한국교통대학교 융·복합기술연구소 논문집, Vol. 13, No. 1, pp. 7-12 (2023)
https://doi.org/10.22710/JICT.2023.13.1.007
Copyright ⓒ 2023 ICT
ISSN : 2233-8667

마그네틱 기어드 모터의 자석 기어 자기력 해석 및 설계

정 광 석*

한국교통대학교 기계자동차항공공학부 기계공학전공

Magnetic Force Analysis and Design Methodology of Magnetic Gear in the Magnetic Geared Motor

Kwangsuk Jung*

Department of Mechanical Engineering, Korea National Univ. of Transportation 27469, Korea
(Received 2023.10.10. / Accepted 2023.11.15.)

Abstract : The built-in motor with an integrated magnetic gear can realize high torque without a separate reduction device. In this paper, the main design parameters of the magnetic gear constituting the magnetic geared motor are derived and the sensitivity analysis results according to these design parameters are discussed. In particular, processing and assembly issues of modulators sandwiched between rotating bodies are discussed, and loss and magnetic force characteristics of various types of modulators are introduced. Since the modulator, which plays a key role in converting the torque of the magnetic gear, is desirable to have a separate form, it is inevitable to add a non-magnetic support to add torsional stiffness according to high-speed rotation, so the effect of this is also analyzed.

Key words : Core loss(코어손실), Finite element analysis(유한요소해석), Harmonic modulator(고조파 조절기), Magnetic geared motor(자석기어모터) , Spatial harmonic analysis(공간 고조파 해석)

1. 서 론

영구자석 동기 모터(PMSM; Permanent magnet synchronous motor) 또는 브러시리스 직류 모터(BLDC; Brushless DC motor)와 같이 영구자석(이하 PM) 레이어를 회전자로 갖는 전동기에서 토크 증폭을 위해 기계식 감속기를 사용하는 대신, 별도의 PM 레이어를 추가하여 모터내 PM 레이어와 자기 공유 결합을 통해 기계적 접촉없이 토크 증폭이 가능하다. 이러한 모터를 일반적으로 마그네틱 기어드 모터(MGM; Magnetic geared motor)라 부른다.[1-3] MGM에서 스테이터 코일은 외측에 놓이며 중심방향으로 모터로서 기능하기 위한 PM 레이어와 그 내측으로 고조파 조절기 그리고 제일 안쪽에 또 하나의 PM 레이어가 배치된 형태를 갖는데 따라서 모터와 접하는 PM 레이어가 고속측 로터의 역할을 그리고 내측 PM 레이어는 저속측 로터의 역할을 한다. 일반적인 MG(Magnetic gear)의 설계 방법은 여러 문헌에서 제시되어있으나[4,5] MGM과 같이 동심 내측 방향으로 토크 증폭이 되는 시스템에서의 MG 설계 방법론에 대한 연구 결과는 극히 제한적이다.[6] 특히 실제 시스템 구현 측면을 고려하면, 내측에서 동시에 회전하는 2중 로터로 인해 모듈레이터의 비틀림 강성 문제가 대두되고 있으며 이를 고려한 모듈레이터 개선이 요구된다.[7]

본 논문에서는 MGM에서 토크 증폭 역할을 하는 동심 MG의 설계 변수에 따른 민감도 해석 결과를 논의하고 분리된 모듈레이터에서의 비틀림 강성을 고려한 모델에 대한 해석상의 손실 부분과 모델별 비교 결과를 소개한다.

*Corresponding author, E-mail: ksjung@ut.ac.kr.

2. 시스템 개요 및 동작원리

MGM의 3차원 레이아웃을 Fig. 1에 그리고 시스템의 단면도를 Fig. 2에 나타내었다. MGM은 PM 어레이를 활용해야 하므로 동기 전동기 기반의 토폴러지가 필수적이다. Fig. 1은 동기 모터인 PMSM 내부에 MG를 포함한 형태이며 스테이터 코일 전원 인가에 따라 고속측 PM 어레이가 회전하면 그 안쪽 고조파 모듈레이터를 통해 고속측 PM 어레이의 자기장이 필터링되고 필터링된 자기장은 최종적으로 맨 안쪽 저속측 PM 어레이와 자기 결합을 한다.

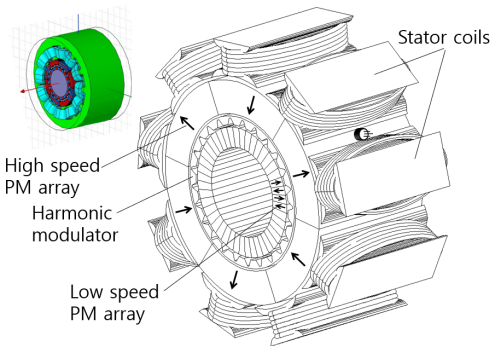

Fig. 1 Overall sample layout of the magnetic geared motor composed of three pole PMSM and concentric magnetic gear

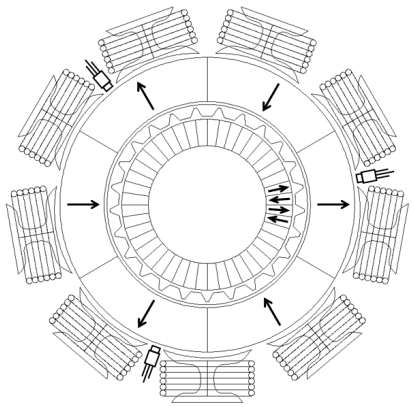

Fig. 2 Cross-sectional diagram of Fig. 1 showing a reducing ratio of 7.33/1

고속측 PM 어레이의 극수를 N_H, 고조파 모듈레이터의 극수를 N_M, 저속측 PM 어레이의 극수를 N_L이라 하면 MG의 감속비 G_L은

$$G_L = \frac{N_L}{N_H} \tag{1}$$

이다. 단, MG로서 기능하기 위해 $N_M = N_H + N_L$의 구속조건을 갖는다. 이때 저속측 PM 어레이를 고정시키고 모듈레이터를 저속측 로터로 설정해도 무방한데 이때 감속비 G_M은

$$G_M = \frac{N_M}{N_H} \tag{2}$$

가 된다. 이러한 관계를 Fig. 2에 적용하면 그림에서 N_H, N_M, N_L은 각각 3, 25, 22이므로 G_L은 7.33/1 그리고 G_M은 8.33/1이 된다. G_M이 상대적으로 크기 때문에 출력측으로 모듈레이터가 적절해 보이나 실제 하드웨어 구축시 해결해야 할 기술적 이슈가 있다.

3. 마그네틱 기어의 민감도 분석

Fig. 1과 Fig. 2의 내측 MG와 같이 고속측이 외부에 저속측이 내부에 있는 MG와 구조가 정반대인 MG에 대한 설계 변수 영향 특성은 해석적, 실험적으로 분석된 사례가 있다.[4] 본 장에서는 Fig. 3에 제시된 Inward MG에 대한 설계 변수와 이의 민감도 분석을 논의한다.

대상 MG는 4극의 고속측 PM 어레이, 19극의 모듈레이터, 15극의 저속측 PM 어레이로 구성되어있는데 핵심 변수로 모듈레이터의 두께, 개방비 그리고 외측

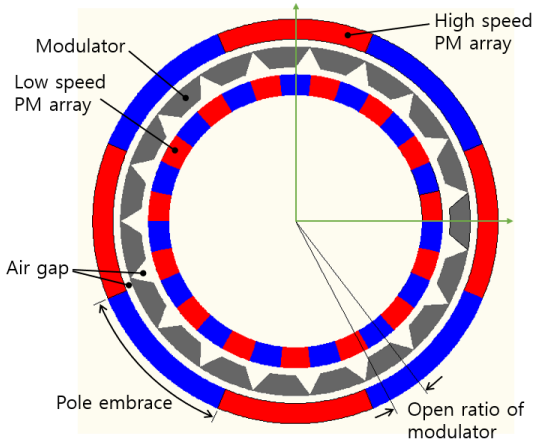

Fig. 3 Inward magnetic gear showing part notation and main parameter definition

PM의 pole embrace, 공극 크기 등을 고려할 수 있다. 실제 해석에 활용된 구성 요소의 제원은 고속측 PM의 경우 외경 40mm, 두께 4mm이고 모듈레이터는 외경 34.5mm, 두께 4mm이며 내측 PM은 외경 29mm, 두께 4mm이다. PM은 Nd35계열 자석이고 모듈레이터는 50PN290의 포스코 전기강판 재질을 선정하였다. 해석 결과는 상업용 전자기 유한 요소 해석 툴인 Maxwell 18.0을 이용하여 도출된 값들이다.

우선, MG의 동작 특성을 확인하기 위해 고속측이 10도씩 회전할 때 모듈레이터 내측 공극에서의 반경 방향 자기장 값(MF)을 원주 방향을 따라 해석하면 Fig. 4와 같다. 이때 고속측 회전에 연동하여 저속측 역시 감속비(15/4)의 비율로 회전시킨다. 계산된 자기장 값을 활용하여 공간 고조파 해석(SHA; Spatial harmonic analysis)을 수행한 결과를 자기장 선도 아래에 나타내었다. PM 어레이가 회전함에 따라 상대적인 결합 구조가 변화함에도 자기장 패턴과 크기는 크게 다르지 않으며 핵심 포인트는 고조파 분석을 통해 얻은 그래프에 4극 성분과 15극 성분이 가장 지배적으로 생기는 점이다. 고속측 PM이 4극이므로 모듈레이터를 통과한 후에도 해당 4극은 주성분이 되지만 이러한 4극 성분이 19극의 모듈레이터를 통과하며 그 차에 해당하는 15극 성분이 2차 주성분으로 생성되고 이러한 15극 성분이 저속측 PM 어레이와 동기화되는 것이다. 회전과 무관하게 4극 성분은 대략 0.2T, 15극 성분은 0.09T를 유지함을 확인할 수 있다. 이외 발생하는 특정 극 성분은 주극 성분의 고조파 성분이며 자기력 발생에 거의 영향을 미치지 않는다.

MG의 자기 필터링 역할을 하는 모듈레이터의 두께 변화에 따른 전달 토크 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 모듈레이터는 저속측 주극과 동기결합하도록 고속측 주극을 필터링하므로 두께가 증가할수록 필터링 기능 측면에서 유리하지만 반대로 전체 자기장 강도가 작아지는 trade-off 특성을 보인다. 또한 모듈레이터 두께가 과도하게 작으면 회전하는 로터 사이에서 안정된 지지체 역할을 하지 못하는 현실적 문제가 있다. 두께 5mm의 범위내에서는 저속측 토크 기준 대략 25~27Nm에 놓여있는 것을 확인할 수 있다. 같은 맥락에서 Fig. 6에 나타낸 모듈레이터의 개방비 영향을 논의할 수 있다. 그림에서 개방비 70%는 사다리꼴 밑변 대비 윗변의 길이가 30%라는 의미이며 따라서 100%의 경우 사다리꼴이 삼각형이 된다. 개방비가 커지면

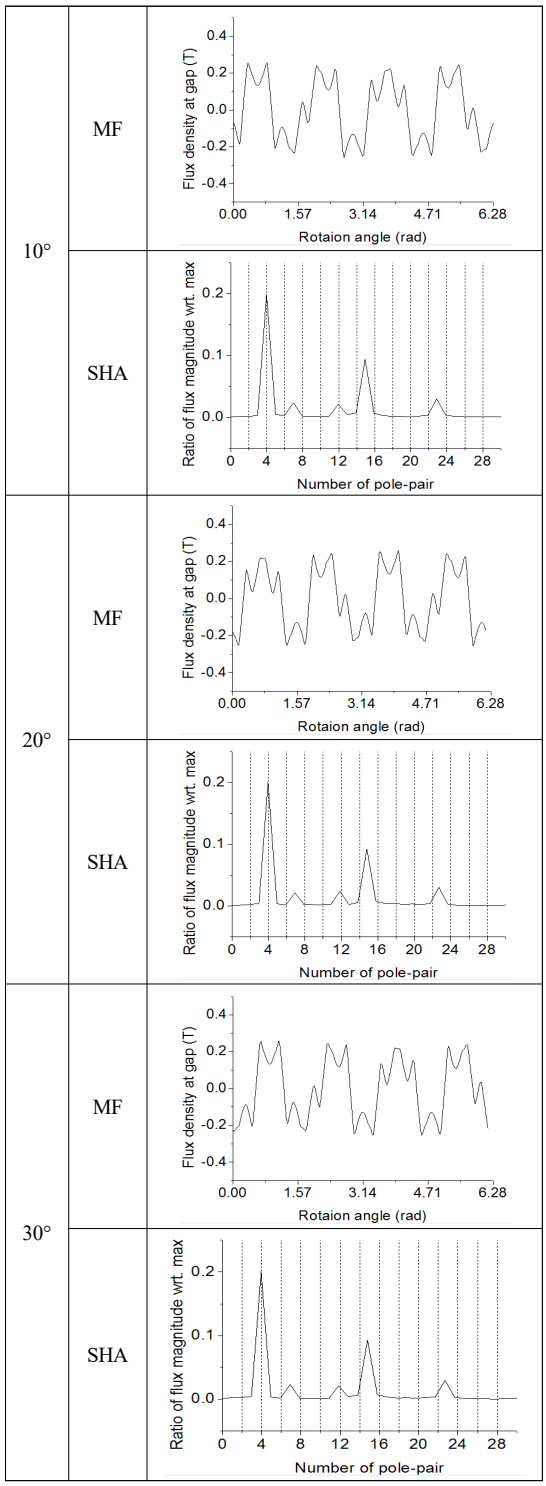

Fig. 4 Magnetic field (MF) according to rotation of the high speed rotor and its spatial harmonic analysis (SHA)

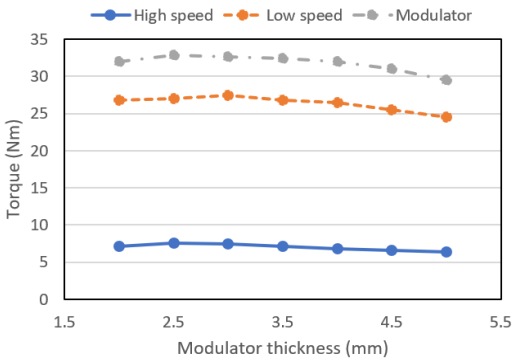

Fig. 5 Influence of modulator thickness on resulting torque

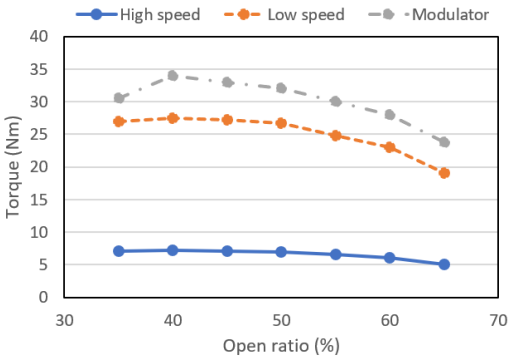

Fig. 6 Torque variation according to open ratio of the modulator

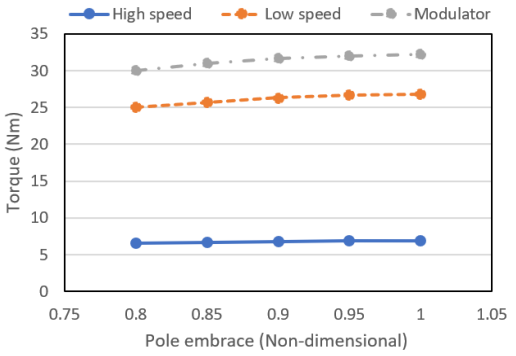

Fig. 7 Resulting torque according to pole embrace of high speed permanent magnet

고속측의 주극 성분이 필터링되지 않고 바이패스되는 부분이 커지며 반대로 너무 작아지면 바이패스 부분은 작아지나 모듈레이터가 자기 차폐하는 부분이 커진다. 따라서 적절한 수준의 개방비가 이상적이며

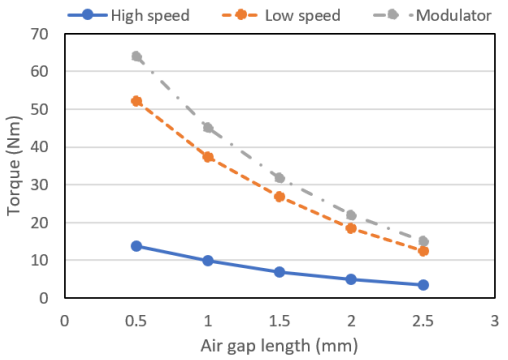

Fig. 8 Torque variation result as air gap length increases

그래프에서와 같이 대략 40~45%가 높은 전달 토크를 담보한다.

고속측 PM array의 embrace는 전달 토크외에 에지 효과 등에 따른 코깅 효과까지 고려할 필요가 있다. Fig. 7에서와 같이 대략 90% 수준 이상이면 PM 소재를 10% 줄이고도 유사한 전달 토크 크기를 얻는 것이 가능한데 이러한 영역은 회전에 따른 극변화시 토크 품질을 우수하게 할 수 있다. 마지막으로 Fig. 8에서와 같이 공극 크기는 작을수록 유리한데 공극 증가의 자승에 반비례하는 자기장 특성에 기인한다. 그러나 이 중 회전 로터를 고려할 때 1mm 이내의 공극을 유지하는 것은 조립 측면과 래디알 미세 진동을 고려하면 큰 부하로 작용한다.

4. 손실 특성을 고려한 마그네틱 기어 모듈레이터 설계

일반적으로 MG의 내외측 구성은 Fig. 9에서와 같이 적은 극수를 갖는 고속측이 내측에 그리고 많은 극수를 갖는 저속측이 외측에 배치된 형태(Outward type)를 취한다. 저속측의 극수가 많기 때문에 대향하는 PM의 자속 강도를 비슷한 수준으로 유지하기 위해서는 이러한 형태가 바람직하다. 그러나 Fig. 2, Fig. 3에 제안된 MG 내장형 모터의 경우 고속측 PM이 모터 토폴러지상 로터의 역할을 갖기 때문에 Fig. 9에서와 같은 Outward type에서는 코일링을 위한 충분한 공간을 확보하는 것이 어렵다. 특히 전류가 인가된 코일을 통한 자속밀도는 PM에 의한 자속밀도보다 훨씬 낮은 수준이기 때문에 불가피하게 능동 코일은 외곽에 배치하는 것이 유리하고 따라서 MG 역시 Inward type을

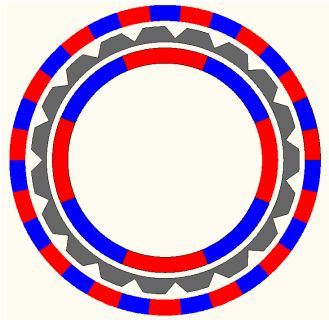

Fig. 9 Concept layout of the traditional magnetic gear (Outward type)

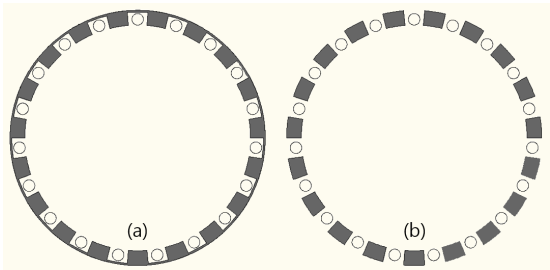

Fig. 10 Cross-section diagrams of the recommended modulators (a) connected type (b) separated type

고려하는 것이 바람직하다. 참고로 3장 해석 모델과 동일한 외경, 너비를 갖는 PM 조합을 갖는 Outward MG에 대한 해석 결과를 Table 1에 나타내었다. 예상된 바와 같이 Inward MG 대비 토크 전달 밀도가 대략 23% 큰 것을 확인할 수 있다.

MG에서 핵심 역할을 하는 모듈레이터의 극 형상은 Fig. 3에서와 같이 사다리꼴 형태를 대상으로 모의해석을 진행하였지만 실제 구현에 있어서는 과다한 코어 손실 등으로 모듈의 각 치(tooth)를 분리해야 할 필요가 있다. 각 치의 형태를 직사각형으로 모델링한 형태를 Fig. 10에 나타내었다. 각 모듈레이터는 내외측 PM 레이어의 고속 회전으로 인해 높은 비틀림 부하를 받기 때문에 하드웨어 셋업 측면을 고려하면 그림의 좌측과 같이 최소한의 연결 구조를 갖는 방식과 우측과

Table 1 Transmission torque comparison between inward magnetic gear and outward magnetic gear

	High speed max. torque	Modulator	Low speed
Outward	8.5 Nm	40.4	31.9
Inward	6.9 Nm	32.8	25.9

Table 2 Torque variation of various modulator structures

	High speed max. torque	Modulator	Low speed
Trapezoidal modulator	6.9 Nm	32.8	25.9
Connected modulator	13.5 Nm	64.1	50.6
Separated modulator	15.2 Nm	72.2	57.0

Table 3 Core loss and solid loss of various modulator structures

	Core loss (W)	Solid loss (W)
Trapezoidal modulator	59.04	241.01
Connected modulator	0.0028	122
Separated modulator	0.0027	90.1

같이 완전히 분리된 방식 각각에 대해 개방된 공간에 비자성 환봉 등을 통한 지지체 구조를 고려해야 한다. 하나의 구조체로 기능하기 위해서는 모듈레이터와 환봉을 에폭시 등으로 결합시킨 형태를 고려할 수 있다. 이러한 두 가지 모듈레이터 구조와 사다리꼴 구조를 대상으로 자기력 해석을 수행한 결과를 Table 2에 나타내었다. 사다리꼴 구조 대비 개별 치의 형상이 사각인 구조 모두 2배 수준의 자기력 밀도를 갖는 것을 확인할 수 있는데 그중에서도 Fig. 10의 우측 separated type이 고속측 기준 대략 2Nm 이상 전달 토크가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 Table 3에 제시된 각 타입의 코어 손실과 solid loss 비교를 통해 명확히 알 수 있다. 즉, 전달 토크가 가장 큰 separated type의 solid loss가 다른 타입 대비 최대 절반가량 작은 것으로 나타났으며 이러한 손실의 차이가 토크 전달 밀도의 크기에 지배적인 인자가 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

MGM에서 모터 토크를 증폭하는 역할을 담당하는 MG의 주요 제변수 변화에 따른 민감도 해석 결과와 모듈레이터 형태에 따른 전달 토크를 논하였다. 본 연구를 통한 주요 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) Inward MG 역시 Outward MG에서와 마찬가지로 전달 토크를 최대로 하는 이상적인 모듈레이터 두께와 개방비가 존재한다.
2) MG의 pole embrace가 클수록 전달 토크 역시 증가하지만 0.9 이상에서는 크기 변화가 거의 없기 때문에 에지 효과 등에 의한 토크 불연속과 코깅을 줄이기 위해 PM 사이에 강자성체 등을 배치하는 것이 적절하다.
3) MG를 구성하는 각 레이어 사이의 공극 크기는 전달 밀도에 큰 영향을 주지만 이중 로터와 기계적 정밀도 등으로 인해 그 크기를 줄이는데 제한이 있다.
4) 모듈레이터의 치 형상은 사각, 개별 치 형태로 구성할 경우 전달 토크는 사다리꼴 구조 대비 2배 이상인데 이는 solid loss의 차이에 의한 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 2023년도 한국교통대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

1) S. Mezani, K. Atallah, and D. Howe, “A High-Performance Axial-Field Magnetic Gear”, J. of Applied Physics 99 (8), 08R303, 2006.
2) K. S. Jung, “Speed Control of The Magnet Gear-Based Speed Reducer For Non-contact Power Transmission”, J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 17 (7), p.380, 2016.
3) L. Jian and K. Chau, “A coaxial magnetic gear with Halbach permanent-magnet arrays”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 25, No. 2, p.319-328, 2010.
4) K. S. Jung, “Magnetic Force Characteristics of the Speed Reducer using Magnetic Focusing”, J. of Institute of Convergence Technology 11 (1), p.7, 2021.
5) P. Rasmussen, T. Andersen, F. Jorgensen, and O. Nielsen, “Development of a High-Performance Magnetic Gear”, IEE Trans. on Industry Applications 41 (3), p.764, 2005.
6) H. H. Won and K. S. Jung, “Power Transmission Characteristics of the Magnetic Gear Reducer with a Variable Gear Ratio”, J. Korean Soc. Precis. Eng. 36 (1), p.45, 2019.
7) K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, “Design, Analysis and Realization of a High Performance Magnetic Gear”, IEE Proc.-Electr. Power Appl. 151 (2), p.135, 2004.