

유압펌프용 SRM 구동 시스템의 특성분석

이주현, 김봉철, 김태형, 안진우
경성대학교

Characteristics Analysis of SRM Drive System for Hydraulic Pump

Ju-Hyun Lee, Bong-Chul Kim, Tae-Hyung Kim, Jin-Woo Ahn
Kyungsung Univ.

Abstract - This paper proposed a hydraulic pump system which uses a variable SR drive and constant capacity pump. The base and maximum speed, torque are determined from displacement capacity of the pump and maximum pressure. The drive system is set to have a minimum power consumption having hydraulic preset pressure, which is operated within a maximum capacity and maximum preset pressure. This is achieved by controlling motor speed and power with feedback signal of pressure of the hydraulic pump. A 2.2kw, 12/8-pole SR motor and DSP based digital controller are designed and prototype drive system is manufactured. The proposed variable speed SR drive system is simulated and tested with experimental set-up. The test results show that the system has some good features such as high efficiency and high response characteristics.

1. 서 론

일반적인 유압 시스템은 가변 용량형 유압 펌프와 정속도 제어용 전동기를 사용하는 방식으로 구성된다. 하지만 유압을 일정하게 유지하기 위해서는 비교적 손실이 크고 응답성이 낮은 유압 펌프의 유량 제어를 수행하게 되므로, 일정한 압력을 유지하기 위한 전력소비가 높은 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 최근에는 고정 용량형 유압 펌프와 속도 제어가 가능한 유도 전동기의 결합에 의한 유압 시스템의 활용이 크게 증가하고 있으나, 상용 전원에서 사용되는 유도 전동기의 구동 시스템은 부하에 따른 정속 운전 특성이 좋지 않고, 또한 가변속 제어를 위해서는 별도의 벡터 제어 드라이브가 요구된다. 한편, SRM은 전동기의 구조가 유도 전동기에 비하여 매우 견고하고, 단순하여 제작이 경제적이며, 초기 구동 토크가 유도 전동기에 비하여 매우 높아 유압 펌프 시스템에서 속응성은 높일 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 가변속 제어용 전동기를 적용한 고정 용량형 유압 펌프 시스템에서 SRM 구동 시스템을 적용하기 위하여 적합한 SRM을 설계하고, 이를 효율적으로 구동하기 위한 구동 시스템 및 제어 방식을 제안한다.

2. 유압 유닛 적용을 위한 전동기 설계

2.1 전동기 설계 및 제작

SRM의 기본설계는 SRM 전용 설계보조 프로그램을 사용하였다.

표 1. 전동기의 재원

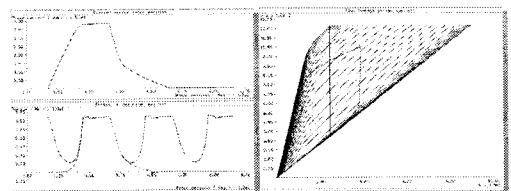
정격전압	3φ 220V	출력	2.2[Kw]
전류	Peak 38.8 [A]	토크	Peak to Peak
	Mean 12.9 [A]		10.9[Nm]
	r.m.s 19.7 [A]		r.m.s
속도	5000 [rpm]	극당 권선수	4.4[Nm]
			41[turn]
전동기 길이	102[mm]	공극	0.2[mm]

유압 유닛 시스템에 적용되는 SRM의 정격전압은 3φ 220V이며 출력 및 코깅 토크 등을 고려하여 12/8극 SRM을 선정하여 치수를 설계하였고, 설계결과와 요구 성능은 표 1에서 보여진다.

표 1은 설계된 전동기의 재원을 나타내고 있으며 전동기의 가공성과 제작을 고려하여 최종치수를 결정하였다. 전동기의 길이는 102[mm]로 하였고, 전동기의 극당 권선수는 41[turn], 전동기의 공극은 가동성을 고려하여 0.2[mm]로 설계하였다.

SRM의 설계는 설계 보조 프로그램 PC-SRD를 이용하여 기본 설계를 하였다. 또한 축력 및 코깅 토크 등을 고려하여 12/8극 SRM을 선정하여 치수를 설계하였고, 설계결과는 그림 1에서 보여진다.

그림 1(a)의 전류 및 토크파형은 제어를 고려하지 않은 경우로 실제 구동시스템의 경우 제어를 통해 토크 크리플을 최소화 되도록 제어알고리즘을 구현해야한다. 그림 1(b)의 전류-자속 곡선은 자속의 포화도를 나타낸다.



(a) 전류-토크 파형 (b) 전류-자속 곡선

그림 1. 시뮬레이션 결과[5000 rpm]

2.2 유압 펌프 시스템에서의 운전 방식

그림 2는 본 논문에서 제안하는 유압 펌프 시스템의 전체 제어 블록을 나타내고 있다.

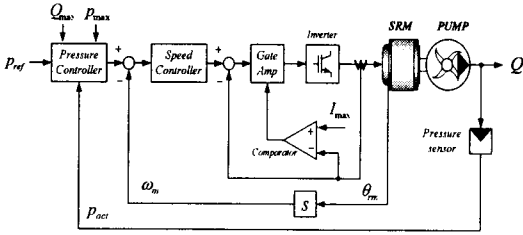


그림 2. SRM 구동형 유압 제어 시스템 블록도

최대유량, 최대압력을 설정하면 실제 압력을 받아 지령속도와 설정된 곡선에서의 속도를 비교하여 작은 값을 기준속도로 선택하고, DSP에 의해 기준 파라미터를 결정하고 그에 따라 최적 구동점을 찾게 된다. 여기서 만들어진 신호가 게이트 앰프단을 거쳐, 인버터를 구동시키게 되고 이때 구동 전류는 설정된 최대전류를 넘지 않는다. SRM의 토오크는 인버터의 펄스폭을 제한하는 방식으로 구현하였다.

3. 유압 유니트 시스템의 구성

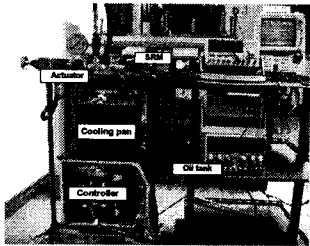
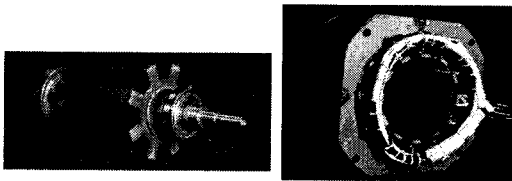


그림 3. 전체 유압 유니트 시스템

그림 3은 실험에 사용된 전체 유압 유니트 시스템을 보여준다. 이 시스템은 기존의 유압펌프 시스템을 사용하였고, 크게 전동기, 컨트롤러, 액츄에이터의 3가지 부분으로 나뉜다. 액츄에이터 부분은 유량, 유압을 조절할 수 있는 밸브를 사용하였다.

3.1 전동기부



(a) 고정자 (b) 회전자

그림 4. 제작된 유압 유니트용 SRM 전동기의 고정자 및 회전자

그림 4는 제작된 유압 유니트용 SRM 전동기의 회전자 및 고정자를 보여주는 그림이다. 전동기는 고정자 12극 회전자 8극의 3상 12/8 SRM을 제작하였고 실제 유압시스템의 적용을 위해 기존 전동기에 외형 치수를 사용하였다.

그림 5는 조립된 전동기의 모습을 나타낸다.

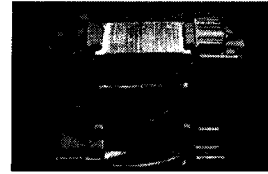


그림 5. 시작 전동기

3.2 인버터

SRM 컨버터는 토오크가 전류방향에 무관하므로, 한 상에 한 개의 소자만으로 가능하다. 하지만 실제로 상당 스위치 한 개로 회로를 구성하는 데는 SRM의 유도성 회로특성으로 인해 스위치 턴 오프시 전류가 완전히 소멸될 때 까지 연속성을 유지해야 한다는 문제점이 있다. 또한 단락사고시 소자를 보호하기 위해서는 상당 2개의 스위치가 요구된다.

본 연구에서는 인버터에 IPM(Intelligent power modules)을 사용하였다. IPM은 대용량, 고 스위칭 주파수 동작이 가능한 IGBT의 구성으로 이루어져 있으며, 소자 내부에 보호회로를 내장하고 있다. 따라서 인버터의 소형화가 가능하고 잡음에 강하며, 과전류나 과전압에 대해 이상신호를 보냄으로서 인버터 고장을 미연에 방지할 수 있다. 2개의 IPM을 이용하여 일반적으로 SRM 구동에 많이 쓰이는 비대칭 브릿지 컨버터를 구성하였다. 비대칭 브릿지 컨버터는 그림 6에 나타내었다. 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 가진다.

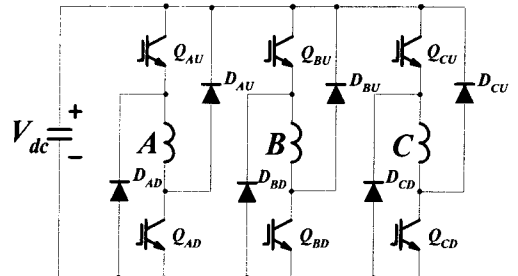


그림 6. 3상 SRM용 비대칭 브릿지 컨버터

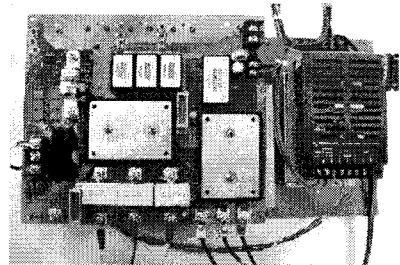


그림 7. 제작된 인버터

이 컨버터는 SRM구동용 컨버터 중에서 제어의 다양성이 가장 뛰어나며 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류중첩이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 고전압, 대용량에 적합하며 스위치의 정격전압이 상대적으로 낮다. 단점으로는 상당 스위치 수가 두 개라는 점과 그에 따르는 제어 및 드라이버 회로의 증가, 위쪽(upper level) 스위치의 드라이브가 각각 절연되어야 하는 등의 번거로움이 있다.

3.3 제어부

제어기는 SRM의 고성능 제어를 위하여 전동기 전용으로 설계된 TI사의 TMS320LF2407A를 사용한 제어 시스템을 구성하였다. 설계된 제어시스템은 SRM의 제어를 위해서 상전류의 검출 및 엔코더 신호의 검출을 프로세서 내에서 처리하도록 설계되어 있어 하드웨어의 구성이 매우 단순하다.

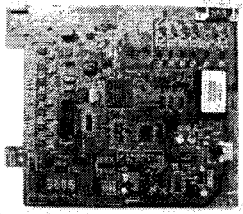


그림 8. 제작된 제어기

그림 8은 제작된 제어기를 나타내고 있다. 엔코더 신호는 SN75175를 통하여 제어부와 센서부를 절연처리하였고, 고속회전에서의 신호 왜곡을 방지하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

전동기의 설계조건에서 정격전압은 3 ϕ 220V 이었다. 실제 실험에서는 안전한 실험을 위해 110V의 전원으로 실험하였다. 전동기는 사용되고 있는 유압펌프에 장착하였고, 설계도 이에 맞추어서 하였다.

4.1 실험 결과

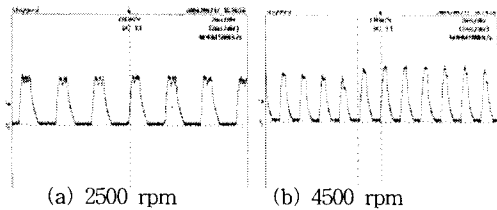


그림 9. 속도에 따른 전류파형 (14A/div; 2ms/div)

그림 9는 속도에 따른 전류파형을 나타낸다. 정격출력에서의 전류파형으로 소자보호를 위해 전류 제어된 상태이다.

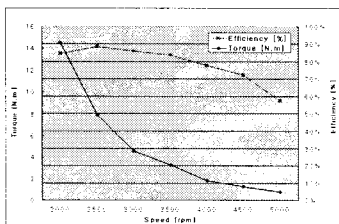


그림 10. 속도 대 토크-효율 곡선

그림 10은 제작된 전동기의 속도 대 토크-효율 곡선이다. 속도 대 효율곡선에서 전체적으로 평균 80%의 효율을 나타내었다. 속도 대 토크 곡선에서도 설계시의 시뮬레이션에 근접함을 알 수 있다.

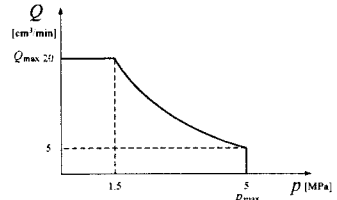


그림 11. 유량, 유압 제어 설정값

그림 11은 유량,유압의 제어 설정값을 나타내고 있다. 최대유량은 20 [cm³/min], 최대유압은 5[MPa]으로 제한되어 있다. 또한, 최저유량은 5[cm³/min], 최저유압은 1.5[MPa]로 설정되어 있는데, 이는 최저유량, 최저유압 이하에서는 유압 유니트의 정상적인 작동이 어려움으로 프로그램으로서 최저값을 설정해 두었다.

그림 12는 최대유량, 최저유량 설정시의 전류파형을 나타내고 있다. 유량설정에 따라 스위칭이 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다.

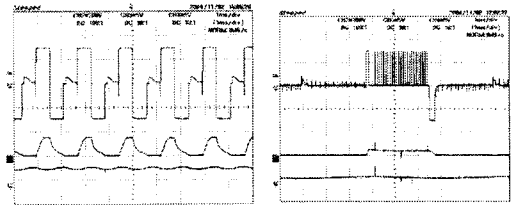


그림 12. 유량설정에 따른 전류파형

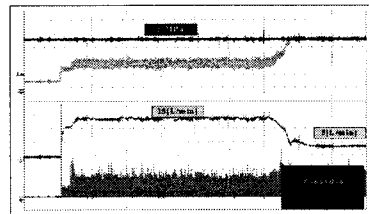


그림 13. 유량 지령 변화 시 응답파형

그림 13은 유량 지령 변화시의 응답파형을 나타내고 있다. 전동기의 속도 감소, 즉 설정유량의 변화에 대해서 압력도 즉각적으로 응답하는 것을 볼 수 있다.

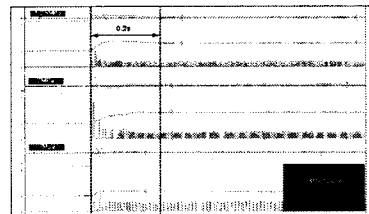


그림 14. 압력 지령치에 따른 응답속도

그림 14는 압력지령치에 따른 응답속도를 보여준다.

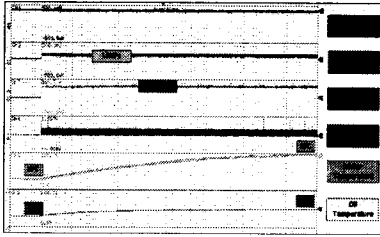


그림 15. 1시간 연속구동 시 모터, 오일의 온도변화

그림 15는 유압유니트가 1시간 연속구동에 모터, 오일의 온도변화를 나타낸다. 모터의 회전속도는 3000 [rpm], 압력은 1.5 [MPa]에서 1시간동안의 온도변화를 측정하였다. 모터의 온도는 모터 고정자측 외형의 온도를 측정하였고, 오일의 온도는 유압유니트 오일 탱크 속 기름의 온도를 측정하였다. 전동기의 온도는 28°C에서 96°C 상승하였고, 오일의 온도는 28°C에서 49°C로 상승하였다. 1시간 구동시간동안 압력, 속도, 전류는 변화 없이 일정하였다.

4.2 고찰

전동기 특성 시험에서는 80%의 효율로 설계시 산정된 효율 84% 보다 낮으나 설계 치에 근접하는 비교적 높은 효율을 보이고 있었고 이는 전동기 제작의 정밀성에 기인하는 것으로 평가된다.

실험에 앞서 유량, 유압의 최대치, 최저치를 설정하였다. 이는 유압 시스템 작동 시 불필요한 영역에서의 운전을 방지하는데 있다.

전류파형에서 입력 제어신호에 따라 전류가 원활하게 제어되고 있음을 볼 수 있다.

유압 유니트가 액추에이터부에 압력을 전달할 때 무리 없이 동작하기 위해서는 0.1 [sec]하의 응답속도를 보여주면 된다. 그림 23에서 각 압력 지령치에 대한 정상상태까지의 응답속도는 0.2 [sec] 정도 되는 것을 볼 수 있다. 그러나 실제 압력 지령치까지는 0.1 [sec] 이내에 도달하는 것을 볼 수 있다.

유압 유니트에서의 작동유의 온도는 중요한 변수가 되는데 작동유의 온도가 50°C 이상이 되면 기름내 기포가 생기게 되 원활한 압력의 전달이 이루어 질수 없게 된다. 실험에서는 작동유의 온도가 1시간 뒤 49°C까지 올라갔다. 이는 유압 유니트 작동에는 영향을 주는 범위는 아니지만, 장시간 연속구동을 고려해서 추가적인 방열대책으로 해결되어야 할 것이다. 모터의 온도는 98°C까지 상승하였는데, 이는 전동기 설계치 수정과 방열등으로 해결되어야 할 것이다.

유압 유니트 정격 전압에서의 실험은 이루어지지 않았으나, 전동기의 원활한 제어와 유압전달의 속응성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 가변속 제어용 전동기를 적용한 고정용량형 유압 펌프 시스템에서 SRM 구동 시스템을 적용하기 위하여 적합한 SRM을 설계하고, 이를 효율적으로 구동하기 위한 구동 시스템 및 제어 방식을 제안하였다.

유압 펌프 시스템에서 SRM의 설계를 위해 적용하고자 하는 유압 펌프의 배제 용적과 최대 압력으로부터 SRM의 기저 속도 및 최대 속도와 출력 토크를 산정하고 이를 바탕으로 SRM의 설계를 수행하였다.

본 논문에서 제안된 가변속 제어용 SRM 구동 시스템을 적용한 유압 시스템은 최대 설정 유량과 최대 설정 압력 내에서 전체 유압 시스템의 소비 전력이 최소가 되는 운전 모드로 동작하는 방식이다. 즉, 유압을 유지하기 위한 SRM의 속도 제어 뿐만 아니라, 유압 펌프의

압력을 피드백하여, 소비 전력이 허용되는 최대 소비 전력 내에 존재하도록 제어하는 방식이다. 그리고 실험을 통해 제안한 제어방식에 의한 유압유니트로서의 구동, 응답성, 문제점을 확인하였고, 실제 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 가변속 제어용 SRM을 적용한 유압 시스템은 SRM의 설계와 유압 시스템에서의 실험을 통하여 그 특성을 검증하였고, 실제 구동특성의 실험을 통해 유압시스템에서의 SRM의 효율성 및 활용도를 입증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호:R2005-B-109) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] Jame L. Johnson et al, Introduction To Fluid Power, Science & Technology, 2004.
- [2] C. S. Kim, M. G. Kim, H. G. Lee and J. W. Ahn, "Development of SRM and Drive System for Small Pallet Truck" Annual Proc. of KIEE, pp. 732-734, 2000.
- [3] C. S. Kim, S. G. Oh, J. W. Ahn and Y. M. Hwang, "The Design and the Characteristics of SRM Drive for Low Speed Vehicle" Annual Proc. of KIEE, pp. 871-873, 2001.
- [4] Aly Badawy, Jeff Zuraski, Farhad Bolourchi and Ashok Chandy, "Modeling and Analysis of an Electric Power Steering System" Steering and Suspension Technology Symposium, 1999
- [5] P. J. Lawrenson, J.M. Stephenson and P. T. Blenkinsop et al, Variable-speed Switched Reluctance Motors, IEE Proc. B, vol.127, no.4, 1980, pp.253-265.
- [6] H. Chen and G. Xie, A Switched Reluctance Motor Drive System for Storage Battery Electric Vehicle in Coal Mine, in Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Low Cost Automation, 1998, pp.90-95.
- [7] D.E. Cameron, J.H. Lang and S.D. Umans, The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors IEEE Trans.Industry Applications, vol. IA-28, no.6, Dec. 1992, pp.1250-1255.
- [8] C. Pollock, C.Y. Wu ; "Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Drives"IEEE IAS. Annual Meeting, Vol.1, pp.448-455,1995.
- [9] Texas Instruments "TMS320F243/F241/C242 DSP Controllers Reference Guide - System and Peripherals", January, 2000
- [10] 신홍렬, 자동화를 위한 유압제어기술,복두출판사, 1993.
- [11] 김봉철 외 2 : "유압 유니트용 SRM 및 제어기 설계, 대한 전기학회, 추계학술대회, pp168-170, 2004.10