

가변 운전 조건을 고려한 유압 펌프 SRM용 데이터 기반의 하이브리드 PID 압력 제어

김태형, 이동희, 안진우  
경성대학교

Data-based Hybrid PID Pressure Control  
of SRM for Hydraulic Pump with Variable Driving Condition Consideration

Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn  
Kvungsung University

**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 proposed control scheme is verified by the experimental test.

1. 서 론

전기 시스템에서 전원과 같이 유압시스템에서는 유압 펌프가 동력원으로 작용한다. 일반적인 시스템에서는 정속 전동기를 통해 펌프를 회전하며 압력을 생성하고, 가변펌프에 의해 일정압력으로 제어된다. 따라서 정속으로 인한 전동기 손실이 발생하게 된다. 최근 이러한 손실을 줄이기 위해 압력요구의 발생시 펌프용 전동기의 회전속도를 높여 순간적인 부하변동에 빠르게 반응하고, 에너지 효율을 높이는 가변속 제어 시스템을 적용한 유압펌프 시스템이 각광을 받고 있다[1]. 따라서 이 시스템의 경우 가변속 운전이 용이한 전동기와 이에 따른 제어가 요구된다. 이러한 점에서 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 유압펌프에 유리한 특징을 가지고 있다. SRM은 단순한 구조에 의한 낮은 제작 단가와 높은 기계적 강인성을 가지고 있으며, 우수한 가변속 특성 및 높은 토크 특성을 가지고 있는 브러시리스 전동기이다[2-9].

가변속 운전을 수행하는 유압 펌프시스템의 운전조건은 압력과 유량에 따라 매우 가변적이다. 일반적으로 운전조건이 제한된 경우에는 고정된 제어이득을 사용하는 PID 제어를 통해 충분한 제어성능을 발휘 할 수 있으나, 실제 유압 펌프 시스템에서와 같이 넓은 범위의 동작조건에서는 충분한 제어성능을 발휘하기 어렵다[10][11].

본 논문에서는 2.2[kW]급 SRM을 이용하여 6[Mpa] 유압펌프시스템의 높은 응답특성을 높이기 위한 데이터 기반의 제어와 PID제어를 함께 사용하는 압력제어 기법을 제안하였다. 제안된 SRM용 유압 펌프 시스템 제어기법은 매우 간단하다. 먼저 지령을 만족시키기 위해 토크를 사전 실험을 통해 측정된 데이터를 기반으로 생성하고, 이때 발생하는 압력의 오차는 일반적인 PID 제어를 통해 제어된다. 또한 전원전압 및 속도에 따른 여자 전류의 확립을 고려한 별도의 전류 제어기도 제안하였다. 제안된 기법의 효용성을 검증하기 위해 실제 유압

펌프 구동시스템을 대상으로 실험을 수행하였다.

2. 제안된 유압제어기법

그림 1과 그림 2는 SRM을 이용한 일반적인 유압 펌프 시스템의 구성과 PID를 이용한 제어기를 나타내고 있다. 유압펌프는 SRM에 직접 연결되어 있으며, 유압은 유량조절밸브와 부하조건, 전동기의 속도에 의해 조절된다. 유압은 압력센서에 의해 검출되어진다.

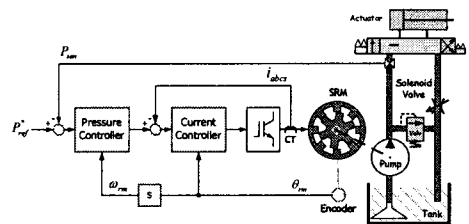


그림 1. 일반적인 유압펌프용 SRM 구동 시스템  
Fig. 1 Conventional SR drive for hydraulic oil-pump

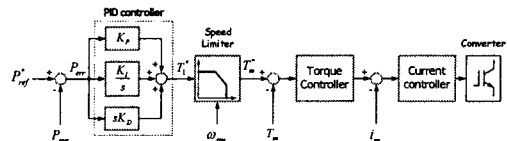


그림 2. 유압펌프구동을 위한 일반적인 PID 블럭도  
Fig. 2 Conventional PID controller block diagram of hydraulic oil-pump system

PID제어를 적용한 시스템에서 압력제어기는 압력 지령치를 생성하기 위한 토크 또는 전류지령을 생성하며, 속도 제한기는 압력제어기내에 포함되어 전동기와 펌프의 보호를 위해 상한속도를 제한한다. 전류 제어기는 생성된 전류지령을 따르기 위해 PWM에 의한 스위칭 신호를 발생시킨다. 따라서 제어 성능은 압력 제어기와 토크 제어기에 의존한다. 그러나 압력제어기의 제어이득은 실제 시스템에 설치된 압력센서의 특성에 의해 제한되어진다. 이와 함께 유압 펌프 시스템의 경우 압력제어밸브에 의해 전동기의 속도는 변화하게 되고, 압력의 변화도 부하 조건에 의존한다. 따라서 넓은 범위의 운전 조건에서 빠르고 정밀한 응답성을 가지는 제어이득의 선택은 매우 어렵다.

그림 3은 본 논문에서 제안된 압력제어기법을 나타내고 있다. 제안된 제어기법은 룩업 테이블을 사용하고 있으며, 토크제어기를 사용하지 않고 압력 오차에서 제어에 요구되는 지령전류를 바로 계산한다.

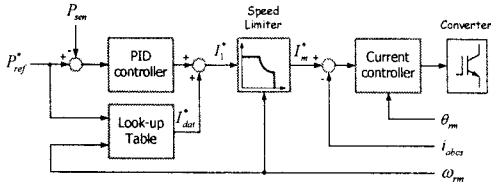


그림 3. 제안된 제어기법의 블럭도  
Fig. 3 Black diagram of proposed scheme

따라서 본 논문에서는 압력 제어를 위해 먼저 토크 지령은 룩업 테이블에 의해 발생시키고, 추가적인 토크 에러는 PID 제어기에 의해 보상한다. 따라서 PID로 제어해야 할 제어의 양이 작아지게 되고, 응답성 및 정밀도가 높아지게 된다. 이와 함께 제어의 복잡함을 줄이기 위해 토크 제어기를 제거하였고 직접 전류 제어기를 사용하였다. 압력 제어기는 다음과 같이 설계되었다.

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

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

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

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

제안된 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 룩업테이블을 나타내고 있으며, 그림 5는 본 논문에서 제안된 데이터 기반의 PID 제어기를 적용한 시스템의 구성을 나타내고 있다.

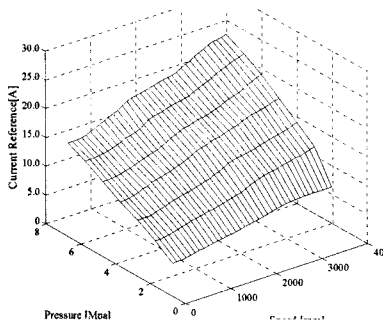


그림 4. 유압펌프시스템을 위한 룩-업 테이블  
Fig. 4 Look-up table for hydraulic oil-pump system

상기와 같이 제어기에서 생성된 전류를 상권선에 인가하기 위해서는 전류지령의 크기와 속도에 따른 적절한 선행각이 요구된다. SRM의 경우 그림 5에서와 같이 인덕턴스의 상승 구간 전에 선행각에서 전압을 인가하여 요구되는 지령 전류를 확립시킨다. 턴-오프 시에도 인덕턴스에 의해 전류의 소화가 지연되게 된다. 따라서 지령 전류가 정상적으로 생성되었다 하더라도 지령전류에 따른 적절한 턴-온, 턴-오프 각이 설정되지 않는다면 그림에서와 같이 충분한 전류를 확립시키지 못해 요구되는 토크를 생성하지 못할 뿐만 아니라, 부토크가 발생할 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 8과 같이 인가전압과 속도를 고려한 전류제어기를 통하여 지령된 상전류의 정확한 제어를 수행하였다.

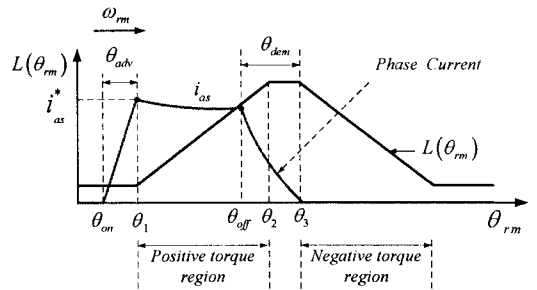


그림 5. SRM의 상전류와 인덕턴스 프로파일  
Fig. 5 Inductance profile and phase current of SRM

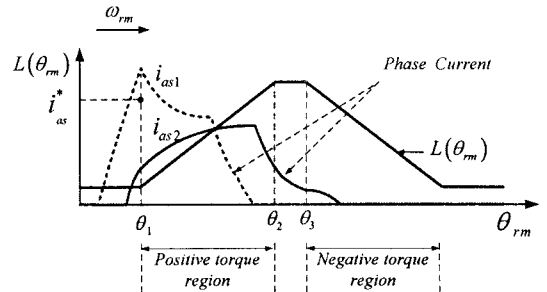


그림 6. 부적합한 선행각과 소호각에 따른 상전류  
Fig. 6 Phase current with an unsuitable advance and turn-off angle

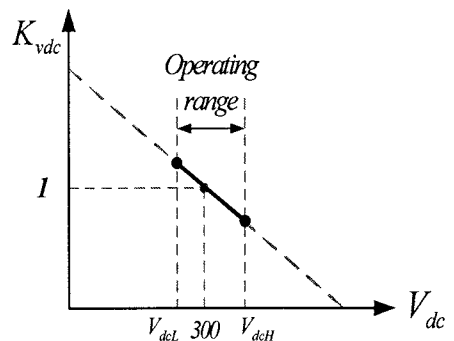


그림 7. 제어 함수내 직류단 전압에 따른 가중치  
Fig. 7 Weighting factor for DC-link voltage effect in control angle function

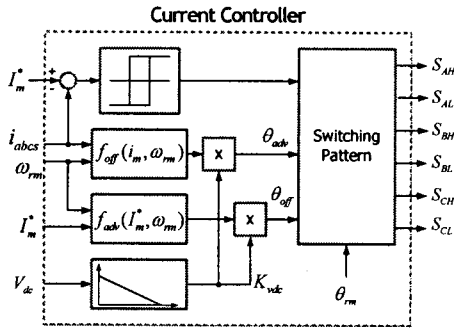


그림 8. 제안된 전류제어기  
Fig. 8 Proposed current controller

### 3. 실험 및 결과

그림 9는 제안된 제어기법을 검증하기 위해 실험에 사용된 제어기와 유압 펌프 시스템을 나타내고 있다. 그림 10은 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 11과 같이 원활히 수행됨을 알 수 있다.

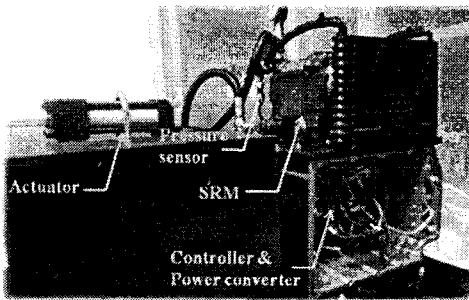


그림 9. 실험장치 구성  
Fig. 9 Experimental setup

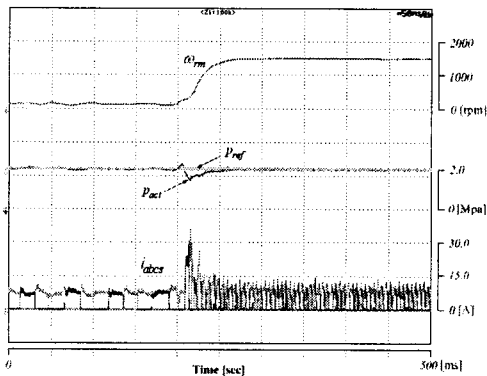


그림 10. 일정 압력 제어 시험(부하 인가시)  
Fig. 10 Constant pressure control test(Load injection)

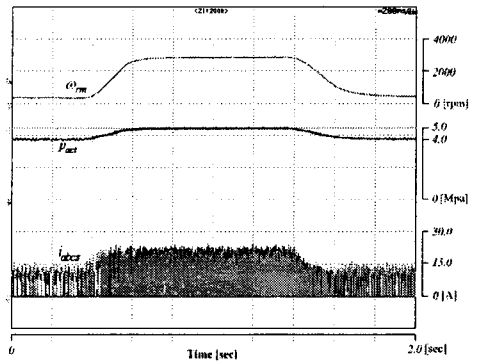


그림 11. 압력 지령 변동시험(4Mpa→5Mpa→4Mpa)  
Fig. 11 Pressure reference changing test  
(4Mpa→5Mpa→4Mpa)

### 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 효용성을 검증하였다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

### [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] 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.