

# 직접순시토크 제어에 의한 SR구동형 유압 펌프시스템의 고성능 압력제어

論 文

56-10-8

## A High Performance Pressure Control of SR Type Hydraulic Pump System using Direct Instantaneous Torque Control Method

安 珍 雨<sup>†</sup>  
(Jin-Woo Ahn)

**Abstract** - This paper presents a high performance pressure control scheme for SR(Switched Reluctance) type hydraulic oil pump using DITC(Direct Instantaneous Torque Control). SR drive has a good feature for pump applications due to a high efficiency, high speed and high torque characteristics. But, SR drive has high torque ripple in commutation region. So, the pump pressure variation is high in the region. In order to reduce the pressure variation, DITC combined with pressure control scheme is presented in this paper. A simple PI controller with flow and pressure limit, generates a reference torque to keep the constant actual pump pressure. The direct torque controller of SR drive generates inverter switching signals according to a control rule and a torque estimator.

Computer simulation and experiental results show the validation of the proposed control scheme.

**Key Words** : Switched Reluctance Motor, Hydraulic pump, Direct Instantaneous Torque Control

### 1. 서 론

현대 산업설비는 높은 생산성과 효율을 요구하며, 이에 따라 자동화에 필수적인 유체동력 시스템(fluid power system)은 고성능화가 요구되고 있다. 유압 시스템에 사용되는 작동유체는 전기와 마찬가지로 연속적인 유동체 이므로 그 제어가 용이하다. 이러한 작동유체를 제어함으로써 작동체의 연동(동작)을 자유로이 조작할 수 있다. 유압장치는 소형으로 큰 힘을 얻을 수 있고 동력에 응답성도 좋으며 주로 고압화에 의한 것으로 현재 200 ~ 300  $kgf/cm^2$  정도의 고압이 사용되고 있다. 또한 제어성에 있어서는 전기식 제어가 좋은 점도 있어 유압과 전기의 장점을 살린 전기 유압식 장치에 대한 관심이 많이 집중되고 있다.[1]

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 최근 반도체 소자의 발전과 메카트로닉스 기술이 발전함에 따라 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 걸쳐 그 응용영역을 확대하고 있다. SRM은 일반적인 전동기에 비하여 전동기구가 간단하고, 고효율, 경제성, 시스템 제어의 강인성, 우수한 견인특성 및 넓은 범위의 속도제어가 가능한 장점을 가지고 있어서 그 실용적 가치가 매우 높다. 최근에는 이러한 SRM을 적용한 유압시스템이 상용화 되어 산업계에 보급되고 있다.[2]

일반적으로 유압 시스템의 압력 제어를 위해서는 순시 압력에 대한 고정도의 토크 제어 성능을 요구하게 된다. 상용

의 압력 제어 시스템에서는 전동기의 속도와 토크에 대하여 전류 제어 기법을 적용하고 있으나, SRM의 경우에는 토크와 전류의 비선형성으로 인하여, 제어 특성을 나쁘게 하는 요인이 되고 있다.

본 연구에서는 SRM의 고성능 순시토크 제어기법을 SR 구동형 유압시스템에 적용하여 유압 시스템의 압력 제어 성능을 개선하고자 한다. SRM의 순시토크 제어기법은 회전자의 위치와 전류에 따라 전동기의 토크를 직접 추정하고 이에 따른 압력 오차를 간단한 제어 규칙에 의해 구동하는 방식으로, 기존의 전류 제어방식에 비해 제어성능이 우수하고 구현이 간단한 장점이 있다.[3,4] 또한 SRM의 상과 상 절환시의 토크 리플을 억제하기 위해, 새로운 토크 분배함수를 구현하여 전류 구간에서의 토크 리플을 억제하고, 운전 효율을 개선하여, 유압 시스템의 운전 성능을 향상시킬 수 있다.

제안된 유압 펌프 압력 제어 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

### 2. 직접순시토크제어형 유압시스템

#### 2.1 일반적인 유압 시스템

그림 1은 일반적인 가변속 구동장치를 이용한 유압 펌프 시스템의 구조를 나타내고 있다. 그림 1에서 가변속 드라이브에 의해 구동된 유압 펌프는 오일 탱크의 유압유를 압축하여 밸브 및 액츄에이터로 전송하여 힘을 전달하는 구조를 가지고 있다. 초기의 유압 시스템이 가변 용량형 구조로 유압 밸브에 의해 압력을 기계적으로 제어하는 방식에서, 최근에는 가변속 드라이브의 속도 및 토크 제어에 의해 시스템의 유압을 일정하게 제어하는 방식이 널리 적용되고 있다. 이는 기계식 밸브 제어방식에 비하여 압력 제어의 정밀도가

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부  
教授 · 工博

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

接受日字 : 2007年 7月 25日

最終完了 : 2007年 8月 21日

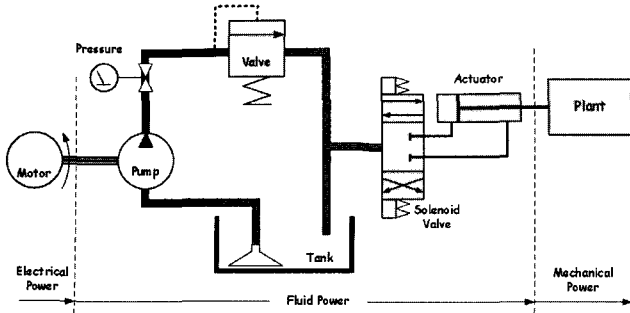


그림 1 유압 펌프의 구조  
Fig. 1 Block diagram of hydraulic oil pump

우수할 뿐만 아니라, 운전 효율이 높고 응답성이 매우 빠른 장점을 가진다.

일반적으로 가변속 드라이브를 적용하여 유압을 제어하는 경우에는 유압 시스템과 가변속 드라이브의 속도 및 토크 관계에 의해 압력 센서로부터 피드백 되어진 신호를 사용하여 제어하게 된다.

유압시스템의 각종 손실을 무시하고, 유압 펌프의 토출량이 일정하다고 가정하면, 유압펌프의 토출 압력과 구동용 전동기 발생토크의 관계는 다음과 같다.

$$p = \frac{T_m}{V_{pump}} \quad (1)$$

단,  $p$  : 유압 펌프 토출 압력 [MPa]

$T_m$  : 유압 펌프 구동용 전동기 토크 [Nm]

$V_{pump}$  : 펌프의 배제 용적 [cm<sup>3</sup>/rev]

즉, 유압 펌프의 토출 압력은 전동기의 토크에 직접 비례하게 된다. 따라서 유압 펌프의 토출 압력은 유압 펌프 구동용 전동기의 토크에 의해 제어될 수 있다.

펌프의 토출량과 구동용 전동기속도와의 관계는 다음과 같다.

$$Q = n_m \cdot V_{pump} \quad (2)$$

단,  $Q$  : 유압 펌프 토출량 [cm<sup>3</sup>/min]

$n_m$  : 유압 펌프 구동용 전동기 회전 속도 [rpm]

따라서 유압 펌프의 토출량은 제 손실을 무시하면 구동용 전동기 속도에 비례하므로, 속도 제어에 의해 유량 제어가 가능하다.

그림 2는 SRM을 적용한 유압 시스템의 압력 제어 구조를 나타내고 있다. 그림 2에서 유압은 압력 제어기의 후단부에 위치한 SRM의 속도 제어 방식에 의해 펌프의 구동 속도를 조절하고, 이에 따라 유량의 변화에 의해 압력이 제어되는 구조로 설계된다. 이 방식은 실제 제어기의 구현이 압력제어기, 속도 제어기 및 토크 제어기로 구성이 되며, 토크 제어기는 PWM 또는 히스테리시스 방식의 전류 제어에 이루어지게 된다. 유압 시스템의 압력을 일반적인 PI 제어기로 구성하는 경우에는 각 단계의 제어 이득의 상호 작용으로 인하여, 제어 이득의 산정이 매우 어렵고, 제어기의 전달 지연에 의해 응답성이 낮아지게 된다.

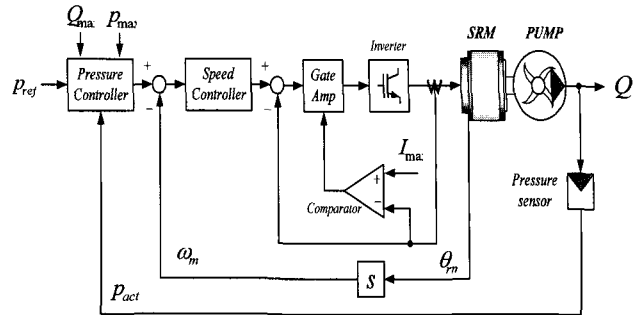


그림 2 SRM을 적용한 유압 시스템의 압력 제어시스템  
Fig. 2 Pressure control system using SR drive

특히, 가변속 드라이브로 SRM을 적용하는 경우에는 전류(轉流)구간에서의 토크 리플이 전체 시스템의 소음을 증가시키며, 안정적인 압력 제어를 어렵게 하는 요인이 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 SRM을 적용한 유압 시스템에서 제어기의 구조를 보다 단순화 시키고, 전류 구간에서의 토크 리플을 억제하기 위하여 직접 순시토크 제어기법을 적용한 압력 제어 시스템을 구현하였다. 제안된 유압 시스템은 유압의 응답성은 PI형 압력 제어기에서 조절하고, 압력 제어기의 출력을 SRM의 토크로 하여 제어기가 직접 SRM의 토크를 추종하는 시스템이다. 이때, SRM의 토크 제어에서 전류(轉流)구간의 토크 리플을 억제하기 위하여 직접 순시토크 제어 방식을 적용함으로써, 전 영역에서 부드러운 토크 제어가 가능하게 되며, 별도의 속도 제어기 및 전류 제어기 제어 이득의 산정이 요구되지 않으므로 시스템의 응답성 설정이 매우 단순해지는 장점이 있다.

## 2.2 제안된 직접 순시토크 제어기법에 의한 유압 시스템

유압 시스템의 실제 압력은 식 (1)에서 설명된 바와 같이 유압 유니트의 구조와 가변속 드라이브의 토크에 직접 비례한다. 따라서, 일정한 압력을 유지하기 위해서는 매우 일정한 토크 제어 기법이 요구된다. 특히 SRM의 경우에는 전동기의 특성이 펌프 구조에 매우 적합하나, 토크 출력 특성이 전류에 대해 매우 비선형적이고, 이러한 특성은 전류(轉流)구간에서 더욱 심해지는 단점을 가진다. SRM의 토크 리플 억제를 위한 다양한 제어 방법들이 연구되었으나, 본 논문에서는 펌프 응용분야에 적합한 단순한 구조를 가지는 직접 토크 제어 기법을 적용하였으며, 특히 일정한 압력을 유지하기 위한 제어 규칙을 제안하였다.

SRM의 직접 순시 토크 제어를 위해서는 적용하고자 하는 인버터의 동작 모드 해석이 매우 중요하다. 본 논문에서 적용한 SRM 구동용 인버터는 일반적으로 널리 적용되고 있는 비대칭 컨버터형 구조를 사용하였으며, 그 구조와 동작 모드 해석은 그림 3과 같다. 비대칭 컨버터는 각 상의 독립 운전이 가능하고, 상간 단락의 위험이 없으므로 일반적인 SRM의 구동에 많이 사용되고 있다. 비대칭 컨버터의 동작 모드는 그림 3에서 보는 바와 같이 두 스위치가 모두 턴-온되는 여자 모드(State 1), 여자 전류의 프리휠링 모드(State 0) 및 여자 전류를 회수하는 감자 모드(State -1)로 설명될 수 있다. 즉, 여자 모드에서는 여자 전류의 상승을 통하여

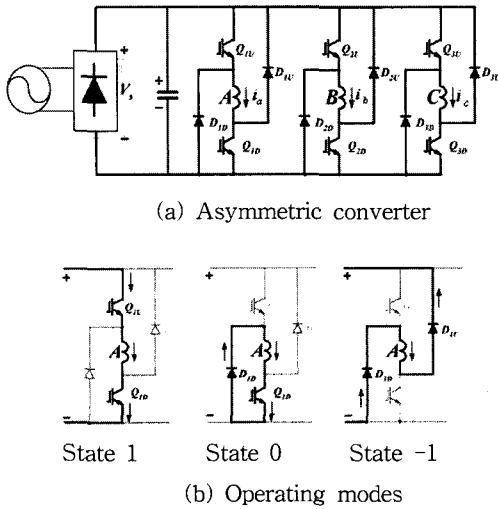


그림 3 비대칭 컨버터의 구조 및 동작 모드  
 Fig. 3 Asymmetric converter and operating modes

전동기에 토크를 발생시키며, 프리 휠링 모드는 여자 전류의 제어에 적용되며, 상 권선에 영전압이 인가된다. 감자 모드는 여자 전류를 감소시켜 전원측으로 에너지를 회수하는 구간으로, 여자전류가 감소하는 동안에는 상권선에 역방향 링크 전압이 인가된다.

직접 순시 토크 제어의 스위칭 규칙은 이러한 비대칭 컨버터의 세가지 동작모드를 토크 발생 구간에 따라 적절히 조절함으로써, SRM의 발생 토크를 일정하게 유지 시키게 된다.

그림 4는 인덕턴스 프로파일과, 각 인덕턴스 구간에 따른 여자 전류 및 토크 형상을 나타내고 있다. SRM의 토크는 다른 AC 전동기와 달리 여자전류의 제어 및 인덕턴스 기울기의 곱에 비례하게 된다. 따라서, 토크제어를 위해서는 전동기의 기하학적 구조에 따라 적절한 인덕턴스 위치에서 여자 전류를 제어해야 한다. 또한, 여자 전류의 상승 및 하강 시간을 고려하여 정 토크 발생 구간에서 충분한 여자 전류가 공급 될 수 있도록 하여야 한다.

그림 4의 구간 1(Region 1)의 주 토크는 A상의 여자 전류로부터 공급하고, B상의 토크 발생을 위해서 여자 전류가 확립 될 수 있도록 선행적으로 턴-온각을 제어하는 구간으로, B-상의 전류에 의해서는 실제 토크가 발생되지는 않는다. 그림 4의 구간 2(Region 2)는 전류(轉流)구간으로 주 토크

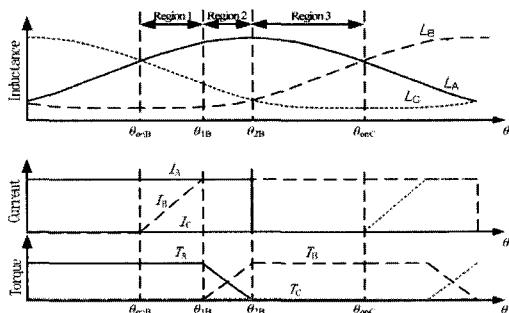
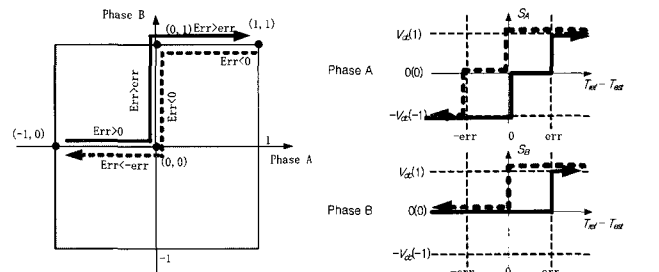


그림 4 여자 구간에 따른 전류 및 토크  
 Fig. 4 Current and torque according to excitation regions

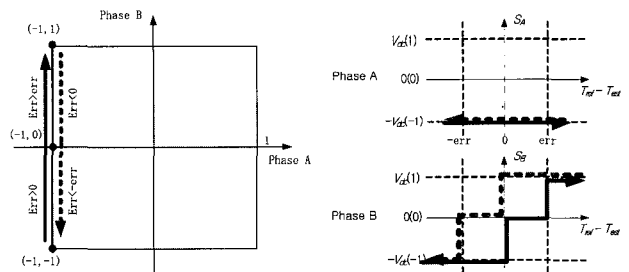
크를 발생하는 A상을 턴-오프 하며, 이 구간에서는 A상의 감자전류와 B상의 여자전류가 동시에 토크를 발생한다.

이때, A상의 감자 구간이 지연되면, A상의 인덕턴스가 감소하는 구간까지 전류가 확장되어 부토크를 발생하게 되므로, 전류구간에서 이전상의 턴-오프각 조절이 중요하게 된다. 구간 3(Region 3)는 B상의 전류만이 토크를 발생하는 구간이 된다.

그림 5는 본 논문에서 제안하는 각 구간에서의 직접순시 토크 제어의 제어 규칙을 나타내고 있다. 그림 5에서 적용된 제어 규칙에서 x-축은 지령 토크와 실제 토크의 오차를 나타내고, y-축은 전류 구간을 기점으로 이전 상(A-phase)과 다음 여자상(B-phase)의 스위칭 상태를 표현하고 있다. 직접 순시토크 제어에서 직접 제어 규칙을 적용하기 위해서는 토크의 추정이 요구되는데, 본 논문에서는 회전자 위치와 전류의 크기에 따라 미리 계측된 비선형 토크의 룩-업 테이블과 선형 보간법을 사용하여 실제 토크를 추정하였다.



(a) 구간 1에서의 제어 규칙



(b) 구간 2와 3에서의 제어 규칙

그림 5 제안된 각 구간별 순시토크 제어를 위한 제어 규칙  
 Fig. 5 Proposed DITC control rules according to regions

그림 5의 (a)는 선행 구간(Region 1)에서의 A상과 B상의 스위칭 규칙을 나타내고 있다. A-상의 경우에는 일반적인 히스테리시스 방식으로 설정된 토크 오차에 따라, 실제 토크 오차를 비교하여 비대칭 컨버터의 State 1, State 0 및 State -1을 발생하며, B-상의 경우에는 선행적으로 여자 전류를 확립해야 하므로 State 1과 State 0을 가지는 제어 규칙을 적용하였다. B-상의 경우에 State 0을 적용하는 이유는 지령 토크가 낮아져서 현재 토크가 지령토크 보다 높은 경우에 여자 전류가 높게 확립되는 것을 억제하기 위한 스위칭 규칙이다.

그림 5의 (b)는 구간 2와 구간 3에서의 비대칭 컨버터 제어 규칙을 나타내고 있다. 그림 4에서 SRM 토크 발생의 구

간별 설명에서 구간 2는 A-상의 감자 구간이며, 구간 3은 B-상의 전류에 의해 토크를 발생하는 구간이므로, A-상의 스위칭 규칙은 항상 State -1을 유지하게 된다. 구간 2에서 A-상의 스위칭을 턴-오프를 유지하고, B-상의 전류에 의해 토크를 제어하는 것은 A-상의 감자 전류가 부토크 영역으로 확장하는 것을 억제하기 위함이다. 그림 6은 본 논문에서 제안한 순시 토크제어기법을 적용한 유압 펌프의 압력제어 시스템을 나타내고 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 순시토크 제어기법에 의한 유압 펌프 시스템의 압력 제어. 제어를 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

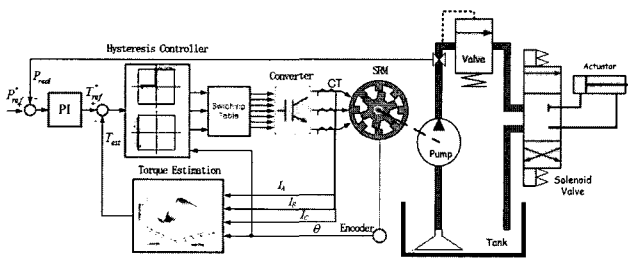


그림 6 순시 토크 제어기법의 압력제어 시스템  
Fig. 6 Proposed control scheme for pressure control system

그림 6의 제어 블록도에서 PI 제어기는 유압 유닛의 압력 제어 응답성을 결정하기 위한 압력 제어기로 일반적인 PI 제어기로 구성하였다. 압력 제어기의 동작은 다음과 같이 결정된다.

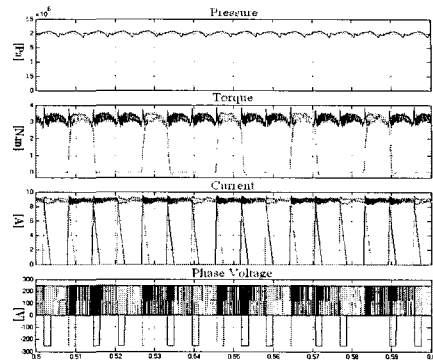
$$P_{err} = P_{ref}^* - P_{real} \quad (3)$$

$$T_{ref}^* = K_p \cdot T_{err} + K_i \cdot \int T_{err} \cdot dt \quad (4)$$

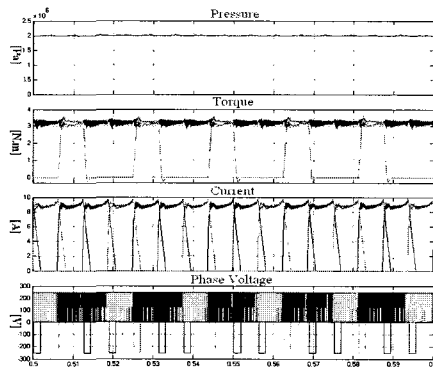
단,  $P_{ref}^*$ ,  $P_{real}$ ,  $P_{err}$  : 유압 시스템의 지령 압력, 실제 압력 및 압력 오차 [Mpa],  $T_{ref}^*$  : SRM의 토크 지령 [Nm],  $K_p$ ,  $K_i$  : PI 제어기의 제어 이득

압력 제어기의 토크 지령은 토크 추정기(Torque Estimator)에서 추정된 SRM의 토크와 비교되어 순시 토크 제어기의 제어 규칙에 따라 SRM의 동작을 결정하게 된다. 이때 제어기의 제어 규칙은 그림 4와 그림 5에서 설명된 제어 규칙을 적용하였으며, 토크 추정기는 회전자 위치와 전류의 크기에 따라 미리 계측된 비선형 토크 함수의 룩-업 테이블 및 선형 보간법을 적용하였다. 본 논문에서 토크 추정기와 순시 토크 제어기는 매 25[μs]마다 수행 되었다.

컴퓨터 시뮬레이션은 Matlab의 Simulink 툴을 사용하여 수행하였다. 그림 7은 지령 압력이 1[Mpa] 및 2[Mpa]인 경우에 기존의 속도 제어형 유압 제어 시스템과 본 논문에서 제안한 방식과의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과는 각각 유압 유닛의 압력과 SRM의 토크 및 각상의 전류와 상권선에 인가되는 전압을 나타내고 있다.



(a) Conventional control



(b) Proposed control

그림 7 지령 압력이 2[Mpa]인 경우의 시뮬레이션 결과  
Fig. 7 Simulation results at 2[Mpa]

그림 7의 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이, 제안된 방식의 경우에 전류구간에서의 토크 리플이 크게 감소되며, 실제 유압 유닛의 압력 리플도 크게 감소함을 보이고 있다. 이는 제안된 방식의 경우에 SRM의 토크를 순시적으로 제한된 크기 이내로 제어함으로써, 각 구간에서의 토크 리플을 억제할 수 있기 때문이다.

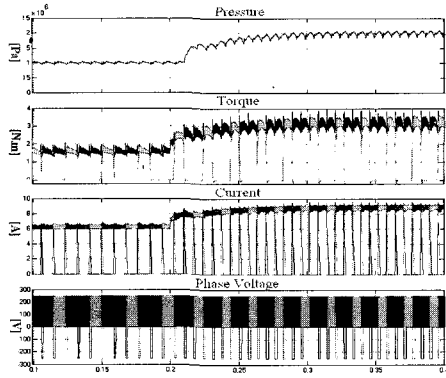
그림 8은 지령 압력이 1에서 2[Mpa]로 변동 하였을 경우의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 정상 상태의 응답성 뿐만 아니라, 과도 상태에서의 압력 응답성도 제안된 방식이 우수함을 보이고 있다.

제안된 방식의 실험은 비대칭 컨버터 및 2.2Kw급 SRM이 장착된 유압 펌프 시스템을 적용하여 수행하였다.

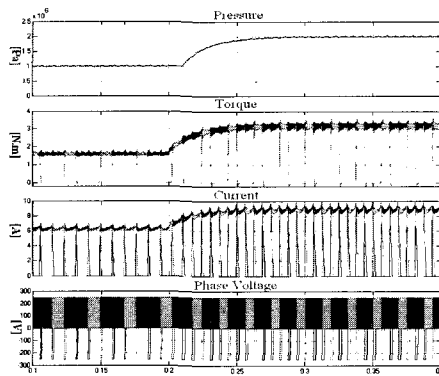
제어기는 TI사의 TMS320F2812-150MHz DSP 시스템을 적용하여 구성하였다. SRM의 전류는 각 상전류를 전류 센서를 통하여 DSP의 12bit ADC를 통하여 입력 받고, SRM의 회전자 위치는 512ppr 광학 엔코더와 DSP의 QEP 기능을 통하여 입력 받도록 설계하였다. 비대칭 컨버터는 IR사의 50A, 600V급 IGBT와 Diode로 구성하였으며, 유압 유닛의 압력은 시스템에 장착된 압력 센서로부터 입력된다.

제어기의 압력 제어는 100[μs] 주기로 PI 제어를 수행하며, 순시 토크 제어는 매 25[μs]마다, 토크 추정치와 제어 규칙이 적용되도록 설계하였다.

실제 실험의 구현에서 유압 시스템에 적용된 압력 센서의 경우 실제 압력과 센서의 응답성 사이에 약 20[ms] 이상의



(a) Conventional control

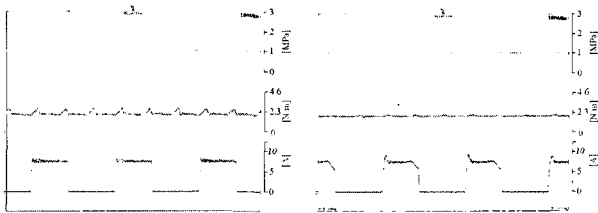


(b) Proposed control

그림 8 지령 압력이 1에서 2[Mpa]로 변하는 경우의 시뮬레이션

Fig. 8 Simulation when pressure varies from 1 to 2[Mpa]

지연이 발생하여 전류 구간에서 발생하는 토크 리플에 의한 압력의 응답성을 매우 정밀하게 확인하기가 어려웠다. 그림 9와 10 및 11은 지령 압력이 각각 1[Mpa], 2[Mpa] 및 압력 지령이 변동하는 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. 각각 유압 유닛의 압력 센서의 출력 및 SRM의 토크와 상전류 파형을 도식하고 있다. 실험결과 SRM의 토크 리플은 크게 개선되었지만, 압력센서의 응답성 문제로 그 효과를 정밀하게 나타내기 어려웠으나 압력리플이 상당히 감소되는 것을 확인하였다. 특히, 그림 11에서 보이는 바와 같이 압력의 지령이 변동되는 경우 매우 안정적인 동특성을 구현할 수 있었으며, 응답시간을 30%이상 줄일 수 있었다.

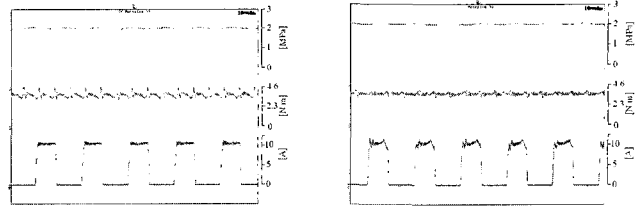


(a) Conventional control

(b) Proposed control

그림 9 지령 압력이 1[Mpa]인 경우의 실험 결과

Fig. 9 Experimental results comparison at 1[Mpa]

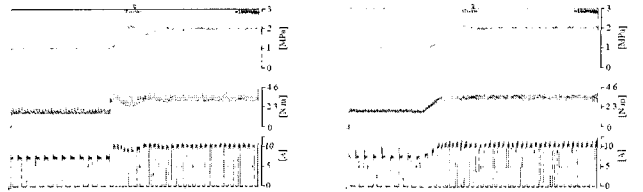


(a) Conventional control

(b) Proposed control

그림 10 지령 압력이 2[Mpa]인 경우의 실험 결과

Fig. 10 Experimental results comparison at 2[Mpa]



(a) Conventional control

(b) Proposed control

그림 11 압력지령이 1에서 2[Mpa]로 된 경우의 실험 결과

Fig. 11 Experiment when pressure varies from 1 to 2[Mpa]

#### 4. 결 론

본 연구에서는 SRM의 고성능 순시토크 제어기법을 SR 구동형 유압시스템에 적용하여, 유압 시스템의 압력 제어 성능을 개선하였다. SRM의 순시 토크 제어기법은 회전자 위치와 전류에 따라, 전동기의 토크를 직접 추정하고, 이에 따른 압력 오차를 간단한 제어 규칙에 의해 구동하는 방식으로, 기존의 전류 제어방식에 비해 제어성능이 우수하고 구현이 간단한 장점이 있다. 또한 SRM의 상과 상 절환시의 토크 리플을 억제하기 위해, 새로운 토크 분배함수를 구현하여 전류 구간에서의 토크 리플을 억제하고, 운전 효율을 개선하여, 유압 시스템의 운전 성능을 향상시킬 수 있다.

제안된 유압 펌프 압력 제어 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007학년도 경성대학교 학술지원연구비에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] Jame L. Johnson et al, Introduction To Fluid Power, Science & Technology, 2004.
- [2] B.C. Kim, D.H. Lee J.W. Ahn, "Performance of SR drive for hydraulic pump" Proceedings of ICEMS 2005, Vol. 1, pp.659 - 663, 27-29 Sept. 2005.
- [3] Inderka, R.B., De Doncker, R.W., "DITC-direct instantaneous torque control of switched reluctance drives", 37th IAS Annual Meeting. Conference

Record of the Volume 3, pp. 1605 - 1609, 2002. 10

- [4] 이진국, 이동희, 안진우, “직접 순시 토크 제어에 의한 SRM 토크리플 억제”, 2006년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 87-90, 2006

## 저 자 소 개



### 안진우 (安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수.

Tel : (051)620-4773

E-mai : jwahn@ks.ac.kr