

원자로 제어봉 구동장치의 전동기와 제어기기 개발

김원호, 장기찬, 강도현, 류홍제, 임근희, *김철우
한국전기연구원, *부산대학교

Development of A LPM and Driver for Nuclear Furnace

W. H. Kim, K. C. Jang, D. H. Kang, H. J. Ryoo, G. H. Rim, *C. U. Kim
KERI, *Pusan national university

Abstract - This paper describes the development of the linear pulse motor(hereafter, LPM) and the driver system to control the quantity of fuel in the nuclear furnace. The LPM developed in this study is a kind of the linear motor with the properties of moving up and down, and both the stator and the mover of the LPM are designed as the salient type. Especially, the stator has windings but there is no windings or magnet on the mover. To Maximize the characteristics of the LPM, we chose the asymmetric bridge converter as the driving system for LPM.

전동기의 진행방향은 같다. 가동자는 자기 저항이 최소로 되는 방향 즉, 고정자와 가동자의 치가 일치되는 방향으로 이동된다. VR-type 전동기의 힘 발생원리를 간략히 설명하기 위해서 투자율이 무한대인 철심을 가정하여 그림 1과 같이 1차원 해석 모델을 고려하였다. 그림에서 τ 는 pole pitch, δ 는 공극, B는 공극 자속 밀도이다.

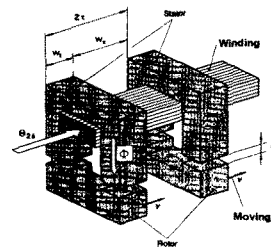


그림 1 VR-type 전동기 기본 모델

1. 서론

원자로의 핵 연료량 제어는 제어봉이라 불리는 일종의 연료 탱크를 원자로 내에 주입시키는 정도를 조절함으로써 행해진다. 따라서, 원자로의 출력은 이 제어봉의 상하 운동에 의한 연료의 주입 양에 따라 결정되어 지므로 이 제어봉을 구동하기 위한 모터의 성능 및 구동 장치의 특성에 따라 원자로의 출력은 많은 영향을 미치게 된다. 또한, 원자로 내의 여러 온도, 습도 등 여러 변수에 잘 견딜 수 있는 시스템의 구성이 필연적이다.

본 연구에서는 100kg중의 설계 사양이 요구되는 상하 추력용 제어봉으로서 선형 펄스모터를 사용하여 직접 제어봉과 일체화시켜 이동시킬 수 있도록 시스템을 소형, 간이화하였으며 제어응답의 빠른 속응성 등을 얻을 수 있게 설계, 제작하였다. 또한, 단위체적 당 최대의 추력을 얻기 위하여 2중 공극을 가진 원통형(Cylindrical type) 4상 VR-type LPM을 선정하였다. LPM의 개발 연구에서는 전동기 설계 시 기본이 되는 VR-type LPM의 추력을 Co-Energy 계산법으로 계산하여 단위면적 당 발생 추력을 계산하였다. 원통형 전동기는 3차원 해석에 의해 발생 추력을 정확히 계산할 수 있으나 해석 모델의 복잡성 계산시간의 과다 등으로 3차원해석 모델을 적용시키지 않고 2차원 유한요소 해석으로 전동기의 치, 극 간격, 공극에 대해서 최대 추력을 발생시키는 형상으로 최적화 시켰다. LPM을 상하로 구동시키기 위한 전력변환 장치는 4상한 컨버터[1-4]로 가장 많은 추력을 발생시킬 수 있는 2상 여자 방식을 채택하였으며 원하는 속도와 이동 거리를 제어할 수 있도록 프로그래밍하였다. 원통형 4상 VR-type LPM의 해석과 설계 타당성을 검증하기 위하여 선형 시험 장치에서 정추력을 시험하였으며, 동 특성, 전력 변환 장치의 동작과 원하는 속도와 이동 거리를 제어하는 프로그램을 검증하기 위하여 동추력 시험을 수행하였다.

2. VR-type LPM의 특성

VR-type 전동기의 기본 형태에서 자속 ϕ 의 진행방향과 전동기의 이동 방향 v 와는 수직이며 전류의 방향과

자기회로에 저장되는 자기에너지(W_m)와 자기수반에너지(W_{co})는 식 (1), 식 (2)와 같이 표현된다.

$$W_m = \int_V \int_0^B H(B) dB dV \quad (1)$$

$$W_{co} = \int_V \int_0^H B(H) dH dV \quad (2)$$

그림 2에서 전류(기자력)가 일정할 때 발생하는 추력 $F_x(\theta_\delta, x)$ 는 다음의 식 (3)과 같이 된다.

$$F_x(\theta_\delta, x) = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial x} \right]_{\theta_\delta = const} \quad (3)$$

여기서 θ_δ 는 기자력을 나타낸다.

자기 수반 에너지 W_{co} 를 그림 2의 모델에서 구하면 다음 식 (4)와 같다.

$$W_{co} = \frac{B^2}{2\mu_0} \delta x l \quad (4)$$

여기서 l 는 해석 모델의 z 방향 길이를 나타낸다. 이때, 자속 밀도 B는 식 (5)와 같다.

$$B = \mu_0 \frac{\theta_\delta}{\delta} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)에서 자기 수반 에너지 W_{co} 는 다음과 같다.

$$W_{co}(\theta_\delta, x) = \frac{\mu_0 \theta_\delta^2}{2\delta} x l \quad (6)$$

식 (3)에서 힘을 구하면 다음과 같다.

$$F_x(\theta_\delta, x) = \frac{\mu_0}{2\delta} \theta_\delta^2 l \quad (7)$$

1차원 해석모델에서 발생하는 평균 힘은 식 (7)값의 절반에 해당된다.

$$F_{xmi} = \frac{1}{2} F_x = \frac{\mu_0}{4\delta} \theta_\delta^2 l \quad (8)$$

따라서, 단위 면적 당 발생하는 힘 밀도 F_{Ax} 는 식 (9)와 같다.

$$F_{Ax} = \frac{F_{xmi}}{2 \tau l} = \frac{\mu_0}{8\delta \tau} \theta_\delta^2 \quad (9)$$

이상의 식 (9)는 VR-type 전동기 힘 발생 밀도도 전동기 설계시 기본식으로 이용하고 있다.

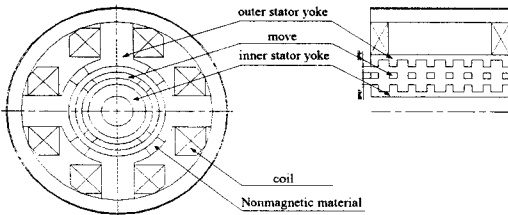


그림 2 원통형 VR-type LPM의 구조

그림 2는 개발 대상인 원통형 VR type LPM의 원주 방향 단면도 및 축방향 단면에서 한 상의 치 구조도를 나타낸다. 한 상은 4개의 극으로 구성되어 있으며 각 극은 각각의 코일로 동시에 여자된다. 내부와 외부 고정자(outer stator, inner stator) 사이로 가동자(mover)가 위치하는 구조이며, 베어링을 사이에 둔 형태로 배치된다. 베어링은 가동자의 전이동구간에 있어서 고정자와 가동자간의 공극을 일정히 유지하는 역할을 한다.



그림 3 VR-type LPM의 1극의 1/4 모델

각상은 각각 4개의 극으로 구성되어 있으며 상간은 서로 독립된 자기경로를 가지며 각 극들은 N-S-N-S의 순으로 여자되며 접선과 같은 경로로 자속이 형성된다. 본 연구에서는 설계된 LPM의 특성 해석을 위해 2차원

유한요소법을 사용하였다. 먼저, 설계된 LPM의 1극 분의 1/4을 3차원적으로 도시하면 다음 그림 3과 같다. 그림 4는 VR-type LPM의 철심을 나타내고 있다.



그림 4 VR-type LPM의 철심

이상과 같이 2층 공극의 원통형 4상 VR-type LPM은 3차원 해석에 의해 발생 추력을 정확히 계산할 수 있으나 해석 모델의 복잡성 계산시간의 과다 등으로 3차원 해석 모델을 적용시키지 않고 2차원 유한요소법으로 전동기의 치, 극 간격, 공극에 대해서 최대 추력을 발생시키는 형상으로 최적화시켰다.

3. 제어용 구동용 전력변환장치 개발

본 연구에서는 LPM을 구동하기 위한 컨버터로서 그림 5의 비대칭 컨버터(Asymmetric Bridge Converter)를 채택하였다. 이 컨버터는 고정자 권선의 각 상마다 각각 2개의 스위칭 소자가 직렬로 연결되어 있어 각 상이 다른 상에 의해 영향을 받지 않으며 독립적으로 제어가 된다. 또한, 다른 컨버터에 비하여 제어방식을 다양하게 구현할 수 있으며 제어하기가 간편하고 한 상의 소자가 파손될 경우 그 영향을 극소화 할 수 있다는 장점이 있다.

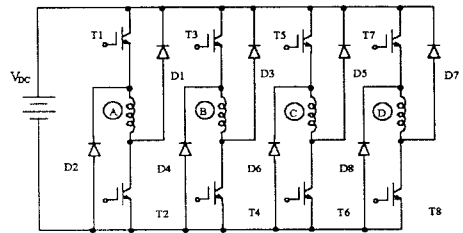


그림 5 비대칭 컨버터의 구조

LPM의 상의 수에 따른 여자 방식은 1상 여자, 2상 여자, 1-2상 여자 방식이 일반적이다. 본 연구의 제어 방식에서 선택한 2상 여자 방식은 항상 2개의 상에 동시에 전류가 흐르도록 하는 방식으로서 1상 여자에 비해 오버슈트(Overshoot)와 언더슈트(Undershoot)가 작아지는 등 댐핑 특성이 좋아 가장 널리 사용된다. 더욱이, 상하 운동을 하는 LPM의 경우는 댐핑 특성이 특히 좋아야하므로 가장 적합한 여자 방식이라고 볼 수 있다. 본 연구에서 개발한 LPM은 고정자 권선이 4개의 상으로 분리되어 있으므로 그림 5와 같이 각 상당 2개의 스위치를 직렬로 연결한 구조를 갖는다. LPM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자와 쇄교 자속이 최대가 되려는 방향으로 직선 운동자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로, 직선 운동자의 위치에 따라 고정자의 해당 상권선을 여자시킴으로서 토오크를 얻는 방식이다. 즉, 스위칭 소자를 턴 온, 턴 오프 시켜 해당 권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절함에 따라 그때의 전류 크기와 비교하는 쇄교 자속수에 의해 직선운동이 가능하게 되는 것이다.

LPM에서 발생하는 힘은 상권선에 흐르는 전류에 비해

한다. 그런데, 권선에 전압을 가하여 전류를 흘릴 때 권선이 가지고 있는 전기적 상수인 저항, 인덕턴스 등에 의해 전류는 시간지연을 가지며 상승한다. 따라서, 원하는 추력을 발생시키면서 원하는 속도를 얻기 위해 권선의 전류는 펄스의 인가와 동시에 빨리 상승하여 정격전류에 도달하고 반대로 감자 시에는 빨리 감쇄시켜야 한다. 이런 관점에서 히스테리시스(Hysteresis) 제어 방식을 사용한 펄스폭 변조방식(PWM : Pulse Width Modulation)형 정전류 구동은 효율을 감소시키지 않고 위의 조건들을 만족시킬 수 있는 최선의 제어가 될 수 있다. 상권선 전류의 상승시간을 줄이기 위해서는 높은 인가전압이 필요하지만 전류의 크기는 지수 함수적으로 증가하기 때문에 필요한 권선 전류로 제한하지 않으면 안된다. 따라서, 인가펄스의 폭을 가변하여 전류의 상승 시간을 빠르게 하면서 전류를 제한하는 것이 펄스폭 변조방식이다. 그림 6은 전체 시스템 구조를 보여준다.

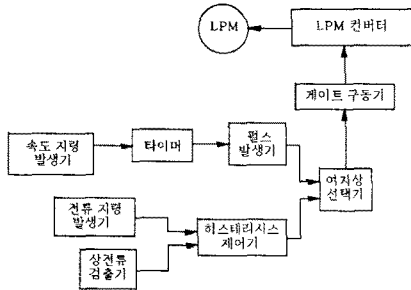


그림 6 제어 회로와 같이 구성된 전체 시스템

4. 실험 결과

본 연구에서 설계된 LPM과 구동장치의 전기적 정격 사양은 다음과 같다.

- 입력 : AC 3상 380V
- 고정자 상 수 : 4상
- 전체 구동 거리 : 2m
- 한 펄스 당 이동 거리 : 4mm
- 가동부 중량 : 100kg
- 최대 속도 : 50mm/s
- 스위칭 devices : IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)
- 상, 하 운전 가능

표 1과 표 2는 상권선에 흐르는 전류의 크기 및 부하를 변동시켰을 때와 LPM 내부에 물을 채웠을 경우에 LPM이 상하 한 스텝 움직이는 응답 속도를 나타내는 표들이다. 원자리에 제어봉과 일체형인 LPM이 설치되는 경우, 고정자와 가동자 사이의 빈 공간에는 180 °C의 물이 채워진 상태에서 운전되므로 이 때가 LPM의 운동에 있어서는 최대 부하가 걸린 상태로 본다. 제어봉 대신에 사용된 근사 부하는 LPM의 하단에 달린 추의 무게를 조절하는 방식으로 무부하 일 때 0kg, 전부하 일 때 30kg 및 과부하에서는 60kg을 달았다. 표들에서 연속적인 추력을 필요로 하는 최소 전류가 부하 변동이나 LPM 내부에 물이 차 있을 경우에 더 커지게 되므로 메터의 측정 범위가 다소 달라졌다. 그러나, 정지 상태에서의 홀딩(holding) 전류는 1A 이하이다.

표 1 및 표 2로부터 부하가 증가할수록 LPM의 추력 속도는 떨어지고 있음을 알 수 있으며 상권선에 흐르는 전류의 크기가 증가하면 추력 속도도 더 빨라짐을 알 수 있다. 또한, 하강 시보다 상승 시의 추력 속도가 전체적

으로 떨어짐을 볼 수 있으며 물을 채웠을 때가 LPM에 가장 큰 부하로 작용하고 있음을 알 수 있다. 물을 채운 경우는 상승 시보다 하강 시에 출력 특성이 더 나빠짐을 알 수 있는데 물의 저항이 하강 시에 더욱 크게 작용하고 있는 것으로 추측된다.

그림 7과 8은 전부하 상태이며 LPM 내부에 180 °C 물이 차 있는 경우의 상하 연속적인 동작에 대하여 위치 센서의 출력 및 2개의 상 전류를 나타내는 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 오실레이션이나 거러 오차 없이 정상적인 상하 이동 운동이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 0.8A의 상전류를 0.7A로 감소시킨 경우로서 홀딩 전류가 부족함으로 인해 LPM이 완전히 자유 낙하하고 있음을 보여준다.

그림 10은 최대 모터 속도에 따른 상하 움직임을 살펴본 것으로서 동시에 4상의 전류를 나타낸다. 모든 조건들을 정상적으로 했을 경우에도 그림들에서 보는 바와 같이 정상적인 상하 운동이 이루어지고 있음을 알 수 있으며 최대 속도인 5cm/s까지 상하 운동이 잘 되고 있음을 알 수 있다.

상전류	2.0A	2.5A	3.0A	3.5A	4.0A	4.5A
부하조건						
무부하	14.2ms	12.31ms	12.14ms	12.0ms	11.43ms	11.42ms
전부하		32.86ms	26.86ms	26.0ms	18.57ms	17.43ms
과부하					32.86ms	25.29ms
물 채움(전부하)				25ms	23.21ms	17.86ms

표. 1 상승 시의 한 스텝 당 응답 속도

상전류	2.0A	2.5A	3.0A	3.5A	4.0A	4.5A
부하조건						
무부하	12.8ms	8.86ms	8.57ms	8.32ms	8.29ms	8.28ms
전부하		24.43ms	24.29ms	23.14ms	16.29ms	15.71ms
과부하					20.43ms	24.29ms
물 채움(전부하)				41.07ms	40.0ms	35.71ms

표. 2 하강 시의 한 스텝 당 응답 속도

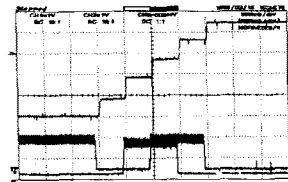


그림 7 연속 상승 운전 (물 채움, 상전류 4.5A)

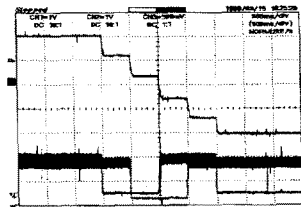


그림 8 연속 하강 운전 (물 채움, 상전류 4.5A)

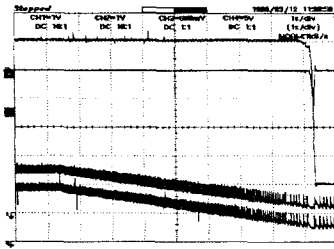


그림 9 홀딩 상태(0.8A)에서
상전류를 0.7A로 감소

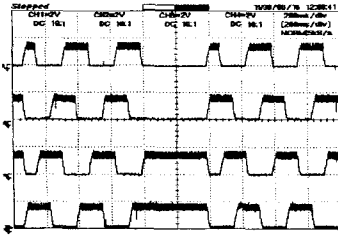


그림 10 5cm/sec로 상하 연속
운전 시의 상전류 (물을 채움,
상전류 4A)

5. 결 론

본 연구에서는 100kg중의 설계 사양이 요구되는 상하 추력용 제어봉으로서 선형 펄스모터를 사용하여 직접 제어봉과 일체화시켜 이동시킬 수 있도록 시스템을 소형, 간이화하였으며 제어응답의 빠른 속응성 등을 얻을 수 있게 설계, 제작하였다. 또한, 단위체적 당 최대의 추력을 얻기 위하여 2중 공극을 가진 원통형(Cylindrical type) 4상 VR-type LPM을 선정하였다. LPM의 개발 연구에서는 전동기 설계 시 기본이 되는 VR-type LPM의 추력을 Co-Energy 계산법으로 계산하여 단위 면적 당 발생 추력을 계산하였다. 원통형 전동기는 2차원 유한요소 해석으로 전동기의 치, 극간격, 공극에 대해서 최대 추력을 발생시키는 형상으로 최적화 시켰다. LPM을 상하로 구동시키기 위한 전력변환 장치는 4상한 컨버터로 가장 많은 추력을 발생시킬 수 있는 2상 여자 방식을 채택하였으며 원하는 속도와 이동 거리를 제어할 수 있도록 프로그램화하였다. 원통형 4상 VR-type LPM의 동 특성, 전력 변환 장치의 동작과 원하는 속도와 이동 거리를 제어하는 성능을 검증하기 위하여 동추력 시험을 수행하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] G. H. Rim and et al., "Comparisons of Converter Topologies for Switched Reluctance Motors", in Journal of KIEE, vol. 6, no. 2, pp. 1-9, Sep. 1993.
- [2] G. H. Rim, W. H. Kim, "A Choppingless Converter for a Switched Reluctance Motor with Unity Power Factor and Sinusoidal Input Current", in IEEE PESC '94 Conf. Rec., pp. 500-507., 1994.
- [3] 임근희 외, "가변속 스위치드 리럭턴스 모우터의 새로운 컨버터 토폴로지", 전기학회논문지, vol. 43, no. 9, 1994.
- [4] H. J. Ryoo, W. H. Kim, G. H. Rim, "A New Split Source Type Converter for SRM Drives", in IEEE PESC '98 Conf. Rec., pp. 1290-1294.

- [5] S. A. Nasar, I. Boldea, "Linear Motion Electrical Machines", John Willy & Sons, Inc., 1976.
- [6] S. A. Nasar et al, "Linear Electric Motors : Theory, Design and Practical Applications", Prentice Hall, Inc., 1987.
- [7] Gieras J. K, Eastham A. R. and Dawson G. E., "An Evaluation of the Effect of Varying the Side Bar Cross Section on the Performance of Single Sided Linear Induction Motors", ICEM '98, vol. 2, pp. 159-164, 1988.