문에서는 3상 스위치드 릴럭턴스 모터를 기본모델로 잡고 그림 2 모델을 바탕으로 전동기의 여자각도를 제어하기 위한 설계 변수인 드웰각과 선행각으로부터 25개의 샘플링에서 FEM을 이용하여서 평균 토크와 토크 리플을 얻었다. 그리고 적절한 드웰각과 선행각을 제안하였다.

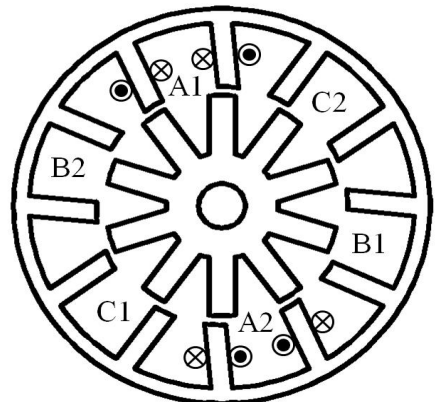
2. 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터

2.1 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터 구조

최적화 하려는 모델은 그림 1과 같은 기존 6상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터에서 각 상을 이루고 있는 두 인접한 고정자 폴을 반대방향으로 3°씩 넓혀서 A1, A2, B1, B2, C1, C2의 폴 구조와 같이 회전자 폴과 동일한 간격을 갖는 그림 2와 같은 3상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터를 만든다. 각 상의 여자에너지는 A1,A2와 같은 집중권이 반복된다. 3상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터는 기존 6상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터에 비해 낮은 철손과 짧은 자속밀도 경로로 인하여 같은 여자 에너지를 인가할 때 높은 토크 출력을 얻는다. 유한요소법 해석을 위한 전동기의 기본사양은 표1과 같다.



<그림 1> 기존 6상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터



<그림 2> 3상 12/10 스위치드 릴럭턴스 모터

<표 1> 12/10 SRM 기본사양

Parameter	size
Outer diameter of stator (mm)	132
Outer diameter of rotor (mm)	69.4
The air gap length (mm)	0.3
The diameter of shaft (mm)	16
Winding turns	200
The stator pole arc (deg)	11
The Rotor pole arc (deg)	13
Rated Speed(rpm)	1500

2.2 스위치드 릴럭턴스 모터의 수학적 모델링

스위치드 릴럭턴스 모터의 동작 방정식은 식 (1)과 같이 정의된 채교 자속 식을 기초로 구할 수 있다.

$$\lambda = \int (v - Ri) dt \quad (1)$$

이 때 λ 는 쇠교자속이고 R 은 권선저항이고 V 는 상전압이다. 식(1)로부터 스위치드 릴럭턴스 모터를 위한 식 (2)와 같은 전압식을 구할 수 있다.

$$V = ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2)$$

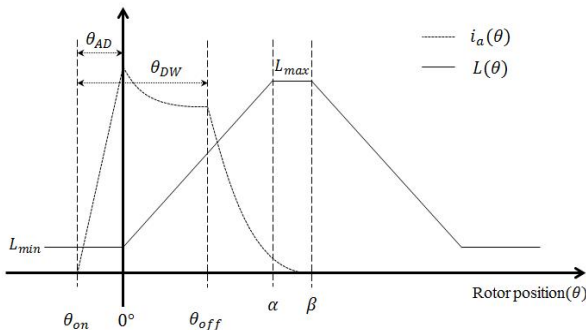
12/10 스위치드 릴럭턴스모터는 짧은 자속 경로를 가지고 있기 때문에 기존 스위치드 릴럭턴스 모터보다 상호인덕턴스가 극도로 작다. 그래서 이 경우에 상호인덕턴스를 무시할 수 있다.[3] 스위치드 릴럭턴스 모터의 쇠교 자속은 전류와 회전자 위치에 관계가 있고, 권선의 저항과 철심의 자기적인 비선형성을 무시하는 이상적인 가정에서 일정한 각속도로 동작을 하면 식(3)과 같고

$$V_i = R\dot{i}^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L\dot{i}^2 \right) + \frac{\dot{i}^2}{2} \frac{dL}{d\theta} w \quad (3)$$

입력의 일부는 $R\dot{i}^2$ 는 동손으로 소비되고, 다른 입력의 일부는 토크를 발생시키는 $\frac{\dot{i}^2}{2} \frac{dL}{d\theta} w$ 로 변환되고, 나머지의 일부는 $\frac{1}{2} L\dot{i}^2$ 의 자기에너지로 변환된다.

2.3 인덕턴스와 전류파형

그림 3과 같이 회전자의 위치에 따른 인덕턴스와 전류파형이 나타난다.[5] θ_{AD} 는 권선에 전원을 인가하여 여자하면서부터 고정자와 회전자가 접촉하기 직전까지의 각이고 θ_{DW} 는 θ_{on} 부터 θ_{off} 까지이다. 스위치가 꺼진 후 전류가 소호된다. 이 때 선행각을 너무 작게 가져가면 여자할 수 있는 구간이 짧아서 충분한 전류를 확립하지 못하고 드웰각을 작게 가져가면 전류를 충분히 확립하지 못하고 크게 가져가면 인덕턴스가 작아지는 구간에서 전류가 남아있게 되어서 진행방향과 반대방향으로 토크가 발생한다.



<그림 3> 인덕턴스와 전류 파형

3. 유한 요소 해석

3.1 설계변수 설정

목적함수로는 식 (4)와 같이 한 주기 동안의 평균 토크와 식 (5)와 같이 한 주기안에서 최대 토크와 최소 토크의 차인 토크 리플을 구했다.

$$T_{avg} = \frac{1}{t} \int_t T \cdot d\theta \quad (4)$$

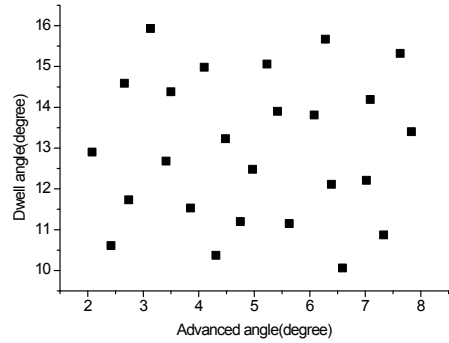
$$T_{ripple} = T_{max} - T_{min} \quad (5)$$

설계변수로는 드웰각과 선행각을 정했으며, 범위는 다음과 같다.

$$2^\circ \leq \theta_{AD} \leq 8^\circ \quad (6)$$

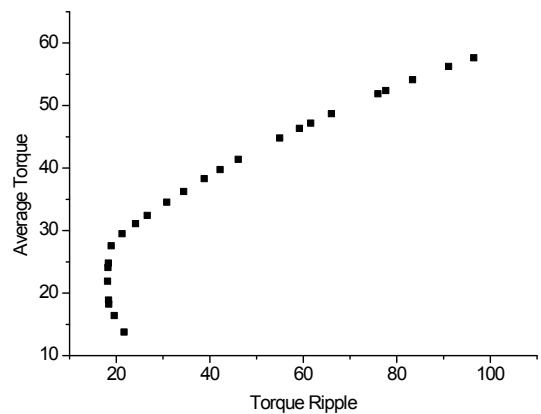
$$10^\circ \leq \theta_{DW} \leq 16^\circ \quad (7)$$

3.2 해석 결과



<그림 4> 변수에 따른 샘플링

변수 범위에서 25개의 샘플링을 LHD를 이용하여 얻었고 그림4와 같은 결과를 얻었다.



<그림 5> 변수에 따른 해석결과

해석결과를 확인하면 그림 5와 같고, torque ripple이 최소인 지점은 표 2와 같다. 사용자에 따라 토크리플을 감수하더라도 더 큰 평균토크 구간을 선택할 수 있다.

<표 2> 최소 토크 리플의 선행각과 드웰각

θ_{AD}	θ_{DW}	평균토크	토크리플
3.13	15.93	21.91	18.12

4. 결 과

본 논문에서는 12/10스위치드 릴럭턴스 모터에 여자에너지를 인가하기 위한 드웰각과 선행각을 구하기 위해서 설계변수를 지정, 25개의 샘플링을 구하였고, 그 결과 설계자가 원하는 토크리플과 평균토크를 구할 수 있는 그래프를 FEM을 통해서 분석하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.Krishnan. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. Boca Raton, CRC Press,2001.
- [2] T.J.E Miller Switched Reluctance Motor Drives, 1988 :Intertec Communications Inc.
- [3] M.T. Khor and R. Sotudeh, "A 3-Phase 12/10 Asymmetrical Switched Reluctance Motor
- [4] Junfang Bao, Yi Yu, Huijun Wang, Jianfeng Liu, "Comprehensive analysis of novel three-phase 12/10 Switched reluctance motor", International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct, 26-29, 2013
- [5] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, 2004