

전동차용 SRM의 상수변화에 따른 특성 해석

최경호, 김경식, 진명철
경북전문대학

A Characteristic Analysis of SRM for vehicle with Different Phase Number

Kyeong-Ho Choi, Kyeong-Sik Kim, Myung-Churl Chin
Kyungbuk College

ABSTRACT

This paper presents the design results and characteristic analysis of SRM. For vehicle power supply for adaptable design of the SRM, variable design parameters, such as stator and rotor laminations, winding details, pole numbers, and pole arcs, phases numbers are required. So, in this paper the SRM design results and the comparison of characteristics for vehicle power supply as phases changed are described.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 견고하며, 고속의 제작이 용이하여 최근 이동용 기구인 소형 드릴, 산업용 청소기등으로 개발이 진행되고 있다. 구조적인 문제점으로 작용해온 소음과 진동은 최근 많은 연구를 통하여 어느정도 감소되었으나, 아직도 미비한 상태이다. 따라서, 연구자들은 적절한 사용분야를 찾음으로서 단점을 보완하려고 하고 있다. SR전동기의 적절한 사용분야로는 최근 소음과 진동에 크게 영향을 받지 않으면서 타 전동기에 비해 견고하고 높은 효율의 장점을 살려서 차량 견인용 전동기나, 산업현장 소음이 심한 장소에 적당한 산업기기로서 사용이 고려되고 있으며, 또한 고정식이 아닌 이동식에도 견고성을 장점을 이용하여 많이 연구되어지고 있다.

특히, 최근에 차량용 구동장치로 많이 연구되고 있는데, 차량용 구동장치중에는 전기자동차용 주구동장치와 과거에 유압식을 전동구동 장치로 바꾸려고 하는 브레이크 구동시스템, 기타 차량용 전동기의 일부를 견고한 SR 전동기로 교체하려는 시도가 이루어지고 있다. 그중에서도 레저용 기구들의 활용도가 높아지면서 차량용 전원을 이용한 이동식 전동장치는 최근에 많이 개발되고 있는데 그 중에서는 소형 청소기, 펌프, 에어펌프등을 들 수 있다. 이들 전동기는 공통적으로 소형 경량으로 제작되어

야 하며, 특히, 차량의 진동에 의해서 발생하는 고장을 방지할 수 있어야 함으로 견고성을 우수한 전동장치를 사용하여야만 한다. 이러한 사용상의 특성을 고려할 때 SR전동기는 차량용 전원을 이용한 이동용 전동장치로서 가장 적합할 것으로 사료된다.

따라서, 본 논문은 이러한 차량용 전원을 이용한 SR 전동기의 최적 설계를 실시하였다. SR전동기의 설계는 타 전동기와 같이 많은 설계 변수를 고려하여 설계해야만 된다. 특히, 이동용 전동장치임으로 부가적으로 추가 되어야할 설계요소로는 중량과 부피를 꼭 고려해야만 한다. 본 연구에서는 12V용 차량용 전원을 이용한 SR전동기의 출력을 고정시키고 상수, 극수, 턴수등을 고려한 설계를 검토하였으며, 그 중에서도 특히 상수변화에 따른 SR전동기의 전기적 특성, 기계적 특성등을 비교하여 적절한 선택에 도움을 주고자 한다..

2. SR 전동기의 설계

2.1 전동기 설계요소

SR 전동기의 설계에 요구되는 조건으로는 토크, 속도, 출력, 온도등의 요소에 경험적인 요소를 부가하여 1차적으로 형상설계를 우선적으로 실시한다. 1차 설계후 제작 및 특성을 고려한 설계요소들의 변수들을 수정하여 최종 설계로 이어진다. 설계 방법은 자기회로법에 의해 쇄교자속, 인덕턴스등을 고려한 토오크 특성, 출력특성을 검토하여 계산하였다. 또한 최적의 전동기의 출력을 얻기 위해서는 제어부분을 고려하지 않을수 없다. 특히 SR 전동기는 비선형적이고, 불연속적인 토오크 특성으로 인하여 속도나 부하에 따라 제어방법도 다르게 하여야만 최적의 운전특성을 얻을 수 있다.

2.2 전동기 설계

본 논문에서는 사용된 SR 전동기의 사양은 차량용 전원인 12V를 주 전원으로 사용하며, 출력은

200W 급으로 설계 하였다. 설계요소들중 상수의 변화에 따른 특성을 알아보기 위하여 3상과 4상으로 각각 설계하여 결과치를 비교 하였다. 표 1은 SR전동기의 사양을 보여주고 있다. 그림 1은 초기 사양을 이용하여 형상설계를 완료한 후 2차 설계한 외형 치수를 나타낸다.

표 1 차량용 SR 전동기 주요사양
Table 1 Primary specifications of SRM for vehicle

정격용량	200 [W]
정격전압	12 [V]
정격회전수	2450 [rpm]
극수	6/4 8/6
상수	3 / 4

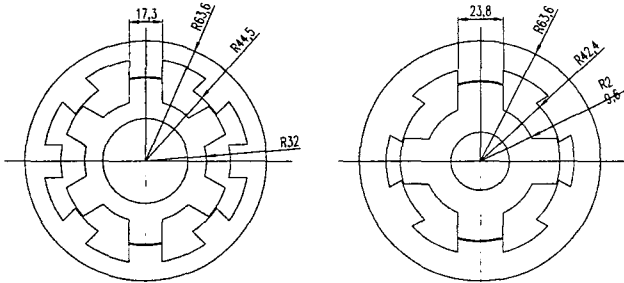


그림 1 200[W]급 3, 4상 전동기 외형 설계 치수
Fig. 1 Outer dimension of 3, 4-phase motor of 200[W]

설계결과는 SR전동기의 최적성능을 얻기 위하여 스위칭각을 변화 시켜 그 특성을 고려하였으며, 표 2는 상세 설계치를 보여주며, 각각 3상과 4상을 비교를 위하여 표로 도시화 하였다.

표 2 상수에 따른 설계 비교치
Table 2 Comparison of 3 and 4 phase design parameters

항 목	3상	4상
극당 턴수	21	28
극호각	33°	22.7°
극수	6/4	8/6
턴온각	-38	-26.5
턴오프각	-6	-4
역률	0.377	0.506
출력	210	210
손실	122.488	128.012
효율	63.2 %	63 %

3. SR 전동기의 특성분석

SR 전동기의 특성 분석을 위해서 SR 전동기의 형상을 그림 2와 같이 간이화 하여 전동기의 출력 특성을 알 수 있는 자기회로를 검토하여 전류에 따

른 쇠교자속, 인덕턴스, 토크등을 분석하였다. SR 전동기는 각상의 여자가 독립적으로 이루어지는 것을 우선전으로 고려하여 각 요소들을 산정하였다. 인덕턴스는 고정자와 회전자가 중첩이 일어나는 시점부터 정렬까지 계산하였으며, 고정자 권선의 앤드턴 효과를 무시한 2차원으로 해석하였다. 구조는 사각형 구조로 간이화하여 나타내었다. 쇠교자속 계산은 암페어의 법칙을 사용하여 회전자 요크와 고정자 요크가 겹치기 시작한 상태에서 두 부분으로 나누어서 계산하였다. 즉, 프린징 현상에 의해 발생하는 쇠교자속 λ_f 와, 회전자와 고정자 두 극에 직접적으로 쇠교되는 λ_m 을 각각 계산하여 전체 자속을 구하였다. 그림 2에서 n_{ser} 은 한 상에서 직렬회로수, N_p 는 권선의 턴수, l_{stk} 은 철심장의 길이, B_f 와 B_m 은 각각 공극과 철심에서 자속 밀도를 나타내고 있다. 그림 2와 같이 고정자와 회전자의 요크가 겹쳤을 때, 폐경로의 자속을 암페어 법칙을 적용하여 식(1)과 (2)를 얻을 수 있다^{[1]-[5]}.

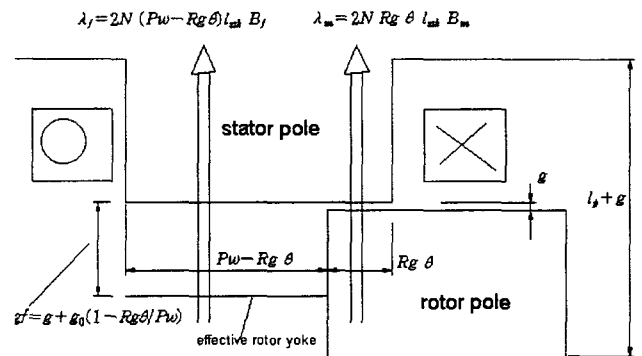


그림 2 고정자와 회전자가 겹칠 때 쇠교자속
Fig. 2 Flux-linkage when stator and rotor poles overlap

$$H_{Fe,m} \cdot 2 \cdot l_p + H_{g,m} \cdot 2 \cdot g = 2N_p \cdot I_p \quad (1)$$

$$H_{Fe,f} \cdot 2 \cdot l_p + H_{g,f} \cdot 2 \cdot gf = 2N_p \cdot I_p \quad (2)$$

여기서, $H_{Fe,m}$ 은 코어에서 자계의 세기, $H_{g,m}$ 은 공극에서 자계의 세기이며, l_p 는 회전자와 고정자의 전체 길이, g 는 에어갭, I_p 는 상전류를 나타낸다. 주 자속밀도를 구하기 위해서는 주어진 일정한 폴의 단면적에 대한 밀도임으로 공극에서의 자속 밀도와 철심의 자속밀도는 같다고 볼 수 있다. 마찬가지로 프린징현상에 의한 자속밀도를 구할 때도 같은 방법이 적용된다. B와 H의 관계는 매질의 특성에 의해서 정해진다. 공극에서의 주자속밀도 B_m 은 식 (3)으로, 요크에서 주자속 밀도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_m = \mu_0 H_{g,m} \quad (3)$$

$$B_m = \frac{\mu H_{Fe,m}}{1 + \frac{\mu |H_{Fe,m}|}{B_{sat}}} + \mu_0 H_{Fe,m} \quad (4)$$

여기서, μ 와 B_{sat} 는 매질에 의해서 결정되어지는 상수이다. 식(3)은 $H_{g,m} = B_m/\mu_0$ 이므로, 식(1)에 대입하면 식(5)와 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 다시 식(6)을 식(4)에 대입하면 식(7)과 같이 B_m 을 나타낼 수 있으며, B_m 을 풀면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{Fe,m} \cdot l_p + \frac{B_m}{\mu_0} g = N_p I_p \quad (5)$$

$$H_{Fe,m} = \frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \quad (6)$$

$$B_m = \frac{\mu \left(\frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \right)}{1 + \frac{\mu \left(\frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \right)}{B_{sat}}} + \mu_0 \left(\frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \right) \quad (7)$$

$$B_m(\theta, I_p) = \frac{\mu_0 N_p}{2(1 + \frac{g}{l_p})g} \left[\left(1 + \frac{2g}{l_p}\right) I_p + \frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p}\right)^2 + \frac{2l_{m2} B_{sat}}{\mu N_p} I_p + I_p^2} \right] \quad (8)$$

여기서, $l_{m1} = l_p + (\mu_r + 1)g$, $l_{m2} = l_p - (\mu_r - 1)g$ 이다. 그림 2에서 나타난 쇄교자속을 구하기 위한 두 식 $\lambda_f = 2N(Pw - Rg\theta)l_{stk} \cdot B_f$, $\lambda_m = 2N \cdot Rg \cdot \theta \cdot l_{stk} \cdot B_m$ 은 B field를 구함으로써 얻어질 수 있다. 권선의 병렬회로수 n_{ser} 을 고려하여 쇄교자속을 구하면 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_m(\theta, I_p) = \lambda_0 \frac{R_g \theta}{\left(1 + \frac{g}{l_p}\right)g} \left[\left(1 + \frac{2g}{l_p}\right) \frac{I_p}{n_{par}} + \frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p}\right)^2 + \frac{2l_{m2} B_{sat}}{\mu N_p} \frac{I_p}{n_{par}} + \left(\frac{I_p}{n_{par}}\right)^2} \right] \quad (9)$$

여기서, $\lambda_0 = n_{ser} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_p}{2} \cdot l_{stk} \cdot s_{tf}$, s_{tf} 는 코어의 점적률을 나타내며, θ 는 고정자 코어와 회전자 코어가 겹치기 시작하는 부분을 0° 로 하였다. 프런징 현상에 의한 쇄교자속 $\lambda_f = 2N(Pw - Rg\theta)l_{stk} B_f$

은 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\lambda_f(\theta, I_p) = \lambda_0 \frac{Pw - R_g \theta}{g_f} \left[\left(1 + \frac{2g_f}{l_p}\right) \frac{I_p}{n_{par}} + \frac{l_{\Lambda} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{\Lambda} B_{sat}}{\mu N_p}\right)^2 + \frac{2l_{p2} B_{sat}}{\mu N_p} \frac{I_p}{n_{par}} + \left(\frac{I_p}{n_{par}}\right)^2} \right] \quad (10)$$

여기서, $g_f(\theta) = g + g_0 \left(1 + \frac{R_g \theta}{P_w}\right)$,

$$l_{\Lambda} = l_p + (\mu_r + 1)g_f, \quad l_{p2} = l_p - (\mu_r - 1)g_f$$

$$g_0 = \frac{n_{ser}}{n_{par}} \mu_0 N_p^2 \frac{l_{stk} \cdot s_{tf} \cdot P_w}{L_{po}} - g \quad \text{이다.}$$

따라서 전체 SRM의 쇄교 자속은 주 자속과 플린징 현상에 의한 자속의 합으로 식(11)으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_\phi(\theta, I_p) = \lambda_m(\theta, I_p) + \lambda_f(\theta, I_p) \quad (11)$$

SRM의 전기적인 전압방정식은 식 (12)와 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_\phi = \frac{d\lambda_\phi(\theta, I_p)}{dt} = \frac{\partial \lambda_\phi(\theta, I_p)}{\partial I_p} \frac{dI_p}{dt} + \frac{\partial \lambda_\phi(\theta, I_p)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

$$V_\phi = L_\phi(\theta, I_p) \frac{dI_p}{dt} + K_\phi(\theta, I_p) \cdot \omega_m \quad (13)$$

여기서, $\omega_m = \frac{d\theta}{dt}$ 로 회전자의 기계적인 속도를 나타낸다. 식 (13)에서 상 인덕턴스는 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$L_\phi(\theta, I_p) = \frac{\partial \lambda_\phi(\theta, I_p)}{\partial I_p} = \frac{\partial \lambda(\theta, I_p)}{\partial I_p} + \frac{\partial \lambda_f(\theta, I_p)}{\partial I_p} \quad (14)$$

다음 각 그림 3, 4, 5, 6은 위 수식을 통해서 얻어진 3상과 4상 SR 전동기의 인덕턴스, 토오크 및 전류파형 및 전류인가에 따른 쇄교자속 파형 비교를 보여준다.

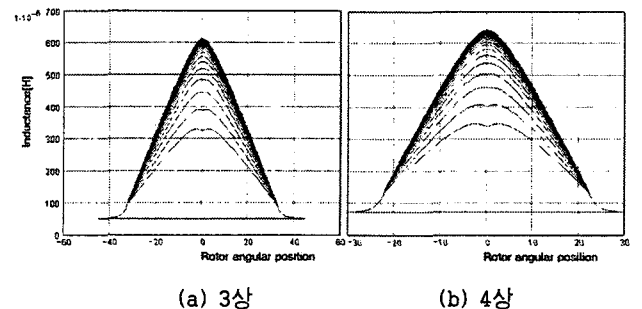


그림 3 인덕턴스 프로파일
Fig. 3 Inductance profile

참 고 문 헌

- [1] T.J.E Miler, *Switched Reluctance Motor and Their Control*, Oxford University Press, 1993
- [2] S.S. Murthy, Bhim singh, Virendra Kumar Sharma "A Frequency Response Method to Estimate Inductance Profile of Switched Reluctance Motor", IEEE, 1997
- [3] H.H.Moghbelli, G.E.Adams and R.G.hoft, " Prediction of the Instantaneous and steady state torque of the Switched Reluctance" IEEE, IAS. Val.1. 1988
- [4] D,A, Torrey, "An experimentally verified variable -reluctance machine model implemented in the saber circuit simulator", Electric Machines Power Syst., vol. 24, No.2, pp.199-209, Mar. 1996
- [5] Arthur. Radun, "Analytically Computation the Flux Linked by a Switched Reluctance Motor Phase When the Stator and Rotor Poles Overlap". IEEE, vol., 36, No. 4, pp.1996-2003, July. 2000
- [6] Arthur Radun "Design Considerations for the Switched Reluctance Motor", IEEE, vol., 31, No. 5, September /October 1995
- [7] G. E. Dawson, A.R. Eastham and J. Mizia " Switched Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite Element Analysis and Test Results" IEEE Transactions, Vol. IA-23, No. 3, May/June 1987, pp 532-537

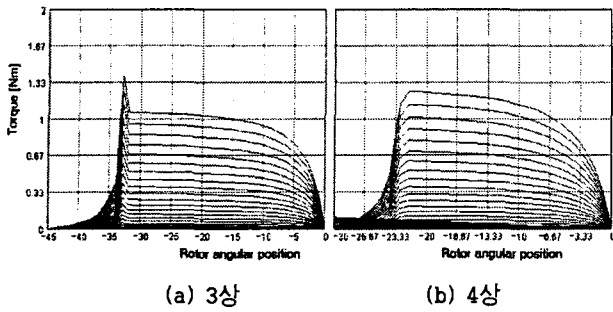


그림 4 토크 파형
Fig. 4 Torque waveforms

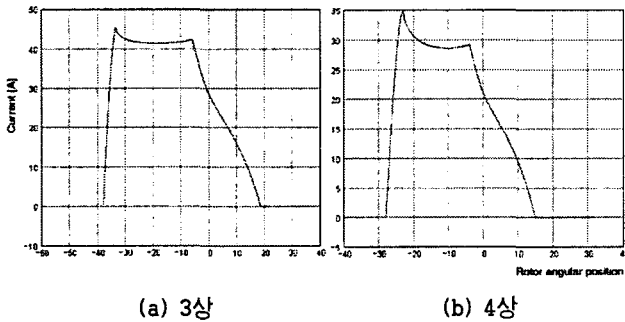


그림 5 전류 파형
Fig. 5 Current waveform

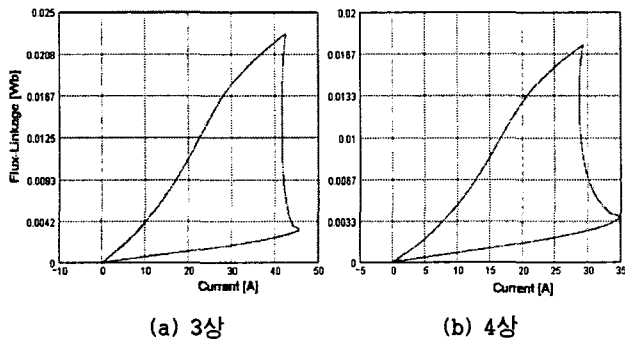


그림 6 쇠고 자속 파형
Fig. 6 Flux-linkage waveform

4. 결 론

최근 전기자동차나 일반 차량에 차량의 전원을 이용한 구동시스템들이 다양하게 개발되면서 그중에서도 특히, 차량의 진동에 의해서 발생하는 고장을 방지할 수 있어야 함으로 견고성이 우수한 전동장치를 사용하여야만 한다. 이러한 사용상의 특성을 고려할 때 SR전동기는 차량용 전원을 이용한 이동용 전동장치로서 적합할 것으로 판단되어 SR전동기를 설계하였다. 특히 설계 요소중 상수 변화에 따른 전동기의 특성을 검토하여 가장 적절한 시스템을 적용하는데 도움을 주고자 연구하였다.