

## DSP를 이용한 SRM 드라이브의 PLL 제어방식에 관한 연구

표성영\*, 문재원\*\*, 박한웅<sup>+</sup>, 안진우\*\*

\*경성대 전기전자컴퓨터공학과, \*\*부산대 전기공학과, <sup>+</sup>해군사관학교, \*\*위스콘신 매디슨대학 전기컴퓨터공학과

### Researching to PLL Control-method of SRM Drive based on DSP

Sung-Young Pyo\*, Jae-Won Moon\*\*, Han-Woong Park<sup>+</sup>, Jin-Woo Ahn\*\*

<sup>\*</sup>Dept. of ECE, Kyungsung U. <sup>\*\*</sup>Dept. of EE, PNU. <sup>+</sup>Naval Academy. <sup>\*\*</sup>Dept. of ECE, UW-Madison

#### Abstract

The switched reluctance drive system is known to provide a good adjustable speed and torque characteristics. However, acoustic noise and higher torque ripple are drawbacks. These drawbacks show the fact that SRM drive is not operated with mmf current specified for dwell angle and input voltage. Reducing torque ripple and having precise speed control, PLL technique is adopted. The PLL system in conjunction with dynamic dwell angle control scheme has good speed regulation characteristics. A TMS320F240 based on the DSP is used to realizing this drive system. Test results show that the system has the ability to achieve good dynamic and precise speed control.

#### 1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 고정자와 회전자의 극의 형상이 단순하고 권선 또한 고정자에만 집중권으로 되어 있어 전자계구조가 전동기구 중 가장 단순하며, 직류직권 전동기와 비슷한 속도-토크 특성이 있어 넓은 속도 범위에서 가변속 구동으로의 응용에 적합하다. 그러나 토크 발생 메카니즘상 토크 리플이 일반적 교류전동기보다 큰 단점이 있어 다양한 적용에 걸림돌이 되고있다.[1] 이러한 토크 리플과 속도 변동을 줄이기 위해 각상의 토크 발생구간 동안 여자전류를 적절히 제어해야 되나 상여자시 자기회로의 포화 로 인해 회전자 각에 따른 인덕턴스가 비선형적으로

변화함에 따라 평탄한 토크발생을 위한 상전류의 제어가 어렵다.

본 논문에서는 부하량의 가변에 따라 선행각이 동적으로 제어되고, 인버터 인가전압 제어를 통해 전류 파형을 제어하기 위해 PLL(Phase Locked Loop)을 SRM 구동 드라이브에 적용하였다.

#### 2. PLL을 적용한 SRM 드라이브

SRM은 돌극형 자기 구조를 가지며 단방향 여자방식으로 구동된다. 고정자 상권선에 여자 에너지를 인가했을 때 자기구조에 의해 릴럭턴스를 최소화하는 방향으로 구동토크가 발생하며 순차적이고 적절한 상여자를 통해 연속적인 회전력을 얻기 위해 스위칭 인버터가 필요하다.

SRM의 각 상에서 발생한 토크는 식 (1)과 같다.

$$\tau(\theta) = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

발생토크는 인가한 상여자전류의 제곱과 회전자 각 위치에 대한 상인덕턴스의 변화에 비례한다. 따라서 발생토크는 상전류에 의해 제어된다.

전압원 스위칭 인버터로 구동되는 SRM의 상전류는 인버터의 인가전압, 스위치 온각, 스위치 오프각에 의해 크기와 형태가 결정되고 이것은 결과적으로 발생토크에 많은 영향을 미친다. 릴럭턴스토크 발생 특성상, 발생토크 중 맥동토크의 성분이 크데

이것은 저속에서 더욱더 문제시 된다. 이러한 맥동토크를 최소화하면서 최대 평균토크를 내기 위해서 순시 상전류 제어가 이루어져야 한다. 그러나 SRM의 상전류 제어에 있어 비선형 특성을 가지는 인덕턴스의 변화를 예측하기 어렵기 때문에 가변하는 부하량에 따라 순시적인 상 전류제어가 이루어지기 어렵다.

## 2.1 동적 도통각 제어 개념

선행각의 조절을 통해 상전류를 제어하기 위해 부하변동에 의해 나타나는 속도변화를 제어량으로 하는 동적 도통각 제어방식을 적용한다.[2] 그림 1(a)는 부하토크와 발생토크가 평형을 이루고 있는 한 상태를 나타내고 있다.

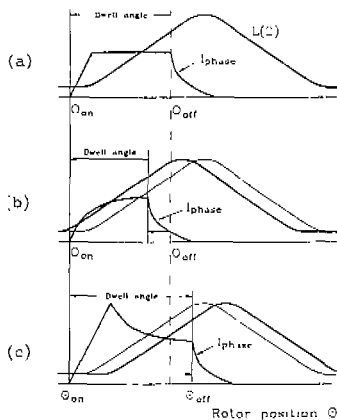


그림 1. 부하변동에 따른 도통각의 동적 조정  
(a)정상운전상태, (b)부하가 감소할 때,  
(c)부하가 증가할 때

이때 부하토크가 감소하면 발생토크가 부하토크보다 더 커져 순간적으로 회전자는 가속된다. 회전자 속도가 빨라진 만큼 회전자 위치센서로부터 나오는 펄스신호는 시간적으로 앞당겨져 발생하여 상을 OFF 시킴으로써 그림 1(b)에서와 같이 그림 1(a)보다 도통각이 줄어들고 평균 상전류와 발생토크도 작아진다. 그리하여 발생토크와 부하토크가 평형이 되는 도통각에서 동작하게 되고 회전자 속도는 지령속도를 유지하게 된다. 반대로 부하토크가 증가하게 되면, 발생토크가 부하토크보다 작아 회전자는 감속된다. 따라서 스위치를 OFF 시키는 것이 시간적으로 늦어진 만큼 그림 1(c)와 같이 도통각이

넓어지게 되어 발생토크가 증가한 부하토크에 대응하게 된다. 이러한 동적 도통각의 원리를 PLL(Phase Locked Loop)을 사용하여 DSP TMS320F240 상에서 구현하였다.

## 2.2 구동 드라이브에 PLL의 적용

PLL은 기준 주파수와 비교 주파수의 위상 차를 일정하게 유지시켜 결과적으로 두 신호가 안정된 위상을 가지도록 하는 시스템으로 DC 전동기의 정밀속도 제어에 적용되었다.[3]

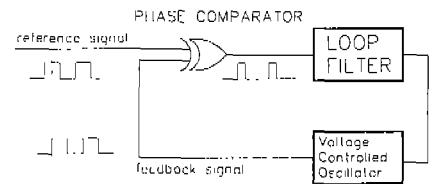


그림 2. 기본적 PLL 구성

그림 2에서 두 주파수의 위상 차만큼 위상 비교기에서 출력된 신호가 루프필터에서 시간 적분되어 VCO에 입력되면 VCO는 변경된 입력 직류전압 값에 대응하는 변화된 주파수를 발생시켜 기준 주파수와 위상을 일치시키도록 동작한다.

SRM 드라이브 시스템에 PLL을 적용해 속도 제어 시스템을 구성한다. 본 제어시스템에서 회전자 위치 검출장치는 정해진 회전자 위치(각상들의 토크 각이 끝나는 지점)에서만 검출하면 되므로 그림 3의 슬롯-디스크 형태의 코드-휠(code-wheel)과 2개의 광센스로 이루어진 간단한 구조의 엔코드를 설계한다.

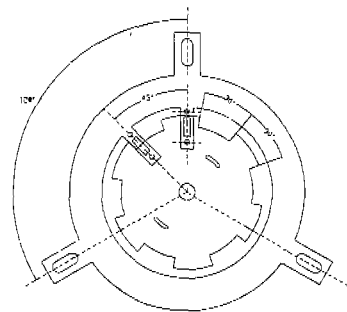


그림 3. 엔코더

그림 4(a)는 전동기 상인덕턴스 프로파일이고 그림 4(b)는 엔코더의 2비트 출력신호이며 신호의 모서리부분

이 스위치를 OFF 시켜야 하는 부분에서 출력되도록 엔코더가 회전자에 맞추어져 장착되어 있다. 그림 4(c)는 엔코더 신호가 디지털 제어기 내부의 상 디코더를 통과한 신호로서 도통각 제어기로 입력되며 각 상스위치를 OFF 시키는 신호이다.

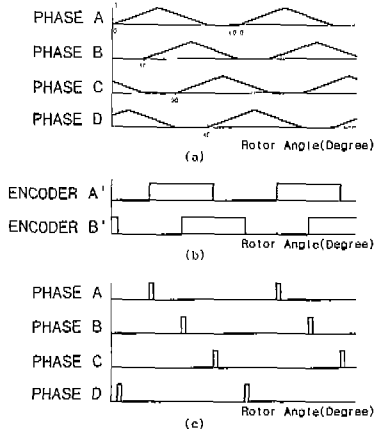


그림 4. 회전자 위치각에 따른  
(a)4상의 인덕턴스 프로파일 (b)엔코더 출력신호  
(c)PHASE DECODER 출력신호

속도명령인 기준 신호주파수는 일정하고 부하의 변동에 따라 회전자 위치 신호의 주파수가 변하여 도통각이 동적으로 가변되는 것을 그림 5에서 보인다. 부하가 증가하였을 때 회전자 제환 신호는 점차 주파수가 느려져 두신호간 상차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 두신호의 위상차가 상스위치의 도통구간이며 루프필터를 거쳐 인버터 DC링크전압을 조절하게 된다.

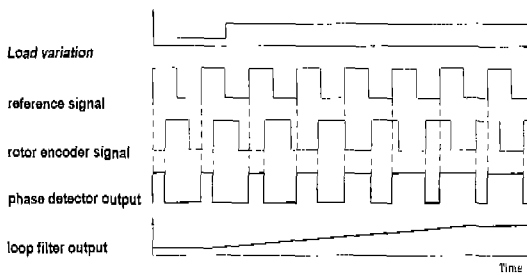


그림 5. PLL 제어신호

루프필터를 통한 도통구간 정보는 인버터 전압제어기로 제환된다. 속도와 부하량에 따라 램프형 상전류여자를 위한 전압제어가 이루어지며 램프형 상전류는 상인덕턴스의 포화를 고려해 토크 발생구간에서 평탄한 토크를 만들기 위해서이다.

그림 6은 전체 구동시스템 블록도이다. 시스템의

제어기는 DSP TMS320F240으로 구현하였다.

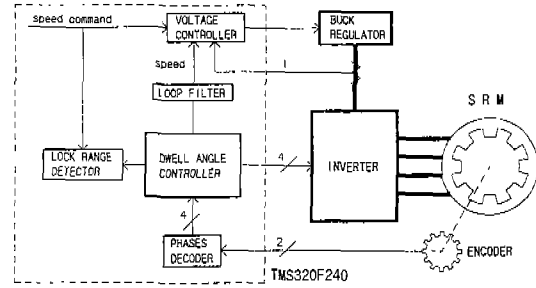


그림 6. 구동시스템의 구성도

도통각제어기는 PLL의 핵심기능으로 명령속도에 해당하는 기준신호를 발생시키고 엔코더로부터의 회전자 위치 제환신호를 처리하며 도통각 계산, 속도 계산 등의 기능을 수행한다. 갑작스러운 부하의 증가나 과부하시 도통각이 최대값이상으로 증가하고 과전류가 흐르는 것을 방지하기위해 PLL 제어모드가 해제되며 속도를 감소시킨다. 또한 부하의 급격한 감소로 인해 회전자 위치 신호가 기준신호를 앞서는 것을 방지하는 기능을 도통각제어기가 가지고 있다.

### 3. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 PLL 방식 SRM 구동드라이브의 속도제어특성을 확인하기 위한 실험 결과는 다음과 같다.

1000rpm에서 운전 중 부하가 감소할 때 도통각의 동적제어 특성은 도통각이 감소하며 속도는 일정하게 유지되어지도록 그림 7과 같이 나타난다.

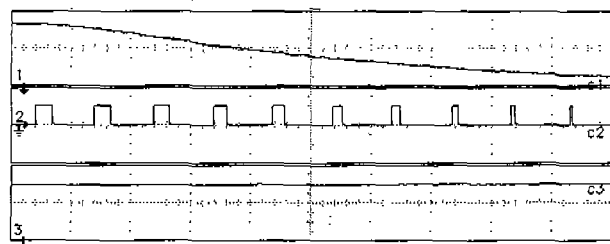


그림 7. 부하토크 감소시 PLL에 의한 동적 도통각변화  
CH1) 부하토크 CH2) 도통각 CH3) 속도

부하의 증가시 그림 8과 같이 도통각은 증가하며 속도는 일정하게 유지된다.

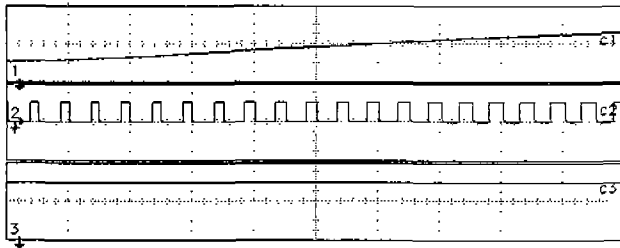


그림 8. 부하토크 증가시 PLL에 의한 동적 도통각 변화  
CH1) 부하토크 CH2) 도통각 CH3) 속도

그림 9에서 운전 중 부하와 속도를 고려한 전압제어에 의해 상 전류파형이 토크 발생구간에서 토크 리플을 저감 할 수 있는 램프형태인 것을 볼 수 있다.

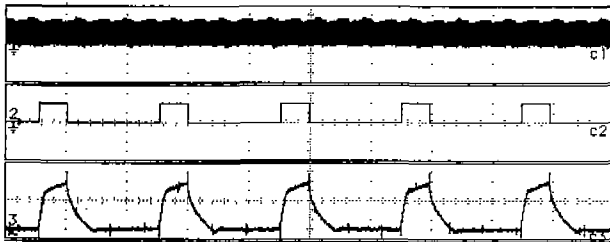


그림 9. 정속도 운전중 CH1) 인버터 전압제어 PWM 신호  
CH2) 도통각 CH3) 상전류

#### 4. 결론

토크 리플과 속도변동을 줄여 전동기가 강인한 운전을 할 수 있도록 적절한 상전류파형의 제어가 필요하다. 본 논문에서는 도통각 제어와 인버터 인가전압을 제어하는 기능을 구현하는데 PLL 방식을 채택하여 강인한 운전을 하도록 구성하였다.

SRM의 PLL 속도 제어기능을 DSP TMS320F240을 사용해 구현하였다. 구성된 시스템은 부하의 변동에 따라 선행스위칭각이 증감함으로써 뛰어난 동적 속도제어 특성을 갖고 있으며, 토크 영역을 확대하기 위해 상간의 도통구간을 중첩시킬 수 있고 램프형태의 상 전류를 여자하여 토크 리플을 저감 할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Chi-Yao and Charles 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

[2] J. W. Ahn, Y. J. An, C. J. Joe, Y. M. Hwang, "SRM Drive System with Power Angle Control Concept", Proc. of ICPE'95, 963-967, 1995

[3] A. W. Morre; "Phase-Locked Loops for Motor-Speed Control", IEEE Spectrum, Vol.10, pp.61-67, 1973

[4] M. O. bilgic, V. Ozbulur, A. Sabanovic "Torque Ripple Minimization of a Switched Reluctance Motor" APEC'95, Dallas, 1995