Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 4 pp. 586-592, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.4.586
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

SRM 설계를 위한 유한 요소 모델링 기법

배재남[1*], 이성구[2], 김원호[3]
[1]동양미래대학교 전기공학과, [2]부산외국어대학교 나노공학부, [3]가천대학교 에너지IT학과

Finite Element Modeling Method for SRM Design

Jae-Nam Bae[1*], Sung-Gul Lee[2], Won-Ho Kim[3]
[1]Department of Electrical Engineering, Dongyang Mirae University
[2]Division of Nano-technology, Busan University of Foreign Studies
[3]Department of Energy IT, Gachon University

요 약 SRM은 이중 돌극 구조의 전동기로 전기자만 존재하는 전동기이다. 동기기 혹은 유도기와 같이 전기자와 계자가 구분되는 전동기는 단순한 수학적 모델을 이용해 특성 해석이 비교적 용이한 반면 SRM의 경우는 단순한 수학적 모델을 적용하기 힘들며 이 때문에 특성 해석 및 설계가 상대적으로 어렵다. 통상 SRM의 설계는 구동 회로를 포함한 수치 해석 기반 특성 해석 결과를 기반으로 반복 수행을 통해 이루어진다. 이 과정에서 설계 인자의 변화에 따른 경향 분석이 필요하며 수많은 설계 인자들은 서로 영향을 미치게 된다. 설계 시간을 단축하고 정확한 설계를 위해서는 설계 주요 인자를 기반으로 한 모델링 기법이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 SRM의 주요 설계 인자의 수를 최소화 하여 형상 모델링을 할 수 있게 수식을 정리하였으며, 이를 이용해 SRM을 설계하기 위한 방법론을 제시하였다. 특히, 그동안 많이 연구 된 6/4극 모델에 대한 설계 기법을 제안하고 제안한 기법에 의한 설계의 예를 보였다.

Abstract SRMs are difficult to design using a simple mathematical model and, consequently, numerical analysis based characteristics analysis is used including drive circuits. In this process, it is necessary to analyze the trends according to the change of the design factors, however, many of the design factors affect each other. In order to shorten the design time and achieve a proper design, a modeling technique based on the design parameters is needed. For this purpose, this paper summarizes the formulas employed for shape modeling by minimizing the number of major design factors of the SRM, and proposes a methodology for SRM design using these formulas. In particular, we propose a design method for a 6/4-pole model, one which has been studied for a long time, and showed an example of a design produced by the proposed method.

Keywords : Switched Reluctance Motor, Finite Element Modeling, 6/4 SRM, Design Procedure, Shape Design

1. 서론

Switched Reluctance Motor (SRM)은 이중 돌극 구조의 전동기로 전기자와 계자로 구분되는 영구자석 전동기 혹은 유도기와는 달리 전기자만 존재하는 시스템이다. 이 때문에 전기적, 기계적으로 아주 단순한 구조를 가지게 되고 내구성이 우수하다. 이러한 이유로 팬, 블로어와 같은 고속 회전 응용이나 내구성이 매우 높아야 하는 응용에 SRM을 적용하기 위한 연구가 진행되었다[1-2]. SRM의 설계에 관한 연구를 살펴보면 유한 요소 기법(Finite Element Method; FEM)을 적용하여 설계한 연구가 주를 이루고 있다[3-4]. 이는 SRM의 전기자와

본 연구는 2016년도 동양미래대학교의 교내학술연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다
*Corresponding Author : Jae-Nam Bae(Dongyang Mirae Univ.)
Tel: +82-2-2610-1744 email: jaenam@dongyang.ac.kr
Received January 30, 2018 Revised March 7, 2018
Accepted April 6, 2018 Published April 30, 2018

계자를 분리해서 생각하기 힘들어 전기 등가 회로 혹은 자기 등가 회로 기반의 단순한 수학적 모델을 이용한 설계가 상대적으로 어렵기 때문이다. 하지만 유한 요소 법을 이용한 설계에 있어, 수 많은 조건에서 특성 검토를 해야 되기 때문에 많은 시간이 소요되었다. 특히 설계 변수에는 고정자 및 회전자 극호율, 공극 길이, 권선 방법, 슬롯 깊이 등 여러 가지가 있을 수 있으며 이러한 설계 변수 조합은 무수히 많다.

설계 시간 단축을 위해서는 핵심이 되는 설계 인자를 독립 설계 변수로 두고, 나머지 설계 인자들을 종속 변수로 만들어 설계 조합 수를 최소화 할 필요가 있다. 물론 기존 연구에서도 핵심 인자를 중심으로 설계 변수로 두었지만 최적화 설계 과정에서는 독립 변수와 종속 변수 간의 관계를 무시하고 설계를 진행한 경우가 많았다. 예컨대, 슬롯 형상이 바뀌면 이는 슬롯 면적에 영향을 미치고 슬롯 면적은 다시 권선 저항에 영향을 미치고 이는 다시 모터 효율에 영향을 미치게 된다. 하지만 기존에는 형상 세부 설계 시 슬롯 형상 변화가 매우 크지 않다고 가정하여 슬롯 형상 변화에 기인하는 결과를 무시한 채 설계가 진행되었다. 이러한 설계 방법은 많은 경우 무리 없이 수행 될 수 있지만 설계 변화 폭이 큰 경우에는 적용 될 수 없다.

SRM은 앞서 언급한 바와 같이 단순한 전기 등가회로 혹은 자기 등가 회로로 표현되는 수학적 모델을 이용한 설계가 힘들고 설계 변화 폭을 크게 하여 설계 변수의 변화에 따른 경향 분석을 통한 최적의 형상 및 권선 설계 과정이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 SRM의 주요 설계 인자의 수를 최소화 하여 유한 요소 형상 모델링을 할 수 있게 수식을 정리하였으며, 모델링 된 형상을 이용해 SRM을 설계하기 위한 방법론을 제시하였다. 특히, 그동안 많이 연구 된 6/4극 모델에 대한 설계 기법을 제안하고 제안한 기법에 의한 설계의 예를 보이고자 한다.

2. SRM 설계를 위한 유한 요소 모델링

2.1 형상 모델링

일반적인 모터 설계 이론과 기존 논문[1-4]을 살펴보면 SRM의 출력 특성에 가장 영향을 크게 미치는 요소는 형상과 관련하여 외경, 공극 직경, 축 방향 길이, 치 폭, 요크 폭 등 이 있으며, 권선 관련하여 권선법, 턴 수

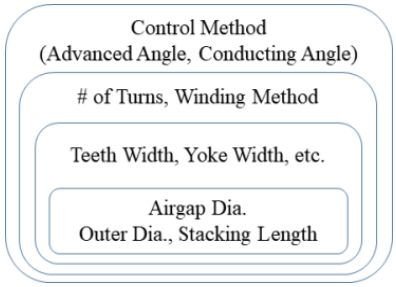

Fig. 1. Cascaded structure of design parameters

등이 있으며, 제어 측면에서는 선행각 도통각 등이 있다. 이러한 설계 인자를 설계 수순에 따라 정리하고 그 파급력을 기준으로 정리해 보면 Fig.1과 같이 나타낼 수 있다.

가장 우선적으로 모터의 사이즈(외경, 축 방향 길이, 공극 직경)가 영향을 미치게 되며, 다음으로 세부 형상인 치 폭, 요크 폭 등이 영향을 미친다. 형상이 결정되면 권선을 할 수 있는 슬롯의 면적이 결정되고 이에 따라 권선 설계를 어떻게 하느냐가 출력에 영향을 미치게 된다. 마지막으로 설계된 하드웨어를 어떻게 제어하느냐에 따라 출력 특성은 또 달라진다.

이상에서 언급한 모든 변수들이 설계 변수이며, 이들의 결정 순서를 어떻게 하느냐에 따라 설계 시간 혹은 설계에 들어가는 노력이 달라진다. 따라서 가능한 적은 노력으로 설계 요구 사양을 만족 시킬 수 있는 유한 요소 모델링 기법 및 설계 수순이 필요하며 본 논문에서는 이에 대한 제안을 하고자 한다. 단, 내전형 SRM에 대하여 다음과 같이 설계를 위한 조건이 주어졌다고 가정한다.

1) 구동 전압, 2) 회전 속도, 3) 출력 토크, 4) 전류 밀도(J_{coil}), 5) 고정자 외경 ($2R_{so}$), 6) 축 방향 길이 (L_{stk}), 7) 슬롯 점적률 (K_{sf}), 8) 공극 길이 (g)

SRM의 형상 모델링은 Fig.2에 보인 치수를 이용할 것이다. 최소한의 독립 변수를 사용하여 형상 모델링을 하는 것이 설계 시간 단축에 유리하다.

이상의 파라미터가 결정된 상황에서 가장 먼저 해야 할 일은 극 수 N_{sr} 및 슬롯 수 N_{ss}를 결정하는 것이다. 극 수와 슬롯 수를 자동으로 결정하기는 쉽지 않으며 여러 극수 슬롯 수 조합 하에 설계를 하여 출력 특성 등을 보고 최종적으로 선택해야 한다. 결국 설계자가 극수와 슬롯 수는 정해야 하며, 이는 설계 독립 변수로 볼 수 있다.

다음으로 결정해야 할 사항은 공극 반경 R_g을 결정하는 것이다. 공극 반경은 Fig.2에서 회전자 반경과 고정자 반경의 중앙이 되며 식(1)으로 써볼 수 있다.

$$R_g = \frac{R_{ro} + R_{si}}{2} \tag{1}$$

반대로, 공극 직경이 결정되면 공극 길이 g가 주어졌으므로 고정자 반경 R_{si}과 회전자 반경 R_{ro} 또한 자동으로 결정된다.

공극 반경이 고정자 반경 R_{so}에 가까워지면 공극 면적은 늘어나나 권선을 위한 슬롯 면적이 줄기 때문에 출력은 감소하게 된다. 반대로 공극 반경이 0에 수렴하면 발생 토크도 0이 된다. 따라서 0과 고정자 외경 사이에 최대 출력을 이끌어 낼 수 있는 공극 반경이 존재하게 된다. 단, 최적의 공극 반경은 권선 설계와 연관이 있기 때문에 적절한 범위에서 공극 반경을 바꿔가며 설계를 반복해야 최적의 공극 반경을 찾을 수 있다. 참고로 공극 반경은 극 수 및 슬롯 수와도 관련되는데, 극 수가 늘수록 공극 반경은 고정자 외 반경에 가까워진다. 결국 공극 반경 또한 설계 독립 변수로 두어야 한다.

공극 반경과 슬롯 수가 결정된 후 개략적인 형상을 그리기 위해서는 고정자 및 회전자의 치 폭 W_{st}, W_{rt} 혹은 슬롯 폭 W_{ss}, W_{rs} 및 요크 폭 W_{sy}, W_{ry}을 우선 결정해야 한다. 치 폭 계산을 위해 우선 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 피치 각 θ_{ss}, θ_{rs}을 식(2)로 구해 볼 수 있다.

$$\theta_{ss} = \frac{\alpha_{ss}\pi}{N_{ss}} \tag{2}$$
$$\theta_{rs} = \frac{\alpha_{rs}\pi}{N_{rs}}$$

여기서 α_{ss}은 고정자 내경 기준 고정자 슬롯 피치에 대한 고정자 슬롯 폭의 비에 2를 곱한 값이며, α_{sr}은 비슷하게 회전자 외경 기준 회전자 슬롯 피치에 대한 회전자 슬롯 폭의 비에 2를 곱한 값이다. α_{ss}와 α_{sr}은 0~2의 값을 가질 수 있으며 가 1인 경우 슬롯 폭과 치 폭이 동일하게 되고 0에 가까울수록 슬롯 폭은 줄고 치 폭은 커지며 반대로 2에 가까울수록 슬롯 폭은 커지고 치 폭은 줄게 된다.

고정자 및 회전자 치의 피치 각 θ_{st} 및 θ_{rt}은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{st} = \frac{2-\alpha_{ss}}{N_{ss}}\pi \tag{3}$$
$$\theta_{rt} = \frac{2-\alpha_{rs}}{N_{rs}}\pi$$

식 (3)으로부터 고정자 치 폭 W_{st}을 구하면 식(4)와 같다.

$$W_{st} = 2R_{si}\tan^{-1}\left(\frac{\theta_{st}}{2}\right) \tag{4}$$

고정자 요크 폭의 결정은 기계적인 강도를 갖고 충분한 자속이 흐를 수 있게 설정되어야 한다. 우선 자속의 입장에서 살펴보면, SRM의 경우 동시 1상 구동이므로 1상에서 발생된 자속 즉 고정자 치에 흐르는 자속이 고정자 백 요크를 따라 흐르게 된다. 치에서 발생한 자속이 백 요크에 다다르면 시계 방향과 반시계방향으로 나뉘어 흐르게 되므로 자기학적으로 백 요크는 치 폭의 절반이면 충분하다. 즉,

$$W_{sy} = \frac{W_{st}}{2} \tag{5}$$

하지만, 기계적인 강도 혹은 제작의 문제 등을 고려하면 백 요크의 두께는 약간씩 달라질 수 있다. 따라서 식(5)에 백 요크 형상 계수 α_{sy}를 곱하여 식(6)과 같이 백 요크 너비를 결정할 수 있다.

$$W_{sy} = \alpha_{sy}\frac{W_{st}}{2} \tag{6}$$

이때 α_{sy}는 1근처의 값을 가진다.

이제 고정자 외경, 고정자 내경, 고정자 백 요크 폭, 치 폭이 결정되었음으로 고정자 형상을 그릴 수 있다. 비슷한 방법으로 회전자 모델링도 할 수 있다. 단, 회전자 모델링을 위해서는 샤프트 직경 혹은 회전자 내경이 우선적으로 결정되어야 한다. 샤프트 직경은 회전자 직경보다 작아야 하며 회전자 직경의 절반 내외로 결정하거

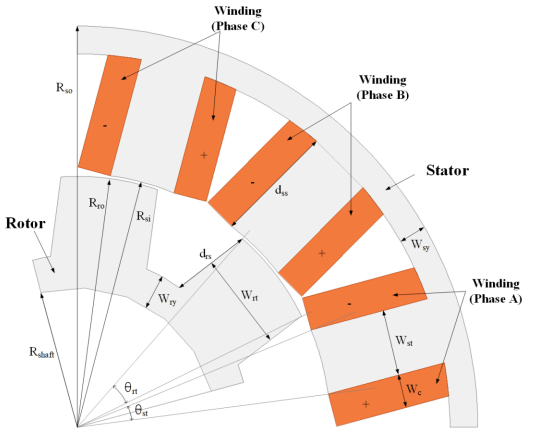

Fig. 2. Geometry parameters for shape design of SRM

나, 회전자 슬롯 깊이를 고정자와 동일하게 두어 계산해 볼 수 있다. 여기서는 독립 변수를 하나라도 줄이고자 고정자 슬롯 깊이와 회전자 슬롯 깊이를 동일하게 두어 샤프트 직경을 구하도록 했다.

마지막으로 슬롯의 면적 정확히는 권선부의 면적을 구해야 한다. 권선부는 권선 제작법에 따라 달라질 수 있는데, 여기서는 와인딩 기계를 사용하여 보빈에 와인딩 한 다음 고정자 치에 보빈을 삽입하는 제작법을 가정하여 Fig.2처럼 직사각형 형태로 만들어진다고 가정하였다. 이때 권선이 가질 수 있는 최대 폭은 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$W_{coil} = R_{si}\tan^{-1}\left(\frac{\pi}{N_{ss}}\right) - \frac{W_{st}}{2} \tag{7}$$

2.2 권선 모델링

형상 모델링이 되면 주어진 슬롯 형상 혹은 코일 형상을 이용해 권선을 모델링해 볼 수 있다. 권선 모델링의 핵심은 코일 턴 수이며 코일 턴 수는 전류밀도 및 슬롯 점적률을 고려하여 결정할 수 있다. Fig.2에서 와인딩 면적은 식(8)과 같이 계산된다.

$$A_{winding} = d_{ss} W_{coil} \tag{8}$$

이때 코일 면적 A_{coil}과 슬롯 점적률 K_{sf}가 주어지면 코일 턴 수는 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$N_c = \frac{A_{winding}}{K_{sf} A_{coil}} \tag{9}$$

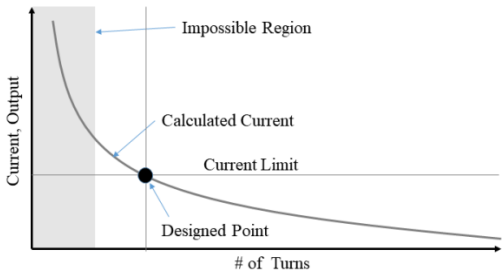

Fig. 3. Number of turns vs. current and output power

코일 단면적을 정하는 기준은 코일에 흐르는 전류이다. SRM의 구동 전압과 출력을 알고 있으므로 상에 흐르는 전류 예측이 어느 정도 가능하다. 예측된 전류와 열적인 문제를 고려한 전류 밀도를 설계자 경험을 기반으로 하여 적절히 설정하게 되면 코일 단면적은 식(10)과 같이 결정된다.

$$A_{coil} = \frac{I_{coil}}{J_{coil}} \tag{10}$$

결국, 권선 설계에 있어 독립변수는 점적률과 코일단면적이 될 수 있으며 이들의 변화에 따라 턴 수가 바뀌고 출력 특성이 바뀌게 된다. 물론 SRM의 권선에 흐르는 전류는 효율과 역률 등을 종합적으로 고려해야하기 때문에 정확하게 예측하기는 힘들다. 따라서 해석과 설계의 반복을 통해 적절한 코일 단면적을 선정해야 할 것이다. 또한 SRM의 구동 전류는 전압원 해석을 통해 알아낼 수 있으므로 식(9)을 이용해 결정된 턴 수를 적용해 특성 유한 요소 해석을 했을 때 식(10)에 사용된 값만큼 전류가 흐르지 않을 수 있다. 즉, Fig.3과 같이 식(9)의 턴 수가 적을 경우에는 권선 저항도 매우 작아지고 인덕턴스도 작아져 같은 전압으로 구동 시 아주 큰 전류가 흐르게 되며 턴 수가 많을 경우에는 반대로 권선 저항과 인덕턴스가 커 적은 전류가 흐르게 된다. 또한 전류 크기에 따라 출력 토크도 달라진다. 턴 수가 적으면 전류는 클 수 있지만 인덕턴스의 변화율이 적어 큰 출력을 낼 수 없고, 반대로 턴 수가 많은 경우 인덕턴스 변화율은 클 수 있지만 전류는 적어 큰 출력을 내기 힘들다. 따라서 적절한 턴 수에서 최대 출력을 낼 수 있게 되고 이때의 권선 설계 결과가 출력 특성을 만족하는 지와 열적인 문제가 발생하지 않는지를 종합적으로 고려해 턴 수 및 코일 단면적을 결정해야 한다.

Table 1. Design parameters and its expressions for SRM shape design

No	Symbol	Unit	Description	Comment (Expression)
1	N_{ss}	-	# of stator slots	Independent
2	N_{rs}	-	# of rotor slots	$N_{ss} \times \frac{2}{3}$
3	R_{so}	mm	Outer radius of stator	Independent
4	R_g	mm	Radius of airgap	Independent
5	L_{stk}	mm	Stacking length	Independent
6	g	mm	Airgap length	Independent
7	α_{ss}	-	Shape coefficient of stator slot	Semi-independent (around 1)
8	α_{rs}	-	Shape coefficient of rotor Slot	Semi-independent (around 1)
9	R_{si}	mm	Inner radius of stator	$R_g + \frac{g}{2}$
10	R_{so}	mm	Outer radius of rotor	$R_g - \frac{g}{2}$
11	θ_{ss}	deg	Stator slot angle	$\frac{\alpha_{ss}\pi}{N_{ss}}$
12	θ_{rs}	deg	Rotor slot angle	$\frac{\alpha_{rs}\pi}{N_{rs}}$
13	θ_{st}	deg	Stator teeth angle	$\frac{(2-\alpha_{ss})\pi}{N_{ss}}$
14	θ_{rt}	rad	Rotor teeth angle	$\frac{(2-\alpha_{rs})\pi}{N_{rs}}$
15	W_{st}	mm	Stator teeth width	$2R_{si}\tan^{-1}\left(\frac{\theta_{st}}{2}\right)$
16	α_{sy}	-	Shape coefficient of stator yoke	Semi-independent (around 1)
17	W_{sy}	mm	Stator yoke width	$\alpha_{sy}\frac{W_{st}}{2}$
18	d_{ss}	mm	Stator slot depth	$R_{so} - W_{sy} - R_{si}$
19	α_{rs}	-	Ratio of a stator slot depth to a rotor slot depth	Semi-independent (0.5~1)
20	d_{rs}	mm	Rotor slot depth	$\alpha_{rs} d_{ss}$
21	W_{rt}	mm	Rotor teeth width	$2R_{ro}\tan^{-1}\left(\frac{\theta_{rt}}{2}\right)$
22	W_{ry}	mm	Rotor yoke width	$\approx W_{sy}$
23	R_{shaft}	mm	Radius of shaft	$R_{ro} - d_{rs} - W_{ry}$
24	W_{coil}	mm	Coil width	$R_{si}\tan^{-1}\left(\frac{\pi}{N_{ss}}\right)\frac{-W_{st}}{2}$

2.3 설계수식의 정리

Table 1은 이상에서 설명한 설계 변수를 설계 독립변수인지 아닌지를 나타내었으며, 설계 독립 변수가 아닌 변수의 경우 설계 독립 변수와의 관계를 수식으로 정리한 것이다. 설계 독립 변수를 먼저 결정하고 나머지 변수를 표의 관계식을 이용해 정리하게 되면 다음 장에 설명할 SRM의 설계 플로우를 만족할 수 있게 된다.

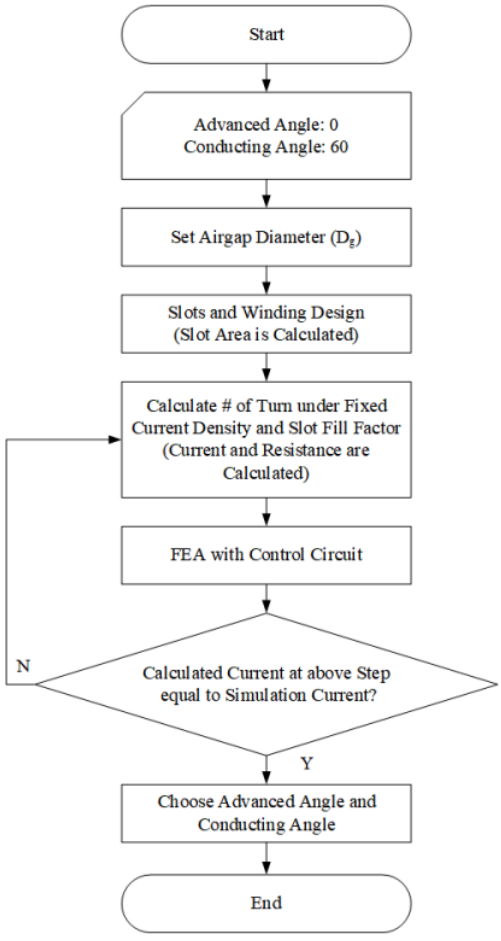

Fig. 4. Design flow of a SRM

3. SRM 설계

3.1 설계 플로우

Fig.4는 SRM 설계 수순이다. 설계 초반에는 선행각과 도통각을 결정할 수 없으므로, 기본 값으로 두고 시작을 한다. 그 후 공극 직경을 결정해 슬롯 형상과 권선 형상을 결정하고 권선 형상이 결정되면 점적률과 전류 밀도를 고려해 턴 수를 결정할 수 있다. 다음으로 구동 회로를 적용한 유한 요소 해석을 실시해 실제 권선에 흐르는 전류를 확인한다. 이때 유한 요소 해석에 의한 전류는 설계 시에 계산된 전류와는 다르다. 다음으로 Fig.3의 턴 수와 전류와의 관계를 이용해 턴 수 조정을 하고 반복 해석을 통해 유한 요소 해석 결과와 설계치를 일치시킨다. 이때 턴 수가 바뀌면 코일 저항도 바뀌므로 꼭 저항

을 재계산 해 주어야 한다. 이후 선행각과 도통각을 조절하여 최대토크 발생이 가능하도록 제어 인자를 찾는다. Fig.4의 프로세스를 밟으면 특정 공극직경에서의 최대 토크 발생을 위한 설계를 마칠 수 있으며, 공극 직경을 변화해 가면서 설계를 진행하면 최적의 공극 직경을 찾을 수 있고 턴 수를 변화시켜가며 설계를 하면 전압조건 및 전류밀도 사양을 만족시킬 수 있는 권선 설계가 가능하다.

3.2 설계의 예

Table 2은 차량용 엑츄에이터 구동용 SRM 설계 제원을 나타낸다. Table 3은 Fig.2 및 Table 1에서 보인 관계식을 이용하여 SRM 형상 모델링을 한 결과이다.

Table 2. Design requirements for a SRM

Item	Requirement
Required Torque@1000rpm	0.2Nm
Rotating Speed	1,000rpm
DC Input Voltage	9V
Stator Diameter	72mm
Stacking Length	17mm

Table 3. Design sheet for a SRM

No	Symbol	Unit	Description	Value
1	N_{ss}	-	# of stator slots	12
2	N_{rs}	-	# of rotor slots	8
3	R_{so}	mm	Outer radius of stator	72/2
4	R_g	mm	Radius of airgap	44.8/2
5	L_{stk}	mm	Stacking length	17
6	g	mm	Airgap length	0.3
7	α_{ss}	-	Shape coefficient of stator slot	1
8	α_{rs}	-	Shape coefficient of rotor Slot	1
9	R_{si}	mm	Inner radius of stator	45.1/2
10	R_{so}	mm	Outer radius of rotor	44.5/2
11	θ_{ss}	deg	Stator slot angle	15
12	θ_{rs}	deg	Rotor slot angle	22.5
13	θ_{st}	deg	Stator teeth angle	15
14	θ_{rt}	rad	Rotor teeth angle	22.5
15	W_{st}	mm	Stator teeth width	5.87
16	α_{sy}	-	Shape coefficient of stator yoke	1
17	W_{sy}	mm	Stator yoke width	2.93
18	d_{ss}	mm	Stator slot depth	10.53
19	α_{rs}	-	Ratio of a stator slot depth to a rotor slot depth	0.6
20	d_{rs}	mm	Rotor slot depth	6.32
21	W_{rt}	mm	Rotor teeth width	5.79
22	W_{ry}	mm	Rotor yoke width	2.93
23	R_{shaft}	mm	Radius of shaft	20.03
24	W_{coil}	mm	Coil width	2.86

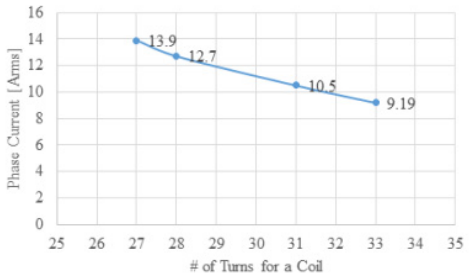

Fig. 5. Phase current vs number of turns for a coil

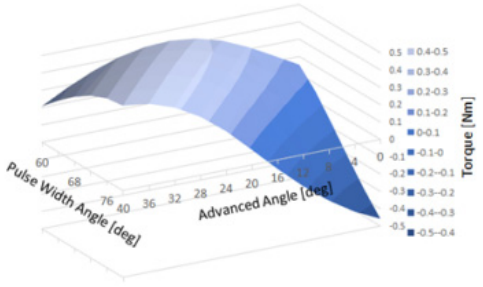

Fig. 6. Output torque as a variation of control parameters

이때 회전수는 1,000rpm, 전류밀도 제한은 $10A_{rms}$, 점적률은 0.65로 설정하였으며, 편의를 위해 준 독립 변수인 고정자 치 슬롯 형상 계수 α_{ss}와 회전자 치 슬롯 형상 계수 α_{rs}를 모두 1로 두어 치 폭과 슬롯 폭을 동일하게 가정하였다. 표에서 1, 3~8, 16, 19번은 사용자가 설정한 값이며 나머지는 계산된 값들이다.

Fig.5는 턴 수 변화에 따른 전류 그래프이며, 그림에서 설계 값과 유한 요소 해석 값이 일치하는 28턴에서 턴 수 설계를 완료하였다. Fig.6은 코일 당 턴 수를 28턴으로 고정하고 선행각과 도통 각을 조절하여 발생한 토크 그래프이다. 전기 각 기준 선행 각이 20도 이상에서 펄스 폭을 60도 보다 크게 조절할 때 최대 토크가 발생하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 SRM의 설계시간 단축을 위한 유한 요소 해석 기반 설계 프로세스에 대해 언급하였다. 본 논문에서 제안한 프로세스를 최적화 알고리즘에 적용하게 되면 중량당 최대 출력 설계, 최대 효율 설계 등이 가능할 것으로 사료된다.

References

[1] Cheng He, Chen Hao, Wang Qianlong, Xu Shaohui, Yang Shunyao, "Design of a Switched Reluctance Motor Driving an Electric Compressor for HEVs", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 62, no. 5, pp. 620-625, 2013.
DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.5.620

[2] Jin-Woo Ahn, "Design and Drive Characteristics of Low Voltage 8/6 SRM for Fan Application", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers,* vol. 63, no. 10, pp. 1371-1376, 2014.
DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.10.1371

[3] Kyeong-Ho Choi, Dong-Hee Kim, Chae-Gyun Ro, Min-Huei Kim, "A Study on Calculating Inductance Characteristics of Switched Reluctance Motor", *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 333-340, 2001.

[4] Hao Chen, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn, "Design and Drive of 3-phase 6/8 SRM", *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 8, no. 1, pp. 48-55, 2003.

배 재 남(Jae-Nam Bae) **[정회원]**

- 2006년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2010년 11월 ~ 2013년 3월 : 현대중공업 선임연구원
- 2013년 5월 ~ 2015년 8월 : 자동차부품연구원 선임연구원
- 2015년 9월 ~ 현재 : 동양미래대학교 전기공학과 조교수

<관심분야>
모터설계, 전자장 유한요소해석, 모터 드라이브

이 성 구(Sung-Gu Lee) **[정회원]**

- 2005년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2009년 9월 ~ 2016년 1월 : 삼성전자 책임연구원
- 2016년 2월 ~ 현재 : 부산외국어대학교 전자로봇공학과 조교수

<관심분야>
모터설계, 전자장 유한요소해석, 무선전력전송

김 원 호(Won-Ho Kim) **[정회원]**

- 2007년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2011년 9월 ~ 2017년 2월 : 삼성전자 책임연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 에너지IT학과 조교수

<관심분야>
모터설계, 전자장 유한요소해석, 모터 드라이브