2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

스텝모터의 회전각측정기 설계 및 해석

Design and Analysis of Angular Detector for Stepping Motor

박석하, 김지호, 김종인, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 노심을 제어하기 위해서는 실시간적으로 제어봉을 제어할 수 있는 센서가 요구된다. 제어봉의 위치는 회전형스텝모터가 제어하므로, 이 스테핑모터의 회전각을 검출하면 제어봉의 위치를 실시간적으로 계측할 수 있다. 이 센서가 설치되는 회전형스텝모터의 회전축 상단은 고온, 고압 그리고 고방사선 등의 매우 열악한 조건이다. 그러나 현재 사용중에 있는 센서나 개발중인 센서들 중에서는 적절한 센서를 선정하는 것은 매우 어렵다. 본 논문에서는 제어봉의 위치를 검출하기 위해 제어봉구동장치를 제어하는 회전형스텝모터의 회전각을 측정할 수 있는 회전각측정기를 연구하고 있다. 우선 각종 회전각측정기에 대한 기술을 분석하고, 이를 토대로 최적의 설계를 수행하고자 한다.

Abstract

To control the reactor core of SMART should require the sensor to control the control rod continuously. Because the rotary stepping motor controls the position of control rod in SMART, the position of control rod can be measured continuously if an angle position of rotary stepping motor is detected. The rotary stepping motor for SMART CEDM is to work at harsh conditions of high temperature, pressure and radiation. But it is difficult to select an adequate sensor from commercially available products. This paper describes the design of angular position detector to detect the rotor of the stepping motor which controls the position of control rod. The existing techniques on various angular position detectors have been analyzed, And this paper studies the principles of our angular position detector, and performs the optimal design.

1. 서 론

볼스크류형 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism ; CEDM)는 구동모터의 한 펄스당 제어봉 이동거리를 1mm 이하로 줄일 수 있기 때문에 조절용 제어봉구동장치로 적합하다. 제어봉을 상하로 이동시키기 위한 CEDM 전동기로 매우 적합한 것이 회전형스텝모터(Rotary Step Motor ; RSM)이다. CEDM에서는 RSM의 회전운동이 베벨기어를 통하여 볼너트로 전달되며 볼너트의 회전운동이 스크류의 직선운동으로 변환되어 스크류와 연결되어 있는 제어봉을 상하로 구동하는 원리로 작동된다. 그러나 구조가 복잡하고 제어봉 이동거리가 긴 경우에는 스크류의

제작이 어려우며 신뢰성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점에도 불구하고 볼스크류형 제어봉구동장치를 이용하고 있는 원자로는 세계적으로 Shippingport PWR, Hallam, Enrico-Fermi, Peach Bottom 및 NRU 등 많은 곳에서 사용중에 있다.[1]

RSM은 저속이며 정확하게 운전이 가능하여 스텝모터의 회전이 볼너트를 회전시켜 제어봉구동장치를 상하로 원활하게 구동할 수 있다. RSM이 설치되는 공간은 고온, 고압, 고방사선 등의 매우 열악한 조건을 갖추고 있기 때문에 상용화되었거나 개발중인 첨단의 센서를 그대로 구매하여 사용하는 것이 매우 어렵다.[2] 따라서 안정성과 신뢰성이 뛰어난 센서를 설계·개발하여야 한다. 본 논문에서는 RSM의 회전축에 직결된 영구자석을 부착시켜 영구자석이 외부로 발생시키는 자계의 변화에 따라 스텝모터 회전축 각변위를 계측할 수 있는 회전각측정기에 관한 연구를 수행하였다. 우선 기존에 회전각측정기로 사용하고 있는 싱크로(Synchro), 레졸버(Resolver) 그리고 본 논문의 특수 개념인 마그네신(Magnesyn) 타입의 회전각측정기의 기술을 분석·비교 해석하였다. 이를 토대로 고유의 회전각측정기를 설계하고, 시제품을 제작하여 시험·평가한 결과를 제시하였다.

2. 각종 회전각측정기의 기술분석

전동기의 회전각측정기는 2차 세계대전 당시 군용으로 사용되기 시작하여 지금도 여전히 사용되고 있는 기술이다. 회전각 측정기의 대부분이 싱크로(Synchros)라는 기술을 기반으로 하고 있다. 싱크로는 synchronization의 약자로 발신기-수신기의 조합이다. 싱크로는 다른 이름으로도 많이 불리고 있지만, 대표적인 것이 self-synchronization의 약자인 셀신(selsyn)이다. 비록 싱크로 시스템이 발신기-수신기 조합이라고는 하지만 전기적인 특성은 변압기와 매우 유사하다.

특히 마이크로 프로세서의 발달과 함께 수많은 센서, 트랜스듀서 그리고 각종 변환기가 발전하여 회전각측정기도 세분화하기 시작하였다. 그 중에서도 회전체, 주로 전동기의 계측제어에 엔코더(Encoder)나 레졸버 등의 회전각측정기가 사용되고 있다. 일본에서는 엔코더가, 유럽에서는 레졸버가 특히 발전하였다. 한편 우주, 방위 분야에서는 싱크로, 레졸버의 사용이 많고 엔코더는 그다지 사용되고 있지 않다. 본 장에서는 회전각측정기로 대표적인 싱크로와 레졸버의 기술을 분석하고 이를 토대로 우리 개념의 마그넷신을 해석하고자 한다.

2.1 싱크로

그림 1은 싱크로의 기본 배치를 보여주고 있다. 이 회로의 좌측은 발신기이며 제어되는 수신기는 우측에 있다. 발신기는 중심에 있는 회전자가 단일의 코일이며 고정자는 세 개의 코일이 120º의 위상차로 구성된다. 수신기도 발신기와 동일한 구조로 되어 있다. 회전자의 두 극점은 슬립링으로 일반적인 경우 교류 120V 라인 전압을 인가한다. 그림 1에서 두 회전자가 0º의 위치에 있으므로 발신기와 수신기 사이에 전류흐름은 없다. 그 이유는 비록 발신기의 코일 각각에 전압강하가 있다고 하더라도 발신기와 수신기 코일 사이에 전위차가 존재하고 있지 않기 때문이다.

만약 발신기의 회전자가 30º 회전한다면 그 이전의 평형은 깨지게 될 것이다. 그림 2는 발신기의 회전자가 30º 회전하였을 때의 전압·전류 관계를 보이고 있다. 우선 발신기 고정자 코일의 전압이 변하여 발신기와 수신기 사이에 전위차가 발생하면, 이에 따른 전류흐름이 그림 2와 같이 발생한다. 수신기의 회전자는 더 이상 토크가 0이 아니다. 수신기 축의 토크는 평형을 유지하려는

방향으로 움직이게 될 것이고, 여기서는 발신기가 회전한 방향으로 30° 회전하게 될 것이다. 수신기의 회전각 변위가 30°에 이르면 발신기와 수신기의 고정자 코일단의 전압은 다시 평형을 이루게 되고 발신기와 수신기 사이의 전류흐름도 중지되고 회전자도 멈추게 된다.

회전자와 고정자 권선 사이의 관계는 AC 입력을 회전자에 공급하고 회전자와 고정자 코일의 권선비에 의하여 고정자에서 전압이 유기되는 유도변압기의 원리와 유사하지만, 이 기능에 덧붙여 회전자가 회전함에 따른 자장의 변화에 의한 변수가 합쳐져 고정자에서 유기되는 전압은 달라지게 되므로 추가적인 고찰이 요구된다.

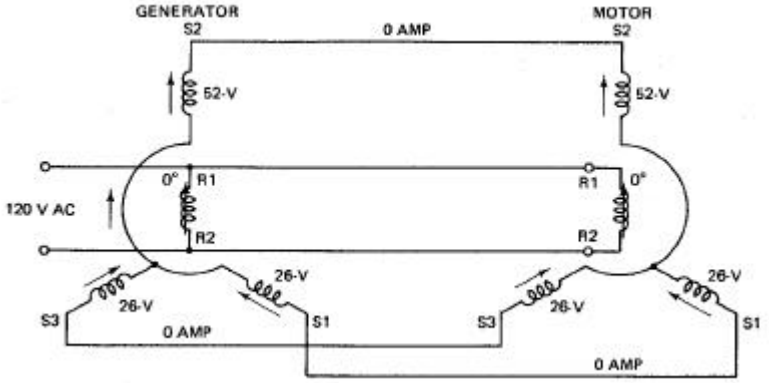


그림 1. 싱크로의 발신기와 수신기의 기본 배치

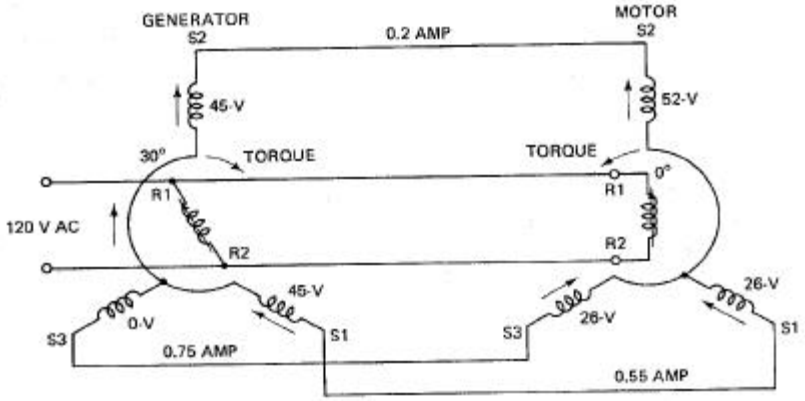


그림 2. 발신기의 회전자가 30° 이동시의 전압·전류 관계

그림 3은 싱크로 발신기의 3상 고정자 권선간 120° 위상각으로 분리되어 있는 출력전압 파형을 보이고 있다. 이들 전압은 모두 위상각을 제외하고는 동일한 사인파형을 보이고 있다. 1차측(회전자)으로부터 고정자로 최대로 유기시킬 수 있는 전압은 회전자와 고정자의 축이 정렬될 때 이루어진다. 그러나 이것은 고정자 권선 하나에 대해서만 그러하다. 3상 고정자 권선의 어떤 한 상에 유기되는 실효전압은 식 (1)과 같이 2차측과 1차측의 권선비(N)와 1차측과 2차측 사이의 자기 커플링을 1차측 전압(E_P)에 곱한 것과 같다. 이 자기 커플링은 회전자 권선의 물리적 위치에 달려 있다. 이 위치는 회전자 축과 고정자 권선축과의 각도 θ에 달려 있다.

$$E_s = E_p \times N \times \cos\theta \qquad (1)$$

2.2 레졸버

일반인에게는 그다지 낯익은 용어는 아니지만 레졸버는 약 50년전부터 회전각 검출에 사용되고 있다. 레졸버는 원통형의 소형 교류모터와 유사하다. 그림 4는 레졸버의 구조를 보이고 있다. 일반적인 레졸버는 1개의 회전자와 2개의 고정자로 형성되며 회전자에 $V \cdot \sin wt$ 라는 교류신호를 여자하면 고정자에 회전각 θ를 파라미터로 하는 $V \cdot \sin wt \cdot \cos\theta$ 와 $V \cdot \sin wt \cdot \sin\theta$ 라는 교류 신호를 얻는다.

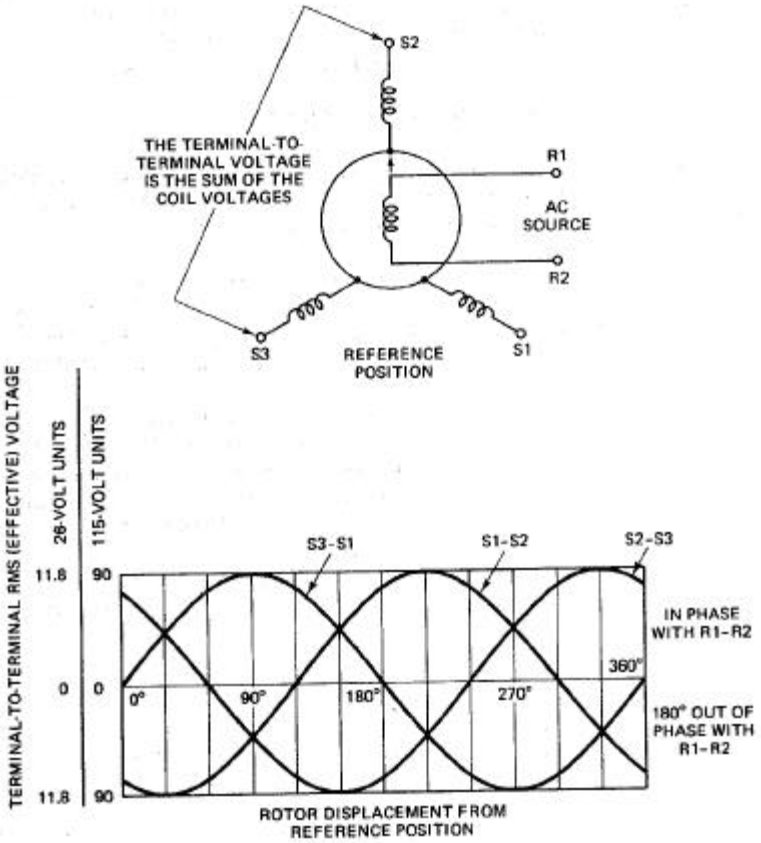


그림 3. 싱크로 발신기 3상 교류전압

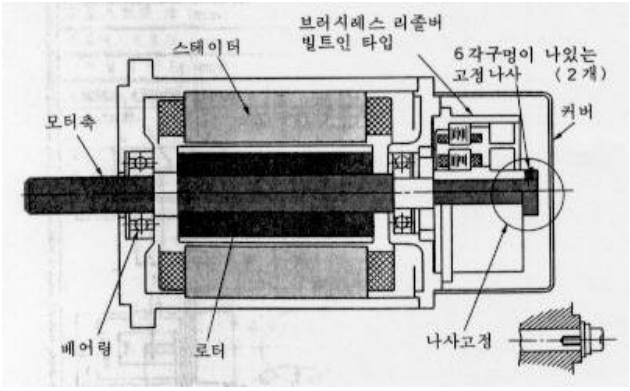


그림 4. 레졸버의 구조

레졸버는 다음의 다섯 가지 장점을 지니고 있다. 첫째 장기간 신뢰성 우수, 둘째 절대 회전각의 검출 가능, 셋째 고정밀도화가 가능, 넷째 소형화 가능, 다섯째 높은 CMRR을 지님.

둘째를 제외한 4개 항목은 상대적인 의미를 지니지만, 절대 회전각의 검출에 대해서는 인크리멘트형 엔코더에는 없는 것이다. 이것은 전원의 ON/OFF 시에 위치신호를 바로 얻을 수 있음을 의미하며 시스템을 만들 때 매우 중요한 요점이 된다. 반대로 단점으로는 직접 디지털회로와 인터페이스가 불가능하고, 디지털화를 하기 위해 높은 비용과 연구가 요구된다는 것이다.

레졸버의 신호는 아날로그이기 때문에 CPU와 인터페이스 하려면 일종의 A-D 변환회로가 요구된다. 그 용도에 따라 추종비교 방식, 위상 아날로그 방식 그리고 축차비교 방식 등이 있다. 본 연구에서는 가장 광범위하게 사용하고 있는 추종비교 방식에 대하여 설명하겠다.

추종비교 방식의 내부 구성은 곱셈형의 D-A 컨버터, 정류검파기, 적분기, VCO(전압제어발진기), 업/다운 카운터 등으로 이루어진다. 그림 5는 레졸버 내부 구성도이다. 레졸버에 $V \cdot \sin wt$ 라는 신호를 여자하면 출력에 다음 식과 같은 신호를 얻는다. 이것이 R-D 컨버터의 입력이 된다.

$$V_1 = V \cdot \sin wt \cdot \sin\theta \qquad (2.a)$$

$$V_2 = V \cdot \sin wt \cdot \cos\theta \qquad (2.b)$$

여기서 θ는 레졸버의 회전자 각도이다.

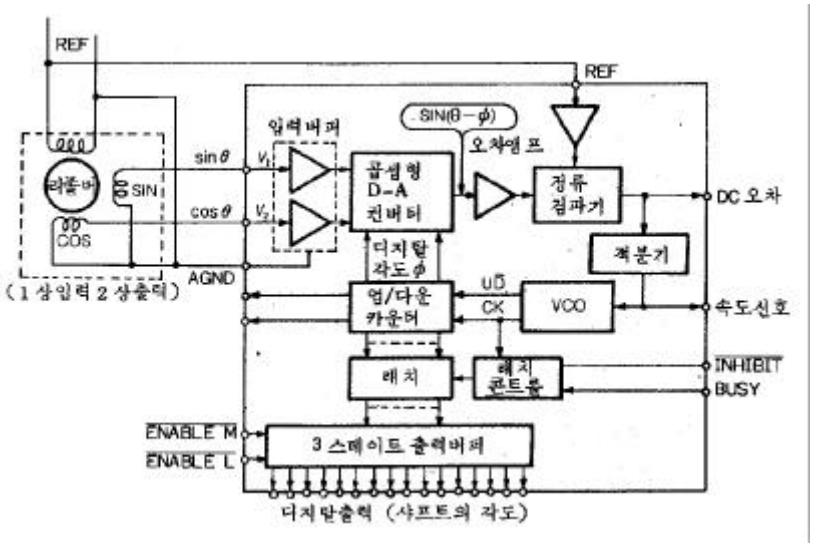


그림 5. 추종비교 방식의 R-D 컨버터의 구성

다음에 업/다운 카운터에서 만들어진 디지털 각도 Φ를 코사인 D-A 컨버터의 입력으로 하고 V_1을 Ref 입력으로 한다. 그러면 식 (3)이 얻어진다.

$$V \cdot \sin wt \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi \qquad (3)$$

마찬가지로 사인 D-A 컨버터측으로부터는 식 (4)가 얻어진다.

$$V \cdot \sin wt \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi \qquad (4)$$

이 2개의 신호를 다음 단의 에러앰프에서 차를 없애고 하나로 모으면 다음 신호를 얻는다.

$$V \cdot \sin wt \,(\sin\theta \cdot \cos\phi - \cos\theta \cdot \sin\phi) \qquad (5)$$

식 (5)를 간단히 하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$V \cdot \sin wt \cdot \sin(\theta - \phi) \qquad (6)$$

여기서 $\sin wt$는 교류신호, $\sin(\theta - \phi)$ 는 직류신호가 된다.

정류검파기가 이 신호를 레졸버를 여자한 신호와 같은 신호를 사용해서 복조한다. 그 결과

$\sin(\theta - \phi)$ 에 비례한 직류신호만을 얻을 수 있다. 이 직류신호가 적분기를 지나 VCO에 입력되고 VCO로부터 펄스가 업/다운 카운터로 전송된다. 이 동작은 식 (7) 상태까지 계속된다.

$$\sin(\theta - \phi) \rightarrow 0 \qquad (7)$$

식 (7)이 0에 가까워질 때는 sin은 없앨 수가 있어서 $\theta - \phi \rightarrow 0$ 이 된다. 이 동작이 종료했을 때 $\theta = \phi$ 가 되어 입력의 각도 θ가 디지털각도 ϕ로서 구해지는 것이다.

이상과 같이 이 추종비교 방식의 R-D 컨버터는 축차비교형의 A-D 컨버터와 같이 변환명령이 필요하지 않고, 입력각도 θ와 디지털각도 ϕ의 사이에 오차가 생기면 동작한다. 또 최종적으로 $V \cdot \sin wt$ 라는 신호는 필요하지 않으며 노이즈나 전압변동에 대해서도 강한 설계가 가능하다.

2.3 Magnesyn

우리가 설계하고 있는 CEDM-RSM 회전축의 위치를 검출하기 위해서는 기존의 싱크로 혹은 레졸버와 달리 회전자에 여자 신호를 가할 수 없는 구조로 되어 있다. 또한 여타의 센서를 선정할 수 없을 정도의 고온, 고압 그리고 고방사선 조건으로 인하여 많은 제약을 지니고 있다. 현재 우리 회전각측정기 개념이 가능한 구조는 회전축에 직결하여 영구자석을 설치하여 회전축의 이동에 따라 영구자석이 회전하여 공간으로 자계를 변화시켜 위치를 검출하게 하는 것이다.

기존 싱크로 타입에서 회전자 권선에 의한 자계의 변화 대신에 회전자 권선을 영구자석으로 대체함으로써 영구자석의 회전에 의한 자계의 변화가 회전자의 위치를 계측할 수 있도록 한 싱크로 타입이 영구자석형 싱크로(Magnesyn ; Magnet Synchro)이다. 그림 6은 일반적인 Magnesyn 시스템을 보이고 있다. 중앙에 영구자석형 회전자가 위치하고 있어 영구자석이 회전함에 따라 자계의 변화를 회전자 바깥에 있는 고정자에 전달한다. 고정자 코일은 퍼멀로이와 같이 쉽게 포화될 수 있도록 자기재료를 적층시킨 후, 권선은 단방향의 토로이덜 형태로 감는다. 고정자 권선은 120° 마다 탭핑 처리되어 3상 전압이 출력되도록 되어 있다. 3상 출력은 발신기와 수신기간에 동기화될 수 있도록 직결되어 있다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 x와 x' 동시에 교류 여기전압을 가한다.

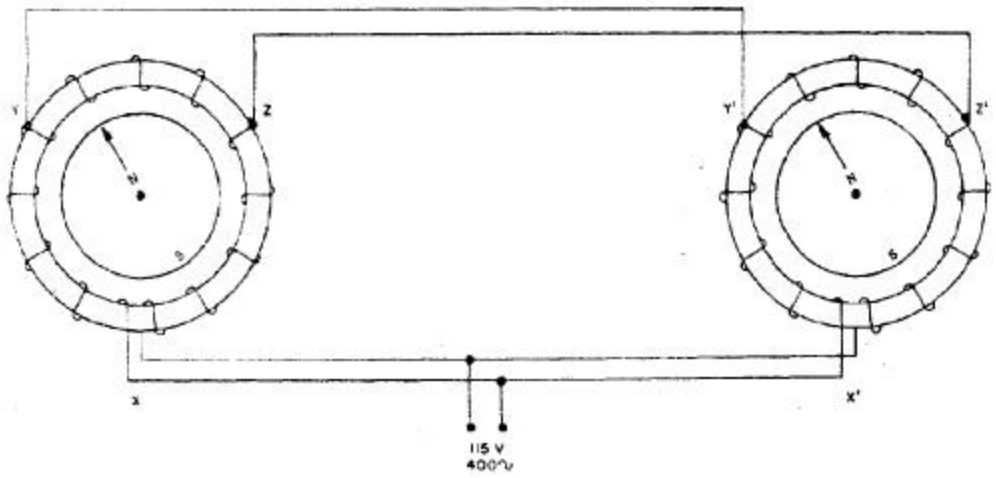


그림 6. Magnesyn system

그림 7은 Magnesyn 고정자 내의 자계 분포를 보이고 있다.(권선 배치는 생략) Magnesyn 고정자 권선에 교류 여기전압을 가하지 않았을 때, 영구자석 회전자는 N, S극 축을 중심으로 좌, 우 링 코어에 서로 반대방향으로 단방향의 자계를 만든다. 코어의 재질이 전체적으로 균일하고 영구

자석 축을 중심으로 대칭이라면, 반쪽의 두 자기저항은 자계 방향은 반대가 되지만 그 크기는 동일한 자계 H_{dc}를 발생시킬 것이다. 이 자계가 실제 코어를 포화시키는 원동력이 된다.

Magnesyn 고정자 권선에 교류 여기전압을 가하면, 여기전압에 상응하여 변화하는 교번자계 H_{ac}가 코어에서 만들어진다. 그림 7을 보면, 가해진 AC 전압의 반 사이클 동안에 H_{ac}가 시계방향으로 영향을 미쳤다면 다음 반 사이클 동안에는 H_{ac}는 반시계방향으로 영향을 미치게 된다. 좌측 코어 부분의 H_1은 H_{ac}와 H_{dc}의 합으로 작용한다. 반면에 우측 코어 부분에서는 H_{ac}와 H_{dc}는 반대 방향으로 되어 있기 때문에, 우측 부분의 전체 자계 H_2는 H_{ac}와 H_{dc}의 차만큼이 작용한다. 즉, 좌, 우측 부분의 자계는 다음 식과 같이 계산된다.

$$H_1 = H_{ac} + H_{dc} \qquad (8.a)$$

$$H_2 = H_{ac} - H_{dc} \qquad (8.b)$$

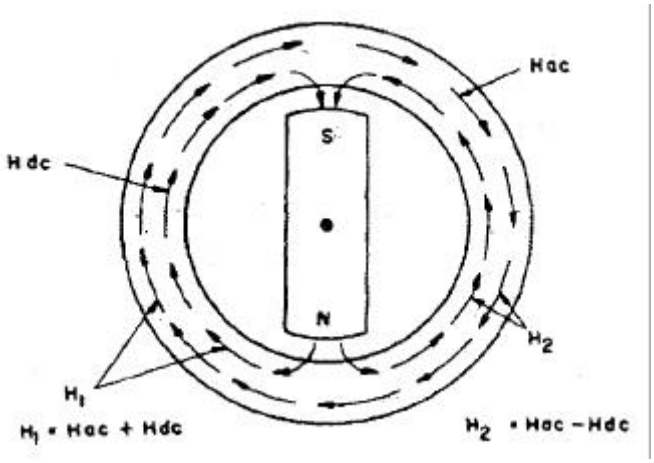


그림 7. Magnesyn의 자계 분포

자계 H_1과 H_2는 각각 자속밀도 B_1과 B_2를 만들어낸다. 자속밀도는 두 성분으로 구성되는데, 하나는 AC 여기 전압에 의해 좌, 우 링에서 공통으로 발생하는 B_{ac}이고, 다른 하나는 H_{ac}와 H_{dc}의 조합에 의해 발생하는 자속 B_x이다. 결론적으로 좌, 우측 링의 자속밀도는 다음 식과 같이 계산된다.

$$B_1 = B_{ac} + B_x \qquad (9.a)$$

$$B_2 = B_{ac} - B_x \qquad (9.b)$$

링의 좌측과 우측 부분의 DC 자속밀도를 나타내는 B_{1dc}와 B_{2dc}는 각각 그림 8의 좌측편과 같이 표현할 수 있다. 그림 8의 우측편은 0을 중심으로 변화하는 H_{ac}에 DC 자계가 합쳐진 (+)의 교번자계 H_1과 (-)의 교번자계 H_2를 보이고 있다. 그림 9는 교류 여기전압의 영향을 포함한 자계와 자속밀도의 관계를 설명하고 있다. 파형 g는 교류 자속 B_{ac}가 H_{ac}와 동상임을 설명하고 있다. 식 (9.a)와 (9.b)로부터 다음과 같이 B_x를 유도할 수 있다.

$$B_x = \frac{B_1 - B_2}{2} \qquad (10)$$

B_1과 B_2의 파형은 코어가 교류 여기전압의 각 사이클에 대해 두 배로 포화되고 비포화되는

것을 보여준다. 그러므로 조합된 자속 B_x는 여기전압 주파수의 두 배로 변화하며 따라서 이 자속을 "2고조파 자속"이라 부른다. 2고조파 자속의 결과로 자속 B_x와 상응한 전압 e_x가 권선으로부터 유기된다. e_x는 B_x의 변화율에 비례하기 때문에 가해진 교류 전압 E의 두 배의 주파수로 변화할 것이다. 이것이 2고조파 전압이 발생하는 원리이다.

요약하면, Magnesyn에서 기본파 자속(라인 주파수)은 단방향 자계(영구자석 자속)와 결합될 때 2고조파 자속과 전압을 발생시킨다.

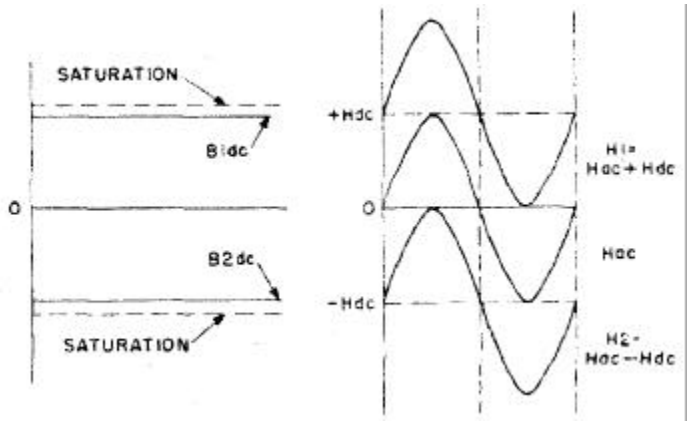


그림 8. 영구자석 DC 자속밀도와 여기전압 자계

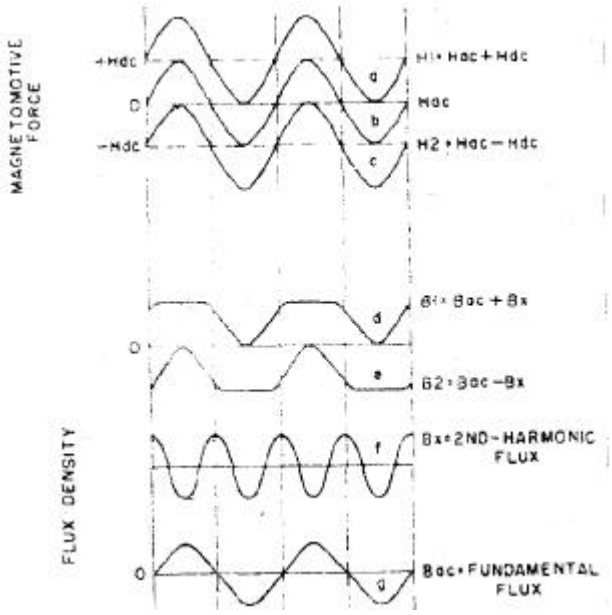


그림 9. 자계의 세기 및 자속밀도

3. CEDM-RSM 회전각측정기 설계

CEDM 내부에는 고압, 고온, 고방사선 등에 의한 많은 제약이 따르기 때문에 첨단 반도체 센서를 포함한 일반적인 센서를 사용할 수 없다. 따라서 오래된 기술이나마 자계의 세기 및 방향성을 이용한 자기 센서가 매우 안정적이면서 신뢰성 있는 센서로 이용될 수 있다. 본 장에서는

CEDM-RSM의 회전축에 직결되어 함께 회전할 수 있도록 되어있는 영구자석의 자계 변화에 따라 회전각을 계측할 수 있는 회전각측정기에 대하여 동작원리를 해석하고 이를 설계하고자 한다.

3.1 회전각측정기의 구조

그림 10은 CEDM 회전각측정기집합체 단면도이다. 회전각측정기는 정밀측정용과 개략측정용의 두 세트가 설치된다. 회전각측정기의 회전축은 RSM 회전축과 직결되어 한 몸으로 회전할 수 있도록 되어 있고, 이 회전축에 영구자석을 부착시켰다. 영구자석 둘레에는 압력용기로 둘러싸여 있어서 압력용기 외부로 물이 스며들지 못하게 되어있고, 압력용기 외부에는 위치감지용 코어와 고정자 권선이 배치되어 있다. 위치감지용 고정자 권선의 외부에는 다시 퍼멀로이 코어와 얇은 스테인리스 스틸로 된 용기로 덮고 보정용 스크류를 돌려 정확한 위치를 보정할 수 있는 구조로 되어 있다. 위치감지용 고정자 권선은 2권선으로 되어 있어, 1차 권선은 퍼멀로이 코어에 toroidal 형태로 감아 여기전압(Exciting voltage)을 가하고 2차 권선은 스텝모터 회전축과 붙어 있는 영구자석이 회전할 때 회전각 정보를 제공할 수 있도록 3상의 전기신호를 출력케 한다.

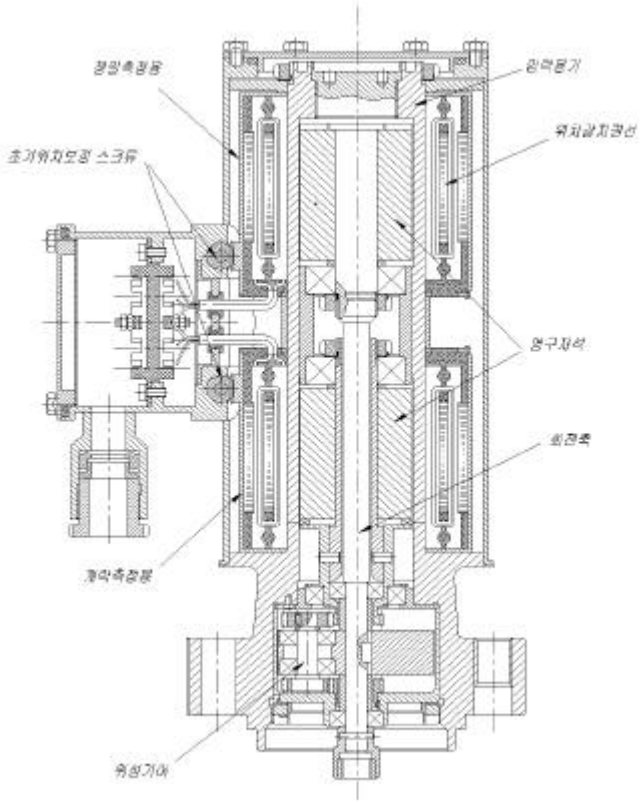


그림 10. CEDM 회전각측정기집합체 단면도

그림 11은 고정자 1, 2차 권선 결선도를 보이고 있다. 앞에서 기술하였던 Magnesyn 타입과는 달리 고정자 권선이 1, 2차 권선을 별로로 배선하고, 2차 권선에 단상 교류 여기전압을 가하고 2차 권선은 120° 간격으로 3상 출력을 지시할 수 있는 구조로 되어 있다. 측정원리는 앞에서 언급하였던 Magnesyn 타입과 유사하다. 축방향에 수직인 자력선을 가진 영구자석의 회전각변화에 따라 고정자 권선 내에 쇄교하는 자력선의 변화와 고정자 1차 권선에 입력되는 전압에 의한 자력선

의 변화가 합쳐져 2차 권선에 3상 출력신호의 진폭이 출력된다. 즉, 회전자의 일 회전당 각 상마다 120°의 위상차를 가지고 각각의 정현파를 만든다. 이 정현파 신호를 실시간적으로 제어기로 보내 3상의 진폭비로부터 스텝모터의 회전각 위치를 검출할 수 있을 뿐 아니라 나아가 제어봉 위치를 유출해 낼 수 있게 된다. 2차 권선의 경우 반대편 상과는 반대방향으로 결선되어 유도되는 기전력이 여기전압 주파수의 2고조파 성분이 나올 수 있게 한다.

회전각측정기는 수명기간동안 작동온도, 압력 및 방사선의 환경에서 선형성 및 안정성이 유지되어야 한다. 고정자 권선은 비자성강으로 된 압력용기 외벽 면에 설치되므로 압력용기 벽면에 수직한 방향의 자력선을 충분히 감지할 수 있어야 하므로 Permalloy 코어를 적층하여 사용한다. 초기 위치보정 스크류 세팅, 위치측정 권선 사이의 거리, 영구자석과 권선 간의 거리, 영구자석의 B-H curve 및 치수 등에 의한 특성을 비교•분석하여 정밀한 설계가 이루어져야 한다.

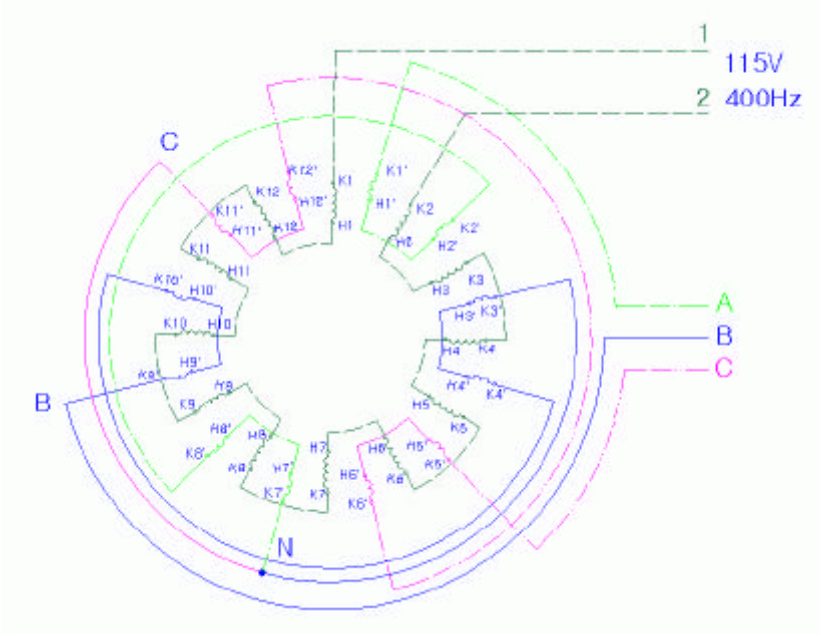


그림 11. 고정자 1, 2차 권선 결선도

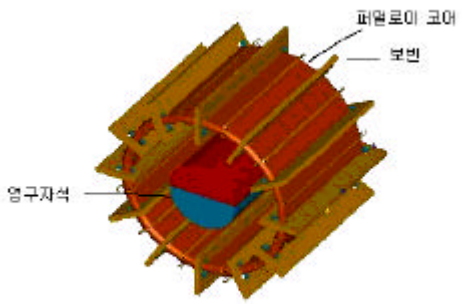


그림 12. 회전각측정기의 자성체와 보빈

그림 12는 회전각측정기의 1, 2차측 권선이 감겨지는 자성체와 보빈을 보이고 있다. 12채널로 분류한 것은 권선을 기계적으로 120° 위상차로 감기 쉬울 뿐 아니라 권선을 용이하게 감기 위한

것이다. 각 채널 사이의 보빈은 글래스에폭시로 제작된 절연물 지지대로 권선을 단단하게 지지할 뿐만 아니라 감는 것을 용이하게 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 자성체로는 퍼멀로이 코어를 사용하며 코어에 1차측을 감고 난 후에 2차측을 감는다.

영구자석은 원통형으로 공간상 균일하게 N, S극으로 착자하여 퍼멀로이 코어에 정확히 대칭으로 자계가 형성되도록 한다. 또한 퍼멀로이 코어가 놓여질 위치에서 원주방향을 따라 측정한 자속밀도는 정현적으로 분포될 수 있어야 한다. 고정자 1차 권선은 동일한 방향으로 균일하게 코어 둘레에 감으며 총 권선수는 퍼멀로이 코어가 포화되어 열이 발생하지 않는 정도에서 여유있는 공간으로 감는다. 고정자 2차 권선은 3상으로 나누어 각 상은 절연물지지대로 12개 섹션 중 2개 섹션씩 서로 마주보며 4개의 섹션으로 구성되며 맞은편 권선과 반대 방향으로 감는다. 즉, A, B, C 상은 120° 위상차를 가지고 동일한 방향으로 감고, $\overline{A}$, $\overline{B}$, $\overline{C}$ 상은 120° 위상차를 가지고 동일한 방향으로 감되 A, B, C 상과는 반대 방향으로 감는다.

개략측정용의 영구자석은 RSM의 회전축과 위성기어를 통하여 연결되어 있는데 위성기어비가 1:120이 되도록 설계하여 RSM 회전자가 1회 회전하는 동안 개략측정용 영구자석은 $3^{\circ}(360/120)$만큼 회전하도록 하였으며 따라서 전기공급이 중단되는 사고가 발생하더라도 개략측정용 회전각측정기로부터 비교적 정확한 스크류의 위치를 알아낼 수 있다. 측정원리는 정밀측정용과 같다.

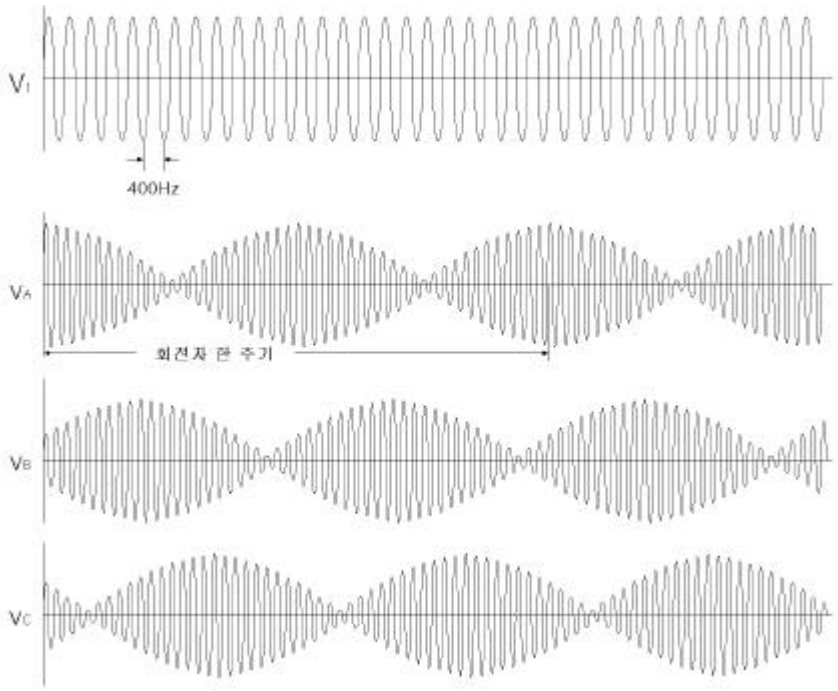


그림 13. 고정자 2차측 권선에 유기되는 전압

3.2 수식 해석

교류전압이 인가된 고정자 1차 권선에 여기되는 전압이 $v_1 = V_{1m}\sin wt$ 라면, 회전자의 영구자석의 각변위 θ에 따라 120° 간격으로 3개 배치해 놓은 고정자 2차측 권선에는 다음 식과 같은 전압(v_A, v_B, v_C)이 유기된다.

$$v_A = K V_{1m} \sin(wt) \sin(\theta) \quad (11.a)$$

$$v_B = K V_{1m} \sin(wt) \sin(\theta - 120^o) \quad (11.b)$$

$$v_C = K V_{1m} \sin(wt) \sin(\theta - 240^o) \quad (11.c)$$

여기에서 K : 결합계수, V_{1m} : 1차측 최대전압

식 (11)과 같이 회전각측정기의 여기전압과 영구자석의 변화에 따라 유기되는 전압파형은 그림 13과 같이 된다.

3.3 제작된 설계 사양

제작된 회전각측정기의 1차측 권선에 인가하게 될 여기전압은 115VAC, 400Hz이고 2차측 전압은 제어기 보드의 입력신호로 3상 최대 실효치가 11.8VAC 400Hz가 된다. 권선으로는 에나멜 동선을 사용하였다. 1차측 권선은 직경이 0.5mm이고 1sector당 70턴씩 총 840턴으로 모두가 직렬연결되어 있다. 2차측 권선은 직경이 0.4mm이고 1sector당 120턴씩 상당 480턴으로 총 3상이다. 1차측 권선은 1방향으로 감고, 2차측 권선은 각 상에서 한쪽 편 2섹터와 맞은편의 2섹터가 서로 반대로 권선을 감는다.

상기 조건에 따라 가해야 할 여기전압을 계산하는 공식은 유도변압기의 1차 권선에 가하는 전압 공식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{ex} = 4.44 \times B_m \cdot N_1 \cdot f \cdot A_c \times 10^{-4} \quad (12)$$

여기에서 4.44는 Sin파의 파형계수를 나타내며, 구형파일 경우에는 4.0이다. B_m은 코어의 최대자속밀도로 PC 퍼멀로이는 0.72[Tesla], N_1은 1차 권선의 턴수, f는 여기전압 주파수, A_c는 자속이 쇄교하는 코어의 단면적($A_c = 5.7 \times 0.45 = 2.565 Cm^2$)이다.

식 (12)로부터 400Hz를 가했을 경우에는 최대 250V까지도 가능하지만, 60Hz를 가하기 위해서는 40V까지만 가능할 것으로 예상된다. 에나멜 동선의 권선저항은 0.4mm일 경우에 141.7Ω/km이고, 0.5mm일 경우에 89.95Ω/km이다. 그리고 1턴당 평균 동선 길이는 대략 15Cm로 계산된다. 표 1은 고정자 1, 2차 권선저항의 계산치와 실측치를 나타내고 있다. 따라서 계산치와 실측치가 비슷한 결과로 나왔다.

표 1. 고정자 1, 2차 권선저항

	1차 권선저항[Ω]		2차 권선저항[Ω]		
	1섹터	12섹터	1섹터	상 권선저항 (4섹터)	선간 권선저항 (8섹터)
계산치	1.5	18	1.6	6.4	12.8
실측치	1.6	18.25	1.6	6.3	12.3

4. 회전각 측정기 시험 및 결과 고찰

4.1 시제품 제작 및 시험장치 구성

그림 14는 고정자 1, 2차 권선이 퍼멀로이에 감겨 있고, 이를 압력용기로 둘러싸고 있는 정밀측정용과 개략측정용의 회전각측정기 고정자 시제품을 보이고 있는 사진이다. 그림 15는 시험장치를 구성하기 위하여 열수순환장치에 장착되어 연결된 위치측정기의 시제품의 개념도를 보이고 있다. 시제품 아래쪽에는 모터를 달아 회전축을 회전시킬 수 있도록 하였으며 내부압력의 유지를 위하여 회전각측정기 압력용기와 모터 회전축과 사이에는 기계밀봉장치를 사용하였다. 이 시험장치를 이용하여 회전각측정기의 각종 성능시험을 수행하게 된다.

그림 14. 정밀측정용 및 개략측정용 위치측정기 고정자

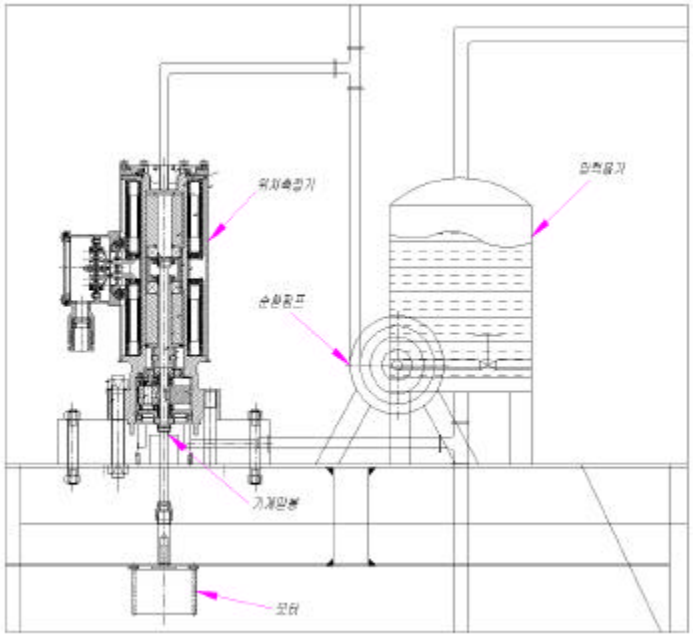
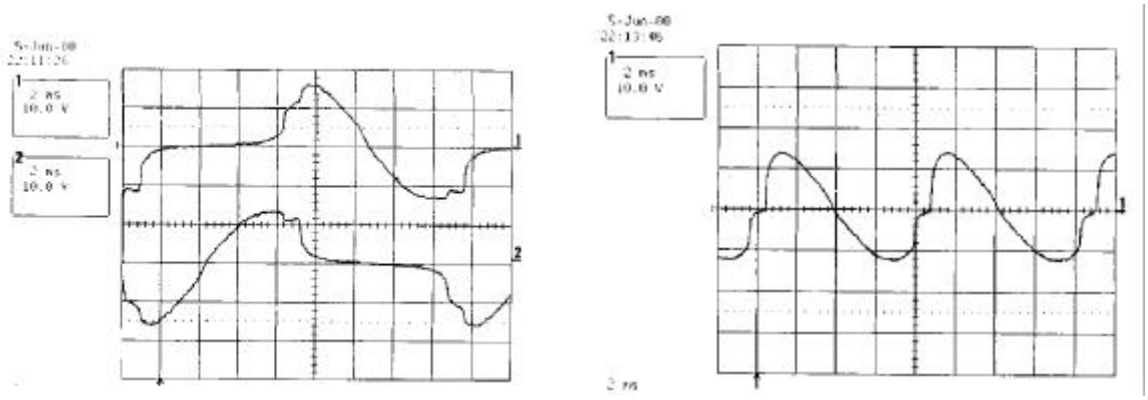


그림 15. 회전각측정기 시제품과 시험장치와의 조립도

4.2 실험결과 및 고찰

그림 16은 고정자 2차측 권선에 제 2고조파가 발생하는 원리를 보여주는 전압파형이다. 즉, 고

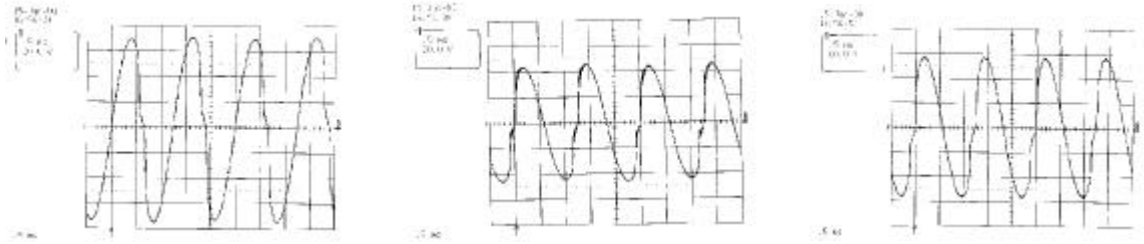
정자 1차측에 여기전압이 400Hz의 주파수를 가했을 때, 고정자 2차측 권선에 800Hz의 신호가 검출되는 것을 의미한다. 그림 16(b)는 NA상 전압이며 주파수가 800Hz이고, 그림 16(a)는 NA상 전압을 A편과 A'편으로 분리한 전압 파형으로 여기전압과 동일한 400Hz 성분이다. A편과 A'편 전압을 실시간적으로 더하면 NA상이 되고 있음을 알 수 있다.



(a) 고정자 2차측 A편과 A'편 전압　　(b) 고정자 2차측 NA상 전압

그림 16. 고정자 2차측에 제 2고조파가 발생하는 원리

그림 17은 영구자석이 330°의 위치에 있을 때의 고정자 2차측 권선의 선간 출력전압을 보이고 있다. 그림 18은 회전자 위치에 따라 계측한 출력전압의 피크치를 보여주고 있다. 이 결과로부터 각 선간전압은 120° 위상차를 보이고 있음을 알 수 있으며, 회전자의 한 주기에 출력전압은 두 주기가 되고 있음을 알 수 있다. 또한 파형이 정현적으로 변하고 있음을 알 수 있었다. 약간 부드럽지 못한 것은 현재 실험중 임시적으로 영구자석을 수동으로 돌림에 따른 실험오차로 보인다.



(a) AB 선간전압　　(b) BC 선간전압　　(c) CA 선간전압

그림 18. 고정자 2차측 출력전압(영구자석의 회전각 : 330°)

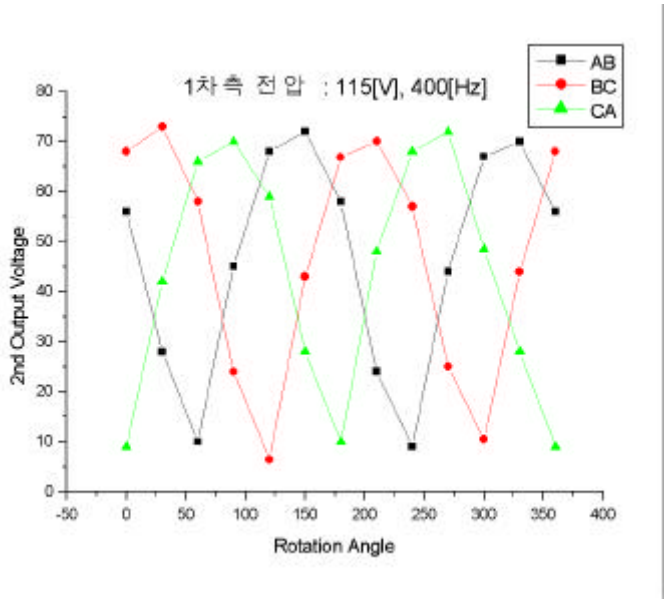


그림 18. 회전자의 위치에 따른 출력전압 도표

5. 결 론

본 논문은 회전형 스텝모터의 회전각을 계측할 수 있는 측정기를 개발하고자 하였다. CEDM의 스텝모터는 고온, 고압 그리고 고방사선 등의 매우 열악한 조건에 설치되기 때문에 현재 상용화되었거나 개발중인 첨단의 센서를 포함하더라도 적절한 센서를 선정하는 것이 매우 어렵다. 본 논문에서는 우선 각종 회전각 측정기에 대한 기술을 분석하고 작동환경에 적합한 개념을 개발하였다. 제시된 개념에 대하여 시제품을 제작하여 실험을 수행하고 설계 최적화 방안을 제시하였다.

차후 연구로는 상기 논문에서 제시한 결과를 토대로 제어판넬에 회전각을 모니터링을 할 수 있는 제어장치를 설계하고자 한다. 즉, 수신기 싱크로를 제작하고, 수신기의 회전축 상단에 엔코더를 부착하여 엔코더에서 출력되는 디지털 값을 제어판넬에서 실시간적으로 모니터링할 수 있는 시스템을 구축할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김지호 외 다수, 볼스크류형 제어봉구동장치 개념설계, KAERI/TR-1448/99, 한국원자력연구소, 1999. 12.

[2] 박석하 외 다수, “SMART CEDM 회전각 위치측정기의 설계”, 2000 한국원자력학회 춘계학술대회, 2000, 5.