

다층 매입형 영구자석 전동기의 리플현상을 고려한 d,q축 쇄교자속 계산

우동균, 광상엽, 서장호, 정현교
서울대학교 전기,컴퓨터공학부

Calculation method of d,q axis linkage flux considering ripple characteristics in multilayer-buried IPMSM

Dong-Kyun Woo, Sang-Yeop Kwak, Jang-Ho Seo and Hyun-Kyo Jung
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - It is important to understand the relationship accurately between linkage flux distributions and machine characteristics for better design of multilayer-buried interior permanent magnet synchronous machines(IPMSM). This paper presents a improved calculation method for linkage flux of multilayer-buried IPMSM. From the analysis result, The proposed method shows that the calculated d,q linkage flux reflects a electromagnetic characteristic well in analysis model.

전류 조합에서의 계산 쇄교자속 값들이 정확하다면 식 (1)을 통해 계산된 토크 T_e 값이 맥스웰 스트레스 텐서법에 의해 계산된 토크 T_s 와 동일해야 한다.

1. 서 론

돌극비가 큰 다층 매입형 영구자석 전동기의 경우 자기저항 토크를 극대화하기 위한 회전자의 구조로 인하여 해석영역에서의 자속밀도 값과 그 공간 분포를 정확하게 예측할 수 없고, 철심의 포화 현상이나 전기자 반작용등으로 발생하는 비선형적인 특성을 고려하기 힘든 점이 있다[1]. 이러한 특성을 갖는 다층 매입형 영구자석 전동기는 다양한 전류조합에 따른 자기포화 양상이 매우 심하게 변화하기 때문에 설계 단계에서부터 기기의 성능을 예측할 수 있는 정확한 제어정수 추출기법이 요구된다[2].

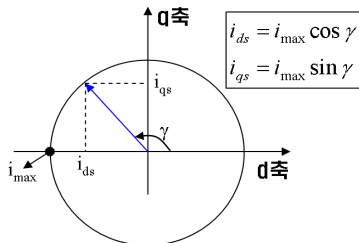
따라서 본 논문에서는 기존의 전류 조합별 d, q축 쇄교자속 계산 방법의 문제점을 기술하고 쇄교자속의 리플 현상을 고려한 개선된 제어정수 추출기법을 제안하였다.

2. 본 론

다층 매입형 영구자석 전동기의 전류조합별 발생 토크는 (1) 식과 같다.

$$T_e(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_{ds}(i_{ds}, i_{qs})i_{qs} - \lambda_{qs}(i_{ds}, i_{qs})i_{ds}] \quad (1)$$

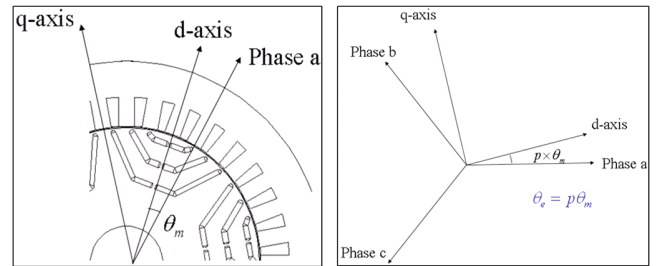
d, q축 쇄교자속 $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 는 d, q축 전류 조합에 따라 다른 값들을 갖기 때문에 함수의 형태로 나타내었고, 본 논문에서는 d, q축 전류 i_{ds}, i_{qs} 는 전류의 피크값 i_{max} 와 전류각 γ 로 표현하였으며 이들 사이의 관계는 그림 1에 나타내었다.



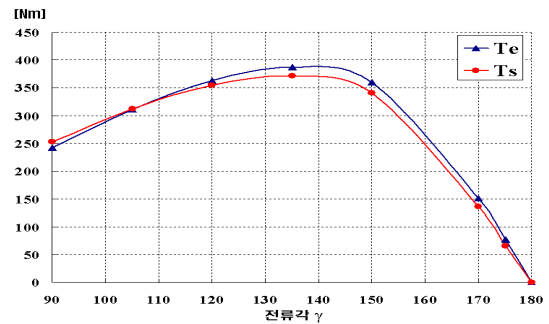
〈그림 1〉 d, q축 전류 i_{ds}, i_{qs} 와 전류각 γ 사이의 관계

2.1 기존 제어정수 계산방법의 문제점

기존의 쇄교자속 계산방법에서는 그림 2에서와 같이 회전자의 위치를 회전자의 d축 위치와 고정자 a상 축간의 기계각 θ_m 을 고정시킨 상태에서 전류 피크값 i_{max} 와 전류각 γ 만을 변화시켜 가면서 전 전류 영역에서의 d, q축 쇄교자속을 계산하였다. 해당



〈그림 2〉 회전자 d축 위치에 따른 고정자 a상 축과의 관계



〈그림 3〉 전류각에 따른 토크값의 변화($\theta_m = 0^\circ, i_{max} = 640A$)

그림 3에서 시험용 전동기에서의 전류각에 따른 T_e 와 T_s 의 값들을 비교하였다. 전류각에 따라 둘 사이에 값의 차이가 존재함을 알 수 있으며, 그림 4에서 보는바와 같이 회전자가 어떤 위치에 놓여 있는지에 따라라도 계산 오차를 보이는 것을 알 수 있으며 이러한 관계를 표 1에 정리하였다. 이는 기존의 해석방법이 전동기의 전자기적 특성을 정확히 반영하지 못하고 있음을 의미한다.

〈표 1〉 전류각에 따른 토크 리플 특성

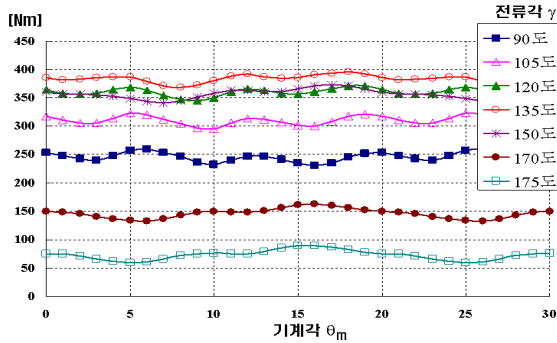
전류각 [°]	90	105	120	135	150	170	175
T_{s-avg}	244.5	309.6	360.3	384.7	358.4	148.0	74.9
T_{s-diff}	29.2	26.6	26.1	26.8	31.7	30.5	30.6
토크리플[%]	12.0	8.6	7.2	7.0	8.8	20.6	40.8

T_{s-avg} : 토크리플 한 주기에서의 평균 토크값

T_{s-diff} : 토크리플 한 주기에서 토크값의 최대값과 최소값의 차

다층 매입형 영구자석 전동기는 입력전류의 고조파성분이나 자계포화 현상에 의한 비선형성과 회전자 위치에 따른 자기저항의 변화로 인해 발생하는 인덕턴스의 고조파 성분으로 부하 인가 시에도 발생 토크의 리플이 발생한다. 따라서 전류 인가시 발생하는 전동기의 토크 T_s 는 토크리플 한 주기 동안의 평균 토크 값

T_{s-avg} 로 나타내야 하며, 토크리플에서와 마찬가지로 쇄교자속 계산시에도 회전자에 따라 각 상 권선에 쇄교하는 자속량 역시 리플현상이 발생할 것을 예상할 수 있으며 이를 고려한 λ_{ds} , λ_{qs} 의 계산이 필요하다.



〈그림 4〉 전류각에 따른 토크 리플 특성 ($i_{max}=640A$)

2.2 리플현상을 고려한 쇄교자속 계산법

시험용 전동기의 회전자를 1° 씩 회전시켜 가면서 d, q 축 쇄교자속의 변화를 그림 5,6에 각각 전류각 별로 나타내었으며, 표 2에 전류각에 따른 d, q 축 쇄교자속의 리플 특성을 토크리플과 비교하였다. 쇄교자속이 토크리플과 같은 주기를 갖고 리플 특성을 가지고 있으며, 각 전류각 별 쇄교자속의 최대값과 최소값의 위치가 다를 수 있다. 여기서 회전자 내부의 d 축 자기저항이 q 축 자기저항 보다 매우 크기 때문에 회전자 위치에 따른 d 축 자로의 변화가 상대적으로 q 축 자로에 비해 큰것에 기인하여 q 축 쇄교자속에 비해 d 축 쇄교자속의 리플현상이 심한 것을 알 수 있다. 표 2에서 알 수 있듯이 전류각에 따른 토크리플의 변화와 d, q 축 쇄교자속의 리플변화가 비슷한 모습을 나타냄을 알 수 있고, 따라서 전류조합에 따른 정확한 d, q 축 쇄교자속의 계산을 위해서는 회전자에 따른 리플특성을 고려한 쇄교자속의 평균 값을 고려해야 함을 알 수 있다. 리플 현상을 고려한 전류조합에서의 쇄교자속은 아래의 식 (2),(3)과 같이 계산할 수 있다.

〈표 2〉 전류각에 따른 토크 리플 특성

전류각 [°]	90	105	120	135	150	170	175
λ_{ds} 리플[%]	4.5	6.0	7.0	6.7	10.7	22.8	25.9
λ_{qs} 리플[%]	1.9	1.3	1.1	0.8	2.1	6.9	13.5
토크리플[%]	12.0	8.6	7.2	7.0	8.8	20.6	40.8

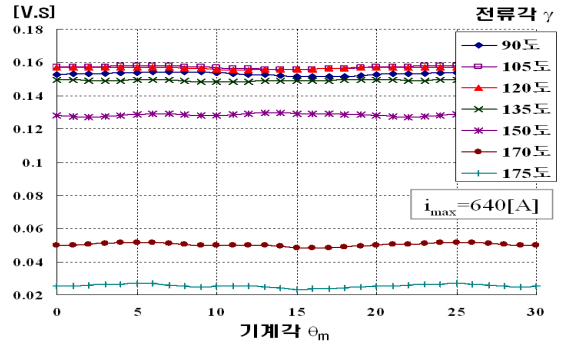
$$\lambda_{qs}^{\dagger}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\sum_{\theta_m=0}^{N-1} \lambda_{qs}(i_{ds}, i_{qs}, \theta_m)}{N} \quad (2)$$

$$\lambda_{ds}^{\dagger}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{\sum_{\theta_m=0}^{N-1} \lambda_{ds}(i_{ds}, i_{qs}, \theta_m)}{N} \quad (3)$$

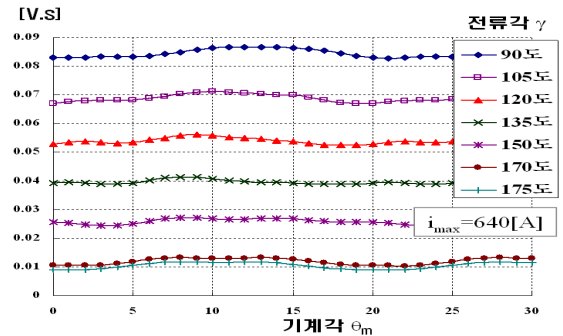
쇄교자속의 평균값들을 이용하여 다층 매입형 영구자석 전동기의 토크 값을 식 (4)으로 표현 할 수 있다.

$$T_{e-avg}(i_{ds}, i_{qs}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_{ds}^{\dagger}(i_{ds}, i_{qs})i_{qs} - \lambda_{qs}^{\dagger}(i_{ds}, i_{qs})i_{ds}] \quad (4)$$

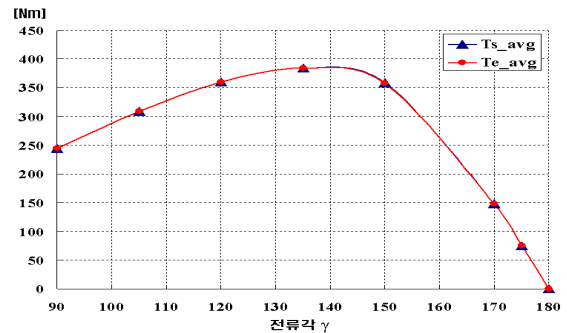
맥스웰 스트레스 텐서법에 의해 계산된 토크리플 한 주기동안의 평균 토크값 T_{s-avg} 와 쇄교자속의 평균값을 통해 계산된 T_{e-avg} 를 그림 7에 나타내었다. 두 값이 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이는 제안된 쇄교자속 계산법이 다층 매입형 영구자석 전동기의 전자기적특성을 정확하게 반영하고 있음을 알 수 있다.



〈그림 5〉 기계각에 따른 d, q 축 쇄교자속 리플특성



〈그림 6〉 기계각에 따른 d, q 축 쇄교자속 리플특성



〈그림 7〉 전류각에 따른 T_{s-avg} 와 T_{e-avg} 의 비교

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 쇄교자속 계산방법의 문제점을 기술하고, 쇄교자속의 리플현상을 고려한 개선된 제어정수 추출 기법에 대해서 제안하였다. 이 방법은 전류조합에 따른 정확한 쇄교자속의 계산을 위해 회전자에 따른 리플특성을 고려한 평균값을 고려함으로써, 매입형 영구자석 전동기의 전자기적 특성을 정확히 반영하는 것을 확인 할 수 있었다. 제안된 해석방법은 시험용 전동기에서의 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] T. J. E. Miller and J. R. Hendershot Jr., *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives Oxford, U.K., 1989.*
- [2] B.-H. Bae and S.-K. Sul, "Practical design criteria of interior permanent magnet synchronous motor for 42 V integrated starter-generator," in *Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf., vol. 2, 2003, pp. 656-662.*