

# Computer를 이용한 電力機器의 設計技術

김 규 탁\*

(\*창원대학교 공과대학 전기공학과 조교수)

## 1. 서 론

우리나라의 산업은 1970년대 이전까지는 노동집약적인 산업이 주축을 이루었으나 1980년대에 들어와서 점차 기술집약적인 산업으로 전환되었다. 이와같은 발전과정에서 우리는 급성장만을 추구하여 왔기 때문에 산업기술의 대부분을 외국에서 도입하였고 우리의 자체개발 노력을 회피하였다. 그러나 근래에 들어와 우리의 경제력이 성장함에 따라 외국의 경쟁상대국이 기술이전을 기피하고 핵심부품의 가격을 높이거나 공급을 기피하는 현상이 발생하여 무역적자가 증가하는 현상이 나타났으며 그 대표적인 제품들이 정밀 구동용 전력기기이다.

최근, 각종 산업분야의 자동화추이에 따라 이들 시스템을 구동하기 위한 정밀 전력기기의 사용은 증가일로에 있으며 전력기기의 종류 또한 세분화, 전문화되고 있다. 또한 생산제품의 輕, 薄, 短, 小化, 高 信賴性, 제품의 life cycle의 단축등에 따라 이들의 구동용 전력기기도 에너지밀도가 높은 compact형의 제품을 신속히 개발하여야 한다. 따라서 선진외국에서는 전력기기의 정밀한 특성해석 및 성능개선과 관련된 연구들이 활발히 진행되어 각 메이커마다 고유의 설계 패키지를 개발하여 사용목적에 부응하는 전력기기를 신속히 설계, 제작하여 국제 경쟁력 강화를 꾀하고 있다.

그러나, 국내의 산업계 현황을 살펴보면 전력기기 산업은 수입대체 및 내수위주의 산업으로 육성

되어 총 생산의 87[%]이상을 내수에 치중하여 새로운 기술개발, 품질향상, 시장 개척의 의욕상실을 초래하여 전력기기 분야의 발전은 이루어지지 못하였다. 또한, 산업계의 기술을 뒤받침하여야 할 학계의 상황도 1970년대에 전동기의 해석 분야에 전자장 수치해법에 도입되어 약간의 연구진척이 이루어지는 듯하였으나, 그나마 1980년대에 들어 정부의 첨단분야 우선 지원 방침에 따라 전력용 반도체 소자에 의한 전동기의 운전제어에 연구인력의 대부분이 편중되어 전력기기의 특성해석 및 최적 설계를 통한 고효율화 연구분야는 몇몇 전문가에 의해 명맥만 유지되고 있는 실정이다.

이에 따라 현재 국내의 전력기기 설계수준은 전동기의 사양이 주어지면 경험을 바탕으로 치수를 결정한 후 특성이 만족되지 못할 경우 치수제원을 변경해 가면서 요구하는 특성을 만족시키는 시행착오적인 방법을 이용하는 초보적인 단계이며, 다만 설계된 전력기기의 특성해석에 정밀해석수단으로 확립된 유한요소법, 경계요소법, 또는 이들의 혼합적용등을 일부에서 이용하고 있다. 이와 같은 방법에 의존하므로써 복합적인 설계파라미터로 구성되는 전동기의 비선형적인 특성이나 가격, 중량등을 최적화하는 설계는 엄두도 내지 못하고 있는 실정이다.

다만, 1980년대 중반부터 산학협동연구가 이루어져 국내에서 개발된 유한요소 해석 컴퓨터 프로그램이 산업체 및 연구소에서 응용되고 있으며 근래

에는 산업체에서 자체 개발된 프로그램도 대기업을 중심으로 이용되고 있으나 전력기기를 생산하는 기업체의 대부분이 중소기업이므로 전력기기의 특성 해석이나 설계에 대한 신기술이나 정보조차 얻기도 어려운 실정이다.

따라서, 본고에서는 외국 및 국내 학계에서의 전력기기의 연구, 개발에 대한 최근 동향에 대하여 간략히 기술하여 전력기기를 생산하는 대부분의 중소기업들에게 신정보를 제공하고자 한다.

## 2. 전력기기의 해석법

공학분야에서의 수치해석은 모델변수와 이들에 의하여 결정되는 특성들 사이의 관계를 찾아내는데 이용되고 있다. 그림 1에서와 같이 모델변수가 주어지고 이에 대응하는 특성을 구하는 문제를 순변환문제(direct problem)라 하고, 반대로 원하는 특성을 얻기 위한 모델변수를 구하는 문제를 역변환 문제(inverse problem)라 한다.

전력기기분야에서의 수치해석도 주로 순변환 문제에 한정되어 왔다. 즉, 주어진 설계 파라미터(예 : 공극, 극간격, 슬롯깊이, 전동기 길이등)들에 의해 기기의 특성(예 : 공극 자속밀도, 발생력등)이 어떻게 되는가를 구하는 특성해석이 주류를 이루고 있으며 전력기기의 정밀 설계를 위하여도 본 과정은 반드시 이루어져야 하며 정확하여야 한다. 따라서 본 고에서는 전력기기의 설계를 위한 특성 해석 방법에 대하여 먼저 간략히 언급하고자 한다.

전력기기의 특성해석법은 일반적으로 제반 파라미터를 집중정수로 취급하는 등가회로법과 분포정수로 취급하는 전자장 수치 해법으로 대별할 수 있다. 회로이론을 기초로한 등가회로법에 의한 해석은 기기의 구조가 간단하거나 전기, 자기적으로 완전 대칭성을 지닌 경우를 제외하고는 정확한 해를 구할 수 없다. 특히 슬롯이나 치등과 같이 기하학적

으로 복잡한 형상을 갖는 경우는 이들을 평균자기 저항으로 밖에 고려할 수 없으므로 많은 오차를 수반하게 되어 해석의 정밀도가 떨어지는 단점이 있어 1970년대 후반부터는 Maxwell의 전자방정식을 기본으로 하는 전자장 수치해법에 의하여 기기의 제반 특성을 해석하고 있다.

전자장 수치해법에 의한 전력기기의 특성해석을 위한 자체해석법으로는 유한차분법, 유한요소법, 경계요소법등이 있으나 복잡한 형상의 취급이 용이하고 비선형 해석이 가능한 이유로 인하여 유한요소법이 가장 많이 사용되고 있으므로 이에 대하여 간단히 논하고자 한다.

통상, 전력기기의 자체해석에서는 다음과 같은 기초 방정식으로 부터 출발하여 정식화를 진행하게 된다.

$$\text{rot}(\nu \text{rot } A) = J_0 - \sigma(\partial A / \partial t + \text{grad } \phi) \quad (1)$$

여기서,  $\nu$ 는 자기저항율,  $A$ 는 자기벡터포텐셜,  $y$ 는 자화전류밀도,  $\sigma$ 는 도전율,  $\phi$ 는 전위이다. 식 (1)을 유한요소법에 의하여 해석하는 경우의 계산 순서는 다음과 같다.

- 1) 포텐셜 분포를 구하기 위하여 영역을 다수의 요소로 분할한다.
- 2) 각 요소내의 포텐셜 변화를 다음식과 같은 근사함수로 가정한다.

$$A^{(e)} = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (2)$$

여기서  $\alpha_i$ 는 요소에 의해 결정되는 상수이다.

- 3) 절점포텐셜을 미지수로 하는 연립 1차 방정식을 변분원리나 Galerkin 법에 의하여 작성한다.
  - 4) 경계조건을 부가하여 미지절점수를 감소시킨다.
- 위 과정에 의한 시스템 방정식 다음식과 같이 된다.

$$[H] \{A\} = -[C] \{I_0\} + \{Q\} \quad (3)$$

여기서  $[H]$ 는 계수 매트릭스,  $[C]$ 는 전류  $\{I_0\}$ 의 계수 매트릭스,  $\{Q\}$ 는 기지 포텐셜등의 함수이며 2차원 해석의 경우에는 0으로 주어진다.

일반적으로, 전력기기는 전압원에 접속되어 있으므로 전압은 일정하고 전류는 부하조건에 따라 변화하는 종속변수이므로  $[C]$ 는 미지수이다. 따라서 유한요소법에 의한 식과 전압방정식을 결합하여 전

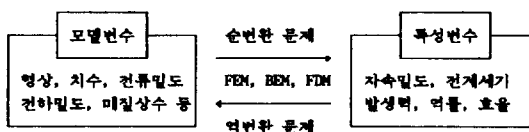


그림 1. 순변환 문제와 역변환 문제

압을 구동함수로 하는 유한요소법이 전력기기의 해석에 많이 이용되고 있다. 그러므로 전압방정식과 유한요소법에 의한 시스템 방정식을 결합하면 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{Bmatrix} [H] \\ [M] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [C] \\ [Z] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [A] \\ [I_0] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [0] \\ [V] \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $[M]$ 은 역기전력을 나타내는 매트릭스이다.

식 (4)로 주어진 방정식을 풀면 구하고자 하는 각 절점에서의 포텐셜 및 각상의 전류를 구할 수 있다. 이로부터 전력기기의 특성해석에 필요한 공극자속밀도, 발생력, 전압과 전류의 위상차에 의한 역률, 효율등을 계산할 수 있다.

그러나 전자장 수치해법에 의한 특성해석은 컴퓨터의 도움이 없이는 해석이 불가능하며 특성해석을 위한 계산시간이 오래 걸리는 단점도 있다.

따라서, 전력기기의 특성해석을 Maxwell의 전자방정식을 기본으로 하는 전자장이론에 의하여 등가회로의 파라미터를 결정한 후 등가회로를 구성하여 전기적, 기계적 특성을 연계한 각종 운전 특성을 종합적으로 해석하는 혼합법도 개발되어 이용되고 있다.

### 3. 전력기기의 최적화 설계

전자계산기의 대용량, 고속화에 따라 전력기기의 수치해석 기법도 괄목할 만한 발전을 이루었다. 그 결과 전력기기의 기하학적 형상 및 제반 파라미터가 주어진 경우 정밀 특성해석이 가능하게 되었다.

그러나, 전력기기의 설계에서는 주로 피어민스법, 실험식등을 이용하여 기본설계를 행한 후에 각종 수치해석법을 통하여 성능을 평가하고, 이 평가한 특성치가 목표치에 미치지 못하면 경험에 의한 시행착오적인 방법으로 설계파라미터를 변경하여 특성치를 목표치에 도달시키는 방법을 주로 이용하고 있다. 이와 같은 방법에 의존하므로써 복합적인 설계파라미터로 구성되는 전력기기의 비선형적인 특성이나 가격, 중량등을 최적화하는 설계는 업무도 내지 못하면서 설계의 정확도는 떨어지면서 높은 개발비와 더불어 개발기간도 오래 걸리는 악순환이 거듭되고 있다.

악순환이 거듭된 주 원인은 전력기기의 설계에서는 무엇을 최적설계의 목표로 할 것인가에 따라 설계 데이터도 큰차이가 나타나기 때문이다. 일례로 FA용용기기등의 초저속에서는 효율은 그다지 문제시 되지 않으나 속응성, 제어성, 출력/KVA, 출력/중량의 최대화가 이루어지도록 전력기기를 설계하여야 하나 power용등 비교적 용량이 큰 전력기기에서는 인버터등의 전력 공급장치도 고려된 KVA, 전력소비량의 최소화, 효율, 역률의 최대화 등이 이루어지도록 전력기기를 설계하여야 하며 초기 투자와 경상경비도 설계시 고려 하여야 한다. 즉, 사용목적에 따라 효율 극대화, 부피 및 제작 단가의 극소화, KW/KVA의 극대화, 속응성의 극대화등이 이루어 지도록 최적화를 진행하여야 한다. 그러나 어느 한가지 만을 극대화 시키기 위한 설계를 하다보면 다른면에서의 성능이나 구조면에서 불합리한 설계가 이루어지기 때문에 특성해석 분야보다는 설계분야가 아직까지 활성화되지 못하였다.

이러한 문제점을 극복하고 체계적인 설계방법을 제시하기 위하여 설계변수의 변화가 얻고자 하는 시스템의 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 정보, 즉 설계 민감도를 계산하고 이를 최적화 알고리즘에 적용하여 설계파라미터나 최적형상을 구하는 최적 설계기법에 대한 연구가 근래 시작되어 활발한 연구가 진행되고 있다. 지금까지의 연구 및 개발동향을 살펴보면 크게 2가지로 나눌 수 있다.

먼저 등가회로나 Maxwell 전자방정식에 의하여 공극에서의 특성을 나타내는 방정식을 도출하여 이를 최적화 기법과 결합하여 설계 파라미터의 최적화를 도모하는 연구가 한 부류이다. 이때 목적함수로써는 사용목적에 따라 효율, 출력등 여러가지를 취할 수 있으나 어느 한가지 만을 극대화 시키기 위한 설계를 하다보면 다른면에서의 성능이나 구조면에서 불합리한 설계가 이루어질 수 있으므로 다른 성능들은 제약조건으로 취급하여 극단적인 설계가 되지 않도록 하여야 하므로 이 제약조건의 결정이 전력기기의 최적 설계에 많은 영향을 끼치게 된다. 따라서 제약조건의 적절한 선정이 요망되며 이는 많은 경험이 필요하다.

세부설계 과정으로 많이 이용되고 있는 형상 최적화는 민감도 해석법과 슬롯이나 치부분의 형상에 직접 영향을 주는 절점좌표값의 변화를 독립변수로

선택하는 형상최적화법으로 나눌 수 있다. 이와같은 방법은 주로 유한요소법이나 경계요소법과 같은 수치해법과 최적화 기법을 결합하여 이용하고있다.

#### 4. 최적 설계 예

본 장에서는 현재까지 전기학회지나 기술조사보고등을 통하여 보고된 전력기기의 설계예를 도시하고자 한다.

표 1은 Maxwell 전자기정식으로 부터 등가회로의 회로정수를 도출하고 최적화 알고리즘으로는 순차 비제약최소화기법을 이용하여 직선 추진 시스템

의 구동용 전동기인 리니어 모터의 설계 파라메터 최적화 예를 도시한 것이다.

표 1에서 독립변수로써는 리니어 모터의 특성에 큰 영향을 미치는 공극과 특성 및 1차 철심의 중량에 많은 영향을 미치는 극간격과 철심의 적층폭, 슬롯의 누설리액턴스에 관계되어 특성 변화에 민감한 슬롯폭과 슬롯피치의 비, 2차 무효전력과 2차측 재료비에 관련된 2차측의 알루미늄 두께, 그리고 2차 도체판에 유도되는 와전류의 통로가 되는 overhang의 길이로 하였고, 그 이외의 설계 파라메터들은 고정된 값으로 하였다.

한편, 목적함수는 전원 용량( $F_1$ )과 주행특성을

표 1. 최적 설계 데이터

ANALYSIS OF OPTIMAL DESIGN										
		SYM-BOL	CONSTANT	VAR IABLE	Ini. Design	OBJ. FUNC. F1	OBJ. FUNC. F2	OBJ. FUNC. F3	OBJ. FUNC. F4	OBJ. FUNC. F5
R A T E D	Primary Voltage (V)	$\downarrow 3V_1$			220	220	220	220	220	220
	Frequency (Hz)	$f_1$			60	60	60	60	60	60
	Primary Current (A)	$I_1$			7.20	6.80	6.87	7.02	6.68	7.03
	Capacity (KVA)	KVA			2.75	2.59	2.62	2.67	2.55	2.68
	Rated Slip	$S_n$			0.62	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64
	Thrust (N, F)	$F_x$			153.7	164.6	157.5	152.6	157.0	155.7
P R I M A R Y	Normal force (N, F)	$F_n$			273	256	231	304	255	290
	Synchronous Speed (m/s)	$v_1$			8.00	8.47	8.37	8.32	8.34	8.23
	Primary Length (mm)	L			326.8	345.7	342.2	339.6	340.6	335.9
	Number of Phase	m	O		3	3	3	3	3	3
	Number of Poles	P		O	4	4	4	4	4	4
	Pole Pitch (mm)	$\tau$		O	66.7	70.6	69.7	69.3	69.5	68.5
I R A I L	Primary Width (mm)	h		O	64.4	72.0	69.7	62.9	70.6	64.2
	Primary Height (mm)	$d_a$		O	61.3	53.6	62.7	58.7	57.8	59.2
	Slots /Pole, Phase	q	O		2	2	2	2	2	2
	Slot Pitch (mm)	$t_s$			11.1	11.8	11.6	11.6	11.6	11.4
	Slot Width (mm)	$w_s$			6.7	7.2	6.5	7.0	6.9	6.9
	Slot Depth (mm)	$d_s$		O	46.3	38.6	39.4	43.7	42.8	44.2
S E C O N D A R Y	Short Pitch Factor	$\beta$	O		5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6
	Series Turns /Phase	Nph	O		480	480	480	480	480	480
	Primary Weight (Kg)	$G_1$			8.66	8.97	9.76	8.28	9.14	8.47
	Mechanical Clearance	g		O	3.00	2.52	2.53	2.84	2.55	2.75
	Thickness of Back Iron Plate (mm)	$d_1$	O		10	10	10	10	10	10
	Al Thickness (mm)	$d_2$		O	3.59	3.53	3.94	3.18	3.55	3.36
C O V E R L A Y E R	Overhang Length (mm)	c		O	21.2	27.8	20.4	20.6	23.3	21.7
	Reaction Rail Width (mm)	$h_2$			107.0	127.6	110.5	104.1	117.2	109.6
P E R F O R M A N C E	KW / KVA (%)				16.8	19.1	18.1	17.1	18.5	17.4
	Power Factor (%)	$\cos\phi$			50.1	60.0	56.3	53.2	57.4	53.6
	Efficiency (%)	$\eta$			33.5	31.8	32.1	32.2	32.2	32.5

악화시키는 수직력( $F_2$ ), 설비단가에 영향을 미치는 모터의 중량( $F_3$ ),  $F_4$ 는 용량과 수직력,  $F_5$ 는 용량과 중량을 선형 결합시킨 다중 목적함수를 택한 경우의 최적화 결과이다.

최적화 결과, 용량을 목적함수로 택한 경우 초기 설계에 비하여 용량이 5.8[%] 감소되었으며 수직력 및 중량 최소화에도 초기 설계시보다는 용량이 줄었다. 이는 초기 설계치보다는 극간격이 증가하였기 때문으로 효율은 다소 감소하였으나 슬롯폭 / 슬롯피치를 고정시켰으므로 극간격 증가에 따라 슬롯폭의 증가로 슬롯누설리액턴스의 감소로 역률이 크게 증가하였기 때문이다. 용량 최적화를 목적함

수로 택한 경우 중량최적화의 경우보다 중량은 0.69[Kg] 증가하였으나 용량은 3[%]감소 하였다. 또한 중량을 목적함수로 택한 경우는 중량이 4.6 [%], 수직력인 경우는 18.2[%]감소하였다.

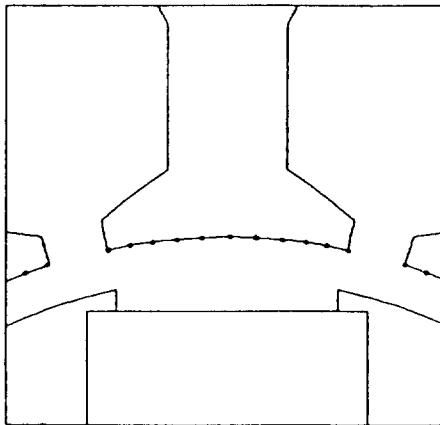
용량과 수직력을 선형 결합시킨 다중 목적함수를 택한 경우의 가중치는 본 연구에서는 1:1로 설정 하였다. 최적화 결과, 용량 및 수직력을 각각 목적 함수를 택한 경우보다도 용량은 1.5[%], 수직력은 1[N]이 오히려 더 감소하여 가장 이상적인 설계가 되었다. 따라서, 리니어 모터의 중량이 그리 문제시 되지 않는 경우의 최적설계에 있어서는 목적함수에 수직력을 포함시키는 다중목적함수를 택하는 것이 요구된다.

한편, 용량과 중량을 선형결합시킨 다중목적함수를 택한 경우, 용량의 감소는 크지 않고 중량의 감소가 크게 나타났다. 따라서 용량과 중량을 선형 결합시켜 다중목적함수로 택하는 경우, 용량을 보다 더 감소시키기 위하여는 가중치를 용량쪽에 더 많이 주어야 한다.

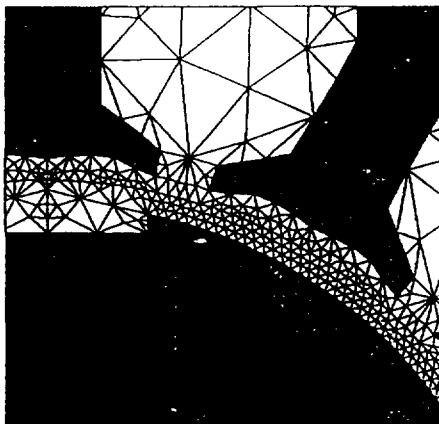
그림 2는 형상 최적화의 예로써 DC 서어보 전동기의 코깅 토오크를 최소화 시키기 위한 민감도 해석 예이다. 코깅 토오크를 최소화 하기 위한 설계변수는 전기자 돌극 표면으로 한 경우이다.

최적화 결과 초기 형상시 보다 최적 형상시 코깅 토오크를 1/2이상 줄일 수 있었다.

이 외에도 다수의 연구 결과들이 발표되었으나 지면 관계상 두 예만 본 고에서는 언급하였다.



a) 코깅 토오크 최소화를 위한 파라미터



b) 최적 형상 및 요소망

그림 2. 최적화 모델 및 형상

## 5. 결 론

본 고에서는 전력기기의 전자기 수치해법 및 그 역문제인 설계기술에 대하여 간략히 언급하였다.

10여년의 짧은 국내 연구기간에 비하여 전력기기의 수치해법 및 설계기술이 괄목할 만한 발전을 이룰 수 있도록 힘쓰신 이 분야 종사자들에게 본 고를 빌어 감사드립니다.

앞으로 전력기기의 업무에 종사하는 산, 학, 연의 관계자들이 더욱 더 일치단결하여 정보교환 및 상호교류를 통하여 구조공학의 범용 프로그램인 NASTRAN, SAP등이나 전기공학의 범용 패키지인 Flux, Maxwell, Magneto등과 같은 powerful 한 응용 패키지가 국내에서도 개발되어 전력기기를

야에 종사하는 실무자 및 대학원생들이 손쉽게 이용할 수 있기를 바랍니다.

참 고 문 헌

- [1] 대한전기학회 기술조사보고, “전자장 수치 해석 기법 현황”, 1992
- [2] 대한전기학회 기술조사보고, “소형 모우터 기술 현황”, 1992
- [3] 전기연구소, “고효율 전동기 기술 개발 연구기획”, 1992
- [4] 日本 電氣學會技術報告, “回轉機の電磁界數値解析法”, 375號
- [5] 임달호 외 2인, “등가회로법과 SUMT를 이용한 편측식 선형 유도 전동기의 설계변수 최적화”, 전기학회 논문지 vol. 42, no. 5, pp. 20-28, 1993
- [6] 원종수 외 1인, “정현파 구동 영구자석 AC서보 모터의 자석치수의 최적설계”, 전기학회 논문지 vol. 42, no. 5, pp. 12-19, 1993
- [7] 한송엽 외 5인, “민감도 해석을 이용한 자기편향 코일의 설계”, 전기학회 논문지 vol. 42, no. 2, pp. 118-124, 1992
- [8] 한송엽 외 2인, “3차원 정자계 문제의 형상 최적 설계를 위한 설계 민감도 해석”, 전기학회 논문지 vol. 41, no. 8, pp. 850-857, 1992

**김규탁(金奎卓)**

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 1989년 3월. 현재 한양대학교 전기공학과 및 산업대학원 강사. 현재 창원대학교 전기공학과 조교수