μ-controller를 이용한 PLL방식 SRM의 구동특성

표 성영*, 안 진우*, 이 일천**, 황 영문***
* 경성대학교 전기공학과, ** 동명 전문대 전기과, *** 부산대학교 전기공학과

Driving characteristics of SRM with PLL using μ-controller

Pyo, Sung-Young*, Ahn, Jin-Woo*, Lee, Il-Chun**, Hwang, Young-Moon***
*Kyungsung Univ, **Dong-Myung Univ, ***Pusan Nat'l Univ.

Abstract - The switched reluctance motor(SRM) drive system provides a good adjustable speed and torque characteristics. However, it also has some drawbacks such as relatively high torque ripple and acoustic noise which are caused by the torque production mechanism.

To reduce torque ripple and to have precise speed control, PLL technique is adopted. The PLL system in conjunction with dynamic dwell angle control scheme has good speed regulation characteristics. Digital control system with a 80c196kc micro-controller is used to be realized this drive system. Test results show that the suggested control system has the ability of dynamic and precise speed control.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 상에 여자 에너지를 인가했을 때 자기구조에 의존해서 릴럭턴스를 최소화하는 방향으로 발생한 릴럭턴스 토오크로 구동되는 전동기이다. 릴럭턴스 토오크를 최대로 하기 위해 회전자와 고정자가 돌극형의 구조이며, 상여자시 기하학적 구조에 의해 변화하는 릴럭턴스를 이용해 연속적인 회전력을 얻기 위해 스위칭 인버터가 필요하다. 단일 여자방식으로 주로 고정자 극에만 권선이 되고 권선 작업이 매우 용이하며, 직류직권 전동기와 비슷한 속도-토오크 특성이 있어 넓은 속도 범위에서 운전이 가능한 장점이 있다.

토오크 발생 메카니즘상 토오크 리플이 정현파로 구동되는 교류 전동기보다 크다[1]. 토오크 리플이 발생하는 원인으로 두 가지가 있다. 첫 번째, 다음 상으로 정류시 각 상에서 독립적으로 발생한 토오크가 구형파 형태가 아니기 때문에 두 상의 토오크가 중첩되며 발생한다. 두 번째, 상여자시 자기회로의 포화로 인해 회전자 각에 따른 인덕턴스가 비선형적으로 변화함에 따라 토오크 발생 구간에서 평탄한 토오크를 발생시키기 어렵다. 이러한 토오크 리플은 전동기의 정속 운전을 어렵게 하며 소음과 진동의 원인이 되어 SRM의 응용분야 확대에 걸림돌이 되고 있다. 따라서 SRM의 구동 특성 향상을 위해서는 토오크 리플 저감 대책이 우선적으로 고려되어야 한다.

토오크 발생 구간에서 발생 토오크를 평탄하게 하기 위해서 상간 도통구간을 적절히 중첩하고 전류 쵸핑을 행하는 제어가 일반적으로 적용되어 왔다[2,3]. 그러나 토오크 리플을 줄이기 위해서는 인덕턴스의 포화를 고려한 전류 파형의 제어가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 부하량의 가변에 따라 advance 각이 순시 제어되고 각 상의 도통구간을 적절히 중첩시키는 기능을 구현하기 위해 일반 전동기 PLL(Phase Locked Loop) 속도제어를 SRM에 적용하였으며, 상인가전압 제어를 통해 전류 파형을 제어하였다.

PLL 전용칩들을 사용하여 SRM의 속도 제어에 적용하면 구성하기 어려운 기능들이 있어 마이크로 콘트롤러 80C196KC를 사용하여 PLL 기능을 구현하였다.

2. PLL을 적용한 SRM의 속도제어

2.1 PLL방식의 적용

간단한 구조의 엔코드를 장착하고서 SRM을 정밀하게 속도 제어할 수 있는 제어법으로 PLL을 이용하였다. PLL은 기준 주파수와 비교 주파수의 위상 차를 일정하게 유지시켜 결과적으로 두 신호가 안정된 위상을 가지도록 할 수 있다.

그림 1은 PLL 시스템의 기본적인 회로이다., PLL은 기준 주파수와 비교 주파수의 위상 차를 일정하게 유지시키는 발진기로서 위상 비교기(Phase Comparator), 루프 필터(Loop Filter), 전압제어발진기(Voltage Control Oscillator, VCO)로 구성되어 있다.

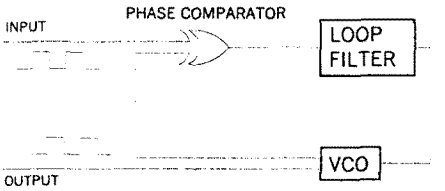

그림 1. 기본적인 PLL의 회로구성

두 주파수의 위상 차만큼 위상 비교기에서 출력된 신호가 루프필터에서 시간 적분되어 VCO에 입력되면 VCO는 변경된 입력 직류전압 값에 대응하는 새로운 주파수를 발생시켜 기준 주파수와 위상을 일치시키게 동작한다. 입력 신호에 동기한 출력 신호를 얻을 수 있고 입력 신호와 출력 신호의 위상이 안정되며 주파수 특성이 대단히 양호하다는 점 때문에 통신 및 발전기, 전동기의 정밀 속도제어 분야 등 광범위한 분야에서 PLL은 활용되고 있다.

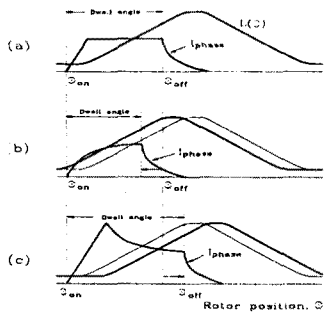

그림 2. 부하변동에 따른 도통각의 동적 조정 (a)정상 운전상태, (b)부하가 감소할 때,(c)부하가 증가할 때

SRM 드라이브 시스템에 적용된 PLL 제어루프의 기능은 부하의 증감을 감지하고 이에 따라 상의 도통각이 동적으로 가변되어 일정속도를 유지토록 하는 것이다. 이때 PLL 제어루프에서 부하의 증감을 감지하는 부문이 위상 검출기이다.

스위치를 OFF 시키는 펄스신호를 회전자에 부착된 위치센서로부터 검출하고, 회전속도의 상 스위칭 주파수와 같은 주파수를 갖는 별도의 펄스신호를 스위치 ON 신호로 인가하면 양쪽 펄스신호의 상차각(phase difference angle)이 전류 도통각이 된다. 이를 적용했을 때 전류 도통각의 동적제어 개념도가 그림 2와 같다.

그림 2(a)는 부하토오크와 발생토오크가 평형을 이루고 있는 한 상태를 나타내고 있다. 이때 부하토오크가 감소하면 발생토오크가 부하토오크보다 더 커져 순간적으로 회전자는 가속된다. 회전자 속도가 빨라진 만큼 회전자 위치센서로부터 나오는 펄스신호는 시간적으로 앞당겨서 발생하여 상을 OFF 시킴으로써 그림 2 (b)에서와 같이 그림 2 (a)에서 보다 도통각이 작아지고 상전류와 발생토오크도 작아진다. 그리하여 발생토오크와 부하토오크가 평형이 되는 도통각에서 동작하게 되고 회전자 속도는 지령속도를 유지하게 된다. 반대로 부하토오크가 증가하게 되면, 발생토오크가 부하토오크보다 작아 회전자는 감속하게 된다. 따라서 스위치 OFF신호가 시간적으로 늦어진 만큼 그림 2 (c)와 같이 도통각이 넓어지게 되어 발생토오크가 증가한 부하토오크에 대응하게 된다[4].

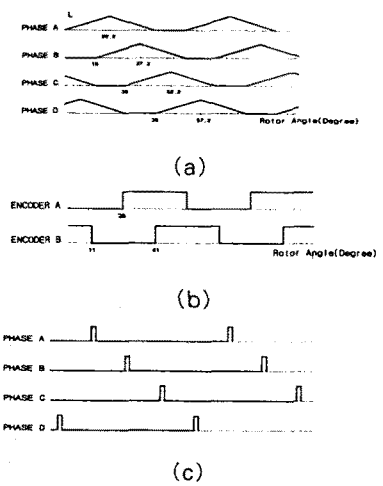

그림 3. 회전자 위치각에 따른 (a)4상의 인덕턴스 프로필 (b)엔코드 출력신호 (c)PHASE DECODER 출력신호

한 개의 기준신호로써 상간에 도통구간을 적절히 중첩시키는 것은 어려운 일이므로 기준 주파수를 각 상마다 입력해야 할 필요가 있다. 그러나 PLL 전용 칩을 사용하여 도통구간을 중첩시키는 기능을 실현하기에는 어려운 점이 많아 마이크로 콘트롤러 80C196KC를 사용해 PLL 기능을 구현하였다.

본 제어 시스템에서는 일정한 회전자 위치에서의 스위치 OFF 신호만을 필요로 하기 때문에 간단한 슬롯-디스크 형태의 엔코드를 설계해 포토 인터럽트를 사용하여 그림 3 (b)의 2 비트의 디지털 신호를 얻어 그림 3 (c)의 상을 OFF 시키는 비교신호를 만들어 낸다.

2.2 구동 시스템의 구성

전체적인 구동 시스템의 구성은 그림 4와 같다. 본 논문에 사용된 SRM은 8/6 형으로 4상 구동을 하므로 4상의 기준 신호가 필요하다. 90도의 위상차를 가진 4개의 기준 신호가 지령 속도에 해당하는 주파수로 기준 주파수 발진기에서 발생되어 상을 ON시키는 역할을 한다.

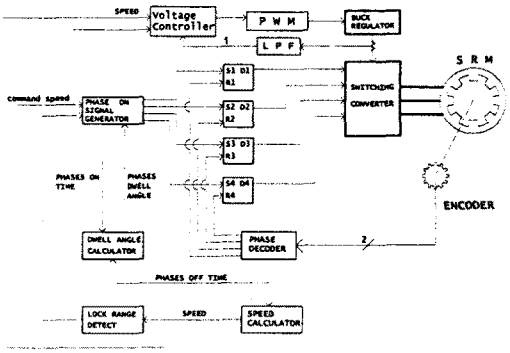

그림 4. 구동 시스템의 구성도

2비트의 엔코드 신호는 PHASE DECODER로 입력되어 각 상을 OFF 하는 4상의 비교신호로 출력된다. 따라서 적절한 토오크 각에서 엔코드의 에지 신호가 들어오도록 전동기의 회전축에 엔코드가 맞추어져 장착되어 있으며 따라서 토오크 각은 고정되어진다. 회전자 위치각 15도마다 엔코드에서 에지 신호가 출력되며 이를 마이크로 콘트롤러의 인터럽트 기능을 이용해 입력받아 디코딩함으로써 현재 회전자의 위치를 파악하고 해당 상을 OFF시킨다.

부하의 급격한 증가 또는 정격 이상의 부하가 걸리면 부토오크가 발생하지 않는 최대 도통각까지 advance 각이 증가하며 그 이상의 증가시 기준 주파수를 지연시켜 결과적으로 속도를 낮추게 된다. 부하의 급격한 감소시 비교신호가 기준신호보다 앞서는 것을 방지하기 위해 기준신호와 비교신호가 일정 시간 차 이하가 되면 기준신호를 앞당겨 과도상태에 대처한다.

인덕턴스의 포화를 고려해 토오크 발생구간에서 평탄

한 토오크를 만들기 위해서는 램프(ramp) 형태의 상전류가 적절하다. 그러나 평활한 토오크를 발생시키기 위해 $dL/d\theta$ 값의 변화분을 보상한 램프 형태의 정밀한 상전류 제어는 연산량이 많아 고성능의 마이크로 프로세서를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 속도와 부하량에 따라 토오크 리플이 최소가 되는 적절한 램프 형태의 상전류를 만드는 인가전압을 지정해 전압 제어기에 입력시켜 놓음으로써 마이크로 콘트롤러 80C196KC에서 토오크 리플을 줄이는 근사(approximation)한 상 전류제어를 하였다.

3. 실험 및 결과

제안한 PLL방식의 SRM 구동 드라이브의 속도제어 특성을 검토하기 위해 실험 장치를 구성하였다(그림 5). 1.5HP의 8/6 SRM을 클래식 스위칭 인버터를 사용해 구동하였고 전압은 스텝 다운(step down) 전압 조절기인 벅(buck) 전압 조절기를 사용하였다.

1500RPM에서 운전 중 부하의 증가시 도통각의 동적 제어특성은 그림 5와 같다. 부하가 증가하면 회전자의 속도가 늦어져 도통각이 증가하고 부하 증가에 대응하게 되어 정속도 제어가 이루어지고 있음을 보여준다.

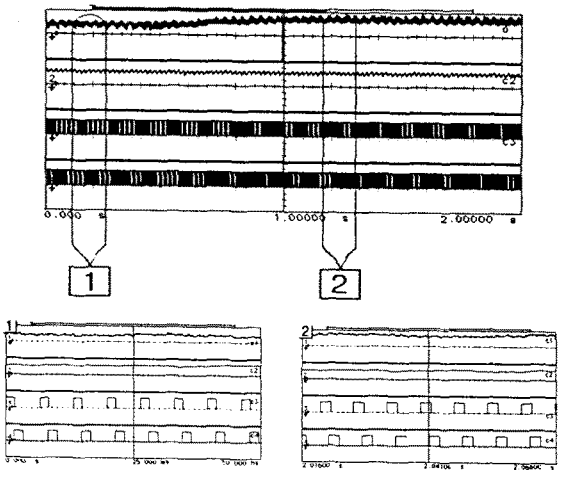

그림 6. 부하 토오크 증가시 PLL에 의한 동적 도통각 변화
CH1)부하토오크 CH2)속도 CH3)1상제어신호 CH4)2상제어신호

그림 6은 2000RPM에서 운전 중 부하와 속도를 고려한 전압제어에 의해 상 전류파형이 토오크 발생구간에서 토오크 리플을 저감 할 수 있는 램프형태인 것을 볼 수 있다.

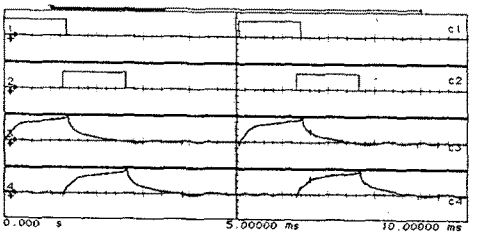

그림 6. 정속도 운전중
CH1)1상제어신호 CH2)2상제어신호
CH3)1상전류파형 CH4)2상전류파형

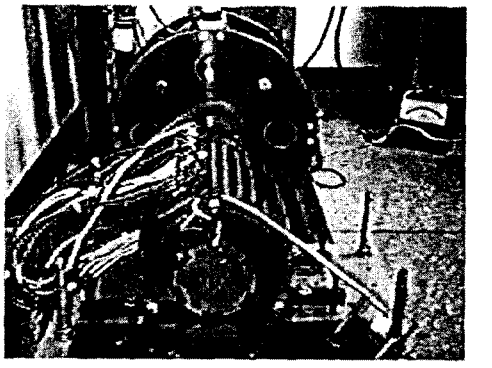

그림 5. 시스템 구성도

4. 결 론

PLL 전용칩을 SRM의 속도 제어에 적용하면 상 증첩의 어려움이 있으며 제어 회로도 복잡하게 된다.

본 논문에서는 SRM의 PLL 속도 제어기능을 마이크로 콘트롤러 80C196KC를 사용해 실현하였다. 원칩 마이크로 콘트롤러를 사용하여 제어기의 하드웨어 부분을 간단하게 구현하였고 제어의 유연성을 높일 수 있게 하였다.

부하의 변동에 따라 advance 각이 증감함으로써 뛰어난 동적 속도제어 특성을 갖고 있으며, 토오크 영역을 확대하기 위해 상간의 도통구간을 중첩시키고 램프 형태의 상 전류를 여자하여 토오크 리플을 저감 할 수 있었다. 또한 마이크로 콘트롤러 내부 타이머를 이용해 기준신호 주파수를 발생시킴으로써 수정 발진자의 안정도에 근거해 기준 신호의 안정도를 높이고 정격속도 부근에서 기준주파수 미조정이 가능해 SRM의 특징인 가변속 성능을 충분히 실현하면서 정밀한 속도제어가 되는 드라이브를 구성하였다.

[참 고 문 헌]

[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] M.O. Bilgic, V.Ozbulur, A.sabanovic "Torque ripple minimization of a switched reluctance motor" APEC'95, Dallas 1995

[3] P.C Kjaer, J.J. Gribble and T.J.E Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machine" Proc. of IAS annual meeting '96 vol.1 pp. 92-100, Oct. 6-10 1996

[4] Seok-Gyu Oh, Jin-Woo Ahn and Young-Moon Hwang "Flexible Control Scheme of Switched Reluctance Motor Drives by PLL controller", IEEE/APEC98, '98 pp.784-788