

## 디지털 히스테리시스 제어기를 이용한 SRM의 위치제어시스템

백원식\*, 김남훈\*, 최경호\*, 김동희\*, 김민회\*\*, 황돈하\*\*\*  
 영남대학교\*, 영남이공대학\*\*, \*\*\*한국전기연구원

### A Position Control System of SRM using Digital Hysteresis Controller

Won-Sik Baik\*, Nam-Hun Kim\*, Kyeong-Ho Choi\*, Dong-Hee Kim\*,  
 Min-Huei Kim\*\*, and Don-Ha Hwang\*\*\*

\*Yeungnam University, \*\*Yeungnam College of S & T, \*\*\*KERI

#### ABSTRACT

This paper presents an implementation of motion control system of Switched Reluctance Motor (SRM) using digital hysteresis controller by TMS320F240 DSP. SRM position control system possess several advantages over other motors, including high efficiency, simple structure, low cost, and four-quadrant operation at a wide speed range, especially for the servo drive systems with precision, stability and fast response characteristics in the industrial applications. In the suggested motion control system, position control using digital hysteresis controller is developed, and is evaluated using experimental testing. The developed system for cost reduction and high-performance by fully digital controller is shown a good response characteristic of motion control results.

#### 1. 서 론

최근 산업의 전반적인 분야에서 자동화와 고속화의 경향에 따라 정밀하고 빠른 응답특성을 갖는 서보 구동용 제어 시스템 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 시스템 제작에 소요되는 비용을 저감하고자 하는 추세에 따라 다른 전동기에 비해 전동기 자체의 제작 단가가 상대적으로 저렴한 Switched Reluctance Motor(SRM)에 대한 관심이 고조되고 있다. SRM은 이중돌극형의 간단한 구조를 이루고 있으며, 이로 인해 영구자석형 동기에 비해 제작단가가 저렴하고 유지보수가 용이하다. 또한, 유도전동기에 비해 효율이 높고, 온도 상승률이 낮으며, 가변 속도 및 가변 부하에 적용이 가능

하다. 그러나, 펄스 형태의 여자방식으로 인해 발생하는 토크리플 및 소음의 원인으로 적용범위가 제한되고 있으며, 리플저감을 위한 설계 및 제어기법에 대한 연구가 이루어지고 있다<sup>[1][2][4]</sup>.

따라서, 본 논문에서는 TMS320F240 DSP를 적용하여 디지털 히스테리시스 제어기를 사용한 SRM의 위치제어시스템을 제시하여 실험을 통해 응답특성을 고찰함으로써, SRM을 적용한 서보구동용 시스템으로써의 효용성에 관하여 검증하였다.

#### 2. SRM의 동작원리 및 구동특성

##### 2.1 SRM의 동작원리

SRM은 회전자 위치각에 따른 인덕턴스의 변화량과 전류의 크기에 따라 토크를 발생한다. 한 상의 고정자 권선이 여자되면, 회전자는 여자된 고정자와 정렬이 되려는 방향으로 토크를 발생하여 움직이게 되고, 완전히 정렬되기 이전에 스위치를 오프한 후, 전압을 다음 상에 순차적으로 인가함으로써 연속적인 회전력을 얻게 된다. SRM의 한 상당 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$v = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \quad (1)$$

여기서,  $v$ 는 인가전압을 나타내고,  $L$ 은 고정자 권선의 인덕턴스,  $dL/d\theta$ 은 회전자 위치각에 따른 인덕턴스의 변화량을 나타내며,  $\omega$ 는 회전자의 회전 각속도를 나타낸다. 식 (1)로부터 저항과 철심의 자기적 비선형을 무시하고 에너지 흐름에 대한 식을 유도하면 다음과 같다.

$$vi = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Li^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \quad (2)$$

여기서, 우변의 첫째 항은 기계적 출력으로 변환되는 에너지의 크기를 나타내고, 둘째 항은 코어에 축적되었다가 전원으로 환원되는 자기에너지의 크

기를 나타낸다. 식 (2)로부터 전동기에서 출력되는 순시토크는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

식 (3)에서 출력토크는 전류의 제곱과 회전자 위치 각에 따른 인덕턴스의 변화량에 비례하여 나타남으로 상전류의 방향과 무관하게 토크를 발생시킬 수 있으며, 회전자 위치와 인덕턴스 변화에 따라 토크의 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토크가 발생하는 회전자의 위치각도가 존재한다. 그러므로 정 방향의 토크를 연속적으로 발생하고 부 토크의 발생으로 인한 효율 저하를 억제하기 위해서는 적절한 스위칭 시간의 조정이 중요하다<sup>[1][2]</sup>

## 2.2 SRM의 구동특성

그림 1에 나타낸 SRM의 속도-토크 특성으로부터 위치제어에 적합한 전동기의 구동영역을 알 수 있다. 구동영역은 크게 세 부분으로 나누어지며, 일정 토크 영역에서는 전동기가 기저속도와 정격토크 이하로 구동되는 경우이고, 전동기가 기저속도보다 높은 속도로 구동되는 영역인 일정 출력 영역에서는 속도가 증가함에 따라 출력 가능한 토크의 크기가 감소하게 된다. 또한, 일정 출력 영역에서 일정 속도 범위를 초과할 경우, 토크가 급격히 감소하는 영역으로 구분할 수 있다<sup>[1]</sup>. SRM의 위치제어를 위해서는 진동 및 소음이 적고 제어가 용이한 일정토크영역이 적합하며, 이 영역에서는 앞서 나타낸 순시토크의 식으로부터 알 수 있는 것과 같이, 전류를 제어함으로써 순시토크의 크기를 조절할 수 있으며, 턴온 및 턴오프 각에 따라 출력특성이 달라진다.

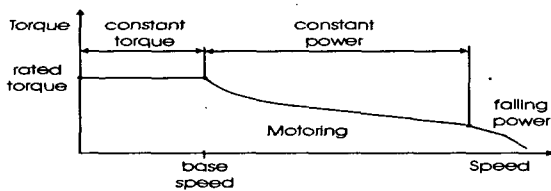


그림 1 SRM의 속도-토크 특성  
Fig. 1 Torque/speed characteristic of SRM

## 3. SRM 제어시스템

### 3.1 스위칭 각 제어

SRM은 펄스 형태의 여자방식으로 토크가 발생되므로 토크리플이 크고, 이로 인해 발생하는 진동, 소음 그리고 고정자 형상의 변이 등이 실용화에 큰 장애가 되어왔다. 따라서 토크 리플을 저감하여 진동과 소음을 줄이고자 하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다<sup>[6][7]</sup>. 그림 2에 나타낸 회전자 위치각

에 따른 인덕턴스 프로파일로부터 정 방향의 토크를 연속적으로 얻기 위한 적정 스위칭 각을 알 수 있다. 인덕턴스 프로파일에서 스위치 턴온은 회전속도와 부하토크의 크기에 따라 전류를 원하는 크기로 증가시키기 위해 인덕턴스가 상승하는 시점이전에 이루어지며, 턴오프는 역 토크의 생성을 억제하기 위해 인덕턴스가 감소하는 시점이전에 이루어진다. 일정 속도 및 부하에 적용되는 SRM 구동에 있어서는 스위칭 각을 일정하게 두고 제어를 수행하였으나, 위치제어기와 같은 가변속도 및 가변부하에 SRM을 적용하기 위해서는 속도 및 부하에 따라 적정 스위칭 각을 적용함으로써 효율 및 응답특성을 개선할 수 있다. 그림 3의 전류와 회전자 위치에 대한 쇠교자속 파형에 나타낸 에너지 변환 루프로부터, 턴오프 각의 크기에 따른 특성을 알 수 있다. 여기서, 면적 OAB와 OCD는 출력 토크의 크기를 나타내고, 면적 OAE와 OCF는 자계에 저장되었다가 전원으로 환원되는 에너지의 크기를 나타낸다. OAB는 OCD에 비해 턴오프 각을 크게 한 경우이며, 두 면적이 동일하다고 가정하면, 생성되는 평균토크의 크기는 같지만, 순시토크에 많은 영향을 미치는 전류의 크기는 OAB의 경우가 작음을 알 수 있다. 따라서 턴오프 각은 역 토크가 생성되지 않는 범위 내에서 최대한 크게 함으로써 순시토크의 크기는 저감시키면서, 평균토크의 크기는 증가시킬 수 있다. 또한, 턴온각은 속도와 부하를 추종할 수 있는 범위 내에서 최대한 작게 함으로써 전류의 크기를 제한하여, 권선 등에서의 손실을 줄임으로써 효율을 개선할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션 및 실험을 통해 산정된 일정토크 영역에서의 스위치 턴온, 턴오프 시점을 스위칭 각도제어기를 통해 적용되도록 하였다<sup>[5]</sup>.

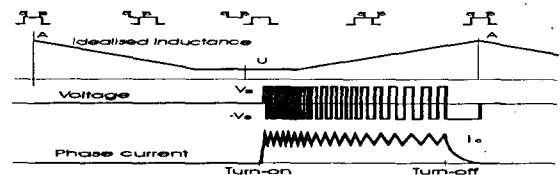


그림 2 SRM의 스위칭 각  
Fig. 2 Switching angle of SRM

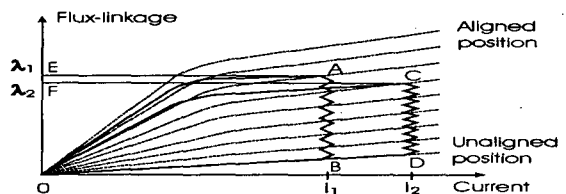


그림 3 SRM의 에너지 변환 루프  
Fig. 3 Energy conversion loop of SRM

### 3.2 디지털 히스테리시스 제어기

SRM은 전류의 제공에 비례하여 토크를 생성하므로 전류를 일정하게 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해 일반적으로 op-amp를 사용하여 아날로그 방식으로 구현된 히스테리시스 제어기를 많이 사용하였다. 그러나, 아날로그방식으로 구현된 히스테리시스 제어기는 히스테리시스 밴드를 정확히 조정하거나 가변하기가 힘들고 주파수가 가변된다는 문제점들이 있다. 따라서 본 논문에서는 아날로그 히스테리시스 제어기의 문제점을 해결하고, 전체적인 시스템의 제작단가를 낮추기 위해 소프트웨어적으로 구현된 디지털 히스테리시스 제어기를 사용하였다. 그림 4는 디지털 히스테리시스 전류제어기의 블럭도를 나타낸 것이다.

히스테리시스 비교기는 응용분야에 따라 여러 가지 형태가 될 수 있으며, 적용 형태에 따라 제어시스템의 동작영역, 성능, 인버터의 스위칭 주파수가 결정된다. 그림 5와 그림 6은 대표적인 토크 히스테리시스 비교기의 형태를 나타내었다. 그림 5는 2-레벨 히스테리시스 비교기를 나타내고 있으며, 지령전류와 실제전류를 비교한 후 스위칭 패턴을 결정하여 0과 1의 신호를 발생한다. 그림 6은 전동기의 회전방향에 관계없이 3-레벨 히스테리시스 비교기를 쓰는 방식이고, 스위칭 패턴을 결정하여 1, 0, -1의 신호를 발생한다. 본 논문에서는 2-레벨 히스테리시스 비교기를 사용하였으며, 히스테리시스 전류제어기의 샘플링 주파수는 10[kHz]로 설정하였고, 밴드는 전류지령의 3%로 설정하였다. 디지털 히스테리시스 제어기의 경우에는 n번째 읽은 전류를 n+1번째 제어주기에서 사용하고, n번째에 결정된 히스테리시스 제어기의 스위칭 패턴을 n+1번째 제어주기에서 인가하기 때문에 제어특성이 아날로그 히스테리시스 제어기에 비해서 나쁘다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 DC link 전압을 낮게 하거나, 전류제어주기의 주파수를 매우 높게 하면 어느 정도 극복할 수 있다<sup>[3][8]</sup>.

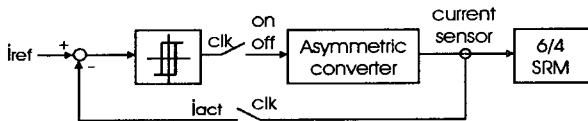


그림 4 디지털 히스테리시스 전류제어기의 블럭도  
Fig. 4 Block diagram of digital hysteresis current controller

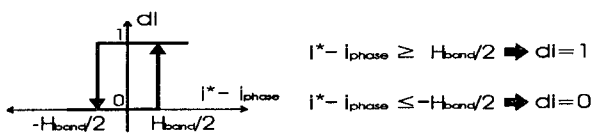


그림 5 2-level 히스테리시스 비교기  
Fig. 5 2-level hysteresis comparator

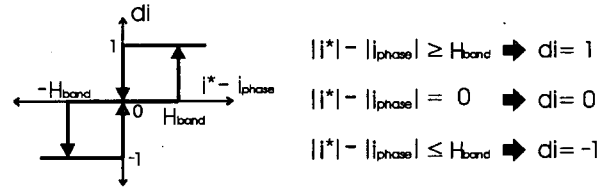


그림 6 3-level 히스테리시스 비교기  
Fig. 6 3-level hysteresis comparator

### 3.3 위치제어 알고리즘

본 논문에 적용된 SRM의 페루프, 위치제어시스템의 제어도를 그림 7에 나타내었다. 위치제어기의 입력과 엔코더로부터 추정된 실제 위치와의 오차는 비례미분제어기(PD)를 통해 연산되고, 그 출력이 속도제어기의 입력이 된다. 또한, 속도 오차는 비례적분제어기(PI)를 통해 연산되고, 전류 지령  $i^*$ 를 생성한다. 이 전류 지령은 구현된 디지털 히스테리시스 제어기내에서 전류 로직 제어기(Commutation logic controller)의 정보를 바탕으로 해당되는 3상 중의 어느 한 상의 전류와 비교해서 출력 펄스를 발생시킨다. 위치제어기는 비례미분제어기가 사용되는데, 비례적분제어기를 사용할 경우에는 제어기 특성상 발생하는 오버슈트로 인해 정확한 위치로 제어하기가 어렵기 때문이다<sup>[1][3][7]</sup>.

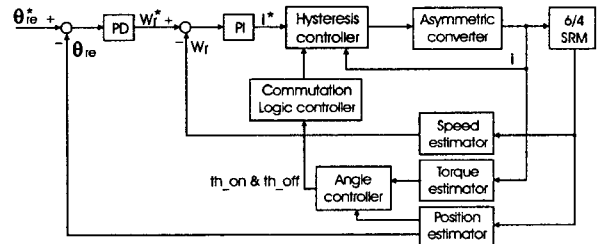


그림 7 제안된 위치제어 시스템의 블럭도  
Fig. 7 Block diagram of suggested position control system

### 4. 제어시스템 구성

본 논문에서 구성한 전체 시스템의 블럭도는 그림 8과 같다. 이 시스템은 DSP보드와 PC사이에 직렬 포트를 통해 통신을 하도록 구성되어 있으며, 모든 제어기는 F240DSP내에서 디지털방식으로 구성하여 제어기의 구성이나 설계를 용이하게 하였다. F240 DSP는 A/D 컨버터, QEP등 여러 가지 전동기 제어에 필요한 주변 소자들이 내부에 포함되어 있으므로 추가적인 회로를 추가하지 않아도 되는 장점이 있으며, 이로 인해 시스템이 소형, 저가이면서 복잡한 알고리즘의 수행도 가능하게 되었다. 컨버터는 SRM을 구동하기 위해서 일반적으로

많이 사용되는 비대칭 브리지 컨버터로 구성하였으며, 정격이 1200[V], 75[A]인 Semikron사의 IGBT SMK75GAL과 SMK75GAR을 사용하였다. 게이트 드라이브는 Semikron사의 SKHI71을 사용하였으며, 부하토크는 Leroy Somer사의 3000[rpm], 50[Nm], 정격의 FP. 15/30 파우더 브레이크를 사용하여 제어하였다. 사진 1에는 구성된 전체 시스템을 나타내었고, 실험에 사용된 기저속도 3000[rpm]이며, 정격토크 2.5[Nm]인 전동기의 세부사항은 표 1에 나타낸 전동기의 설계상수와 같다.

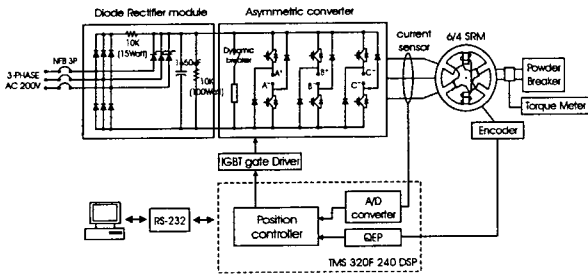


그림 8 제어시스템의 블럭도  
Fig. 8 Block diagram of the control system

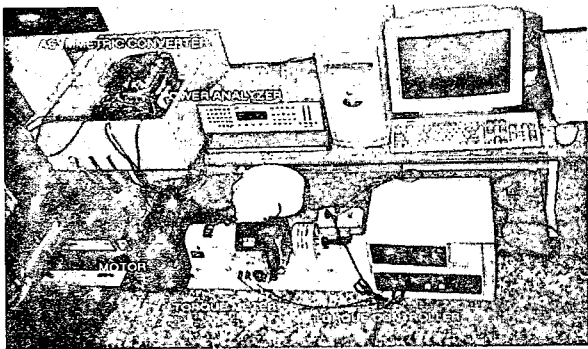


사진 1 시스템 전체 구성도  
Photo 1 Structure of total system

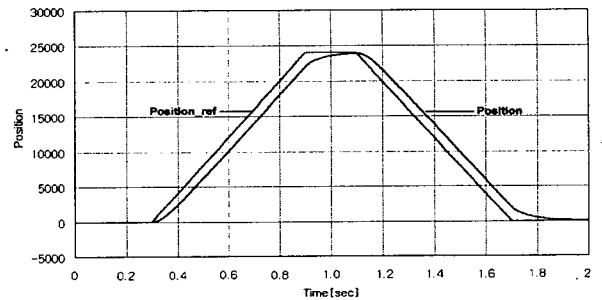
표 1 SRM의 설계상수  
Table 1 Design parameters of SRM

상수	3상	$L_{max}$	0.34[H]
극수	6/4	$L_{min}$	0.034[H]
정격전압	300[Vdc]	고정자 극호	30[Mdeg]
권선저항	3.9[Ohm]	회전자 극호	32[Mdeg]
관성모멘트	0.00026	마찰계수	0.0006

## 5. 실험 결과

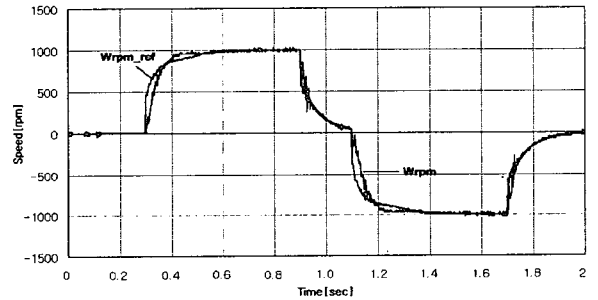
그림 9는 제안된 위치제어기에 의한 위치제어 응답특성을 나타내었다. 파형으로부터 지령 값을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 위치 오차로부터 생성된 속도 지령에 대한 속도응답 특성을

보여주고 있다. 그림 11은 전체 전압 파형을 나타내었으며, 그림 12는 정상상태 전압 파형을 나타내었다. 각 상에 인가되는 전압이 히스테리시스 제어기에 의해 초핑 됨을 알 수 있다. 그림 13은 전체 전류 파형을 나타내었고, 그림 14는 정상상태 전류 파형을 나타내었다. 전류 파형으로부터 적정 스위칭 각이 인가되어 일정한 순시토크를 생성하는 평탄 전류 파형이 나타남을 알 수 있다. 그림 15는 위치 지령이 음으로 인가되어 회전 방향이 변하는 과도상태 전류의 부분 확대 파형을 나타내었다.



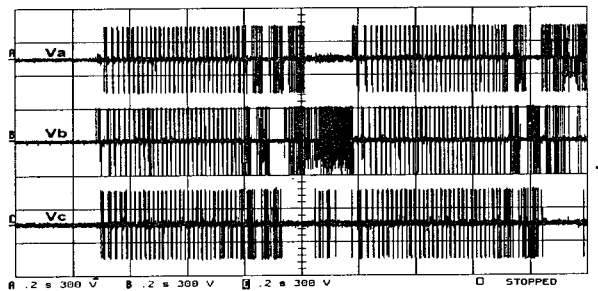
(5000[pulse]/div, 0.2[sec]/div)

그림 9 위치제어 응답 특성  
Fig. 9 Response characteristics of position control



(500[rpm]/div, 0.2[sec]/div)

그림 10 속도제어 응답특성  
Fig. 10 Response characteristics of speed control



(300[V]/div, 0.2[sec]/div)

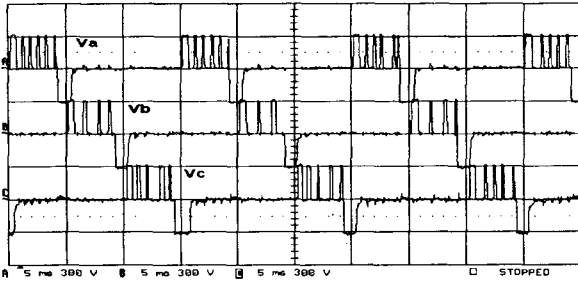
그림 11 3상 전압파형  
Fig. 11 3-phase voltage waveforms

## 6. 결 론

최근 산업응용분야에서 고도의 정밀도와 속응성이 요구되는 서보 구동용 전동기 제어시스템은 제작비용을 저감하고자 하는 추세에 따라, 영구자석 동기전동기에 비해 전동기 자체의 제작 단가가 상대적으로 저렴하고 유지보수가 용이하며, 유도전동기에 비해 효율이 높고, 온도 상승률이 낮으며, 가변 속도 및 부하에 적용이 가능한 SRM에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 TMS320F240 DSP를 사용하여 디지털 히스테리시스 제어를 적용한 SRM의 위치제어 시스템을 제시하였다. 제시된 제어시스템의 검증을 위하여 실제 시스템을 구성하였으며, 응답특성을 고찰하였다. 이 결과 우수한 위치제어 응답특성이 얻어졌으며, 이는 SRM을 적용한 서보구동용 전동기 제어시스템의 가능성을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

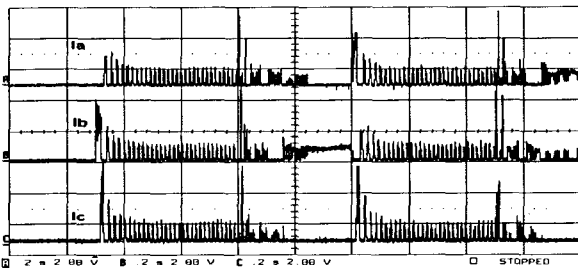
- [1] T.J.E. Miller, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes Press, 2001.
- [2] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, 2001.
- [3] B.K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press, 1997.
- [4] Hassan Moghbelli, Gayle E. Adams, Richard G. Hoft, "Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors", *IEEE Trans. on IA*, Vol. 27, No. 3, pp. 531~538, May/June, 1991.
- [5] 최경호, 백원식, 김동희, 이상석, 김민희, "SRM의 최대효율을 얻기 위한 적정 어드밴스가 산정에 관한 연구", *한국산업응용학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 74~78, 2001.
- [6] H.C. Lovatt, J.M. Stephenson, "Computer-optimised smooth torque current waveforms for switched reluctance motors", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 144, No. 5, Sep., 1997.
- [7] P.C. Kjaer, J.J. Gribble T.J.E. Miller, "High-grade control of switched reluctance machines", *IEEE Trans. on IA*, Vol. 33, No. 6, pp. 1585~1593, Nov./Dec., 1997.
- [8] F. Blaabjerg, P.C. Kjaer, P.O. Rasmussen, C. Cossar, "Improved Digital Current Control Methods in Switched Reluctance Motor Drives", *IEEE Trans. on PE*, Vol. 14, No. 3, pp. 563~572, May, 1999.



(300[V]/div, 5[ms]/div)

그림 12 정상상태에서 확장된 3상 전압파형

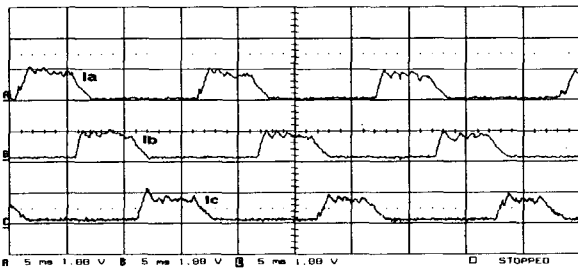
Fig. 12 Expanded 3-phase voltage waveforms at steady state



(4.4[A]/div, 0.2[sec]/div)

그림 13 3상 전류 파형

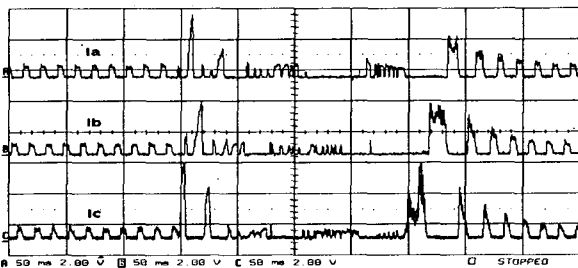
Fig. 13 3-phase current waveforms



(2.2[A]/div, 5[ms]/div)

그림 14 정상상태에서의 확장된 3상 전류파형

Fig. 14 Expanded 3-phase current waveforms at steady state



(4.4[A]/div, 50[ms]/div)

그림 15 과도상태에서의 3상 전류파형

Fig. 15 3-phase current waveforms at transient state