

토오크 리플을 고려한 송풍기 구동용 단상 SRM의 설계

이종한, 이은웅
충남대학교

Design of single phase SRM for the Blower considering the Torque Ripple

Lee Jong-Han, Lee Eun-Woong
Chungnam National University

Abstract - The single phase switched reluctance motor has many merits in practical use because it has simple operating drives and control systems, very high energy density per unit volume comparing with three phase SRM. But it has also problems which is a starting device and torque ripple.

One of the major problems is torque ripple which causes increased undesirable acoustic noise and possibly speed ripple.

This paper describes an approach to determine optimum magnetic circuit parameters to minimize the torque ripple.

1. 서 론

송풍기는 산업 전반에 걸쳐 매우 널리 사용되며, 그 용도에 따라 다양한 사양을 갖고 설계 제작된다. 현재 송풍기와 같은 유체부하 구동용 전동기로 유도전동기가 가장 많이 사용되고 있는데 특히, 단상유도전동기는 효율이 낮고 제어가 용이하지 못하여 이를 보완하거나 대체할 적절한 전동기의 개발로 단상 SRM이 연구되고 있다.

최근 산업의 발달과 더불어 가변속 구동용 전동기로 SRM이 활발히 이용되어지고 있다. SRM은 자기저항이 최소가 되려는 자기적 변화를 이용한 것으로 구조가 간단하고 견고하며, 구동을 위한 스위칭 소자의 수를 줄일 수 있기 때문에 매우 경제적인 장점이 있다. 특히, 단상 SRM은 고정자 극수와 회전자 극수의 조합을 이용하는 다상 여자하는 다상 SRM에 비해 단상 여자하기 때문에 스위칭 소자를 줄일 수 있고, 단위체적당 에너지 이용율이 높다. 하지만 기동 토오크가 발생되지 않아 별도의 기동장치가 사용되어야 하고, 단상 여자에 의한 토오크의 불연속으로 토오크 리플이 발생된다. [1][2]

단상 SRM의 토오크리플을 줄이는 방법으로는 자기회로를 최적화하는 방법과 제어회로의 특성을 개선하는 두 가지 방법이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 선행연구를 통해 얻어진 단상 SRM의 설계 기술을 근거로 도출한 송풍기 구동용 단상 SRM의 설계파라미터에 대해 토오크 특성을 해석하여 각 설계 요소가 토오크 리플에 미치는 영향을 조사하고 토오크 리플을 감소시킬 수 있는 최적의 설계 변수를 얻고자 한다.

2. 단상 SRM의 토오크 리플

단상 SRM의 토오크 리플은 토오크의 변화로 결정된다. 토오크 리플은 회전속도에 따라 다르기 때문에 운전 조건을 고려해야 한다. 보통은 토오크 변화가 회전속도에 상당히 많은 영향을 주는 저속운전일 때 토오크 리플이 가장 크고, 고속운전에서는 회전자의 관성이 속도변

화와 진동에 영향을 주어 토오크 변화가 감소하게 된다. 토오크 리플을 예측하기 위해서는 토오크 특성과 입력 전류파형을 고려하여야 한다. 저속에서는 입력전류의 파형이 거의 구형파에 가깝기 때문에 정상전류치에 도달하는 시간을 줄일 수 있다.

단상 SRM의 순시토오크는 식 (1)과 같이 평균토오크 또는 일정한 값을 갖는 토오크와 시간이나 위치각에 따라 주기적으로 변화하는 값의 합으로 표현할 수 있다. 그림 (1)은 순시토오크의 변화를 나타낸 것이다. [2]

$$T(\alpha) = T_0 + T_r(\alpha) \tag{1}$$

여기서, T_0 : 평균토오크

$T_r(\alpha)$: 주기적 성분

이때, 주기적 성분이 토오크 리플의 원인이 된다.

토오크 리플을 나타내는 식은 식 (2)- 식(5)과 여러 가지 방법으로 표현할 수 있다. 일반적으로 토오크 리플을 계산하는 데는 식 (3)이 가장 많이 사용된다.

$$T_r = \frac{T_{max} - T_m}{T_{max} + T_m} \tag{2}$$

$$T_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avr}} \tag{3}$$

$$T_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{rms}} \tag{4}$$

$$T_r = \frac{[Torque\ ripple]_{rms}}{T_{avr}} = \frac{T_{rms}}{T_{avr}} \tag{5}$$

여기서, T_r : 토오크 리플값

T_{max} : 최대순시토오크값

T_{min} : 최소 순시토오크값

T_{avr} : 평균토오크값

T_{rms} : 순시토오크의 실효값

평균토오크값은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$T_{avr} = \frac{1}{T_p} \int_0^{\alpha+T_p} T(\alpha) d\alpha = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} T(\alpha) d\alpha \tag{6}$$

순시토오크의 실효값은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} T^2(\alpha) d\alpha} \tag{7}$$

여기서, T_p 는 순시토크 파형의 주기를 나타낸다.
또한 고조파 성분을 고려한 순시토크의 토크 리플은 식 (8)과 같다.

$$T_{rms} = \sqrt{T_{rms1}^2 + T_{rms2}^2 + \dots + T_{rmsv}^2} \quad (8)$$

3. 설계변수와 토크 리플과의 관계

3.1 해석 모델

본 연구에서 해석하고자하는 단상 SRM은 송풍기 구동용으로서 속도의 제곱에 비례하는 유체 부하의 특성을 설계시 고려하였고 표 1은 해석모델의 설계사양이다. 표 2는 선행연구를 통한 설계 과정을 통해 설계 사양에 대한 세부 설계파라미터를 나타낸 것이다. 그림 1은 단상 SRM의 해석 모델을 나타낸 것이다.[3][4]

표 1. 단상 SRM의 주요 설계 사양

설계 요소	단위	기호	설계값
출력	kW	P	0.75
회전자 체적당 토크	kNm/m ³	TRV	15
회전자 지름에 대한 stack 길이의 비		L_{stk}/D_r	1
회전자 극수	No.	N_r	6
고정자 극수	No.	N_s	6
DC 공급 전압	V	V_s	220
상수	No.	m	1
정격 회전 속도	rpm	n	1750

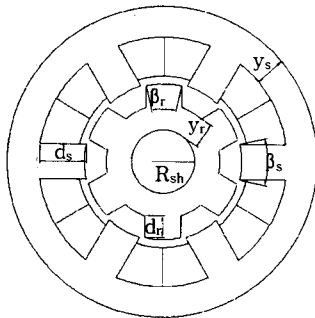


그림 1. 6/6극 단상 SRM의 단면도

표 2. 송풍기 구동용 단상 SRM의 설계 파라미터

설계 요소	비교	기호	설계값
고정자 지름	mm	D_s	140.68
회전자 지름	mm	D_r	70.34
축방향 길이	mm	L_{stk}	70.34
공극	mm	g	0.3
고정자 극호	[°]	β_r	25.650
회전자 극호	[°]	β_s	26.933
고정자 슬롯깊이		d_s	20.592
회전자 슬롯깊이		d_r	9.395
고정자 요크 두께	mm	y_s	14.068
회전자 요크 두께	mm	y_r	11.466
축지름	mm	D_{sh}	28.618
극당 턴수		N_p	140

3.2 해석 결과

단상 SRM의 토크 파형은 회전속도, 부하, 그리고 점호각 등의 운전조건에 의해 결정되고 또한 설계시 주요 설계 변수에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서 SRM의 설계 및 해석 프로그램을 이용해 여러 설계 변수와 토크 리플과의 관계를 조사하였다.

단상 SRM의 설계파라미터 중 구동 특성에 가장 많은 영향을 미치는 요소는 고정자와 회전자의 극호이다. 고정자극호 β_s 와 회전자극호 β_r 에 따라 인덕턴스 프로파일 이 결정되고 이로 인해 평균토크 및 토크 리플 등에 영향을 받고, 또한 구동을 위한 스위칭 각을 결정하는 기준이 된다. 그림 2는 고정자 극호에 대해 회전자 극호를 변화시켰을 때 평균토크의 변화를 나타낸 것이고, 그림 3은 토크 리플을 나타낸 것이다. 고정자극호와 회전자극호가 커질수록 토크 리플값이 커지고, 고정자극이 25[°]일 때 회전자 극호 변화에 따른 토크리플 차이가 줄어들음을 알 수 있다.

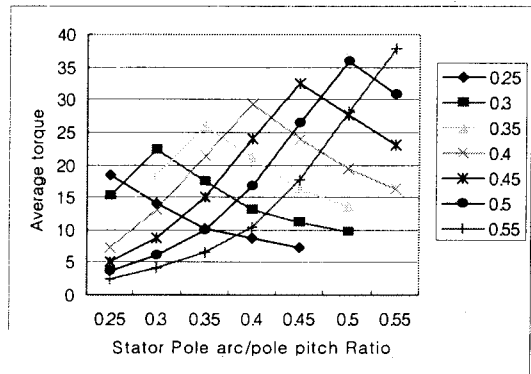


그림 2. 고정자극호와 회전자 극호에 따른 평균토크 변화 (입력전류 5[A]일 때)

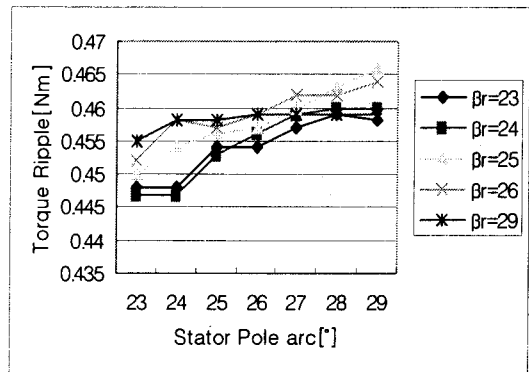


그림 3. 고정자와 회전자의 극호변화에 따른 토크 리플 변화

단상 SRM의 공극길이 g는 토크를 최대화하고, 소음과 진동을 줄이기 위해 되도록 작게 한다. 보통은 회전자 직경의 0.5% 정도에서 선정하고 제작시 기술상의 문제점을 고려하여 적절한 값으로 선정하게 된다. 그림 4는 고정자와 회전자의 극호를 각각 23[°], 25[°]로 하였을 때 공극길이를 0.2[mm]에서 0.65[mm]까지 변화시켰을 때 토크 리플과 회전자 체적당 토크를 나타낸 것이다. 공극길이가 커질수록 토크 리플은 줄어들지만

회전자 체적당 토오크 값이 급격히 줄어들기 때문에 설계사양에 적합한 토오크를 고려하여 선정하여야 한다.

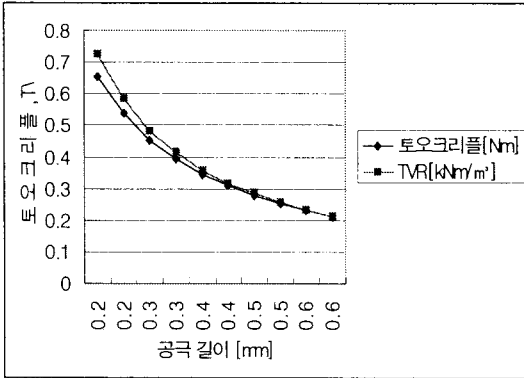


그림 4. 공극길이 변화에 따른 토오크 리플 및 회전자체적당 토오크 변화

단상 SRM의 설계시 구조적인 극호값 뿐만 아니라 전기적인 스위칭 on/off를 고려하여 설계하여야 한다. 일반적으로 고정자와 회전자의 극호값은 $\beta_s < \beta_r$ 의 범위에서 결정한다. 하지만 회전자 극호 β_r 를 고정자 극호 β_s 에 비해 너무 크게 하면 턴오프시 전류값이 0으로 떨어지는데 걸리는 시간이 0이 되는 이상적인 턴오프 동작이 되더라도 토오크 발생에 큰 이득이 없고 오히려 철심의 채적과 무게를 증가시키게 된다. 그림 5는 고정자와 회전자의 극호를 각각 23[°], 25[°]로 하고 공극을 0.3[mm]로 하였을 때, 턴온각은 고정하고 턴오프각만 변화시켰을 때 턴오프각에 대한 토오크 리플을 나타낸 것이다. 그림 6는 같은 조건에서 턴오프각 변화에 대한 회전자 체적당 토오크를 나타낸 것이다. 턴오프각을 크게 하여 여자구간을 증가시키기에 따라 토오크 리플이 증가하다가 정렬위치(60[°]) 근처에서 턴오프할수록 토오크 리플이 감소됨을 알 수 있다. 또한 정렬위치 이후에 턴오프하게 되면 역방향 토오크가 발생하게 되어 회전자 체적당 토오크도 감소하고 토오크 리플도 급격히 증가됨을 알 수 있다.

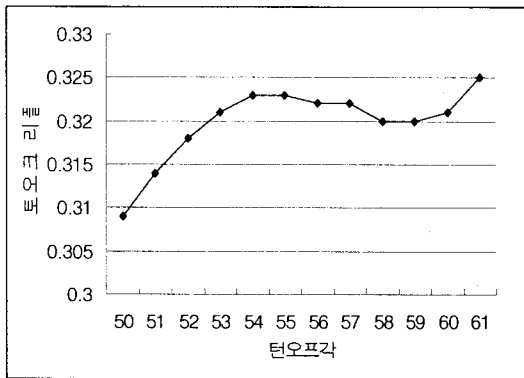


그림 5. 턴오프각 변화에 따른 토오크 리플 변화

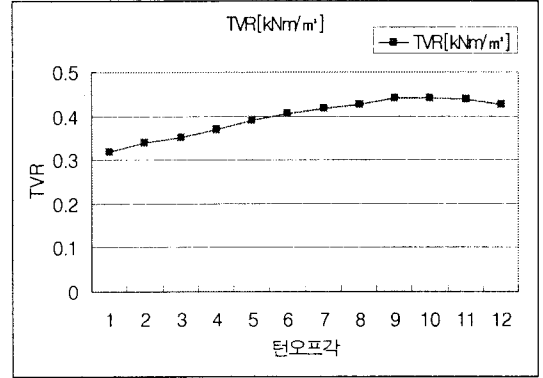


그림 6. 턴오프각 변화에 따른 회전자 체적당 토오크 변화

3. 결 론

송풍기의 성능을 결정하는 여러 가지 구성 요소중 구동용 전동기의 선택은 매우 중요하다. 일반적으로 유체 부하를 다루는 팬용 송풍기나 펌프용 전동기는 부하 토오크 특성이 속도의 제곱에 비례하여 증가한다. 이렇게 유체부하들은 운전시 급격한 부하 변동이 적고 큰 기동 토오크를 필요로 하지 않기 때문에 소용량의 경우 단상 유도전동기가 주로 사용되고 있다. 하지만 단상유도전동기는 효율이 낮고 제어가 용이하지 못하여 이를 보완하거나 대체하기 위해 단상 SRM의 개발이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 송풍기 구동용 단상 SRM을 설계하는 과정에서 단상 SRM의 가장 큰 단점인 불연속토오크 발생에 따른 토오크 리플을 저감시킬 수 있는 설계변수를 찾고, 이들 설계변수가 토오크 리플에 미치는 영향을 조사하였다.

앞으로는 선정된 설계조건을 정확한 특성을 예측하고 실제 제작에 앞서 최적의 설계파라미터를 선정하여야 할 것이다

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2002-B-036)주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motors and their Control", Magna Physics Publishing and Oxford University Press, London, 1993
- [2] J.R.Hendershot, T.J.E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Magna Physics Publications Oxford Science Publications, 1994
- [3] 이종한, 이은웅, 이충원, 오영웅, "송풍기 구동용 단상 SRM의 기본 특성 해석을 위한 자화곡선 측정", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.91-93, 2003.4
- [4] 이종한, 이은웅, "송풍기 구동용 단상 SRM의 극호 설계 조건", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.125-127, 2003.10