SRM의 고효율 구동을 위한 PLL 제어방식

김태형, 오석규*, 안진우
경성대, 진주산업대*

Design of SRM according to Design Parameters

Tae-Hyung Kim, Seok-Gyu Oh*, Jin-Woo Ahn,
Kyungsung Univ, Jinju National Univ.*

ABSTRACT

Switched Reluctance Motor(SRM) drive system is known to provide good torque characteristics and high efficiency drive. However, speed variation caused by higher torque ripple is one of main drawback. The Phase-Locked Loop (PLL) technique in conjunction with dynamic dwell angle control has good speed regulation characteristics. In this paper, appropriate advance angle control for high efficiency drive and PLL technique for accurate speed control is proposed. A TMS320F240 DSP is used to realize this drive system. Test results show that the system has good dynamic and precise speed control ability as well as high efficiency.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)의 속도 변동을 줄이기 위해서는 토크 발생구간에서 여자전류를 적절히 제어해야 되나 자기회로의 포화로 인해 상 인덕턴스가 비선형적으로 변화하여 평탄한 토크 발생을 위한 상전류의 제어가 어렵다. 또한 상여자 전류를 제어하여 토크를 제어하는 경우 운전효율이 저하하며, 상전류의 실시간 계산과 제어를 위해서는 고가의 고성능 제어기를 필요로 하는 등의 문제점이 있다.[1]

본 논문에서는 상전류의 계산없이, 저가형의 제어기로서 순시속도 제어기능을 가지는 디지털 PLL제어방식을 제안하고, 구동효율을 높이기 위해 도통각이 고효율 운전구간에서 결정되도록 하는 SRM 구동 시스템을 제안한다.

2. SRM의 고성능 운전을 위한 제어

본 논문에서는 효율을 주 성능 기준으로 하고, 가변속 운전 시 속도 제어특성을 높일 수 있는 구동 시스템을 제안한다.

2.1 순시속도제어를 위한 동적도통각 제어

본 연구에서는 맥동토크나 부하토크 변동에 의해 나타나는 순시속도 변화를 선행각을 증감시켜 억제시키는 동적 도통각 제어방식을 적용한다.[3]

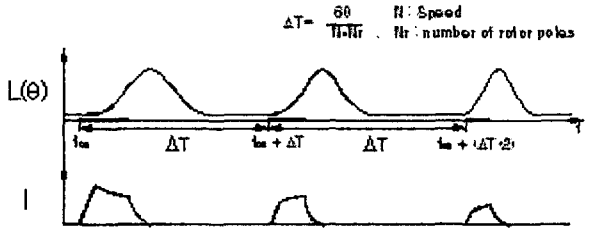


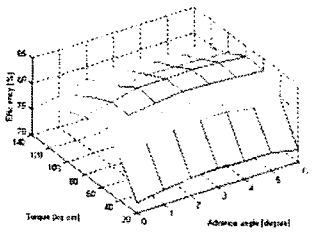
그림 1 부하토크 변동에 따른 도통각의 동적 조정원리
Fig. 1 Dynamic dwell angle control principle according to load torque

동적 도통각 제어의 개념은 그림 1에서 보여준다. 맥동토크가 증가하거나 부하토크가 감소하면 발생토크가 부하토크보다 더 커져 순간적으로 회전자는 가속된다. 회전자 속도가 빨라지는 만큼 그림 1 에서와 같이 상 인덕턴스는 주기가 점차 작아지게 되어 도통각이 줄어듦으로서 평균 상전류와 발생토크가 작아진다. 따라서 발생토크와 부하토크가 평형을 이루는 도통각에서 동작하게 되어 회전자 속도는 현재 지령속도를 다시 유지하게 된다. 이와 같이 맥동토크나 부하토크의 증감에 의한 회전자의 순시적인 속도변동에 대응해 도통각이 조절되어 상에 인가되는 전류의 양을 조절함으로서 동적 도통각 제어는 순시속도 변동을 억제할 수 있는 방법이다. 여기서 제어의 복잡성을 줄이기 위해 스위칭-

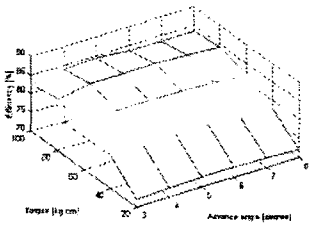
오프각은 회전자의 일정위치에 고정시키고 스위칭 -온 각 만이 순시속도에 대응하여 자동적으로 조정되도록 한다.[4]

2.2 고효율 구동을 위한 운전조건

그림 2는 일정속도의 운전에서 부하토크와 선행각의 변화에 따른 운전효율의 시험결과를 나타낸다. 각 운전속도 1000, 1500[rpm]에서 부하의 변화에 따라 선행각이 각각 약 3도, 5도 부근에서 항상 가장 높은 효율 특성을 보이고 있다. 일정한 부하토크에서 고효율 구동을 위한 선행각은 속도에 따라 변화한다. 1000[rpm] 에서는 약 3도 부근에서 최대 효율 동작점이 형성되고 1500[rpm] 에서는 5도 부근으로 동작점이 이동한다.



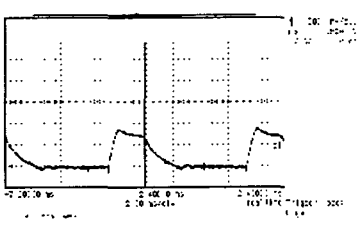
(a) speed : 1000[rpm]



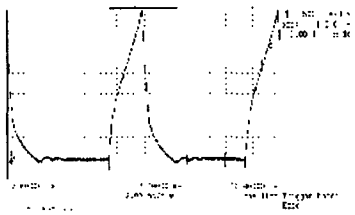
(b) speed : 1500[rpm]

그림 2 선행각과 부하 토오크의 변화에 따른 효율 특성,
Fig.2. Efficiency according to advance angle and load torque

그림 3은 일정속도에서 부하의 증가에 따른 상전류파형을 측정한 것이다. 부하가 증가할수록 전류파형은 평탄한 형태에서 첨두파 형태로 변해가며 점차 피크전류가 과도하게 흐르게 된다. 이러한 이유로 피크전류를 낮추기 위해서는 상전류를 제한하는 방법과 선행각을 변화시키는 방법 등이 가능하다.



(a) speed : 1000[rpm], torque : 20[kg/cm]



(b) speed : 1000[rpm], torque : 120[kg/cm]

그림 3. 일정속도에서 부하의 증가에 따른 전류파형 (2.5[A/div.])
Fig. 3. Current according to load at constant speed (2.5[A/div.])

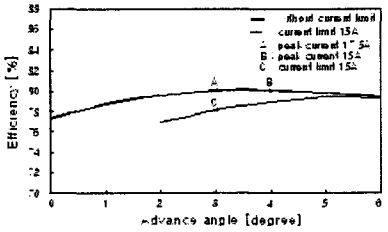


그림 4. 전류제한에 따른 효율특성, 1000[rpm]
Fig. 4. Efficiency characteristics according to current waveform

그림4에서 속도 1000[rpm], 부하토크 120 [kg/cm]의 운전상태에서 상전류를 15[A]에서 제한했을 때와 하지 않을 때 선행각의 변화에 대한 효율특성을 비교하였다.

그림 상의 세 개의 동작점을 비교하면, A점은 전동기를 가장 높은 효율로 구동시키는 조건이나 높은 피크전류가 흐르고, C점은 전류 제한으로 인해 충분한 상여자가 행해지지 않으며, 스위칭 손실의 증가로 효율이 낮아진다. 따라서 선행각을 증가시키고 전류를 제한을 하지 않는 B점이 인버터의 용량을 적절히 유지시키면서 고효율 구동을 얻을 수 있는 동작점이다. 여기서 선행각은 PLL방식을 이용하여 선정되도록 한다.

3. 구동시스템의 구성

전동기 구동을 위한 디지털 제어기를 TMS320 F240 DSP를 이용하여 구현하였다. 그림 5에서 전압 제어기, 도통각 제어기, 상 디코더가 인터럽트 루틴으로 작성되어져 있으며, 제어 알고리즘의 특성상 타이머 제어와 인터럽트 핸들링이 제어기 구현에 가장 중요한 요소이다. 도통각 제어기에서는 기준신호 발생과 엔코드로부터 궤환된 신호를 처리한다. 기준신호는 속도명령에 해당하는 주기적인 샘플링 타임을 가지고 발생되어지고 엔코더로부터의 궤한신호는 DSP상의 QEP단자에 입력되어 타이머 주기 인터럽트를 발생시켜 처리된다. 상 디코

더는 QEP 단자에 입력된 신호를 디코딩해 현재 OFF해야할 상을 판단해 도통각 제어기에 알린다. 전압제어기는 운전영역 상에서 선행각과 인가전압과의 관계를 look-up 테이블형태로 가지고 인버터 인가전압을 제어한다.

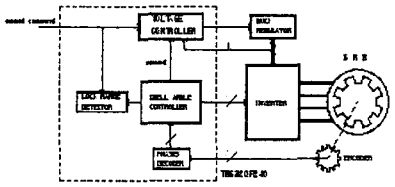


그림 5. 구동시스템의 구성도
Fig. 5. Drive system configuration

4. 실험 및 결과

그림 6은 부하토크의 증가 시 동적 토크각의 변화를 자세히 보여준다.

그림 6. 부하토크 증가 시 PLL에 의한 동적 도통각 변화; CH1) 부하토크 (0[kg?cm] → 90[kg?cm]), CH2) 도통각 CH3) 속도 1500[rpm]
Fig.6. Dynamic dwell angle variation by PLL control when load increase; CH1) load torque (0[g/cm] → 90[kg/cm]) CH2) dwell angle CH3) speed 1500[rpm]

구성된 제어 시스템으로 부하토크의 변화에 따른 효율특성을 실험을 통해 확인하였다. 그림 7은 운전속도 1000[rpm]에서 전부하 영역에 대한 효율특성이다. 그림 7의 A곡선과 같이 상전류를 제한하지 않고 고정된 도통각으로 운전하였을 때 가장 높은 효율특성이 나오나, 이는 부하가 증가하면 높은 피크전류가 형성된다. 그러나 도통각을 그대로 하고 상전류를 제한하여 운전하는 경우 C곡선과 같이 효율의 저하를 가져온다. 상전류를 제한하지 않고 선행각을 가변시키는 PLL 제어를 행하면 B곡선과 같은 결과를 가지며 이는 최고운전효율 곡선에 근접하는 결과를 얻을 수 있다. 즉, 일정한 부하토크값 이상일 때 선행각을 증가시키는 PLL 특성을 가지는 구동시스템이 전류제한 구동보다 더 향상된 효율특성을 보이고 있다.

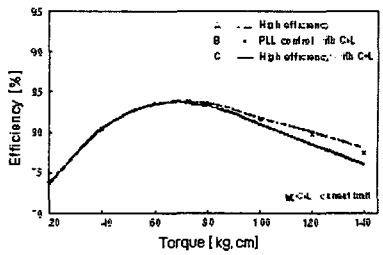


그림 7. 부하변화에 따른 운전효율 특성, 1000[rpm]
Fig. 7. Efficiency characteristics at 1000[rpm]

5. 결 론

본 논문에서는 동적 도통각 제어를 통해 맥동토크와 부하토크의 변화로 인한 속도변동을 줄이는 PLL(Phase Locked Loop) 방식을 채택하였으며, 고효율 구동을 위해 도통각제어를 행하였다. 구성된 시스템은 운전속도와 부하의 변화에 따라 선행각이 증감함으로써 뛰어난 동적 속도제어 특성을 가지며, 인버터 인가전압 제어를 통해 선행각을 조정함으로서 전부하 영역에서 높은 구동효율특성을 보였다. SRM 구동 시스템의 PLL 속도 제어기능과 도통각 제어를 TMS320F240 DSP를 사용해 구현함으로서 디지털 제어기를 유연성있고 소형으로 구성하였다.

이 논문은 BB21 Project 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

[1] M. O. Bilgic, V. Ozbulur, A. Sabanovic, "Torque Ripple Minimization of a Switched Reluctance Motor" APEC'95, Dallas, 1995
[2] J. Reinert, R.Inderka, M.Menne, R.W. De Doncker, "Optimizing Performance in Switched Reluctance Drives", IEEE Tr-IA, Vol. 31, No.1 pp.91-98, 1995
[3] J. W. Ahn, Y. J. An, C. J. Joe, Y. M. Hwang, "SRM Drive System with Power Angle Control Concept", Proc. of ICPE'95, pp.963-967, 1995
[4] J. W. Ahn et al " Digital PLL Technique for Precise Speed Control of SR Drive" Proc. of PESC'99, pp815-819, 1999
[5] A. W. Morre; "Phase-Locked Loops for M otor-Speed Control", IEEE Spectrum, Vol.10, pp.61-67, 1973