

차동변압기의 계열화 설계 기법에 관한 연구

조경재*, 이정일**, 윤석암***, 차인수****, 이권현*

*담양대학 인터넷 정보통신과, **송원대학 디지털 전기정보과,
송원대학 전자미디어과, *동신대학교 전기광전자공학부

A Study on the Systematization Design Technique of a Differential Transformer

K.J. Cho*, J.I. Lee**, S.A. Yoon***, I.S. Cha****, and K.H. Lee*

*Dept. of Internet Information & Communication Eng. Provincial College of Damyang

**Dept. of Digital Electrical Information Songwon College

***Dept. of Electronic Media Eng. Songwon College

****Dept. of Electrical & Optic Electronics Eng. Dongshin Univ.

ABSTRACT

In this paper, systematization design method by analogical interpretation which is profitable in the compatibility and standardization of developed products and is useful of reducing construction time and price was introduced.

Systematization design based on analogical interpretation is a method which systematizes each characteristic with mathematical description in order to make variable design parameters correspond with the terms desired.

In this paper, after choosing a differential transformer as the sample for design components each characteristic was expressed mathematically by analogical interpretation and miniaturized ones were manufactured by similarity factors.

The relationship between input voltages of an actual differential transformer and the model and output voltages occurred by the change of the displacements in operational axis was shown.

1. 서 론

국제 무역 정책의 개방으로 국가 간의 경쟁이 더욱 치열하게 진행됨에 따라 품질의 차별화를 통한 국제 경쟁력을 향상시키기 위해서 제품의 소형화, 경량화, 고품위화, 저가격화로서 고객의 요구를 만족시키려 하고 있다. 이들 조건들을 만족시키고 특히 제품의 고품위화를 위해서는 재료에 대한 문제점을 해결하고, 제작기술상의 방법 및 제품의 설계 기술 등을 향상 시켜야 한다.

그중 제품의 설계시 설계자나 개발자는 수요자로부터 기능, 가격, 제작기간 등의 다양한 요구사항에 접하게 된다.

이에 대한 제품의 설계시 개발 제품의 표준화 및 호환성과 제작공정의 단축, 가격저하 등을 우선적으로 요구하게 된다면 유추해석에 의한 계열화 설계기법을 택할 수 있다.

계열화 설계기법은 주어진 임의의 모델에 대한 기기구조의 변환 시스템과 구성요소를 면밀하게 분석하여 이들 구성요소나 또는 구성요소의 디멘존을 가변함으로서 주파수, 출력 변동 등 아직까지 밝혀지지 않았거나, 예견 하고자 하는 특성을 결정지을 수 있다.^{[1],[2]}

본 논문에서는 설계자나 개발자가 동일한 설계 및 제조 기술에 바탕을 둔 제품의 표준화로 국제화 규격에 쉽게 적용할 수 있고, 그로 인한 가격 경쟁의 장점을 지닐 수 있는 유추해석에 의한 계열화 설계기법을 제시하였다. 또한, 그 응용의 예로서 차동변압기를 모델로 선정하여 유추해석에 의해 소형화로 설계한 후 시작품을 제작하여 인가전압과 가동축의 변위에 따라 나타나는 출력전압에 대하여 사전에 예측한 기기의 특성과 실험 결과를 비교 분석하였다.

2. 유추해석 설계 기술

2.1 계열화 설계

유추해석 기법을 이용한 계열화 설계는 한 모델의 집중적인 연구 결과를 토대로 다단계의 표준화

설계가 가능하므로 설계기간을 단축시킬 수 있으며, 생산기술 및 공정이 동일한 조건에서 이루어지기 때문에 기기기구 설계나 개발비가 설계 대상을 각각 별도로 개발하는 방법인 비표준화나 비계열화 설계 방법에 비해 현저하게 절감되는 설계 기법이라 할 수 있다.^{[1],[2]}

계열화설계는 수학적 기술이 가능한 설계 정수와 그 기술이 불가능한 설계 정수로 구분되어야 한다. 수학적 기술이 가능한 파라미터는 유사이론 알고리즘을 통해 개개의 현상을 프로그램화하여, 이들 프로그램이 전체적인 시스템에 적용될 수 있도록 작성되어야 한다. 그러나 수학적 기술이 불가능한 설계 정수는 별도의 해설문이나 그래픽 데이터를 참고하여 단계적 급수로 부분적 유사이론을 적용하여 최종 프로그램을 실현하도록 한다.^[3]

주어진 조건 내에서의 수학적 고찰을 통해 확실하게 접근되어질 수 없는 간접 파라미터는 계열화의 제한적 요소로 작용된다. 그것은 임의의 규정된 크기에서 다른 크기로의 계열화 작업이나 또는 개개의 크기로부터의 운전특성을 전개함에 있어 방해가 된다.

그림 1은 계열화 설계를 위한 기기기구의 입·출력 및 간접 매체에 대한 문제점을 도시한 것이다.

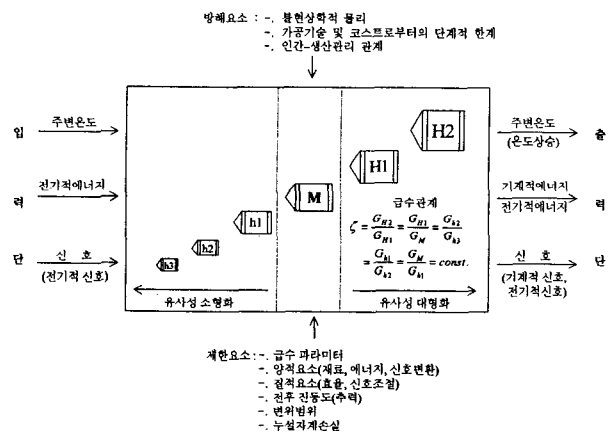


그림 1 계열화 설계를 위한 기기기구의 입출력 및 간접매체
 Fig. 1 The input, output and indirect medium of mechanical equipment for systematization design

2.2 유사성 척도

기기의 외형적 크기인 길이, 체적 등으로부터 유사성을 찾고 내적의 크기는 출력, 회전수, 전류, 저항 등 전기적, 기계적 변수의 유사성을 물리적인 상수와 길이척도로써 나타낼 수 있다. 기구나 기기 및 기계장치의 외적·내적 모든 구성요소가 유사성을 갖는다고 할 때 완전 유사성이라고 하며 내적 또는 외적 요소 중 어느 한쪽의 유사성만을 갖게 될 때 부분적 유사성이라고 한다.^{[3]:[5]}

어떤 두 기기의 물리적 특성의 기본단위 즉, 길이, 힘, 시간 등의 관계에 대해 유사한 정도를 나타내는 단위는 유사성 척도로서 표현한다.

이 유사성 척도는 모델(M)과 주 실행기기(H)의 제반 기하학적·물리적 양에 대해서 M과 H의 비교 관계로부터 찾을 수 있으며 항상 길이 척도(l^*)로 표현한다.

$$\text{유사성척도}(l^*) = \frac{\text{주실행기기의 물리적 양}(B)}{\text{모델의 물리적 양}(B)} \quad (1)$$

다음 표 1은 식 (1)로부터 산정된 기본 물리적 양에 대한 유사성 척도의 한 예를 표현하고 있다.

표 1 산정된 기본 물리적 양에 대한 유사성 척도의 예
 Table 1 Example of similarity factor for produced basic physical quantity

물리적 양	기본단위	유사성 척도 l^*	비 고
길이 L	m	$L^* = l^*$	
넓이 S	m^2	$S^* = l^{*2}$	
체적 V	m^3	$V^* = l^{*3}$	
속도 v	m/s	$v^* = l^*/t^*$	t : 시간
출력 P	N·m/s	$P^* = F^* \cdot l^*/t^*$ $= \left[l^{*3} \frac{l^*}{t^{*2}} \right] \cdot \frac{l^*}{t^*}$ $= \frac{l^{*5}}{t^{*3}}$	$F = m \cdot \frac{d^2 l}{dt^2}$ m : 질량
관성 모멘트 J	$Kg \cdot m^2$	$J^* = \int r^{*2} dm^* = l^{*5}$	r : 회전자 반경 m : 질량

3. 차동변압기의 유추해석

3.1 모델링

차동변압기는 코일의 상호 유도 작용을 이용하여 가동축의 변위에 비례하여 유도되는 전기량으로 변환하는 장치, 즉 기계적 변위를 전압으로 변환시키는 장치이다. 차동변압기는 매우 정밀한 기기로서 자동제어기의 위치검출기, 정밀 중량 측정기 및 자동차 엔진 호흡기관의 부압을 측정하는 장치 등으로 널리 이용되고 있다.^{[6] [8]}

그림 2는 본 논문에 이용된 차동변압기의 구조를 나타내고 있다.

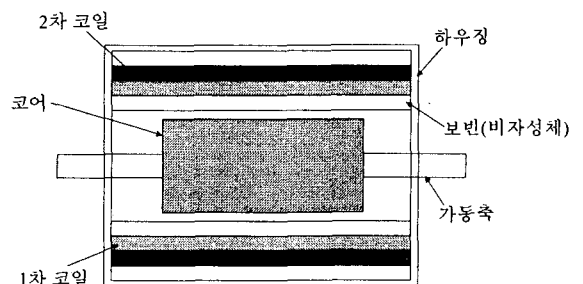


그림 2 차동변압기의 구조
 Fig. 2 Structure of the differential transformer

1차 코일과 두개의 2차 코일, 비자성체이면서 도전율이 뛰어난 재질인 알루미늄판을 이용한 보빈과 순철을 이용한 가동철심으로 구성되어 있으며, 보빈 위에 1차 코일을 감고 절연을 시킨 후 다시 그 위에 2차 코일들을 감는 구조로 되어 있다. 또한, 누설 자속량에 의한 손실을 줄이기 위하여 비자성체이면서 절연 효과가 뛰어난 플라스틱 재질로 외함을 마련하였다. 그림3은 차동변압기의 기본 회로를 보여주고 있다.^[6]

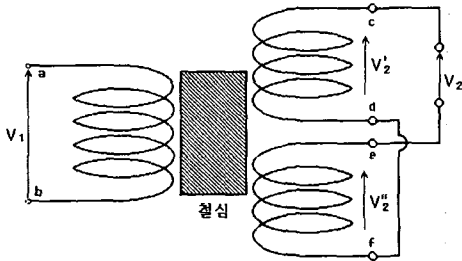


그림 3 차동변압기의 기본 회로
Fig. 3 Basic circuit of the differential transformer

1차 코일의 단자 ab에 교류전압 V_1 를 인가했을 때 2차 코일에 전압이 유기 되는데 이는 단자 cd 및 ef간에 2차 전압 V_2' , V_2'' 의 차를 이용하여 전압 V_2 를 유도해 낸다.

여기서, 2차 코일의 양쪽 권수를 동일하게 하고, 철심이 중앙에 있을 때는 1차 코일과 두개의 2차 코일 사이에 나타나는 상호인덕턴스 M_1 , M_2 는 동일하므로 단자 cd, ef의 2차측의 유도전압 V_2' , V_2'' 가 같게 되어 2차 전압은 cd, ef 단자의 유기 전압의 차, 즉 $V_2 = V_2' - V_2''$ 는 0이 된다. 그렇지만 철심이 cd 단자 쪽으로 변위하면 $M_1 > M_2$ 로 되어 코일 cd 단자 전압 V_2' 가 증가하고 코일 ef 단자 전압 V_2'' 가 감소한다. 그리고, 가동철심을 좀 더 움직여서 철심의 위치가 단자 cd 중앙위치로 일치하였을 때, M_1 은 최대, M_2 는 최소가 되어 단자 cd 전압 V_2' 는 최대가 되고 단자 ef 전압 V_2'' 는 최소가 되어 이들 차에 의한 2차 전압 V_2 는 최대가 된다.

철심을 다시 반대 방향으로 움직이면, $M_1 < M_2$ 이 되어 코일 cd 간의 유도 전압 V_2' 은 감소하고 철심이 ef 단자 쪽으로 변위하면 결과는 전압 V_2' 의 형성 과정과 반대 현상으로서 V_2' 가 최대가 된다.

다음 그림 4는 가동철심의 변위량에 따른 2차측 출력전압 V_2 크기의 관계를 나타내고 있다.

가동 철심의 변위가 $-x$ 와 $+x$ 가 동일한 부분 즉, 변위가 중앙(0)에 위치했을 때, 2차측 출력전압은

최소가 되고 철심의 변위가 $\pm x$ 로 증가할수록 1차 코일과 2차 코일의 상호인덕턴스 M_1 , M_2 의 값이 각각 증가 및 감소하여 이들 차에 의해 발생하는 2차측 출력 전압이 증가함을 나타내고 있다.

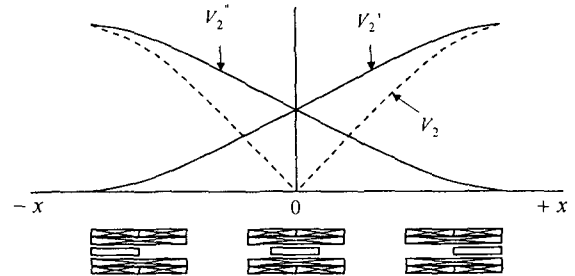


그림 4 차동변압기의 출력 파형
Fig. 4 Output waveforms of differential transformer

3.2 유추론적 특성 해석

그림 5는 차동변압기의 특성 해석을 위한 4 단자 망 회로도이다.

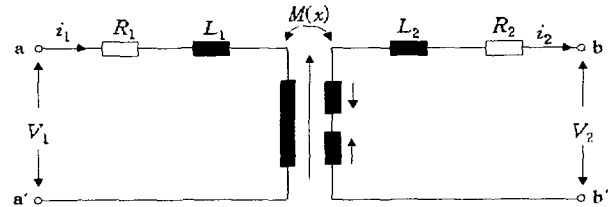


그림 5 차동변압기의 4 단자망 회로도
Fig. 5 Four-terminal network circuit of the differential transformer

그림의 a-a'와 b-b' 단자간으로부터 다음 4 단자 망 식으로 표현할 수 있다.^[9]

$$V_1 = \left(R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \right) - M(x) \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$V_2 = M(x) \frac{di_1}{dt} - \left(R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \right) \quad (3)$$

2차측은 무부하가 되므로서 2차 전류에 의한 여자 반응은 생략할 수 있다. 그러므로 2차측 전류 i_2 는 0의 값으로서 식 (2)와 (3)은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.^{[9], [11]}

$$V_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (4)$$

$$V_2 = M(x) \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

1차측 코일의 자기인덕턴스 L_1 은 가동자의 위치 변환 x 에 종속되지 않는다. 만약 주어진 모델 변압기를 아주 소형화 하고자 한다면 가동자의 운동거리 x 역시 소형화 비에 비례하여 미소거리가 되어야 한다. 소형화시 2차측의 전기적 신호량(V_2)이 모델의 2차측 신호량에 예외 없이 비례적으로 변화해야

한다면 실행 차동변압기는 가능한한 모델과 동일한 재료로 구성되어야 하며 소형화 규격 역시 기하학적 단계로 변형되어야 할 것이다. 같은 의미에서 식 (4) 과 (5)의 1차 및 2차 전압에 대한 유사성 척도는

$$V_1^* = R_1^* i_1^* + L_1^* \frac{di_1^*}{dt^*} \quad (6)$$

$$V_2^* = M^*(x^*) \cdot \frac{di_1^*}{dt^*} \quad (7)$$

과 같으며 식 (7)은 가동자의 이동으로 인하여 2차 측 전압 V_2 와 여자전류 크기 i_1 과의 관계를 유추해 석에 의해 분석하게 된다.

그림 6은 초소형 차동변압기의 규격에 따라 상호 인덕턴스 $M(x)$ 및 자기인덕턴스 L_1 을 선정하는 식 (8)과 (9)에 대한 설명도이다.^[9]

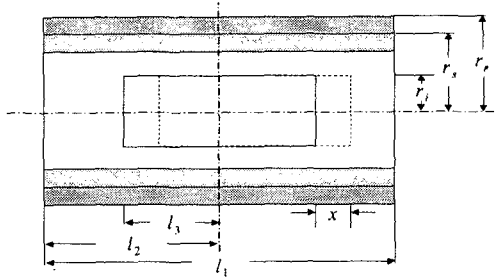


그림 8 초소형 차동변압기의 치수
Fig. 8 Dimension of a subminiature differential transformer

초소형 코일의 상호인덕턴스 $M(x)$ 와 자기인덕턴스 L_1 을 식 (8), (9)과 같이 기술하고 있다.^{[9],[12],[13]}

$$M(x) = \sqrt{k \cdot \frac{4\pi^2 \cdot N_2^2}{l_2^2} \cdot L_1 \cdot \frac{r_1^2(\mu-1)}{\sqrt{l_2 \cdot r_2^2 + l_3 \cdot r_3^2(\mu-1)}}} \cdot x \quad (8)$$

$$L_1 = k_p \left[\frac{4\pi^2 N_1^2}{2l_3} \left(\frac{2l_3}{l_1} \right)^2 \cdot (r_p^2 - r_i^2 + \mu r_i^2) + \frac{4\pi^2 N_1^2}{(l_1 - 2l_3)} \cdot \frac{(l_1 - 2l_3)}{l_1} \cdot r^2 \right] \quad (9)$$

여기서, μ 는 가동자의 투자율, k 는 Nagaoka 상수, k_p 는 교정 인자의 코일길이 대 코일 반경의 비를 나타낸다.

식 (6)에서 저항의 유사성 척도값은 다음 식 (10)과 같이 표현 할 수 있다.

$$R_1^* = \rho_1^* \frac{N_1^* r_p^*}{d_c^2} \quad (10)$$

여기서, ρ_1 는 고유저항 값, N_1 는 권선 수, d_c 는 도체의 직경, 그리고 r_p 는 철심 코일 반경이다.

동일한 재질의 코일을 사용할 경우 유사성 척도에 의한 고유저항 $\rho_1^* = 1$ 이 되며 도체의 직경과

철심코일의 반경의 유사성 척도에 의한 비는 $1/l^*$ 이 되어 저항 R 의 유사성 척도 값은 $R^* = N^*/l^*$ 으로 표현된다.

식 (6)과 (7)에서 $1/t^*$ 의 크기는 $1/t^* = f^*$ 로써 여자 전류의 주파수 $\omega_{EL}^* = 2\pi f^*$ 즉 주파수 f^* 에 비례한다. 이때 유사성 척도에 의해서 상수 2π 는 1로 표현이 가능하므로 다음 식 (11)과 같이 표현이 가능하다.

$$\frac{1}{t^*} = \omega_{EL}^* \quad (11)$$

완전히 기하학적 유사성이 성립되는 조건하에서 식 (9)의 자기인덕턴스 L_1^* 은 식 (12)와 같다.

$$L_1^* = k_p^* \cdot N_1^{*2} \cdot l^* = N_1^{*2} \cdot l^* \quad (12)$$

유사성 척도에 의한 여자전류의 주파수 ω_{EL}^* 은 식 (6)으로부터 다음 식 (13)과 같다.

$$\omega_{EL}^* = \frac{1}{t^*} = \frac{R^*}{L^*} = \frac{N^*}{l^*} \cdot \frac{1}{N^{*2} l^{*2}} = \frac{1}{N^* l^{*2}} \quad (13)$$

여기서, 재질과 턴수를 동일하게 하였으므로 $\rho_1^* = 1$, $N_1^* = N_2^* = N^*$ 가 되므로 식 (8)의 상호인덕턴스의 $M^*(x^*)$ 는 식 (14)과 같이 표현된다.

$$M^*(x^*) = N^{*2} \cdot x^* \quad (14)$$

완전 동일한 재질로 설계되었다면 투자율 $\mu^* = 1$ 이 적용되므로 가동자의 이동에 의해 유도되는 2차 전압 V_2^* 식 (15)와 같이 표현된다.

$$V_2^* = N^{*2} \cdot x^* \cdot \frac{di_1^*}{dt^*} \quad (15)$$

x 는 가동자 이동 거리로서 거리의 유사성 척도 $x^* = l^*$ 이 된다. 소형화 제품도 2차 유기전압이 모델 제품과 일치되는 값을 유지하고자 한다면 $V_2^* = 1$ 이 되어야 한다. 즉,

$$V_2^* = N^{*2} \cdot l^* \cdot \frac{di_1^*}{dt^*} = N^{*2} \cdot l^* \cdot i_1^* \cdot \omega_{EL}^* = 1 \quad (16)$$

이로부터 식 (16)은 $N^{*2} \cdot l^* \cdot i_1^* \cdot \frac{1}{N^* l^{*2}} = 1$ 과 같으므로 이때 1차 전류에 대한 길이척도 $i_1^* = l^*/N^*$ 에 비례하여 변한다.

식 (6)의 입력식은 위의 각 함수에 대한 길이척도 결과치를 대입함으로서 식 (17)과 같이 표현된다.

$$V_1^* = R_1^* \cdot i_1^* = \frac{N^*}{l^*} \cdot \frac{l^*}{N^*} = 1 \quad (17)$$

식 (17)은 모든 요소들이 기하학적 단계로 계열화가 이뤄진다면 1차측 주파수는 항상 일정하며 그로 인하여 2차측 주파수 변화에도 일정하게 영향을 미친다. 그러므로 가동자의 이동 변위에 의한 2차 측 전압의 민감성 계수 k^* 는 식 (18)이 된다.

$$k^* = \frac{\Delta V_2^*}{\Delta x^*} = N^{*2} \cdot \frac{l_1^*}{l^*}$$

$$= N^{*2} \cdot \frac{l^*}{N^*} \cdot \frac{1}{N^* l^{*2}} = l^{*-1} \quad (18)$$

이상에서의 유사성 이론에 의한 소형화 고찰에서의 각 변환자에 대한 유사성척도를 시각적 표현이 용이하도록 하면 각 성분의 유사성척도는 그림 8과 같다.

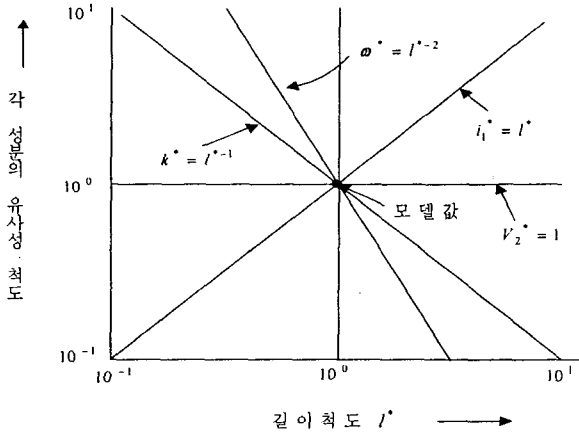


그림 7 입력전압 $V_1^* = 1$ 일때 모델에 대한 각 성분의 유사성 척도
Fig. 7 Similarity factor of each element for the model as input $V^* = 1$

4. 실험 결과 및 고찰

그림 8은 차동변압기의 변위에 따른 출력전압의 유도를 위한 실험 장치를 나타내고 있다.

마이크로미터를 이용하여 $\pm x$ 변위를 3mm씩 가변이 가능하도록 설치하였으며, 1차 코일의 턴수를 88회로 감고 절연한 후, 그 위에 1차 코일의 중앙의 위치에서부터 2차 코일의 턴수를 각각 79회로 제작하였다.

1차 전원의 주파수를 상용주파수인 60[Hz]로 고정하였으며 교류전압 1[V]부터 8[V]까지 전압을 가변 시키면서 2차측 출력전압을 측정하였다.

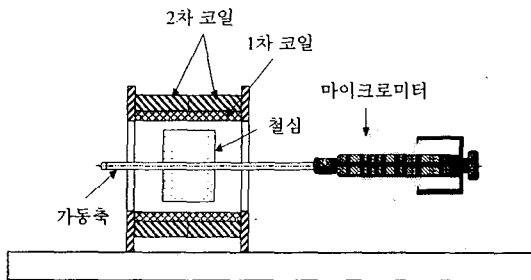
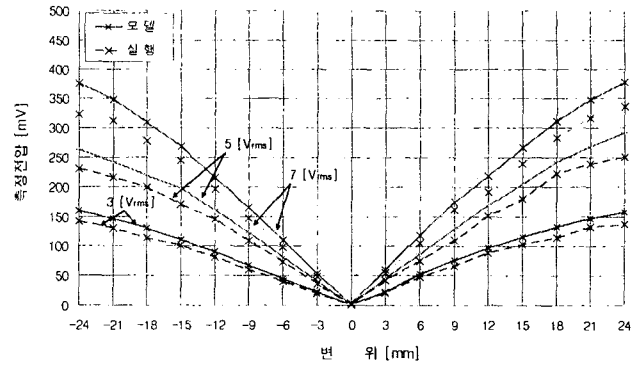
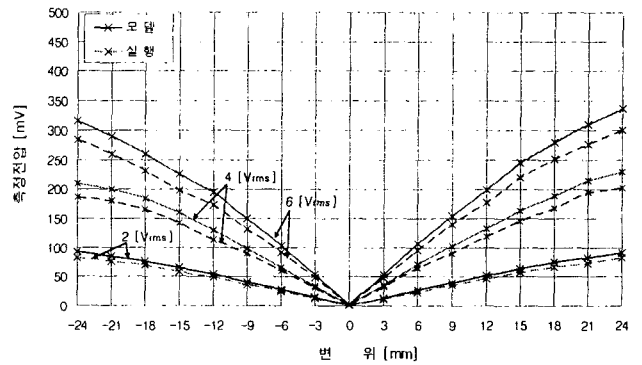


그림 8 차동변압기의 측정장치
Fig. 8 Measurement set for the differential transformer

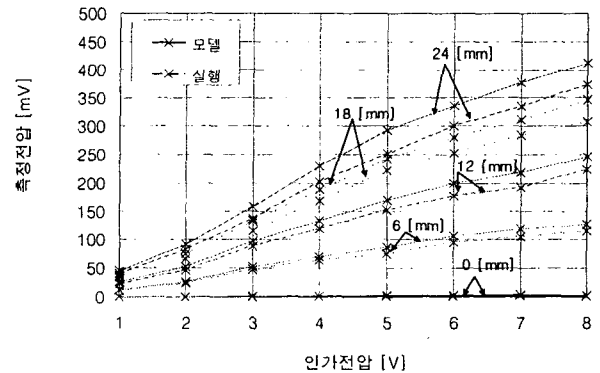
그림 9는 모델과 실험 차동변압기의 인가 전압을 가변시키면서 가동자의 변위에 따른 출력전압의 파형을 나타내고 있다.



(a) 인가전압 3, 5, 7 [V]



(b) 인가전압 2, 4, 6 [V]



(c)

그림 9 인가전압과 변위에 따른 출력전압
Fig. 9 Output voltage with input voltages and displacements

차동변압기는 입력전압과 가동축의 변위를 증가 시킴으로써 상호 유도 작용에 의해서 나타나는 출력전압이 증가함을 살펴볼 수 있었다. 유추해석에 의한 이론적 분석에 의하면 인가전압이 동일한 ($V^* = 1$) 경우 모델과 실험 변압기는 각각 변위에

따라 측정전압이 일정하게 나타나는 결과였으나, 그림 10과 같이 모델과 실행의 측정 결과에서는 약 10%의 오차가 발생하였다. 또한, 각 전압에 따른 가동침십이 중앙에 위치했을 때 최소 전압이 나타났으며 변위를 크게 했을 때 전압은 변위에 비례하여 증가함을 알 수 있었으며, 최대 변위 부근에서는 증가 비율이 약간 감소함을 살펴볼 수 있었다. 이것은 모델을 소형화로 시작품 제작시 각 부품이 정확하게 유사성척도 $l^* = 0.6$ 으로 제작 및 조립이 이뤄지지 못하였기 때문으로 생각된다.

또한, 소형화로 실행시킨 차동변압기의 가동축의 변위와 인가전압에 따라 증가하는 비율은 모델 변압기에 비하여 2차 전압의 증가 비율은 약간씩 감소됨을 살펴볼 수 있었다. 이는 실행 변압기의 소형화시 1차 및 2차의 코일의 직경에 대한 소형화비가 완전하지 못하여 코일의 저항이 증가함에 따라 유도 기전력의 값이 적어졌기 때문이다.

5. 결 론

이상에서 밝힌바와 같이 설계자나 개발자가 동일한 설계 및 제조 기술에 바탕을 둔 제품의 표준화로 국제화 규격에 쉽게 적용할 수 있고, 그로 인한 가격 경쟁의 장점을 지닐 수 있는 유추해석을 이용한 계열화 설계기법에 의한 설계기술에 대하여 연구하였으며, 차동변압기를 모델로 선정하여 유추해석에 의한 계열화 설계가 가능함을 살펴보았다.

차동변압기 모델의 길이척도 $l^{*0.6}$ 으로 소형화하여 유추해석에 의한 이론적 특성과 시작품에 대한 특성 실험을 통한 이론분석 결과와 실험결과에 대해 비교 분석하였다.

모델과 실행 차동변압기의 인가전압과 가동축의 변위에 따라 나타나는 출력 전압의 관계의 이론적 분석에 의하면 인가전압이 동일한 경우 각각 변위에 따라 측정전압이 일정하게 나타나는 결과였으나, 모델과 실행의 측정 결과에서는 약 10% 정도의 오차가 발생하였다.

이는 실행제품에 대한 제조기술상의 문제 등 간접 매개체에 해당하는 설계요소로 인하여 예상 특성곡선과 측정값과의 약간의 차이를 발생하였으며, 간접 매개체의 설계요소가 기술상의 문제로 실행급수에 비례하여 제작되지 못하였기 때문이다. 따라서 이의 보정 방법으로는 해당되는 설계요소에 대한 사항을 별도의 카다로그나 데이터 베이스화를 통하여 구체적인 프로그램이 이루어지도록 하고 계속하여 보정작업이 이뤄진다면 더욱 정확한 특성을 밝힐 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] E. Mayer, J. Eckhardt, "Vorgehensweise bei der einführung eines CAD systems", Der Konstrukteur, H. 4, pp. 6-14, 1985.
- [2] E. Gerhard, "Baureihendenken in der feinwerktechnik", Feinwerktechnik Messtechnik, H. 8, pp. 411 - 413, 1980.
- [3] K. J. Cho, I. S. Cha, K. H. Lee, "Systematization design of linear actuator by using CAE system", ICPE'98, pp. 107-112, 1998.
- [4] K. H. Lee, K. J. Cho, C. J. Cho, "A study on the design technique of linear actuator by using CAE system", KIIEE, vol. 11, no. 1, pp. 106-113, 1997.
- [5] K. J. Cho, K. H. Lee, I. S. Cha, "Systematization design technique for linear actuator by using similarity theory", KIPE, vol. 4, no. 5, pp. 442-448, 1999.
- [6] S. Guru, Electric Machinery and Transformers, Saunders College Publishing, 1995.
- [7] M. Gomez-Morante, D. Nicoletti, "A wavelet-based differential transformer protection", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1351-1358, 1999.
- [8] P. Sutherland, "Application of transformer ground differential protection relays", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36 no. 1, pp. 16-21, 2000.
- [9] R. Feldtkeller, Theorie der Spulen und Übertrager, S. Heirzel Verlag Stuttgart, 1971.
- [10] J. Klamt, Berechnung und Bemessung Elektrischer Maschinen, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1962.
- [11] A. Mohr, "Die ankerquerfeldbeanspruchung von permanentmagnetsegmenten in kleinen gleichstrommotoren aus der sicht von theorie und praxis", etz Archiv Bd. 5, pp. 3-10 1983.
- [12] 秋山勇治, 小型モータ設計 マニュアル, トリケエボス社, 1985.
- [13] 西村啓治, 小型モータ設計, トリケエボス材料集, 第32號, 1997.