

수치해석 기반의 전기기기 설계프로세스

■ 정상 용, 한 성 진 / 동아대학교
 ■ 정 현 교 / 서울대학교

1. 서 론

현재 전세계는 기술의 고유성과 집약성을 바탕으로 한 고부가가치형 시스템을 글로벌경쟁력을 위한 선도 분야로 선정하였으며, 국내에서도 이를 핵심 성장 동력 기반기술로 규정하여 전자/정보통신, 기계/교통, 에너지 및 생명 관련분야 등에서 원천기술배양 및 기술 표준화를 가속화하고 있다.

이 중에서 전기동력 관련분야는 국가 에너지 산업의 핵심 인프라를 담당하고 있으며, 성장 동력형 시스템의 가치성을 제고할 수 있는 쟁점분야로, 응용시스템의 지능화에 따라 고전적인 단순 전기구동장치로서의 기능을 넘어 전체 시스템의 주요역할수행, 동력 성능 및 운전제어성을 결정하도록 진화하고 있다. 따라서 전기동력기기의 다양한 기능 성능별 모듈화, 유연한 구조적 결합력 및 패키징성, 분산제어 인터페이스 등의 고급화가 요구되고 있으며, 특히 전기기기

의 고성능/경박단소화(높은 출력/토크 밀도), 효율개선(운전목적별 맞춤형 효율분포), 고정밀화(높은 설계/제어정밀도), 고속화(강건 구조설계), 내환경성(내열, 내진동, 내부식성), 고품질/고신뢰성(통계적 고장을 개선) 등의 응용시스템 최적맞춤형 개발을 적극 추진하고 있다[1-3]. 이와 같은 응용시스템은 대부분 전기기기의 운전점이 다양하고, 시스템의 결합공간의 제약이

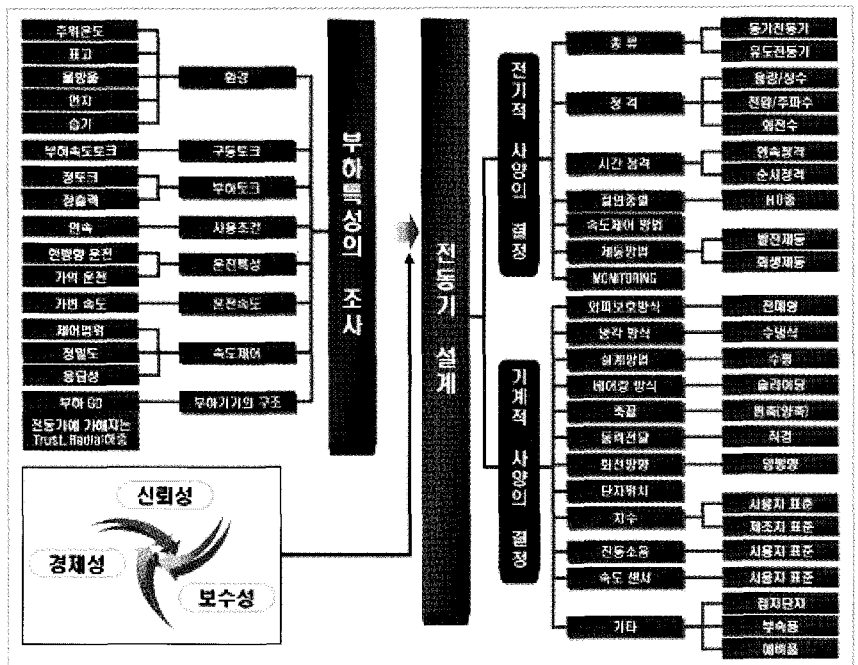


그림 1 전동기 설계 Tech-Tree

많으며, 운전환경이 열악하면서, 높은 신뢰성과 운전 성능을 요구하므로 기존의 일반 전기기기와 차별화되는 고급형 전기기기로 시스템의 운용성을 최적화할 수 있는 설계프로세스 개발이 필수적이다[4].

따라서 본고에서는 이러한 특징을 고려하여 수치해석 기법을 도입한 최근 전기기기 설계 프로세스를 종래의 설계 프로세스와 비교 기술하고, 실제 적용된 사례를 소개하고자 한다.

2. 종래의 전기기기 설계

전기기기 설계는 그림 1의 전기기기 설계 Tech-Tree 와 같은 다양한 설계 제한 조건을 고려하여야 한다. 기존의 설계는 D2L법, 장하분배법 및 자기등가회로법 등이 대표적이다. D2L법(체적법)은 전기 및 장하비와 출력계수를 이용하여 설계하는 방법이며, 장하분배법은 전동기 용량을 전기장하와 자기장하의 곱으로 표현하여 미중가 비례법에 의해 적절한 장하의 배분으로 설계하는 방법이다. 아울러, 자기등가회로법은 이상적인 선형성을 가정하여 집중정수회로를 활용하는 설계 방법이다[5]. 이러한 설계법은 최근 들어 문제점이 대두되고 있는데, 이는 시행착오적인 방법에서 오는 시간적 문제 및 설계목적을 만족하는 해의 신뢰성 문제들로 인한 것이다. 특히, 심각한 비선형 자기 포화 특성으로 인한 제어 정수 추출의 어려움 및 복잡한 형상에 기인한 최적 설계의 어려움 등이 아직도 연구되고 개선되어야 할 문제점들로 남아 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해 컴퓨터 기술의 발달과 수치해석적 연구 성과들을 바탕으로 CAD(Computer Aided Design)를 응용한 수치해석

기반의 전기기기 설계가 다양하게 연구되고 있다[6].

3. 수치해석 기반의 전기기기 설계

3.1 전자계 수치해석

수치해석은 수학의 연속문제(구체적 해를 가지고 있지 않은)를 다루는 알고리즘을 연구하는 학문으로서, 컴퓨터 기술의 발달과 함께 1990년대부터 산업계에 본격적으로 적용되었다.

대표적인 수치해석 방법으로는 유한요소법(Finite Element Method : FEM), 유한차분법(Finite Difference Method : FDM), 경계요소법(Boundary Element Method : BEM) 등이 있다. 이 중에서 유한요소법은 복잡한 구조물을 작은 조각으로 나누어 전체 구조물의 형상과 특성을 반영하도록 모델링 및 수식화하여 문제를 해석하는 방법으로써, 형상이 복잡하거나 비선형적 특성으로 인한 해석적 해를 구하기 어려운 문제에 적

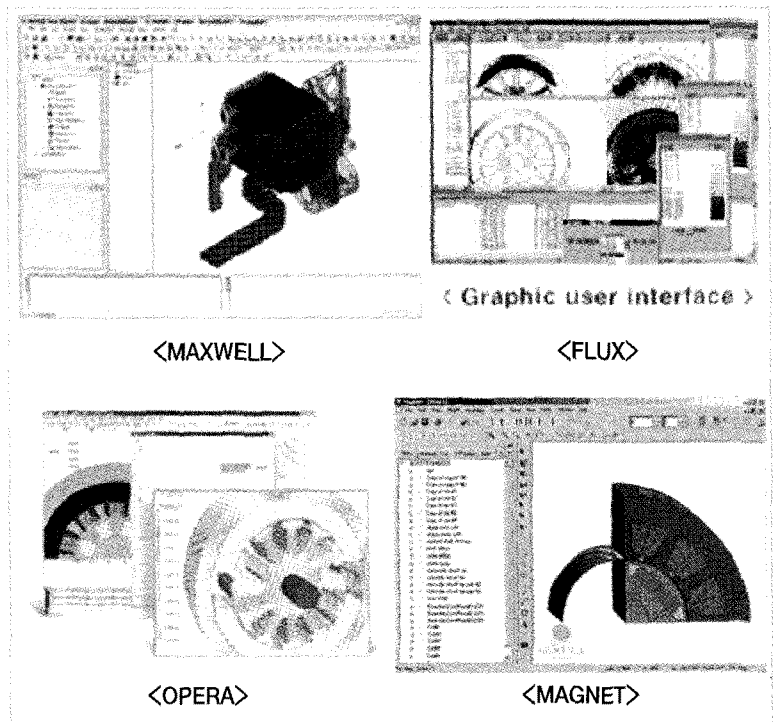


그림 2 전기기기 수치해석 상용 프로그램

용하는데 매우 유용한 기법이다.

실제 유한요소법의 공학적 응용사례는 1950년대에 기체강도(機體強度)를 계산하기 위해 구조공학분야에서 적용한 것을 효시로, 전기공학분야에서는 1970년대 캐나다의 McGill 대학교의 P. Silvester 교수가 전기기기의 자기적 특성해석에 적용한 것이 시초가 되어, 전기기기 설계에 있어서 CAD(Computer Aided Design) 기반의 획기적인 변화로 발전하는데 교두보적인 역할을 하였다.

아울러, EU 등 여러 국가의 산업체, 학계, 연구소가 참여하여 IDAM, MIDAS, PARTEL, EPOCH, CHAMAD 등 수치해석에 관련된 여러 프로젝트를 지속적으로 수행하여 왔으며, 아울러 대학과 연계개발을 통하여 다음과 같은 전기기기 수치해석 프로그램이 상용화되었다[8-11].

- 1) ANSOFT社 MAXWELL 개발(Carnegie-Melon大學, 美)
- 2) CEDRA연구소, MAGSOFT社 FLUX 개발(Grenoble大學, 佛)
- 3) Vector Field社 OPERA 개발(Southampton大學, 英)
- 4) Infolytica社 MAGNET 개발(McGill大學, 加)

전기기기 수치해석 프로그램은 전처리 과정(Pre-processing), 해석 과정(Solving-processing), 후처리 과정(Post-processing)으로 구분된다.

먼저, 전처리 과정은 요소분할, 물질값 입력, 문제정의로 나누어진다. 요소분할 과정은 해석영역을 많은 요소로 분할하는 것으로서, 분할요소의 수가 많을수록 해석결과 정밀성은 증가하지만, 상당한 해석시간이 소요된다. 이러한 요소분할 과정에는 소요시간과 정밀성 부여 영역에 대한 설계자의 경험적 지식이 주요하게 작용한다. 물질 데이터 입력과정은 자성체의 B-H특성 곡선, 자석의 잔류자속 밀도 및 리코일 투자율, 각 영역의 투자율 등 전동기를 구성하고

있는 영역의 물질 특성값을 입력하는 과정으로, 일반적으로 설계자의 편의를 위한 물질 데이터를 데이터베이스로 저장하고 있는 경우가 많다. 문제 정의 과정은 해석영역의 경계조건을 부여하고, 전류밀도 및 전류방향, 자석의 자화방향 등을 지정한다. 이러한 전처리 과정은 설계자의 의사가 가장 많이 반영될 수 있는 부분으로서, 많은 경험적 지식이 수반된다.

해석과정은 전체 해석 영역을 만족하는 편미분 방정식을 요소별로 이산화 된 편미분 방정식으로 바꾸어 해를 구하는 것으로서, 이산화에 의해서 편미분 방정식은 절점에서의 포텐셜을 미지수로 하는 많은 선형 연립 방정식으로 변환된다. 즉, 분할된 요소 내의 함수 분포를 근사 함수로 설정하여 연립방정식을 유도한 후, 각 절점에서의 자기 벡터 포텐셜(Magnetic Vector Potential)을 구하는 과정이다.

후처리 과정은 해석과정의 결과에서 얻게 되는 각

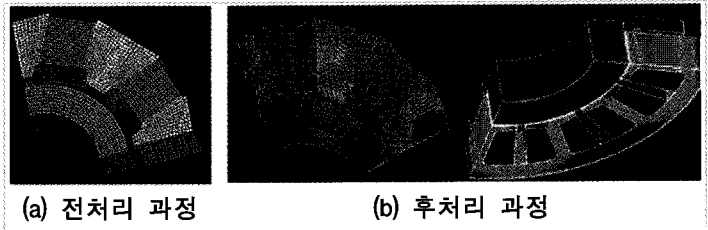


그림 3 유한요소법의 전처리 과정 및 후처리 과정

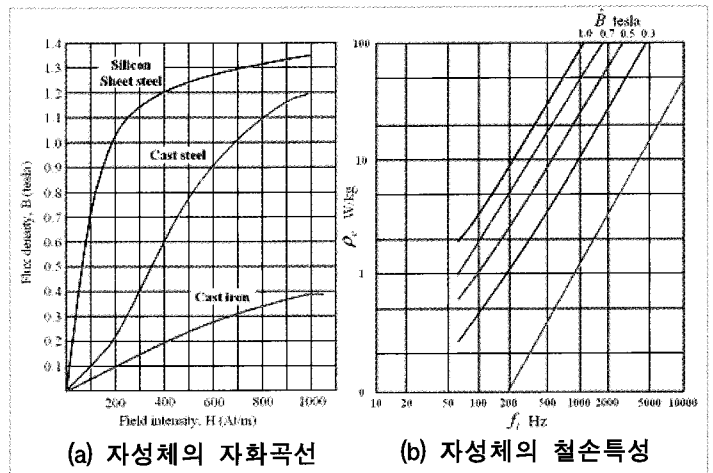


그림 4 자성체의 특성곡선

절점에서의 포텐셜 값을 이용하여, 설계자가 필요로 하는 특성치(자속밀도, 힘, 토크, 인덕턴스 등)를 계산하는 과정이다[12-13].

수치해석 기반의 설계 프로세스는 상기한 바와 같으나, 실제 설계 과정에 있어서 수치해석 결과에 민감한 영향을 미치는 물성재료의 선정 및 데이터 확보가 중요하다. 영구자석 전동기의 경우, 동일한 형상의 전기 기기라도 철심 재질 데이터와 자석의 잔류 자속 밀도 값에 따라 전기기적 특성이 상이하게 나타나므로 적절한 재료의 선정뿐만 아니라 재료의 제작성, 온도, 기계적 특성을 고려한 데이터 확보가 필요하다. 예를 들면, 철심 재질 선정 시 고려해야 할 항목은 B-H 특성, 주파수별 철손 특성 및 기계적 강도 등이 있다. 철심은 자속이 통과하는 주경로이기 때문에 자기적 포화 특성이 우수해야 하고, 고효율화를 위해 철손이 작아야 한다. 그림 4(a)와 같이, 철심에서 자계가 전류에 비례하여 증가하면 철심의 자속밀도는 변화한다. 자속밀도 B는 자계의 세기 H가 낮은 영역에서는 선형적 특성을 나타낸다. 반면에, H의 값이 높은 영역에서 B는 비선형적 특성을 나타내며, 자성재료는 포화(saturation) 상태가 되므로 특성 해석에 있어서 이러한 점을 충분히 고려해야 한다. 또한, 자성체 내의 시변자계는 그림 4(b)와 같은 철손(와전류손, 히스테리시스손)을 발생시키며, 이러한 값을 수치 해석적으로 정확히 예측하기 위해서는 제조사로부터 강판재료에 대한 명확한 데이터를 확보해야 한다[14].

3.2 전기기기 설계 프로세스

이와 같은 수치해석 기법을 바탕으로 한 전기기기 설계 프로그램은 기계결합에서 발생하는 진동/소음 문제와 제어결합에서 발생하는 스위칭노이즈, 전압/전류 제한 등 다양한 제약조건을 만족해야 하며, HILS(Hardware In The Loop Simulation) 및 SILS(Software In The Loop Simulation)와 같은 설계평가 시스템을 적용하여 통합시스템의 성능을 결정짓는 운전제어 전략을 반영하여 설계단계

에서 최적 성능을 정량적으로 평가할 수 있어야 한다. 아울러, 고품질/고신뢰성 기반의 실험계획법(Design of Experiment), DFSS(Design For Six Sigma), FMEA(Failure Mode Effective Analysis) 등을 적용하여 사용자 기반 설계평가 표준화를 구현하여 실 운전환경에서 운용효과를 점검할 수 있어 설계에 대한 신뢰도를 증진시킬 수 있게 될 것이다.

이와 더불어, 전기기기 설계는 그림 6과 같이 다양한 설계 운전조건을 만족하면서 사용자 기반의 자동화 최적설계가 이어져야 할 것이며, 다양한 지식기반(Knowledge Base) 설계기법 및 지능형 CAD 프로세스, 설계 유사도 분석 및 추론엔진 개발 등이 추가되어야 할 것이다.

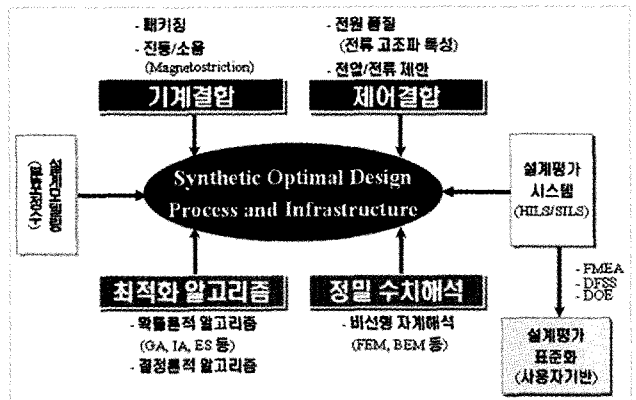


그림 5 수치해석 기법의 전기기기 설계 프로세스

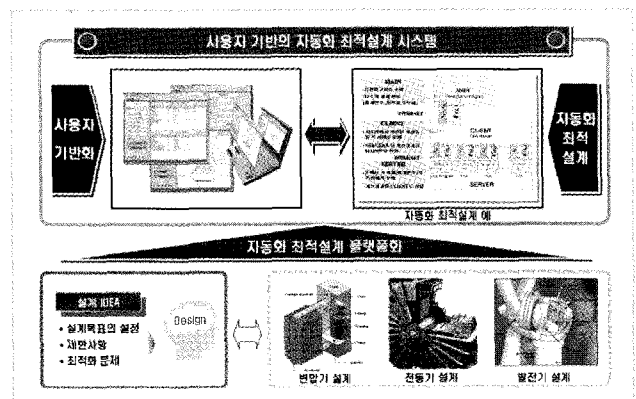


그림 6 자동화 최적설계 플랫폼

4. 수치해석 기반의 전기기기 설계의 적용사례

앞서 언급한 바와 같이, 수치해석 기반의 전기기기 설계는 다양한 운전조건과 동력성능, 열악한 내환경성 등의 가혹조건 설계에 유용하며, 본 장에서는 이와 관련한 설계사례를 살펴보고자 한다.

4.1 42V 전기자동차용 ISG(Integrated Starter-Generator) 설계

42V 전기자동차용 ISG는 스타터와 얼터네이터의 통합형 전기기기로 1750rpm에서 3.6kW, 2500rpm~7500rpm에서 4kW, 15000rpm에서 3kW의 출력을 만족시키고 동작온도 -25~95°C에서 기동토크 63.2Nm와 1750rpm~10000rpm에서 효율 80% 이상 등 다양한 설계조건과 운전특성을 만족시키고자 수치해석 기법을 적용하여 설계를 수행할 수 있다. 즉, ISG는 기동시 고토크와 넓은 정출력 운전영역 확보가 필요하므로, 이

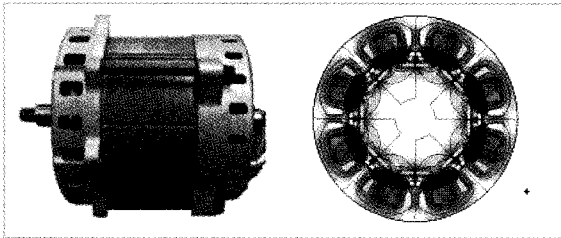


그림 7 전기자동차용 ISG의 실 제작모델 및 자계 특성

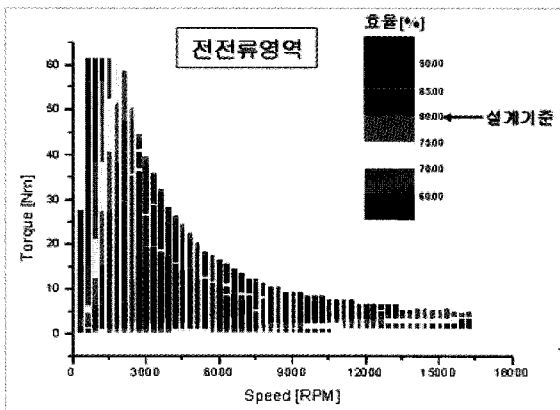


그림 8 전기자동차용 ISG의 해석결과(효율맵)

에 대한 모터 제어정수를 수치해석적인 분포계수로 적용하여 설계를 수행하게 된다.

그림 7은 수치해석 기반의 설계에 의해 제작한 전기자동차용 ISG와 이에 대한 자계 특성을 나타낸다. 그림 8은 2층 8극 구조의 매입형 영구자석 동기전동기의 설계모델 해석 결과(각 운전점별 효율특성)를 보여준다. 해석 결과 도출된 효율 및 출력은 요구 제한조건을 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)용 구동모터 설계

연료전지 전기자동차(Fuel-Cell Electric Vehicle)는 수소를 에너지원으로 하여 연료전지가 전기에너지를 생산하고 이를 이용하여 전동기가 추진동력을 발생시키는 시스템으로, 구동전동기의 설계 성능이 차량의 상품성 및 신뢰성에 직결되는 특징을 지닌다.

FCEV 주 구동원의 설계조건으로는 높은 출력 및 토크밀도, 넓은 속도운전 영역, 구조적 견고성 등이 있으며, 매입형 영구자석 동기전동기가 가장 각광받고 있

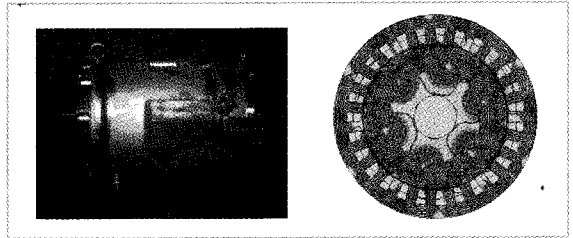


그림 9 FCEV 구동용 전동기의 실 제작모델

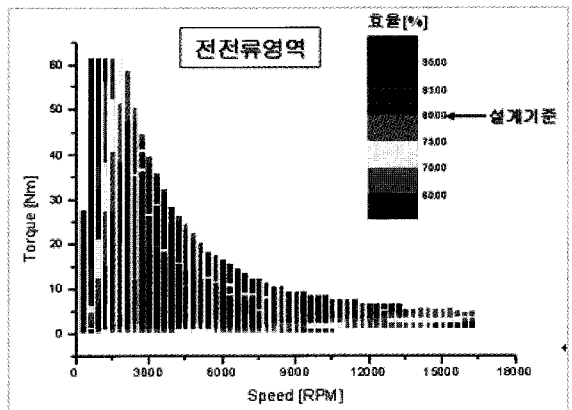


그림 10 FCEV 구동용 전동기의 출력특성 및 효율맵

다. 매입형 영구자석 전동기 설계시 돌극성(Saliency)을 극대화하고자 d-q축 인덕턴스를 이용한 설계가 이루어지며, 구조적 자계 포화특성을 고려한 인덕턴스 추출에서 설계 결과 차이를 보이게 된다.

그림 9는 중형 SUV급 FCEV 구동용 340Nm, 3000rpm급으로 설계된 전동기의 실 제작모델 및 자계 해석 결과이다. 그림 10은 설계 모델의 자계해석을 통한 토크-속도 및 효율 특성을 나타낸다. 주 운전구간(2500~3500rpm)에서 가장 높은 효율이 되도록 설계목적에 부합한 특성을 보임을 알 수 있다.

4.3 직구동 전동차용 영구자석 전동기 설계

직구동 전동차용 전동기는 기존의 감속기형의 외부순환형 냉각구조에서 감속기를 탈거하고 전폐형 자기통풍형 냉각구조를 지닌 형태로 큰 기동토크를 요구하고 있다. 이와 같은 높은 기동토크를 만족하면서 협소한 대차 구조에 체결되기 위해서는 사이즈를 최소화 할 수 있는 영구자석 전동기의 적용이 필수적이다. 특히, 대용량 영

구자석 전동기에 따른 경제성을 고려한 회전자 형상설계에서부터 고조파 특성 및 부하조건에 따른 제어정수 추출 등은 수치해석 기반의 설계 프로세스에서 구현된다.

그림 11은 280kW, 12000Nm, 216rpm급 직구동 전동차용 전동기(Direct Drive Motor, DDM) 설계안 및 제작모델을 나타내며, 그림 12는 수치해석 기반의 특성해석 결과로써, 출력특성 및 다양한 부하조건에 상응하는 전류 위상각 및 크기에 대한 수치해석 결과 등을 나타내고 있다.

4.4 직접구동용 풍력발전기 설계

풍력발전 시스템의 경우 증속기로 인해 많은 기계적 손실문제 해결과 저속에서 상대적으로 높은 토크밀도와 고효율 특성이 요구된다. 아울러, 지역적 풍속정보 등을 고려한 풍속 확률밀도 함수모델링 등을 적용하여 연간 에너지 생산량(Annual Energy Production, AEP)을 설계의 주목적으로 산정하고 있다. 반면, 구조적인 안정성을 바탕으로 한 사이즈 및 중량감소 등의 설계

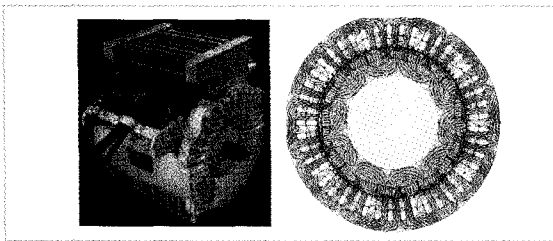


그림 11 직구동 전동차용 영구자석 전동기 및 자계특성

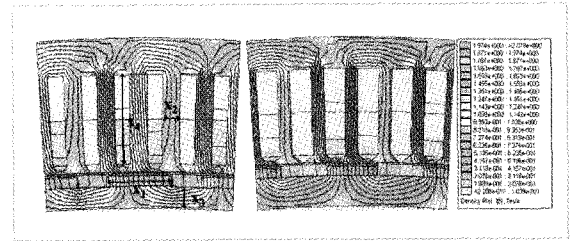


그림 13 영구자석 풍력발전기 설계변수 및 설계결과

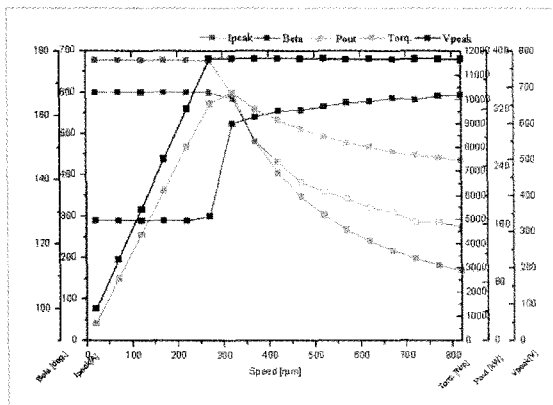


그림 12 직구동 전동차용 영구자석 전동기 특성해석 결과

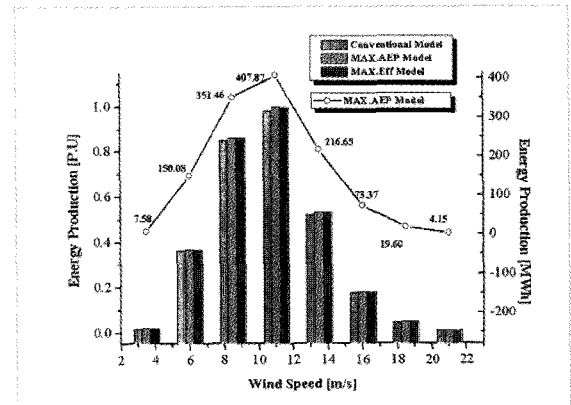


그림 14 영구자석 풍력발전기 에너지생산량 곡선

제한을 만족해야 한다.

그림 13은 정격토크 148kNm, 정격속도 32rpm에서 운전되는 500kW급 직접 구동용 표면부착형 영구자석 동기발전기(Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator)의 설계안을 나타내고 있다. 그림과 같이 설계 변수는 구조적으로 자극각도(), 고정자 치 폭(), 회전자 요크 두께(), 고정자 슬롯 높이() 등을 선정할 수 있으며, 필요시 최적화 알고리즘을 적용하여 최적설계를 수행할 수 있다[15].

그림 14는 설계된 영구자석 풍력발전기의 자계수치 해석을 통한 연간 최대에너지 생산량 특징을 나타낸 것으로 기존 모델 및 정격 효율을 최대 설계에 비해 연간 최대에너지 생산량 최대화 설계결과가 우수한 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

상기 기술된 수치해석기반의 전기기기 설계는 궁극적으로 통합적인 시스템 성능 최적화 설계환경 구축으로 이어져야 하며, 이는 전기기기의 전자계 설계 최적화를 중심으로 여러 연관 분야와의 상호 유기적 협조 관계를 바탕으로 시스템 성능을 극대화하고자 함이다. 그림 15에서 나타내었듯이 전자기적 해석을 기반으로

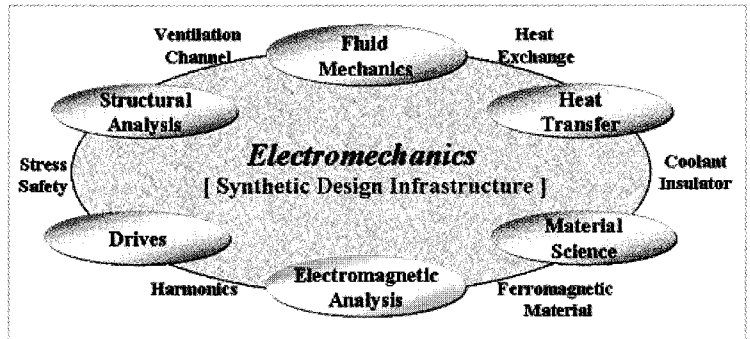


그림 15 통합적 전기기기 설계

제어, 열전달, 유동, 구조, 제어 등과의 설계 입출력 데이터를 연관시켜 여러 제반 특성을 전기역학(Electromechanics) 기술로 수렴될 수 있다.

이와 같은 통합적 설계 환경은 정부하 특성을 요구하는 고전적 일반산업용 전기기기가 아니라 다양한 운전패턴, 우수한 동력성능, 넓은 고효율 운전영역, 고신뢰성이 요구되는 결합형 전기기기에 적합할 것이며, 고부가가치를 창출하기 위한 성장동력형 시스템용용 전기기기에 적합한 가장 이상적인 연구개발 환경이 될 것이다. 특히, 궁극적으로 고급형 전기기기 관련부문의 연구개발 클러스터를 형성하여 산업의 융복합화에 부응하는 기술적 솔루션을 창출하는 밑거름이 될 것으로 판단되며, 각 기능 모듈간의 긴밀한 정보교류, 핵심역량에 기초한 연구 구분, 근거리 산업연계 기반화가 동반될 때 큰 시너지 효과를 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] J. Jarvinen, "Future Perspectives of Electrical Machines and Market Trends", Proc. ICEM2000, pp.1~4, 28-30 August 2000
 [2] V. B. Honsinger, "Sizing Equations for Electrical Machinery", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 1, pp.116~121, March 1987
 [3] Surong Huang, Jian Luo, Franco Leonardi, Thomas A. Lipo, "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines", IEEE Trans. on Industry

Applications, Vol. 34, No. 1, pp.92~97, January/February 1998
 [4] Jan K. Sykulski, "Field Simulation as an Aid to Machine Design : the State of the Art", Power electronics and Motion Control Conference, pp1937-1942, 2006
 [5] A. M. Winslow, "Numerical Calculation of Static Magnetic Fields in an irregular triangle mesh", University of California Report, UCRL-7784, 1964, J Comput Phys 1, pp149, 1966
 [6] C.W. Trowbridge and J. K. Sykulski, "Some Key

- Developments in Computational Electromagnetics and their Attribution”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No 4, pp503-508, 2006
- [7] M. V. K. Chari, and P.P. Silvester, “Finite Element Analysis of Magnetically Saturated DC Machines”, IEEE Trans. PAS, vol. 89, No 7, 1642-51, 1970 & vol. 90, No 2, pp454-464, 1971
- [8] OPERA, Vector Fields Ltd, <http://www.vectorfields.co.kr>
- [9] MagNet, Infolytica, <http://www.infolytica.com>
- [10] Maxwell, Ansoft, <http://www.vectorfields.co.kr>
- [11] Flux, CEDRAT Software, <http://www.cedrat.com>
- [12] O. Biro, K. Preis, and K. Richter, “On the use of the Magnetic Vector Potential in the Nodal and Edge Finite Element Analysis of 3D Magnetostatic Problems”, IEEE Trans. Magn., vol. 32, No 3, 1996
- [13] Y. Takahashi and S. Wakao, “Large-Scale Analysis of Eddy-Current Problems by the Hybrid Finite Element-Boundary Element Method Combined With the Fast Multipole Method”, IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 4, pp. 671-674, 2006.
- [14] A. Sobester, S. J. Leary and A. J. Keane, “On the design of optimization strategies based on global response surface approximation Models”, Journal of Global Optimization, 33, pp.31-59, 2005
- [15] Khan, M.A, Pillay,P, “Design of a PM Wind Generator , Optimised for Energy Capture over a Wide Operating Range,” Proc.ofIEMDC2005, pp. 1501-1506, May 2005.