

실험 데이터 기반의 PID 제어를 적용한 유압펌프용 SRM의 압력제어

석승훈, 김태형, 이동희, 안진우
경성대학교

The pressure control of SR Drive for Hydraulic Oil-pump with Data based PID Control

Seung-Hun Seok, Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
Kyungshung Univ.

ABSTRACT

This paper presents the practical pressure control of hydraulic oil-pump system using SR drive for industrial application. In order to get a high performance of pressure dynamics in actual application, a data based PID control scheme is proposed in this paper. The look-up table from pre-measured data produces an approximately proper current reference according to motor speed and oil-pressure. And, PID controller can compensate the pressure error. With the combination of two references, the proposed control scheme can get a fast dynamics and stable operation. Furthermore, the suitable current controller considering the nonlinear characteristics of SRM(Switched Reluctance Motor) and practical test method for data measuring are introduced.

The proposed control scheme is verified by the experimental test.

1. 서론

유압 펌프 시스템은 큰 동력을 쉽고 부드럽게 제어하여 발생 시킬 수 있기 때문에 차량의 브레이크나 산업용 장비 등에 널리 이용되고 있다. 일반적으로 기존의 유압 펌프 시스템의 경우 부하에 관계없이 전동기가 정속으로 회전하여 압력을 발생시키면 가변밸브에 의해 일정한 압력을 유지하는 기계적인 제어 시스템을 사용하였다. 최근에는 순간적인 부하변동에 빠르게 반응하는 가변속 제어 시스템을 적용한 유압펌프 시스템이 각광을 받고 있다[1]. 가변속 유압펌프의 경우 설정된 압력의 변화가 발생할 경우에만 전동기가 회전하므로 에너지 효율이 일반적인 경우에 비해 높고, 구조 또한 단순하여 경제적인 장점을 가지고 있다. 그러나 압력변동에 따라 전동기의 가변속 운전을 수행하여야 하므로 이에 따른 제어가 필요하다는 단점을 가진다.

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)은 단순한 구조에 의한 낮은 제작 단가와 기계적 강인성을 가지고 있다[2]~[4]. 이러한 특징으로 인하여 높은 내환경성과 경제성이 요구되는 산업용 기기에 대한 적용이 용이한 것으로 알려져 있다[5]~[9]. 이와 함께 SRM은 유도 전동기에 비해 높은 토크특성과 함께 넓은 속도범위에서 운전이 가능하다는 특성을 가지고 있으며 효율도 양호하다. 또한 유도 전동기와

달리 집중권 형태의 상 권선에 독립적으로 펄스형 전원을 여자하여 토크를 발생시키기 때문에 제어가 단순하고 스위칭 주파수가 상대적으로 낮아 손실도 낮다는 장점이 있다[10][11].

본 논문에서는 압력제어를 위한 데이터 기반의 PID 제어를 실제 유압 펌프 시스템에 적용하였다. 유압 펌프시스템의 동작 조건은 압력과 유량에 매우 가변적이다. 만일 부하로 실린더가 장착되어 있는 경우, 실린더가 움직이면 전동기의 속도가 변화되고 유량 조절 밸브에서 설정된 유량에 따라 속도가 조절된다. 일반적으로 운전조건이 제한된 경우에는 고정된 제어 이득을 사용하는 PID 제어를 통해 충분한 제어성능을 발휘 할 수 있다. 그러나 실제 유압 펌프 시스템에서와 같이 넓은 범위의 동작조건에서는 충분한 제어성능을 발휘하기 어렵다.

이와 함께 유압 펌프 시스템에 이용되는 압력센서의 경우 압력변화에 대한 신호의 지연 등의 낮은 응답특성을 가지고 있다. 따라서 유압펌프시스템의 경우 안정화된 동작을 위한 PID 제어기의 이득선정은 제한적이다.

본 논문에서는 2.2[kW]급 SRM을 이용하여 6[Mpa] 유압펌프시스템의 높은 응답특성을 높이기 위한 데이터 기반의 PID 제어를 제안하였다. 제안된 SRM용 유압 펌프 시스템 제어기법은 매우 간단하다. 압력 제어를 위한 주토크는 사전 실험을 통해 측정된 데이터를 기반으로 생성하고, 이때 발생하는 압력의 오차는 일반적인 PID 제어를 통해 제어된다. 이때 측정된 데이터는 속도-압력-전류의 관계에 의한 3차원 특업 테이블로 작성되며, 선형 보간법을 통하여 전동기의 속도와 요구 압력에 따라 필요한 전류량을 쉽게 얻을 수 있다. 따라서 빠른 속도응답을 얻을 수 있다. 그러나 데이터를 기반으로 한 제어의 경우 실제 압력에 대한 에러를 가지게 된다. 이 에러에 대한 보상은 PID 제어기에 의해 수행된다.

제안된 기법의 효율성을 검증하기 위해 실제 유압 펌프 구동시스템을 대상으로 실험을 수행하였다.

2. 데이터 기반의 PID 유압 제어 시스템

그림 1은 SRM을 이용한 일반적인 유압 펌프 시스템의 구성을 나타내고 있다. 유압펌프는 SRM에 직접 연결되어 있으며 유압은 유량조절밸브와 부하조건, 전동기의 속도에 의해 조절된다. 유압은 압력센서에 의해 검출되어진다. 압력제어기는 일정한 압력 지령치를 유지하기위한 토크 또는 전류지령을 생성하고, 속도 제한기는 전동기와 펌프 보호를 위해 압력 제어기 내에 포함되어 있다. 전류제어기는 일정한 압력을 위한 전류를

제어하기 위해 PWM을 통해 스위칭 신호를 발생시킨다.

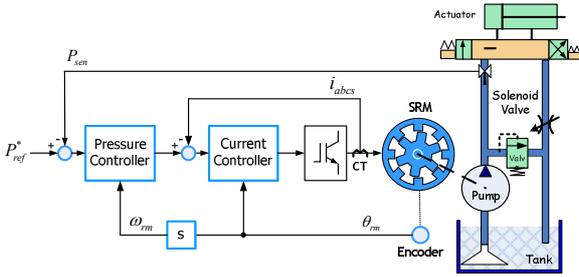


그림 1. SRM을 이용한 일반적인 유압펌프 시스템의 구성도
Fig. 1 Block diagram of conventional hydraulic oil-pump system using SR drive

그림 2는 일반적인 PID 제어기를 적용한 유압펌프시스템 제어기를 나타내고 있다. 제어 성능은 압력과 토크제어기에 의존한다. 그러나 압력제어기의 제어이득은 실제 시스템에 설치된 압력센서의 동적 특성에 의해 제한되어진다. 운전영역이 제한적인 경우에는 우수한 제어성능을 가지는 제어이득을 선택할 수 있다. 그러나 유압 펌프 시스템의 경우 압력제어밸브에 의해 전동기의 속도는 변화하게 되고, 압력의 변화도 부하조건에 의존한다. 따라서 넓은 범위의 운전 조건에서 알맞은 제어이득을 선택하는 것은 매우 어렵다.

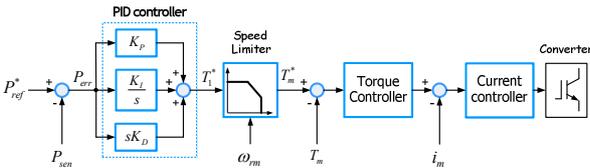


그림 2. 유압펌프구동을 위한 일반적인 PID 블럭도
Fig. 2 Conventional PID controller block diagram of hydraulic oil-pump system

그림 3은 본 논문에서 제안된 압력제어기법을 나타내고 있다. 일반적인 압력제어기법과 비교하여, 제안된 제어기법은 룩업 테이블을 사용하고 있으며 토크제어기는 사용하지 않는다. SRM은 상전류에 대해 비선형적인 토크특성을 가지고 있기 때문에 토크지령을 전류지령으로 직접 변환 할 수 없다. 본 논문에서는 압력 제어를 위해 주토크 지령은 룩업 테이블에 의해 발생시키고, 부가적인 토크 에러는 PID제어기에 의해 보상한다. 제어의 복잡함을 줄이기 위해 토크 제어기를 제거하였고 직접 전류 제어기를 사용 하였다.

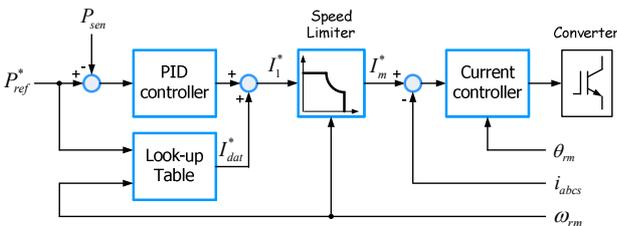


그림 3. 제안된 제어기법의 블럭도
Fig. 3 Block diagram of proposed scheme

압력제어기는 다음과 같이 설계되었다.

$$P_{err} = P_{ref}^* - P_{sen} \quad (1)$$

$$I_1^* = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + sK_D \right) \cdot P_{err} + I_{dat}^*(P_{ref}^*, \omega_{rm}) \quad (2)$$

$$I_m^* = f_x(I_1^*, \omega_{rm}) \quad (3)$$

여기서 $f_x(I_1^*, \omega_{rm})$ 는 속도 제한기를 나타내며, $I_{dat}^*(P_{ref}^*, \omega_{rm})$ 는 실측을 통해 미리 입력된 룩업 테이블의 결과를 나타낸다.

제한된 제어기법의 경우 룩업 테이블의 데이터를 기반으로 하기 때문에 룩업 테이블의 생성은 매우 중요하다. 룩업 테이블은 속도-압력-전류에 대한 3차원 데이터로 구성되며, 선형 보간법에 의해 현재 속도와 요구 압력에 따라 식(2)를 통해 PID 제어기와 함께 전체 지령 전류를 생성하는데 이용된다.

그림 4는 실제 유압펌프시스템의 실험을 위해 실측된 룩업 테이블을 나타내고 있으며, 그림 5는 본 논문에서 제안된 데이터 기반의 PID 제어기를 적용한 시스템의 구성을 나타내고 있다.

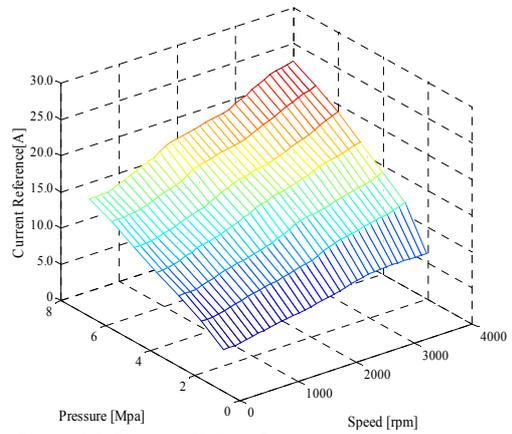
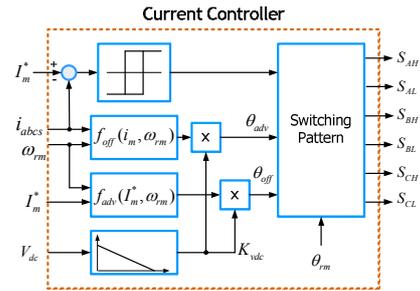
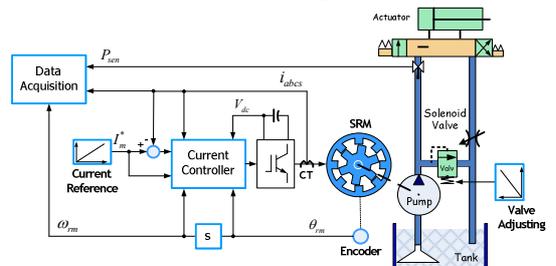


그림 4. 유압펌프시스템을 위한 룩업 테이블
Fig. 4 Look-up table for hydraulic oil-pump system



(a) 제안된 제어블럭



(b) 전체시스템 구성도

그림 5. 제안된 시스템의 구성도
Fig. 5 Block diagram of proposed system

3. 실험 및 결과

그림 6은 제안된 제어기법을 검증하기 위해 실험에 사용된 제어기와 유압 펌프 시스템을 나타내고 있다. 그림 7은 부하변동에 따른 일정 압력 제어성능을 시험한 결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 부하변동에 따른 압력의 차가 발생할 경우 신속히 보압하는 과정을 수행하며, 이후 일정한 압력을 계속 유지하기 위해 높은 속도 범위에서 구동하고 있음을 확인할 수 있다. 압력지령의 변동에 따른 응답특성시험 결과는 그림 8과 같이 원활히 수행됨을 알 수 있다.



그림 6. 실험장치 구성
Fig. 6 Experimental setup

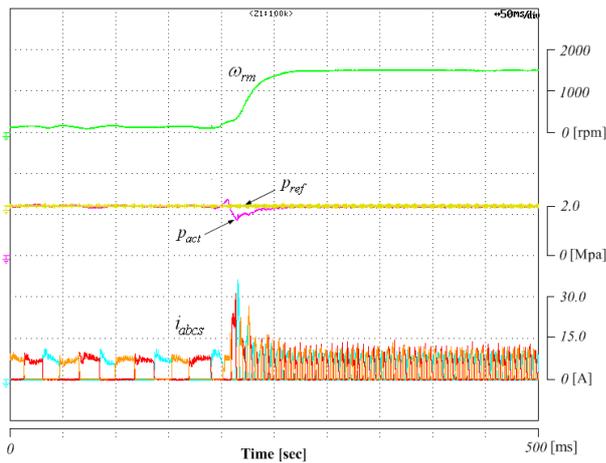


그림 7. 일정 압력 제어 시험(부하 인가시)
Fig. 7 Constant pressure control test(Load injection)

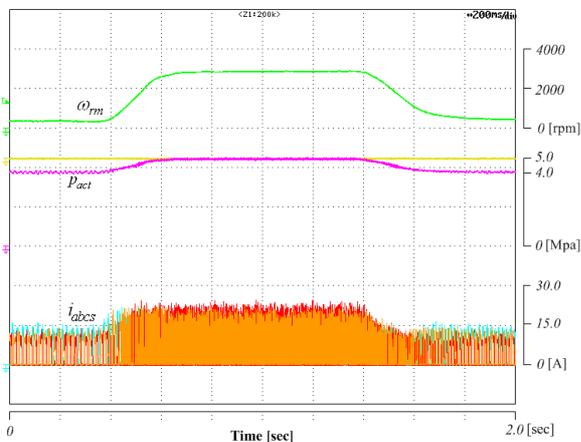


그림 8. 압력 지령 변동시험(4Mpa→5Mpa→4Mpa)
Fig. 8 Pressure reference changing test
(4Mpa→5Mpa→4Mpa)

4. 결론

본 논문에서는 실제 유압펌프에서 넓은 범위의 동작조건에 의해 PID의 제어이득을 선정하기 어려운 문제점을 보완하고 압력제어특성 및 응답특성을 향상시키기 위해 실측된 데이터를 기반으로 한 PID 압력제어방식을 제안하였다. 제안된 제어기법은 실제 유압 펌프 시스템에 적용하여 효율성을 검증하였다.

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력 양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [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] C.Y. Wu and C. Pollock ; "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive," IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995.
- [10] Texas Instruments "TMS320F243/F241/C242 DSP Controllers Reference Guide - System and Peripherals", January, 2000
- [11] Aly A. Badawy, Farhad Boloruchi, Steven K. Gaut, "E-Steer™ Redefines Steering Technology ", Automotive Engineering, Automotive Systems Review of Technical Achievements, pp. 15-18, SAE International Magazine, September, 1997.