

## 제어봉 구동장치용 횡자속형 전동기의 제어기 개발

김종무, 정연호, 강도현, 임태운, 김동희\*, 이석규\*  
한국전기연구원, 영남대학교\*

### Development of the Controller for TFM with Contol-Rod

J.M. Kim, Y.H. Jeong, D.H. Kang, T.Y. Im, D.H. Kim, S.G. Lee  
KERI, Yeungnam Univ\*

#### ABSTRACT

In the System-integrated modular advanced reactor(SMART), the motor for Control element drive mechanism(CEDM) requires high density power and simple drive mechanism to reduce volume because of restriction by install-space and must satisfy the reactor operating circumstances with high pressure and temperature.

To Maximize the characteristics of the TFM, we chose the asymmetric bridge converter as the driving system for TFM. Because two switching devices are connected in series with the stator winding of each phases in the asymmetric bridge converter all the phases are not affected by another phase but controlled independently. Also, this converter has many advantages that the various control methods can be adopted, it is easy to control, and that in case that the switching devices of a phase are damaged, the affects can be minimized.

#### 1. 서 론

원자로의 제어봉 구동장치(CEDM : Control Element Drive Mechanism)는 원자로의 상부에 설치되기 때문에 설치공간과 무게의 제약이 따르며 저속으로 운전하면서 큰 토크를 요구하는 특성이 있다. 이를 위해 정지 및 저속에서 큰 토크 출력이 가능하며 변위제어가 용이한 횡자속형(TFM : Transverse Flux-type Motor) 전동기를 선정하였다. 횡자속형 전동기는 자속의 방향과 회전자의 이동방향이 횡방향으로 즉, 전류의 방향과 이동방향이 같은 구조로 전기회로와 자기회로가 분리되어 있고, 링 형태의 권선을 이용함으로써 오버행 권선에서 발생하는 손실이 없기 때문에 단위 체적당 높은

출력과 효율을 얻을 수 있다.

본 연구에서 제어봉 구동장치용 횡자속형 전동기의 특성을 분석하고 이를 구동하기 위한 제어기를 설계하였다. 제어기는 전동기의 운전 조건의 제약으로 인해 높은 신뢰성과 안정성이 요구되며 속도 또는 위치 센서의 부착이 불가능하며 오픈 루프로 운전된다. 따라서, 전동기의 설계시 부하토크를 충분히 고려한 설계가 이루어져야 한다. 제어기는 설계특성에 맞게 속도에 따른 전류제어를 하여야 한다. 이를 위해 전류제어기를 오프셋을 가진 비례 제어기를 설계하여 우수한 응답특성을 얻었다.

#### 2. 횡자속형 전동기

##### 2.1 전동기의 특성

CEDM에서는 전동기의 출력이 제어봉에 전달되기 위해 베벨기어가 사용되며 다시 볼스크류를 통하여 부하에 전달된다. 리럭턴스형 횡자속형 전동기는 그림 1과 같이 고정자와 내부 고정자로 구성되며, 그 사이에는 회전자가 위치한 2중 공극 구조로 되어 있다.

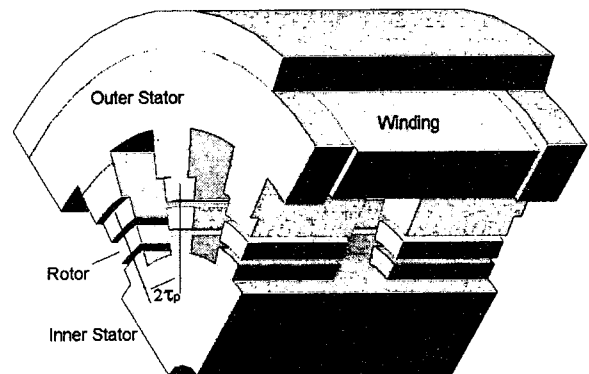


그림 1 리럭턴스형 횡자속형 전동기의 외형

회전자의 위치에 따라 기자력  $\Theta$ 와 발생 추력  $F_x$ 를 그림 2에 나타내었다. 극간격  $0 \sim \tau_p$ 구간에서는 정토크의 힘을 발생시키기 위해 전류를 흘리고,  $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 부토크의 힘을 발생시키므로 전류를 흘리지 않는다.

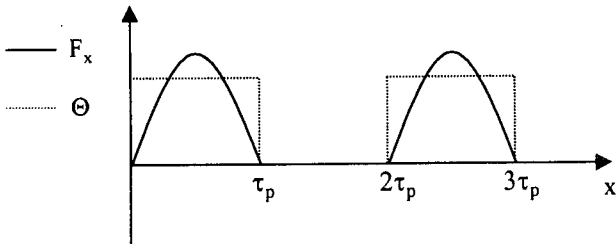


그림 2 리럭턴스형 횡축형 전동기의 전류-추력 패턴

전동기가 4상으로 구성된 경우, 각 상을  $1/4 \tau_p$  거리만큼 이동하여 배치하고 2상 여자를 하면 전동기에는 회전자의 위치에 따라 항상 2상의 전류가 흐르며,  $1/4 \tau_p$  위치에서 최대 힘을 발생시킨다.

그림 3-6은 리럭턴스형 TFM 전동기의 1상 토크, 2상 합성토크, 자속 분포 및 인덕턴스 분포를 나타낸다.

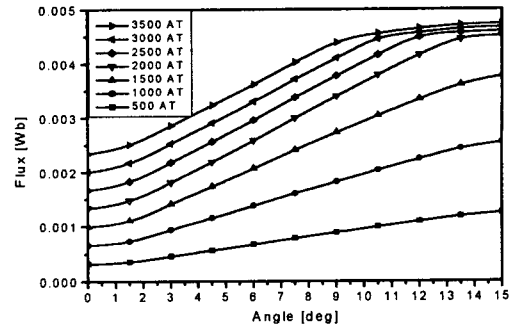


그림 5 TFM의 위치에 따른 자속분포

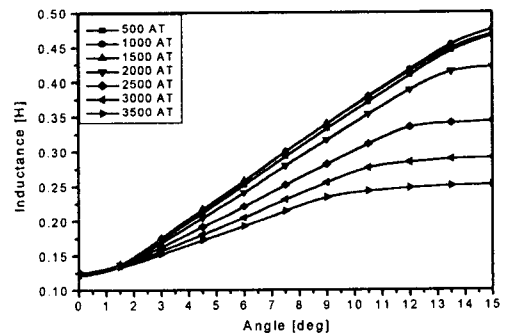


그림 6 TFM의 위치에 따른 인덕턴스 분포

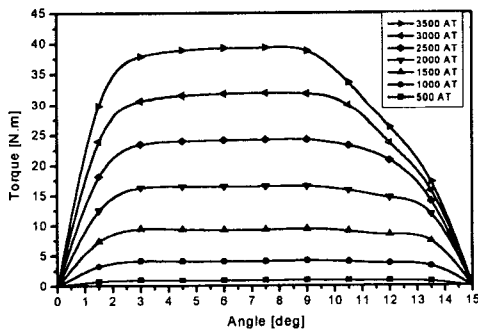


그림 3 TFM의 위치에 따른 1상 토크분포

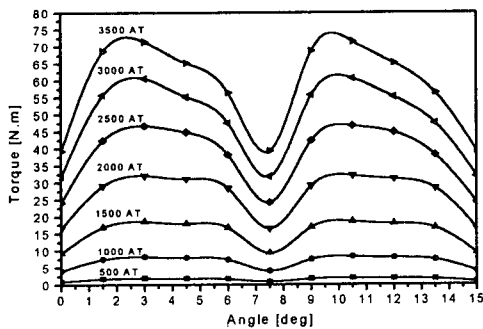


그림 4 TFM의 위치에 따른 2상 토크분포

## 2.2 토크 및 전압 방정식

횡자속형 전동기는 릴럭턴스형 전동기로 토크  $T_e$ 는 코에너지  $W_c$ 의 회전자 위치에 대한 편미분항으로써 식 (1)과 같이 나타내어질 수 있다.

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta_r} \quad (1)$$

여기에서, 코에너지  $W_c$ 는 인덕턴스  $L$ 과 코일의 여자전류  $i$ 에 의해 식 (2)과 같다.

$$W_c = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2)$$

따라서, 토크  $T_e$ 를 다시 정리하면,

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta_r} \quad (3)$$

식 (3)같이 전류와 인덕턴스의 변화율의 함수로써 정의된다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 전동기의 토크는 인덕턴스의 변화의 증감에 따라 부호가 결정되므로 회전방향의 반대방향의 힘인 부토크가 발생하지 않는 회전자의 위치에서 전류를 인가하여야 한다.

황축형 전동기는 전기적 회로의 관점에서  $R \cdot L$  직렬 회로로써 등가화 되며, 이에 따른 한 상의 전압방정식은 고정자 코일의 저항  $R$ 과 전류  $i$ , 회전자의 위치와 전류로 결정되는 쇠교 자속  $\phi$  로써 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = Ri + \frac{d\phi(i, \theta_r)}{dt} \quad (4)$$

$$= Ri + \frac{\partial \phi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \phi}{\partial \theta_r} \frac{d\theta_r}{dt}$$

단,  $V_d$ : 입력전압,  $i$ : 상전류,  $\phi$ : 자속이다. 또한, 회전자의 변위에 따른 기계적인 운동방정식을 쓰면 다음 식 (5)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_e = J\omega_r' + T_L \quad (5)$$

여기에서,  $T_e$ : 전동기 토크,  $J$ : 관성 모멘트,  $T_L$ : 부하토크,  $\omega_r$ : 회전자의 속도이다.

식 (5)을 마찰 계수  $B$ 를 고려하여 다시 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e - T_L = J\omega_r' + B\omega_r \quad (6)$$

### 3. 제어기

#### 3.1 전류제어기의 구성

전류제어기는 전동기의 권선에 인가되는 전류를 피드백 받아 지령치와의 오차를 제어기를 통해 연산 후 지령 전압을 PWM회로를 통해 권선에 인가한다. 전류제어기의 구성을 그림 7에 나타내며, 이때 제어기는 일반적으로 PI제어기 또는 히스테리시스 제어기를 많이 사용한다. PI제어기는 구성이 용이하나 리락턴스토크를 이용하는 TFM 전동기인 경우 속도에 따라 스위칭각의 변화로 전동기 파라메타가 변하므로 제어기의 게인이 변하여야 하며 전구간에서 좋은 응답을 얻을 수 없다. 히스테리시스 제어기는 응답특성이 우수하고 아날로그회로로 구성이 용이하나 스위칭 주파수가 변하는 단점과 DSP로 구성되는 디지털회로에는 구현의 어려움이 있다.

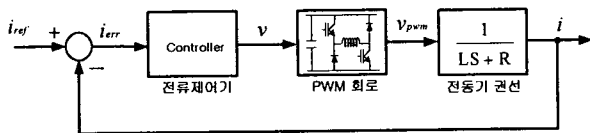


그림 7 전류제어기의 블록도

본 논문에서는 전류제어기를 비례게인만 가지는 P-전류제어기를 구성하여 히스테리시스 제어기에 준하는 우수한 응답 특성을 얻었다. P-전류제어기는 게인의 설정이 용이하고 구조가 단순하여 구현하기가 쉽다. 정상상태시 PWM출력은 저항손실을 무시하면 듀티 50[%]가 된다. 초기 지령은 P제어에 의해 추종하고 정상상태시는 일정한 듀티의 출력을 권선에 인가하게 된다. 식 (7)에 전류제어기를 나타낸다.

$$e(n) = i_{ref}(n) - i(n) \quad (7)$$

$$v(n+1) = K_p \times e(n) + K_{off}$$

여기서,  $K_p$ 는 비례게인,  $K_{off}$ 는 듀티50[%]의 PWM 출력값이다

#### 3.2 TFM 전동기의 제어기의 개발

황자속형 전동기용 제어기는 TI사의 16Bit DSP TMS320LF2407로 구성하여 모든 제어 알고리즘을 디지털로 구현하였으며 전력변환부는 IGBT모듈을 사용하여 비대칭 브릿지회로를 구성하여 빠른 전류 응답을 얻었다. 제어기의 시스템 블록도를 그림 7에 나타내며, 전력변환부의 구조를 그림 8에 나타낸다.

TMS320LF2407은 전원을 3.3[V]을 사용하며 디지털 및 아날로그 인터페이스시 이를 고려하여 설계하여야 한다. DSP는 내부에 32KWords의 Flash Memory와 2.5KWords의 RAM과 2조의 3상 PWM과 10Bits 16채널 ADC, SCI, SPI 및 CAN 통신을 지원하므로 콘트롤러 설계에 적합하다. 사진 1에는 제작된 제어기 보드의 사진을 나타낸다.

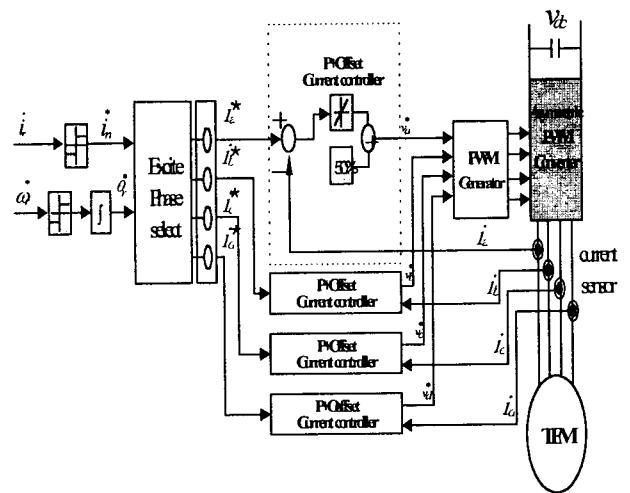


그림 8 전체 제어기의 블록도

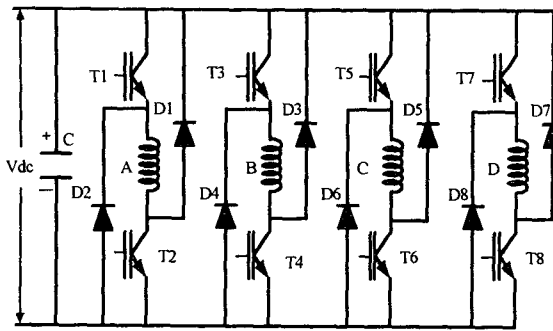


그림 9 비대칭 브릿지 컨버터 회로

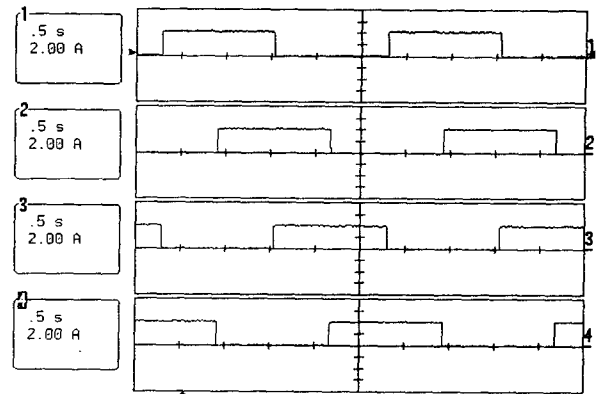


그림 11 회전시의 전류파형

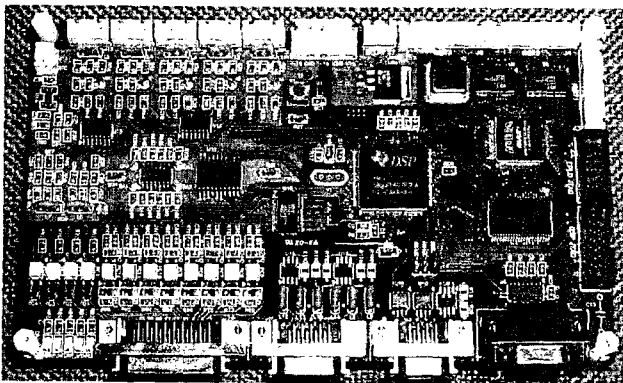


사진 1 TMS320LF2407의 제어기 사진

#### 4. 결론

제어봉 구동장치용 리럭턴스형 횡자속형 전동기를 구동하기 위한 제어기를 TI사의 16Bit DSP TMS320LF2407을 이용하여 설계·제작하였고 개인 설정이 용이하고 응답특성이 우수한 전류제어기를 적용하여 디지털 제어기를 구현하였다.

향후 운전특성을 고려하여 신뢰성 향상 및 고장 진단 기능을 추가 할 예정이다.

#### 참고 문헌

- [1] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motor and Their Control," Magna Publishing and Clarendon Press, 1993.
- [2] D.H. Kang, "Transversalflußmaschinen mit permanenter Erregung als Linearantriebe im schienengebundenen Verkehr", Dissertation, TU Braunschweig 1999.
- [3] G.S. Buja, M.I. Valla, "Control Characteristics of the SRM Drives-Part I: Operation in the Linear Region," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 38, No. 5, pp. 313~321, 1991

#### 3.3 실험 결과

그림 10에서는 전류제어기의 실험 파형을 나타내며 P 전류제어기가 PI 전류제어기에 비해 오버슈터가 없는 빠른 전류응답 특성을 확인 할 수 있다. 그림 11은 회전시의 전류파형을 나타낸다.

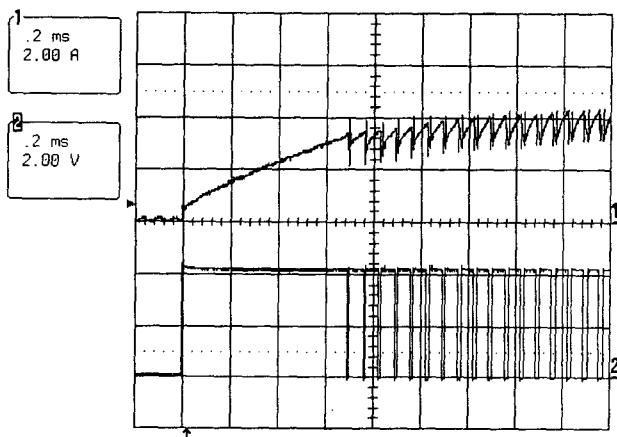


그림 10 전류 제어기의 응답 파형