

회전자 체적비를 이용한 브러시리스 전동기 설계 알고리즘 연구

이정종, 하재평, 홍정표, 임양수*, 허윤*
 창원대학교 전기공학과, 대우정밀(주) 모터사업부

A Study on Brushless Motor Design Algorithm Using Rotor Volume Ratio

Jeong-Jong Lee, Jea-Pyong Ha, Jung-Pyo Hong, Yang-su Lim*, Yun Hur*
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University,
 The Automotive Motor Division at Daewoo Precision Industries Co. LTD*

Abstract - This paper present the design algorithm using torque and rotor volume(TRV). And, this paper introduce that how to applying the 3-Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network(3D EMCN) and brushless motor circuit simulator. This algorithm is applied the design program, the design shape is compared with existed brushless motor.

1. 서 론

각종 구동시스템의 기능과 성능이 고도화, 고성능화됨에 따라 이들 시스템을 구동하기 위한 전동기의 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 전동기의 종류 또한 전원, 구조, 제어 기능 등에 따라 세분화, 전문화되고 있다. 또한, 반도체 기술과 자성재료 등의 발전에 힘입어 제품이 경박단소화, 장수명화하는 등 고성능화되면서 이의 응용분야 또한 매우 광범위해지고 있다. 시스템의 제어 방식도 기존의 유압기구나 기어, 링크등을 이용한 메카니즘에서 서보전동기를 이용한 전자제어로 변환되어 생산단가의 절감 및 메카니즘의 간소화뿐만 아니라 시스템 효율의 향상을 도모할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 다양한 시스템에 적합한 구동원으로서의 역할을 하기 위하여 전동기는 고성능화, 고효율화, 회전속도의 양극화, 복합화되고 있는 추세다. 따라서, 이러한 소형 정밀모터나 서보용 전동기의 수요가 매년 기하급수적으로 증가하므로 이들 수요에 대응한 신속한 제품의 개발이 절실히 요구되고 있다. 브러시리스 전동기(Brushless DC or AC Motor)는 최근 고정밀 시스템의 발전으로 수요는 급증하고 있으며, 각종 멀티미디어기기, 컴퓨터 주변기기, 공장자동화를 위한 자동화기기 및 공작기기등을 비롯한 정밀기기 분야의 핵심 구동원으로 그 중요도가 높아지고 있다[1]. 또한, 최근 들어 소음, 분진, EMI 등의 환경문제로 인하여 기존의 브러시 쿼터형 직류전동기들이 브러시리스 전동기로 급속히 전환되고 있다. 따라서, 브러시리스 전동기의 수요가 매년 기하급수적으로 증가하므로 이들 수요에 대응한 신속한 제품의 개발에 대처하고, 전동기의 성능 및 효율의 최대화를 위해서는 정확하고 빠른 설계가 필요하다. [1]

전동기를 생산하기 위한 설계 과정은 구동 전원과 요구 사양을 만족 할 수 있는 치수 결정 과정과 결정된 치수로부터 특성해석을 수행하여 성능을 예측함으로써 이루어진다. 이러한 일련의 과정은 수년 전부터 컴퓨터를 이용하여 신속한 처리를 가능하게 하였다. 또한 특성해석을 수행하는 여러 방법들이 개발되어 유한요소해석에 비하여 빠른 결과를 도출하고 있다.

본 논문에서는 전동기 설계/특성해석 프로그램 개발에 사용되는 회전자 체적비(TRV)를 이용한 설계 방법을 소개하고 3차원 등가자기회로망법(3D EMCN)과 구동 드라이버 시뮬레이션을 설계 단계 적용 사례를 보였다. 설계 결과의 타당성을 확보하기 위하여 설계 프로그

램을 활용하여 기존의 설계 전동기와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 회전자 체적비를 이용한 회전자 치수 결정

회전자 체적비를 이용한 설계 방법은 이미 유럽등 국내에서 많이 사용하는 것으로 알려져 있다. 일본과 국내에서는 장하분배법을 많이 사용하고 있다. 하지만 장하분배법의 경우 장하비의 설정에 경험치를 요구하고 초보자가 설계하기에는 어려움이 많다. 하지만 회전자 체적비를 이용할 경우 개략적인 전동기 특성의 예측이 쉽고, 설계 치수의 변경이 용이하다. 전동기 설계를 위한 자기장하 M 은 수식 (1)과 같이 정의된다.

$$M = \frac{p\phi}{NI} \tag{1}$$

여기서, p :극수, ϕ :1극당 자속량, N :전기자 총 턴수, I :입력 전류 이다. $p\phi$ 를 자기장하라 하고, M 를 전기장하라고 한다. 장하비는 전기장하와 자기장하의 비로 정의된다. 설계를 위하여 장하비 M 을 설정하여야 하지만, 설계 수식이 복잡하여 초보자의 경우나 어느 정도 숙련자라 하더라도 복잡한 수식계산에 필요한 시간이 요구된다.

회전자 체적비를 이용한 설계는 TRV (Torque/Rotor Volume)를 이용하여 회전자의 체적 결정을 가능하게 한다. 장하비에 비교되는 TRV 는 수식(2)와 같이 정의된다.

$$TRV = \frac{T}{\pi R^2 L} = \frac{4T}{\pi D^2 L} \tag{2}$$

여기서, T :발생토크, R :회전자 반경, D :회전자 직경, L :회전자 길이를 나타낸다.

전동기 설계시, 발생토크는 결정되어 있으므로 TRV 를 결정하면 회전자 체적을 결정 가능하다. 식(3)과 같이 회전자의 길이와 직경의 비를 나타내면, 식(2)와 연립하여 길이와 직경을 산정 할 수 있다.

$$S = D/L \tag{3}$$

식(4)는 길이와 직경의 비 S 를 이용하여 회전자 직경과 토크와의 관계를 나타내었다.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4TS}{TRV\pi}} \tag{4}$$

따라서 회전자의 정격 토크, 길이와 직경의 비, TRV 를 설정하면 직경과 길이를 확보 할 수 있다. 표1은 각종

전동기에 사용되는 TRV를 나타내었다[2].

2.2 브러시리스 모터 설계 알고리즘

전동기는 회전자와 고정자의 발생 자속에 따라 그 특성이 결정되어 진다. 회전자에 영구자석을 포함하는 브러시리스 모터의 경우 TRV의 값이 변경되면 회전자에 의한 자속량이 변경되므로 고정자의 권선 사양을 변화하여 원하는 출력의 전동기 설계가 가능하다. 또한 TRV를 이용한 설계라 하더라도 전동기의 특성을 예측할 수 있는 값을 산정하는 방법은 기존의 해석 방법과 유사하다. 하지만 TRV를 이용하여 설계하는 가장 큰 장점은 기존의 장하분배법에 비하여 전동기의 체적을 설계 초기 단계에서 설정 가능하므로 설계자의 편의를 도모할 수 있다. TRV를 이용한 설계 과정을 그림 1에 나타내었다. 설계 사양이 주어지면, 인가전류와 입출력 파라미터를 산정한 후, TRV를 설정하고 회전자 크기를 결정한다. 회전자 크기를 산정 후 영구자석의 두께를 산정해야 하지만 영구자석 두께를 결정하기 위한 자속량이 아직 결정된 단계가 아니다. 따라서 영구자석의 두께를 회전자의 크기와 영구자석 사양을 검토하여 영구자석의 동작점을 만족할 수 있는 영구자석 크기를 설정한다. 영구자석의 크기가 결정되면 공극(Airgap)을 설정하고 고정자의 치수를 임의의 큰 값으로 설정하여 극당 자속량을 산정한다. 이 때 극당 자속량을 산정하는 방법은 여러 가지 방법이 있다. 예를 들면, 대표적으로 공간고조파를 이용한 자속 해석이나 등가자기회로법을 들 수 있으며 최근 상용 프로그램으로 널리 알려진 유한요소해석을 통한 자속 해석이 가능하다. 본 논문에서는 3차원 등가자기회로망(3D EMCN)을 이용한 자기회로 해석 방법을 이용하여 공극의 자속량과 오버행 효과를 고려하였다. 극당 자속량이 산정되면 전기자 코일의 턴수, 코일의 단면적을 결정하고, 자기회로를 구성하는 고정자의 치폭과, 요크의 크기를 결정한다. 설계 과정에서 가장 오차가 많이 날 수 있는 부분은 극당자속량의 평가로 자속량의 평가는 매우 중요하다.

2.3 3D EMCN을 이용한 자속량 산정

브러시리스 전동기 설계 단계에서 3D EMCN은 영구자석에 의한 공극의 자속량을 산정하는데 이용된다. 3D EMCN은 해석영역을 요소분할하여 수치연산을 수행하는 방법은 유한요소해석과 유사하지만 이론은 간단한 등가자기회로법과 동일하여 3차원이지만 해석시간이 짧은 장점을 가지고 있다. 그림 2는 3D-EMCN을 이용하여 전동기 파라미터를 산정하는 과정을 나타내었다[3-4].

표 1 전동기 종류에 따른 TRV 설정

모터 종류	TRV (kNm/m3)
Small totally-enclosed motors (Ferrite) 소형 통풍구가 없는 모터	7-14
Totally-enclosed motors (Sintered Rare Earth or NdFeB)	14-42
Totally-enclosed motors (Bonded NdFeB)	21
Integral-hp industrial motors	7-30
High-performance servomotors	15-50
Aerospace machines	30-75
Large liquid-cooled machines	100-250

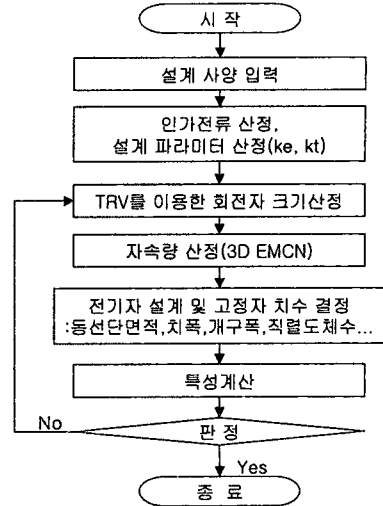


그림 1 TRV를 이용한 전동기 설계 수순

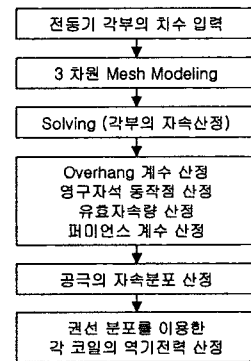


그림 2 3D EMCN을 파라미터 산정

2.4 회로 시뮬레이션을 통한 동특성 해석

대부분의 3상 브러시리스 전동기의 드라이버회로는 그림 3과 같다. 구형파 구동방식과 정현파 구동방식은 각상의 스위칭 상태가 변한다. 이 때 전동기 내부의 결선은 Y-결선일 때 그림4와 같으며, 각 상의 전압방정식은 식(5)와 같다 [1].

$$V_i = I_i R_i + L \frac{dI_i}{dt} + E_i \quad (i = 1 \sim 3) \quad (5)$$

여기서, V_i 각상의 인가전압, I_i 각상의 전류, L 상인덕턴스, E_i 는 각상의 역기전력으로 인가전압 역기전력, 인덕턴스는 2.3 절에서 산정 가능하다. 따라서 인가전류는 각상을 표현한 식(5)의 미분방정식의 해를 구함으로써 시간에 따른 순시 전류를 계산할 수 있다. 계산된 각상의 입력 전류로부터 기계적인 출력은 식(6)과 같이 산정된다.

$$P = 3E_i I_i \quad (i = 1, 2 \text{ or } 3) \quad (6)$$

이러한 회로 시뮬레이션은 브러시리스 전동기가 구형파

또는 정현파 구동시 각 상 스위칭 시간만 변화하고 해석 방법은 동일하므로 어떠한 3상 브러시리스 전동기에도 사용가능하다.

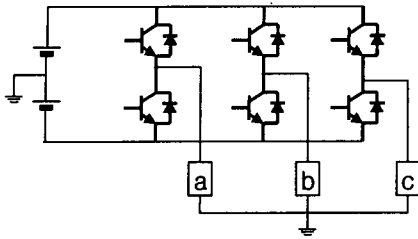


그림 3 3상 브러시리스 전동기 드라이버 회로도

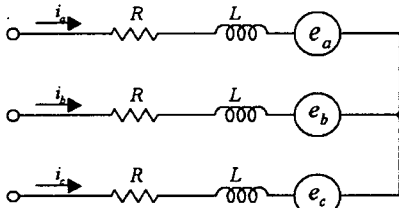


그림 4 전동기 내부의 파라미터

2.5 프로그램 구성 및 설계 결과

회전자 체적비를 이용한 알고리즘의 타당성을 확보하기 위하여 실제 프로그램을 구성하였다. 설계자가 빠른 결과 확인을 가능하게 하기 위하여 Graph기능과 CAD 기능을 추가되었다. 적용대상은 기존에 장하분배법으로 설계된 전동기를 대상 모델로 선정하였다. 그림 5는 회로 모델링을 통한 입력 전류를 나타내었다. 구동 방식은 구형파를 사용하여 120도 도통형으로 구성되었다. 그림 6는 기존 전동기 형상과 설계 프로그램을 활용한 형상을 나타내었다. 이 때 TRV는 $28(\text{kNm}/\text{m}^3)$ 로써 다소 큰 값으로 설계되었다. 그 원인은 전동기의 극수가 많고 속도는 저속으로 고투크 전동기 형태로 구성되었다. 전기자 및 회전자 Yoke는 설계 프로그램에서 특성 만족을 위한 최소한의 크기로 설정되었으므로 기존에 설계된 전동기와 약간의 차이를 가진다. 그림 7은 기존에 설계된 전동기와 설계 프로그램을 활용한 설계 결과를 나타내었다. 정격지점을 기준으로 설계하였으므로 정격 지점인 $65(\text{kgf}\cdot\text{cm})$ 인 지점에서는 만족하지만 무부하 상태에서는 차이를 보인다.

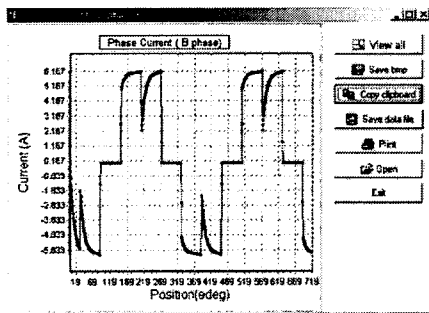
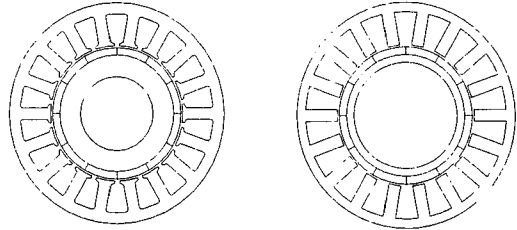


그림 5 회로 시뮬레이션을 이용한 입력 전류 해석



(a) 기존 전동기 형상 (b) 설계 프로그램 활용

그림 6 설계결과 형상 비교

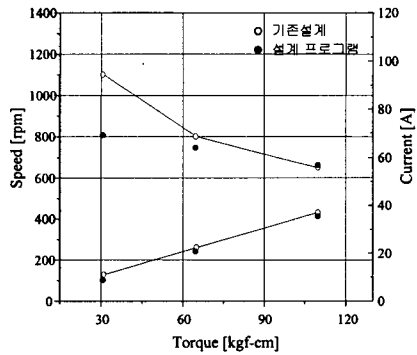


그림 7 전동기 특성 비교

3. 결 론

본 연구에서는 전동기 설계 프로그램에 적용되는 알고리즘 및 특성해석 방법을 소개하였다. 전동기 설계의 경우 입력 변수가 많고 초기 형상 결정의 조건을 설계 프로그램에 반영하는 방법이 어려움이 많다. 회전자 체적비를 활용한 설계 방법은 초기 설계 외에 치수 제약조건이 있을 경우 유용하게 사용될 수 있다. 전동기가 시스템에 장착될 경우 대부분 전동기의 치수 제약조건을 설정하므로 회전자 체적비를 이용할 경우 유용하게 사용될 수 있다. 또한 본 논문에서는 이러한 해석 방법의 타당성을 설계 프로그램을 통하여 확인하고 3D EMCN과 구동 드라이버회로 해석을 통하여 형상 치수를 비교하였다. 해석결과에서는 비교적 기존의 장하분배법을 이용한 전동기와 유사한 전동기 치수를 확보 할 수 있었다. 본 논문에서 사용한 설계 방법은 각종 전동기에서 설계의 한 방법으로 유용하게 사용 될 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 이재건, 박창수, 이정중, 조한익, 홍정표, 이근호, "구동방식을 고려한 브러시리스 전동기의 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회, pp589-591, 2002
- [2] J. R. Hendershot Jr, JJE Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Magna Physics Publications, 1994
- [3] 이정중, 진영우, 김영관, 조영식, 홍정표, "3차원 등가자회로방법을 이용한 초전도 전동기의 자속밀도 분포해석", 대한전기학회 하계학술대회, pp733-775, 2002
- [4] 허진, 홍정표, 현동석, "3차원 와전류 해석을 위한 등가자회로방법의 개발", 전기학회논문지, Vol. 51, No. 5, pp228-233, 2002