

표면부착형 영구자석 초고속 회전기의 설계

송재홍, 차영범, 양현섭, 이정중*, 홍정표*
 삼성테크윈(주), 창원대학교 전기공학과*

Design of High Speed Motor
 for Surface Mounted Permanent Magnet

Jae-Hong Song, Young-Bum Cha, Hyun-Sub Yang, Jeong-Jong Lee*, Jung-Pyo Hong*
 SamsungTechwin PowerSystem R & D Center
 Dept. of Electrical Engineering of Changwon National University*

Abstract - High Speed permanent magnet machines are currently being developed for a number of applications including gas turbine power plants, air conditioning systems, machine tools, gas pumps, high performance vacuum pumps, flywheel energy storage systems, aircraft fuel pumps, and so on.

Using a high-speed machine eliminates the necessity of the mechanical gearbox and could certainly increase the system efficiency and reduce the total cost. In addition, a high-speed machine has the advantage of small dimension and low weight, i.e. low weight to power and volume to power ratio. This paper presents a review of some important applications (mostly still under development) where high-speed machines are used, highlighting the advantages of the technology in each case.

1. 서 론

초고속 회전기는 90년대 초부터 산업계에서 전기자동차, Air Compressor, ACM, Aerospace, Gas Turbine Motor/Generator, Machine Tools 등의 개발이 활발히 진행되고 있으나 요소기술의 어려움으로 국내 기술은 선진국에 비해 미흡한 상태이다. 하지만 최근 몇 년간 국내에서는 출력 수 Kw급, 수만 RPM 이상 회전하는 초고속 회전기에 대한 연구가 활발히 진행되어, 현재 시스템에 적용하며 미흡한 부분은 계속 연구 및 시험 중에 있다. 이러한 초고속 회전기의 경우 고속 회전을 요구하므로 일반적인 범용 모터에 비하여 손실, 기계적 구조 등 차이가 있다. 초고속 회전을 위한 요소 기술로는 High Speed Motor의 설계 및 제작, High Speed Motor 구동을 위한 Inverter의 설계, Air Foil Bearing(이하, AFB)의 설계 및 제작/적용, Rotor Dynamics 해석, 고속 회전시 영구자석 비산방지를 위한 Sleeve(Can 또는 Retainer)의 구조해석, System of Cooling을 위한 열전달 해석이 수행되어야 한다. 특히 초고속 회전기는 전자기적 설계보다 회전기의 구동을 위한 Inverter, AFB, 회전자의 구조 및 동특성, 냉각 등 시스템의 해석이 선행되어야 한다. 초고속 회전기는 회전자에 높은 에너지 밀도의 영구자석[희토류계열]을 부착하여 고속, 고회력, 소형, 경량, 저소음을 얻을 수 있는 장점이 있다[1].

본 논문에서는 초고속 회전기 설계 시 일반전동기 설계에 비하여 차이점과 보다 중요시되는 설계 사항을 소개하고 현재 초고속 회전기의 문제점을 서술하고 진행 중인 해결 방안을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 초고속 회전기의 소개

일반적으로 공기 압축기에 사용되는 초고속 회전기는 회전자 표면에 높은 에너지 밀도의 영구자석(희토류계열)을 사용하고, 초고속 회전시 영구자석의 비산 방지를 위해 영구자석 표면에 Sleeve를 부착한 표면부착형 영구자석 회전기이다. 일반적으로 회전체의 경우는 회전자에 의해 발생하는 회전력에 의해 구조적으로 불안정해진다. 여기서 구조적으로 불안정하다는 것은 회전력에 의해 원주방향으로 응력이 발생하게 되고 이 응력이 과도하게 증가하여 구조 강도가 소재강도를 초과하게 되면 원주방향의 수직방향으로 파단이 발생하는 것을 의미한다. 이것을 일반적으로 버스트(hoop burst)라 하는데, 운전 중 전동기의 구성품 중, 특히, 영구자석의 경우 이와 같은 버스트로 손상이 발생하게 되면 회전체가 제 역할을 수행하지 못하게 되므로 회전체로서의 가치를 상실하게 된다. 따라서 원심력에 의해 발생하는 자석의 원주방향 응력을 감소시키기 위해 과도한 조립 조건이나 구성품의 두께 또는 회전력 등의 변수를 조정하여 운전 중 파단이 발생하지 않게 설계를 하여야 한다. 그리고 모든 작업이 근래에는 유한요소법을 이용하여 구조 안정성을 확인하고 있으므로, 회전자의 구조해석을 통해 회전자의 회전수와 Sleeve 두께 변화에 따른 한계점을 알 수 있다. 공기 압축기 회전자의 구조적 안정성을 확보하기 위해 회전자의 기계 회전수에서 내부 압력, 원심하중, 열팽창을 고려하여 설계 및 해석이 필요하다. Impeller와 Shaft간 조립부에서 원심하중에 의한 안전강도 확보와 회전자의 영구자석 Burst 방지를 위해 Rotor Layout 설계 및 해석을 수행하여 제작 사양을 확정해야 한다 [2]. 초고속 회전기 나타나는 Core Loss의 손실을 줄이고 효율을 증가시키기 위해 영구자석과 Sleeve를 몇 조각의 Segment로 설계 제작하며 초고속 회전기의 기본주파수에 의해 나타나는 철손을 줄이기 위해 고투자율의 재료와 얇은 Steel Core를 사용해야 한다[2]. 해외 제작사의 경우 60000rpm ~ 70000rpm의 초고속 회전기에 극수가 2극이며 두께가 0.18mm Steel Core를 사용한다. 초고속 회전을 위한 AFB는 회전체를 이용하는 압축기, 터보기기 산업분야 뿐만 아니라 회전체가 이용되는 가전제품, 산업기기 분야에서의 첨단 기술로, 주로 고속/경량 회전체를 지지하는 비접촉 베어링이다. 기존의 접촉식 볼베어링이 가지는 문제점인 접촉에 의한 진동문제가 없으며, 윤활시스템이 필요 없다는 장점 때문에 항공용에 많이 사용하고 있다. AFB는 Magnetic Bearing 혹은 Ball Bearing에 비해 여러 가지 장점이 있는데 장단점을 비교해 보면 표1과 같다.

고속 회전기의 구동을 위한 인버터의 설계에 있어서는 일반 저속 회전기와 비교해 볼 때 큰 차이가 없으나 높은 스위칭 주파수에 의한 열손실이 고려되어야 한다. Power Stack 부분에서 열손실 보상을 위한 부품선정과 Layout을 신중히 결정해야 한다. 또한 속도에 비례하는 고속의 프로세서가 필요하고 이에 적절한 제어 방식이 필요하다.

회전자가 초고속으로 회전하게 되면 철손, 베어링 마

찰손실이나 풍손, 그 외의 동력손실 등으로 인한 발열 때문에 회전기의 온도가 상승하게 된다. 온도 상승에 의한 회전축의 열변형, 열팽창을 막고 마찰손실을 줄일 수 있는 베어링을 사용해야 한다. 전동기의 고속화, 소형, 경량화가 가능하기 위해서는 내열성이 우수한 절연재료의 개발과 각 부분에서 일어나는 온도상승을 허용치 이하로 제한할 수 있는 냉각기술 해석 방법에 달려 있다.

표 1 Bearing 종류별 장단점 비교

특징	AFB	Ball Bearing	Magnetic Bearing
초고속	가능	불가능	가능
Load Capa	적다	크다	크다
유풀	불필요	필요	불필요
유지보수	불필요	필요	필요
사용환경	환경친화적	Oil 사용	환경친화적
소음	적다	크다	적다
가격	싸다	적당	비싸다
제어	불필요	불필요	필요

2.2 초고속 회전기의 해석

2.2.1 Air Foil Bearing

AFB은 별도의 윤활장치와 Oil 공급 장치가 필요 없이는 Oilless 베어링으로 별도의 유지보수가 필요 없으며 30,000RPM 영역에서부터 120,000RPM에 이르기까지의 고속회전체를 지지할 수 있다. AFB은 Radial 베어링과 Thrust 베어링으로 구성되어 있으며 초고속 회전기 회전체의 전방과 후방에 각각 장착되어 있다. 이것은 여러 개의 포일(Foil)로 구성되는 베어링이며 포일과 회전하는 회전자 사이의 공기에서 발생하는 압력으로 회전자를 지지하게 된다. 그리고 초기 구동시의 마찰을 줄이고, 베어링의 윤활 역할을 위해 포일에 코팅을 하여 사용하고 있다. AFB 설계 특징은 회전자의 크기에 적당한 포일을 설계하고 이 포일들을 적절하게 배치하여 회전자의 무게에 의한 정적 하중과 불균형 응답성 및 외부 가진 조건에 의한 동적 하중을 견디도록 베어링을 설계하는 것이다. 또한, 베어링의 수명에 중요한 역할을 하는 lift-off speed, 회전자의 초기구동에 필요한 힘인 start-up moment에 관한 해석을 수행해야 한다. 그 밖에 해석적으로는 알기 어려운 AFB의 불안정영역, AFB의 수명, 진동특성 등 여러 시험을 통해 규명해야 한다. 이 외에 AFB에 있어 중요한 사항은 적절한 냉각 방식을 설계하여야 한다는 것이다. AFB 내에서 포일과 축의 거리는 수 μm 정도의 아주 미세한 틈이므로 틈에서의 마찰에 의한 발열로 온도가 상당히 올라간다. 특히 Thrust AFB의 경우는 그 면적이 넓기 때문에 발열이 Radial AFB보다 훨씬 많아 이 부분의 냉각이 중요한 문제가 된다. Radial Bearing과 Thrust Bearing의 형상은 그림1과 그림2에 나타내었다. 응용 분야로는 ECS (Environmental Control System), 가스터빈엔진의 모터/발전기 지지용 (60,000rpm,10Kg), F-18 Foil Bearing ACM (95000rpm), Boeing Aircraft 777 Foil Bearing ACM등에 사용된다.

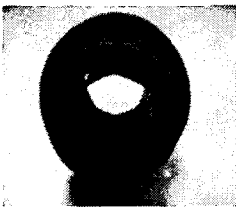


그림 1 Radial Bearing

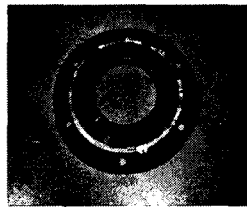


그림 2 Thrust Bearing

2.2.2 2D Rotor 구조/동특성 해석

초고속 회전 시 일반적으로 회전자는 높은 회전속도에 의해 발생하는 원심하중으로 인해 구조적으로 매우 불안정해진다. 따라서 설계단계에서 회전자의 구조안정성을 확인하기 위하여 회전자의 구성품인 영구자석과 Sleeve의 소재강도(재질의 기계적 특성)를 고려하여 반드시 구조해석을 수행하여야 한다. 이와 같은 구조해석의 가장 큰 목적은 회전자의 구조안정성을 확인하는 것이며, 2차적으로 해석결과를 토대로 영구자석, Sleeve의 제작 및 조립조건 등이 가능한지 판단하는 것이다. 본 절에서는 회전자의 구조안정성을 확인하기 위하여 2차원 축대칭 요소를 이용하여 선형정적 탄성해석수행 과정을 간단하게 나타내었다. Pre/Post Processing은 범용 FEM 소프트웨어인 MSC. Patran 2001r2a를 사용하였고 Solver는 ABAQUS 6.3을 이용하여 계산하였다. 그리고 이때 사용된 요소의 물성 데이터는 표2에 나타내었다.

표 2 Material data of motor

부품명	소재명	Modulus	CTE	Poisson's ratio	Density
Sleeve	In718	2.11e+8	1.29e-5	0.30	8.2e-6
Magnet	NdFeB	1.50e+8	3.40e-6	0.29	7.4e-6
Shaft	SCM440	2.10e+8	1.08e-5	0.27	7.83e-6

원심하중은 식(1)과 같이 회전체의 질량과 회전속도의 함수이며, 질량이 회전력에 1차 선형으로 비례하는 반면에 회전속도는 자승으로 비례하는 것을 알 수 있다.

$$F = r \times m \times w^2 \quad (1)$$

여기서, r :무게중심의 반지름, m :중량, w :각속도를 나타낸다. 따라서 회전체의 외곽 지름이 커지는 것 보다 속도증가가 회전체의 구조 안정성에는 더 큰 영향을 미치게 된다. 초고속 회전기의 회전자 구조 해석을 위해 pre/post processing 해석과 선형정적 탄성해석 (Steady state Linear Elastic Analysis)을 수행해야 한다. 예로서, 초고속 회전기에 적용되는 모델을 그림3에 정리하였다. 고속으로 회전하는 것이 회전체의 구조 불안정성에는 더 큰 영향이 미치는 것을 알 알아보기 위해 구조 해석을 수행하였다. 회전력에 의한 회전자의 응력성분은 크게 반경응력과 원주응력(Hoop Stress)으로 구분될 수 있으며, 주 응력은 원주응력으로 나타나고 있다.

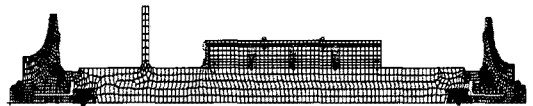


그림 3 2D FE model of rotor

구조해석 결과는 그림 4에 나타내었다. 구조해석 결과, 공기압축기에 적용된 회전자 Sleeve의 응력은 정상 상태에서 원주 응력이 약 120MPa로 Sleeve의 소재강도(약 800MPa)는 매우 안정적으로 나타나지만 자석의 경우는 약 80MPa으로 영구자석의 소재강도(약 70MPa)를 초과하는 것으로 나타나 구조적으로 매우 불안정한 것으로 나타나고 있다. 그리고 반경면위의 경우는 sleeve와 영구자석의 경우 약 0.0207mm / 0.0073mm 가 발생하며, 영구자석과 shaft의 경우는 약 0.0065mm / 0.0074mm 가 발생하는 것으로 나타나 sleeve와 영구자석 사이는 정상상태에서 clearance

가 약 0.0134mm가 발생하며, 영구자석과 shaft의 경우는 0.001mm interference가 발생하는 것으로 나타났다. 정상상태에서 구조적으로 불안정한 자석의 구조 안정성을 확보하기 위하여 sleeve와 영구자석 간에는 접착을 위한 열처리 요구될 것으로 판단되며, 최소 열처리 접착 양은 정상상태에서 sleeve와 영구자석 간에 발생하는 clearance 이상이 요구될 것으로 판단된다. 만약 sleeve와 영구자석을 편심으로 약 0.02mm의 열처리 접착으로 조립할 경우, 그림4와 같이 정상상태에서 sleeve의 응력은 약 200MPa로 증가하지만 자석의 응력은 약 55MPa로 낮출 수 있는 것을 확인할 수 있다. 영구자석과 shaft 사이는 정상상태에서 열팽창의 차에 의해 0.001mm 열접착 처리 효과가 있기 때문에 토크에 의한 미끄럼 현상은 없을 것으로 판단된다.

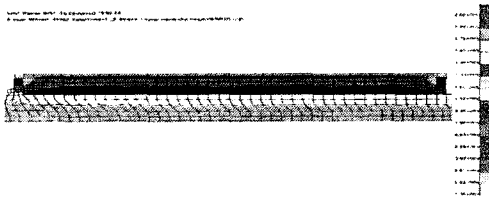


그림 4 Hoop stress result of motor

초고속 회전기의 충분한 회전안정성을 확보하기 위해서는 무엇보다도 위험속도(Critical Speed)에 대한 Critical Speed Margin 확보와 Rotor-Bearing System에 대한 구성이다[3]. 다시 말해서 30%이상의 Critical Speed Margin과 Sub-Critical Rotor를 설계하는 것이 목표이다. 이와 같은 설계사양을 확보하기 위해서는 각 요소의 강성과 관성을 효과적으로 고려해야 한다. Foil Bearing의 낮은 Bearing Stiffness로 인하여 난관이 있지만 재료의 최적 선정 및 Shaft 길이를 최소화하여 위험속도에 대한 Critical Speed Margin을 30% 이상을 확보할 수 있고 이는 Unbalance Response Analysis에서도 확인할 수 있다. 실험적으로 확인하기 위하여 100,000rpm까지 회전 진동시험을 수행하여 전 영역에 걸쳐 안정된 거동을 확인 하는 예를 그림 5에 나타내었다.

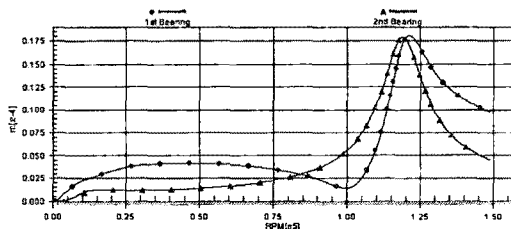


그림5. Unbalance Response Analysis

2.2.3. 기계 손실 해석

회전체에서의 기계 손실은 초고속 회전기에 대해 Windage 손실이 지배적이다. Windage 손실은 마찰손실(Friction Loss)과 유체유동 손실(Gas Flow Loss)로 나뉘지며 마찰손실은 회전하는 회전자에 의한 접선방향(Tangential) 흐름에 대한 회전자와 유체간의 마찰 손실이며, 유체유동 손실은 회전자와 고정자 사이의 간극을 통한 축(Axial) 방향 흐름에 의한 마찰 손실이다. 어떤 유체 유로 상에서의 전체 Windage 손실은 마찰 손실과 유체유동 손실을 합한 값이 된다. 마찰 손실 계산식은 원통형 유로에 대해 식 (2)같이 표현된다.

$$T = Cf \times \rho \times \pi \times \omega^2 \times r_1^4 \times L \quad (2)$$

여기서 Cf : 마찰계수, ρ : 유체밀도, ω : 회전각속도, r_1 :

내부반경, L : 유로길이를 나타낸다. 유체 유동 손실은 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$T = 2/3 \times \rho \times \pi (r_2^3 - r_1^3) \times \omega \times um \quad (3)$$

여기서 r_1 : 내부반경, r_2 : 외부반경, ω : 접선방향유속, um : 축 방향 유속을 나타낸다. 예를 들면, 회전자의 회전수가 11519[rad/sec], 기계적인 Air-gap이 0.4mm일 때의 수식(2)에 의해 마찰손실은 220[W], 수식(3)에 의해 유체유동손실은 55[W] 정도로 나타난다. 각각의 구조물에 대해서 마찰 손실을 구하면, Thrust Bearing에서 70[W] 정도로 가장 많았고, Air-gap에서는 20W 정도로 미미하게 계산된다. Thrust Bearing은 직경의 접촉 면적이 Radial Bearing에 비하여 넓어 손실이 가장 크게 나타난다. 공기 등의 저밀도 유체를 사용할 경우 총 소모동력 대비 기계손실이 차지하는 비율이 큰 문제가 되지 않으나 고압냉매 등의 고밀도 유체 분위기에서의 Windage Loss는 Air Gap 간극이 좁을수록, 선속도(로터 회전수)가 증가할수록 크게 증가한다. 이러한 특징은 본 논문에서는 제외하였으나 실험적으로 구할 수 있으며, 회전자 직경을 0.5mm 작게 함으로써 동일 밀도에서 회전수 66000rpm일 때 기계손실이 20 ~ 40W 정도 증가한다.

2.2.4. 냉각, 열전달 해석

시스템 내부를 적정한 설계 온도이하로 유지하기 위해서 열 해석이 수행되어야 한다. 현재 많이 사용하는 방식으로는 Air Forced Cooling 방식이 있다. 표면 부착형 영구자석 고속 회전기에 냉각 팬(Blower)을 이용하여 Air forced Cooling을 할 경우에는 시스템 내부를 적정한 설계 온도이하로 유지하기 위해, 내부 유로 해석을 통해 냉각 유량을 결정하여야 한다. 그리고 결정된 냉각 유량을 통해서 Blower의 모양, 크기, 중량과 관련된 설계, 해석을 수행해야 한다. AFB를 사용하는 경우에는 접촉 면적이 커서 마찰 손실이 많은 Thrust Bearing과 Radial Bearing을 통과하도록 내부 유로 설계를 해야 한다. 특히, NdFeB 피토류계의 영구자석을 사용할 경우에는 영구자석의 고온감각을 고려한 내부 유로 온도를 적정 설계하여 그 이하로 유지하도록 해야 한다.

3. 결 론

초고속 회전기는 고효율, 소형, 경량, 저소음을 얻을 수 있는 장점이 있기 때문에 초고속 회전기의 응용 제품에 있어서 국내/국제 경쟁력을 갖추기 위해서는 시스템의 성능 향상과 제작 비용의 절감이 요구된다. 초고속 회전기의 응용 제품에 있어서는 AFB와 같은 환경친화적인 베어링을 사용하기 때문에 전 세계가 직면하고 있는 친환경 유지 보전 기술과 Energy Saving을 가능하게 할 수 있다. 마지막으로 초고속 회전기는 국내/국제 경쟁력을 가질 뿐만 아니라 여러 가지의 기술 개발 및 파생 효과가 있기 때문에 21세기 미래 첨단 고부가가치 산업의 일원으로서 고속 회전기의 개발이 시급한 실정이다.

[참고 문헌]

- [1] 한국전기연구원, 초고속 회전기 설계이론, 2002
- [2] 정연호 외3 "마이크로 가스터빈용 고속 전동/발전기 설계에 관한 연구", 대한전기학회, 2002
- [3] Jacek F. Gieras, M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology", Second Edition