

# SRM의 여자제어를 위한 멀티레벨 인버터

論 文

52B-4-3

## Multi-level Inverter for the Excitation Control of an SRM

李 相 勳\* · 朴 晟 濬\*\* · 安 珍 雨\*\*\*  
(Sang-Hoon Lee · Sung-Jun Park · Jin-Woo Ahn)

**Abstract** - The applications of SRM(Switched Reluctance Motor) are dramatically increasing due to a simple mechanical structure, a high efficiency and a high speed drive characteristics. Energy recovery in the regenerative region is very important when SRM is used in traction drive. This is to reduce energy loss during mechanical braking and/or to have a high efficiency drive. To control excitation voltage during motoring and regenerating voltage in the generator operation in the SRM, multi-level voltage control is effective. This paper suggests multi-level inverter which is useful for motoring and regenerative operation. The proposed method is verified through simulations and experiments.

**Key Words** : SRM, 5-level inverter, excitation control, conduction ratio

### 1. 서 론

스위칭 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 고효율, 고속운전, 간단한 전자기적 구조, 그리고 용이한 가변속제어 등의 장점을 가지고 있어 전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 선진국을 중심으로 가전기기, 전자자동차, 항공기 및 산업전반에 걸쳐 그 응용영역을 확대해가고 있다.[1][2] SRM은 비선형적인 특성이 강하고 전류파형이 많이 변하므로 제어가 부하의 변화에 적응하기가 어렵다. 최근 이러한 취약성을 근본적으로 해결하기 위하여 SRM과 자기적 구조가 거의 같은 돌극형 동기전동기에서의 출력특성인 전력각 제어기능의 개념을 도입하여 드웰 각 조절을 하는 방법의 새로운 제어방식이 제안되었다.[3] 그러나 드웰각은 전력소자의 전류정격 및 평활전류 소호를 위한 스위칭 오프 각의 설정치에 의해 제안된다. 이로 인해 토오크 발생영역에서 스트로크각에 대한 온각의 비인 도통비는 일반적으로 0.6이하가 된다.[4] 따라서 평활전류의 전류소호시간을 단축시켜 도통비를 증가시키면 SRM의 출력은 증대 될 것이다. SRM 구동방식에 있어서 종래의 평활 전류 구동방식에서 평활전류 정착을 위해 회수 에너지를 저장한 콘덴서전압을 여자전압으로 이용하는 방식은 SRM의 발전모드를 고려하지 않았으므로, SRM이 전동기 영역으로 동작할 경우에는 콘덴서에 저장된 에너지 모두를 전동기 영역에서 소모할 수 있으나, 발전모드가 장시간 유지되면 콘덴서의 에너지는 더 이상 저장할 수 없는 상태가 되고, 발전모드 운전시 부하전류에 따라 발전전압은 현저

하게 변하게 되어 안정적인 운전이 어려움이 있다. 이는 콘덴서에 저장된 전압이 능동부하로서의 역할을 제대로 수행하지 못할 경우 자칫 직류 직권 발전기의 경우와 같이 발전전류가 발산하게 된다. 또한 평활전류를 형성에 있어서 전동기 영역에서 설정한 파라메타는 발전기 영역에서는 다르게 나타나며 발전기 영역이 더욱 악조건을 갖고 있으므로, 전압레벨이 3레벨로 이루어져 있는 기존의 인버터 타입은 상여자 및 감자를 위한 전류의 신속한 정착 및 소호에 어려움이 많았다.

본 논문에서는 제안된 인버터로 순간적으로 높은 전압으로 전류정착영역을 최소화하도록 설계하고 높은 감자전압으로 신속한 전류소호가 이루어지므로, 이 두 영역을 최소화하여 토오크 영역의 사용범위가 크게 되어 전동 출력을 증대시킬수 있는 인버터를 제안하고 발전에너지 효율적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 도출하여 실험에 의하여 검증하였다.

### 2. SRM의 특성 및 자기에너지

#### 2.1 SRM의 여자특성

자기적 구조를 매개로 하는 전기기계 에너지변환기구의 토오크 발생중 릴럭턴스 토오크(reluctance torque)는 고정자 또는 회전자 한 쪽에만 여자에너지를 인가할 때 자기적 구조에 의존하여 발생하는 토오크로서 자기회로의 릴럭턴스와 여자에너지의 변화로 유도되며, 여자에너지를 인가한 상의 릴럭턴스가 최소화되려는 특성에 기인한다. 그러므로 자체 구조는 전동기가 회전함에 따라 릴럭턴스가 지속적으로 변화하는 돌극형이 필요하지만 기하학적 구성에는 한계가 있으므로, 일정한 회전구간마다 연속적인 펄스 여자전원의 인가가 필요하다.

SRM의 회전자 및 고정자의 이중 돌극형 구조로 되어 있으며, 고정자에만 집중권으로 되어있다. SRM의 고정자 권선에 전압을 인가할 경우 상당 전압방정식은 식(1)과 같다.

\* 正 會 員 : 慶星大 工大 電氣科 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 東明大 工大 電氣科 教授

\*\*\* 正 會 員 : 慶星大 工大 電氣科 教授

接受日字 : 2002年 8月 20日

最終完了 : 2003年 2月 11日

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

단,  $R$ : 권선의저항,  $L$ : 인덕턴스,  $i$ : 상전류,  
 $\omega = d\theta/dt$ : 회전자 각속도

SRM의 토크는 인덕턴스가 변하는 구간에서 발생하며, 이때 발생하는 토크는 자기회로 내 코에너지(Coenergy) 개념을 도입한 식 (2)와 같이 상권선에 흐르는 전류의 제곱과 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

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

식 (2)로 부터 SRM의 발생토크는 전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다. 토크가 전류의 제곱에 비례함으로써 상전류의 방향과 무관하게 토크를 발생시킬 수 있으며, 인덕턴스의 기울기에 따라서 토크의 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토크인 부토크(negative torque)가 발생하는 회전자의 위치각이 존재하게 된다. 그러므로 SRM은 부하전류에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 토크 발생 구간을 최대한 활용하여야 하며 부토크의 억제를 위해서 반드시 회전자의 위치각에 동기시켜 스위칭 여자를 이루어야 한다.

2.2 인덕턴스 변화에 따른 동작모드

SRM의 동작모드는 토크의 극성따라 결정되며, 인덕턴스의 변화율이 正(정)인 구간에 상 전류를 흘리면 정토크가 발생하는 전동기영역이 되고, 변화율이 負(부)인 구간에 상 전류를 흘리면 부토크가 발생하는 발전기 영역이 된다. 이러한 두 영역에서 전류의 신속한 확립과 소호의 조건은 다르게 나타난다.

그림 1의 전동기 영역에서는 상권선의 최소 인덕턴스의 영향으로 전류의 확립은 순간적으로 이루어지지 않고 시간 지연이 생기며, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 증가하는 시점보다 앞선 각( $\theta_{ad}$ )에서 상 스위치를 온 하여야 한다. B의 파형은 적정  $\theta_{ad}$ 인  $\theta_B$ 에서 상 스위치를 온 함으로써 평활 전류를 형성함을 알 수 있으며, A의 파형은 평활전류를 형성하기 위한 적정각 보다 큰  $\theta_A$ 에서 상 스위치를 온 하여 과여자가 됨을 나타내고 있고, C의 파형은 적정 각보다 적은  $\theta_C$ 에서 상 스위치를 온 하여 부족여자가 됨을 나타내고 있다. 그러므로 인덕턴스 증가 구간에서 정토크의 발생을 효과적으로 하기 위해서는 전동기의 속도와 여자전압의 크기에 따른 적정 온각을 구할 필요가 있다. 또한 발전기 영역에서는 상권선의 최대 인덕턴스의 영향으로 전동기 영역보다 전류의 확립을 위한 시간 지연이 많이 발생하게 되고, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 감소하는 시점보다 앞선 각(어드벤스 각:  $\theta_{ad}$ )에서 상 스위치를 온 하여야 한다. 그러나 일반적인 SRM에서는 인덕턴스의 최대영역은 적절한 상전류를 형성할 수 있도록 큰 영역을 갖지 못하고 있

며, 설사 이러한 조건을 만족시키는 전동기를 설계 제작하더라도 최대, 최소 인덕턴스 비가 적어 상대적으로 출력이 적은 전동기가 되어 바람직하지 못하게 된다. 따라서 원하는 상전류를 형성하기 위해서는 제한된  $\theta_{ad}$ 에서 인가전압의 크기를 조정하는 방법이 고려될 수 있다.

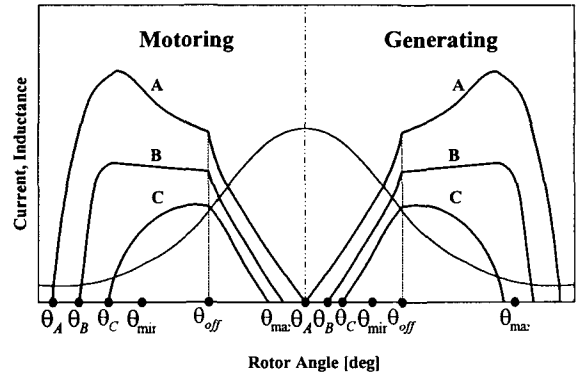


그림 1 스위칭 온 각도 변화에 따른 SRM 및 SRG의 상전류 파형

Fig. 1. Current waveforms by changing switching-on angle in SRM & SRG

인덕턴스 증가 구간 및 감소구간에서 전동기 모드 및 발전기 모드를 효과적으로 하기 위해서는 다음과 같은 조치가 필요하다.

- (1) 전동기 영역에서 인덕턴스 상승 구간( $\theta_{min} \sim \theta_{max}$ )에서 스위치-온이 될 경우 인덕턴스의 영향으로 인하여 전류의 확립이 충분하지 않다. 따라서 토크 발생을 위해 충분한 전류를 확립하기 위해서는 그 구간 이전의 최소 인덕턴스 구간( $\theta_0 \sim \theta_{min}$ )에서 스위치 온을 행하여야 한다. 인덕턴스의 최소구간에서 온을 행할 경우 전류정착에 의한 전동기의 출력은 증가시킬 수 있으나, 동손이 증가하는 단점을 안고 있다. 또한 이러한 동손의 증가를 고려하지 않고 출력을 증가 시키려고 해도 전동기의 속도가 증가하면 어드벤스 각  $\theta_{ad}$ 의 증가에도 불구하고 전류가 확립되지 못하면 전류확립시 단 펄스 형태의 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하여 전류정착을 도울 수 있다.
- (2) 발전기 영역에서 인덕턴스 하강 구간( $\theta_{max} \sim \theta_{min}$ )에서 전류정착을 위해서 스위치-온이 될 경우 전동기 영역으로 동작하며 스위치를 오프한 시점부터 발전기 영역이 된다. 따라서 전동기 영역으로 동작하는 시간을 최소화하기 위해서는 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하는 것이 필요하다. 과전류의 전류정착시 발전기의 출력이 발산하는 것을 방지하기 위해서도 높은 역전압을 발생시킬 수 있는 회로가 필요하다.
- (3) 발전기 영역에서 SRM은 그림 2과 같이 역기전력 항에 전류를 포함함으로써 인해 직류직권 발전기와 동일한 특성을 갖고 있어 발전기 영역 운전시 부하전류에 따라 발전전압은 현저하게 변하게 되어 안정적인 운전이 어려움이 있다. 특히 부하가 능동부하(콘덴서전압)인 경우

초기치 전류에 따라 안정된 동작의 범위가 결정되므로 과전류 제한을 위해서는 외부에 높은 전원이 필요하게 된다.

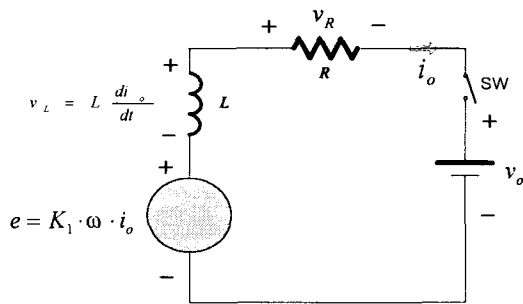


그림 2 SRM의 발전영역 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit for generating region of SRM

이와 같이 SRM에서 빠른 평활전류 형성을 위하여 다양한 레벨의 전압을 인가하는 방식에 대한 연구가 활발히 이루어져왔으며, 그 대표적인 방식이 콘덴서를 이용한 C-Dump이다. 그러나 이러한 방식은 에너지 회수를 위하여 장치를 추가해야 하며, 회수되는 에너지가 많을 수록 그 효율은 저하한다. 이는 에너지 회수시 전류루프가 콘덴서 측으로만 존재하기 때문이다. 또한 C-Dump 방식은 과전류 제한을 위해서 외부의 높은 전원을 필요로 하는 발전기 영역에서는 적합하지 못하게 된다.

### 3. SRM의 최적 운전을 위한 여자전압 제어

#### 3.1 일반적인 SRM 인버터의 스위칭 모드 해석

SRM제어용 인버터로 가장 많이 사용되고 있는 비대칭 브릿지 컨버터의 동작모드의 그림 3에 나타내었다. 이 인버터는 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 가지며 크게 3단계의 동작모드를 가진다.

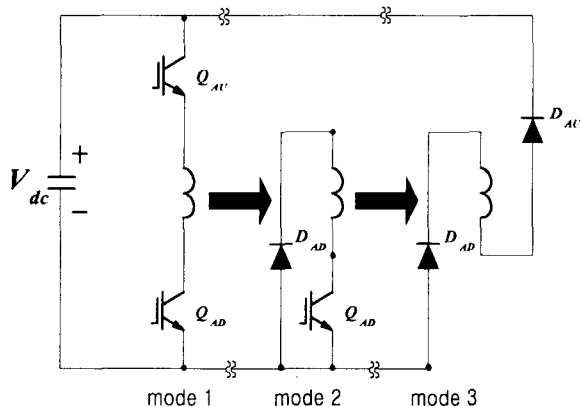


그림 3 비대칭 브릿지 컨버터의 동작모드  
Fig. 3 Operation modes of asymmetric bridge converter

모드 1은 두 스위치를 모두 턴 온 시켜 DC 전원 전압

(V<sub>dc</sub>)을 권선에 인가하여 전류를 흐르게 한다. 모드 2는 전류제어기에서 사용되는 모드로 단방향 전류제어기 권선에 흐르고 있을 전류를 한 개의 다이오드와 스위치 및 권선을 순환하게 한다. 모드 3은 두 스위치를 모두 턴 오프하여 권선전류가 두 다이오드를 통해서 전원측으로 에너지를 환원시키는 방법으로 전류가 감소되도록 한다. 이 때 해당 상의 인덕턴스가 음의 기울기(negative slope)를 가지기 전에 전류를 완전히 소멸시키거나 아주 적은 양이 되도록 해야 한다. 그렇지 않으면 부(negative)토크를 발생시키게 되어 전동기의 평균 토크가 줄어들게 되며 에너지 변환효율도 감소하게 된다. SRM의 스위칭각 제어에는 모드 1의 영역에 의해 출력토크는 영역의 제곱에 비례하는 특성으로 이 영역의 크기로 출력을 제어하는 것이 보통이다. 따라서 모드 1 영역에 따른 출력특성을 고려해 볼 필요성이 있다.

#### 3.2 SRM의 새로운 여자전압 제어기법

SRM에서 전동기 영역으로 동작할 경우 그림 4(a)와 같이 신속한 평활전류 정착을 위해서 DC-Link전압보다 높은 전압을 인가하여야 하며, 평활전류 정착 후에는 평활전류와 전동기의 속도에 맞는 DC-Link 전압을 인가하여야 하며 전류 소호시에는 높은 역전압으로 신속한 전류소호를 행하여야 한다. 또한 저속영역에서 전류제어를 행할 시에는 지령전류보다 큰 경우 율령모드를 두기 위해서 영전압을 인가 할 수 있는 전력회로가 필요로 한다. 따라서 강인한 전류제어를 위해서는 높은 여자전압인 정의 C-Dump전압, DC-Link 전압, 영전압, 높은 감자전압인 부의 C-Dump전압의 4레벨 인버터를 구성하여야 한다.

발전기 영역에서는 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 전동기 모드를 최소화 하기 위해 신속한 전류정착용인 높은 C-Dump전압과 DC-Link측으로 발전기모드로 동작하기 위한 DC-Link전압이 필요로 한다. SRM을 발전기로 동작할 시 단일 펄스모드로 동작하면 한 상당 1회의 발전모드가 동작하므로 정격의 발전출력을 발생하기 어렵다. 이를 극복하기 위해 불연속 PWM모드로 동작하여 한 상당 수회의 발전모드를 동시에 발전기의 출력을 증대할 수 있다. 따라서 SRM을 전동기 영역과 발전기 영역에서 효율적인 여자제어를 위해서는 5개의 전압 레벨이 필요하다.

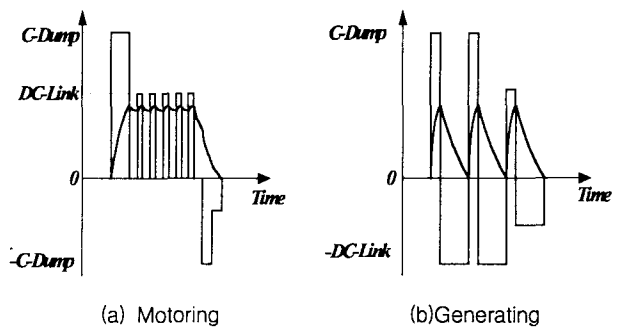


그림 4 5-레벨 여자전압제어  
Fig. 4 5-level excitation voltage control

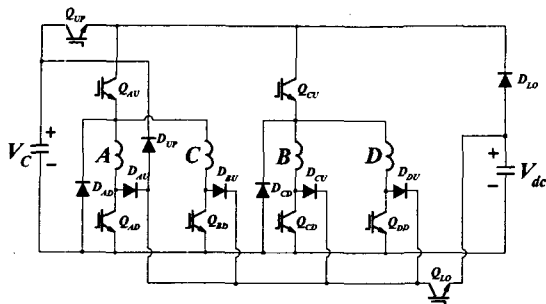


그림 5. 4상 SRM용 5-레벨 인버터  
Fig. 5. 5-level inverter for 4-phase SRM

이와 같은 조건을 만족하면서 발전기 모드에서 전류정착을 위한 높은 전압과 발전동작을 위한 전원전압을 인가할 수 있도록 그림 5와 같은 회로를 제안하였다. 이 회로는 한 상을 형성하는 두 스위치 중 한 스위치를 공통으로 사용할 수 있어 스위치를 절감할 수 있다. 이 회로에서는 여자전압의 크기를 콘덴서전압과 전원전압을 인가할 수 있음은 물론 부의 콘덴서전압과 부의 전원전압을 인가할 수 있는 구조로 되어있어, 발전기영역에서의 과전류 제한에 적합한 구동회로가 된다.

각 스위치의 온, 오프에 따른 구동회로의 동작은 5개의 모드로 나누어 설명할 수 있으며, 각 모드에 대한 회로는 그림 6과 같다. 스위치 QUP, QAU, QAD가 온된 경우는 콘덴서전압이 상권선에 인가되며, 스위치 QAU, QAD가 온된 경우는 전원전압이 상권선에 인가되며, 스위치 QAD가 온된 경우는 다이오드 DAD에 의해 전류회로가 구성되어 영(zero)전압이 상권선에 인가된다. 스위치 모두가 오프되면 다이오드 DUP, DAU, DAD에 의해 회로가 구성되어 콘덴서전압의 반대극성이 상권선에 인가되며, 스위치 QLO가 온된 경우는 부의전원전압의 상권선에 인가된다.

이 회로의 동작은 전원전압과 C-Dump전압 두 전원으로 부터 스위치 QLO에 의해 선택할 수 있는 회로가 되며, 발전영역에서는 기존의 C-Dump회로와 달리 발전영역이 장기간 유지되어도 발전기의 회수에너지가 초과없이 전원 측으로 회생할 수 있다.

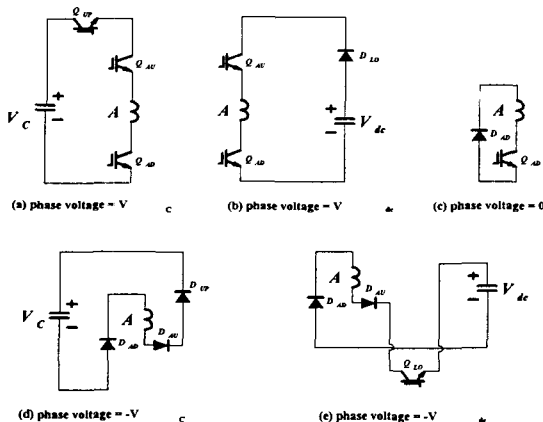
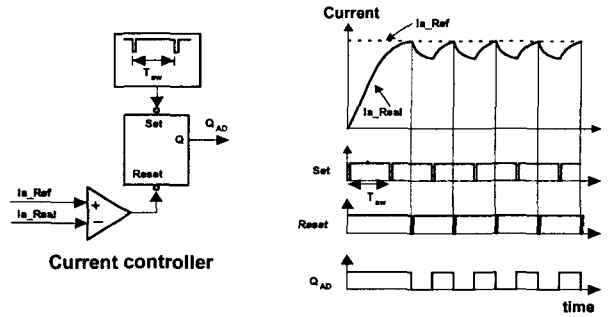


그림 6 인버터 동작에 따른 각 모드  
Fig. 6 Modes according to inverter operation

#### 4. 제어기의 구성

전동기의 구동에 있어 저속영역에서는 일반적으로 전류제어 모드로 동작시킨다. 이를 위해서는 전류제어기가 필수적이며, 전류제어기는 그림 7과 같은 피크전류 제어방식을 제안하였다.



(a) current controller (b) waveform

그림 7 전류제어기와 동작파형  
Fig. 7 Current controller and operational waveform

그림 7의 전류제어기는 비교기와 플립플롭(flip-flop)으로 구성되어 있다. 스위칭 주기마다 플립플롭의 셀단자를 인에이블(enable)시켜 스위치를 턴-온하게 하여 실제전류는 증가하게 되고, 비교기에서 전류 지령치와 실제전류를 비교하여 실제전류가 지령치 전류보다 크게되면 리셀 단자를 인에이블시켜 스위치를 오프하여 전류를 감소하게 한다. 이러한 전류제어방식은 제어기의 속응성은 델타변조기법과 동일한 우수한 특성을 갖게되고, 스위칭주파수는 일정하게 할 수 있는 장점이 있다.

그림 8은 엔코더에서의 위치 및 속도 검출 원리를 설명한 것으로 그림 8(a)는 인코더의 상태변환 시점을 임펄스로 표현하고 있으며, 그림 8(b)는 기준 클럭 주파수  $f_c$ 를 가지는 프로그램 카운터의 출력 파형으로 위치 및 속도 검출시 필요한 기준클럭 주기를 제공한다.

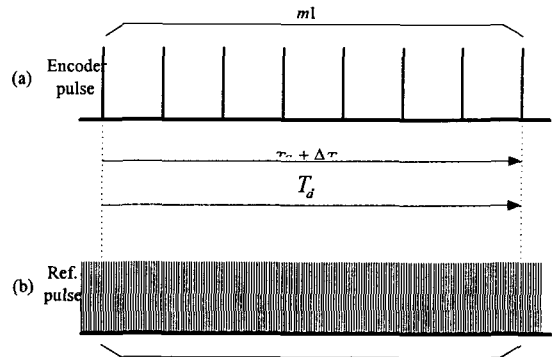


그림 8 위치 및 속도검출 원리  
Fig. 8 Basic principle of speed and position detection

1 회전당 P개의 펄스를 발생시키는 엔코더가  $T_d$ 시간 동안에  $m_1$ 개의 펄스를 발생시킨다고 하면  $T_d$ 시간 동안에 이동한 회전자 위치각의 변위( $\theta_d$ )는 식 (3)으로 주어진다.

$$\theta_d = \frac{2\pi m_1}{P} \quad (3)$$

그리고 시간  $T_d$ 는 일정주파수 발전기의 주기  $T_c$ 와 속도에 따라 변화하는  $\Delta T$ 의 합으로 주어지고 발전기의 기준 주파수  $f_c$ 로 나누어져 디지털화된 값이  $m_2$ 라고 하면  $T_d$ 는 식 (4)와 같이 된다.

$$T_d = \frac{m_2}{f_c} \quad (4)$$

한편, 식 (6)과 같이 속도를 구할 수 있다.

$$\omega = \frac{\theta_d}{T_d} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi f_c m_1}{P m_2} \quad (6)$$

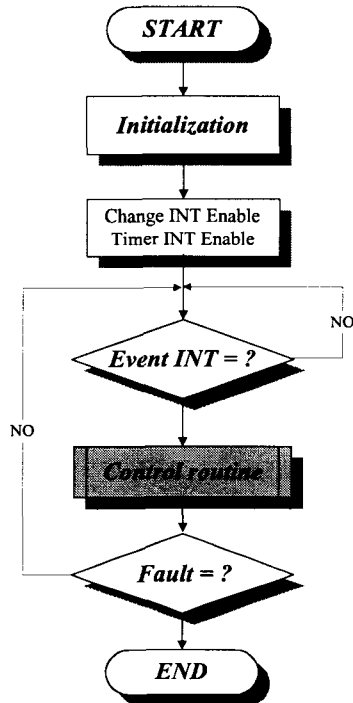
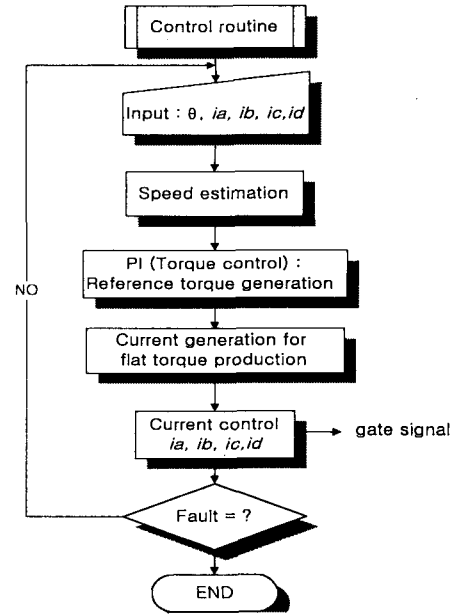


그림 9 주프로그램의 흐름도  
Fig. 9 Flowchart of main program

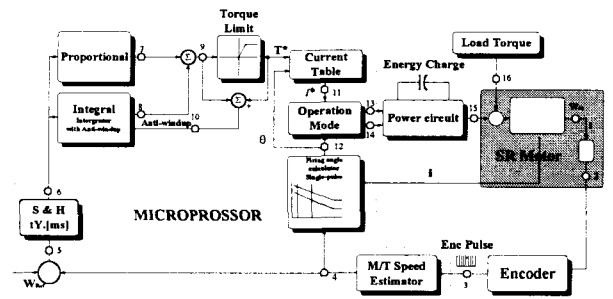
그림 9은 SRM 구동시 메인 루프의 플로우 차트이다. 메인 루프에서는 각종 변수의 초기화 및 과전류 및 과전압 등을 검사하여 폴트 신호를 발생하는 부분이며, 제어루틴에는 매 샘플링 마다 구동영역에 따라 SRM구동에 필요한 전류 및 스위칭 각을 결정한다.

그림 10 은 스위칭 시간간격마다 발생하는 인터럽트에 의해 실행되는 제어프로그램의 흐름도 및 제어기 블럭도를 나

타낸 것이다. 그림 10(b)에서 속도제어기는 기준속도  $\omega_r^*$ 와 실제속도  $\omega_r$ 의 차이를 제어하여 기준토크  $T^*$ 를 만든다. 이 기준 토크와 검출된 회전자 위치각 $\theta$ 에 의해 원하는 토크를 발생시킬 수 있는 기준전류  $i^*$ 를 테이블로부터 구한다. 또한 각각의 전류제어기는 기준전류  $i^*$ 와 전류센서를 통해 얻어진 상전류를 비교하여 실제 전류가 기준전류를 추종하게 한다.



(a) Control routine



(b) Control block diagram

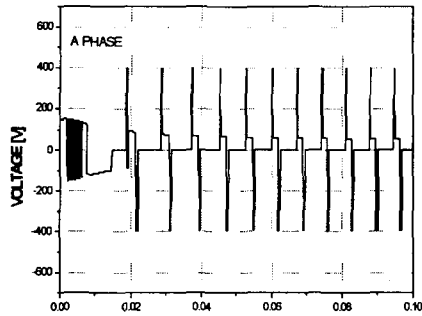
그림 10 제어루틴 및 제어기 블럭도  
Fig. 10 Control routine & Block diagram

### 5. 실험 및 결과

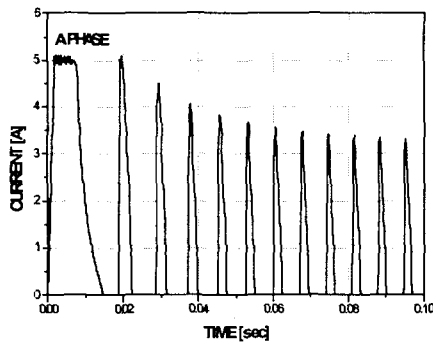
#### 5.1 특성평가를 위한 실험

그림 11은 인버터 동작에 따른 인가 상전압, 상전류, 토크 및 속도에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림 11(a)에서 보는 바와 같이 신속한 상전류 정착 및 소호를 위해 전원전압에 1.8배의 높은 콘덴서 전압을 인가하고 있다. 모터의 토크는 그림 11(c)에서 보는 바와 같이 리플이 매우

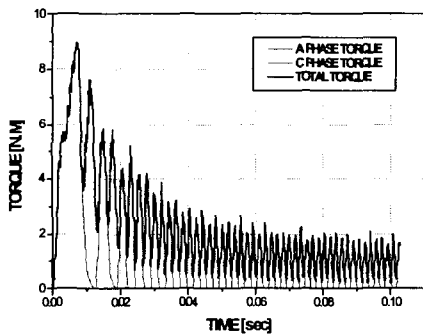
심하게 나타나고 있으나 전동기의 관성력에 의해서 속도변동은 그림 11(d)에서 보는 바와 같이 크지 않음을 알 수 있다.



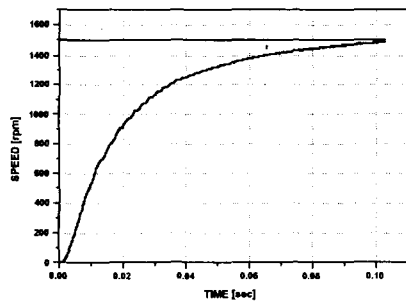
(a) Applied voltage (Phase A) VER: 200V/div., HOR: 10msec/div.



(b) Phase current (Phase A) VER: 1A/div., HOR: 10msec/div.

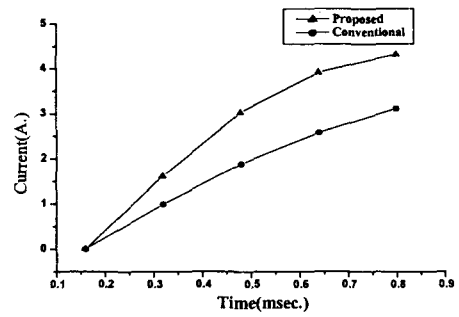


(c) Torque

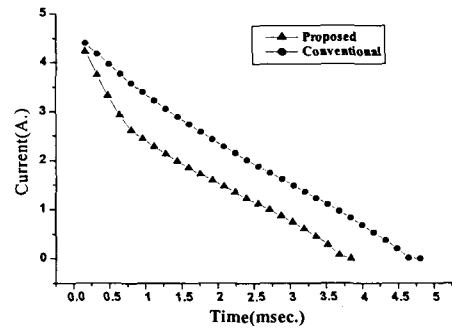


(d) Speed

그림 11 제안된 인버터의 특성 해석  
Fig. 11 Characteristics of the proposed inverter



(a) Build-up Time



(b) Demagnetizing Time

그림 12 시간에 따른 전류 정착 및 소호시간 비교  
Fig. 12. Build-up and demagnetizing time according to each inverter

제안된 인버터와 기존의 인버터의 일정한 전류에 대한 전류 정착시간 및 전류 소호시간에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 12에서 나타내고 있다. 그림 12(a)에서 알 수 있듯이 전원전압의 1.8배의 크기의 콘덴서 전압하에서 기존의 일반적인 인버터에 비해 제안된 Multi-Level 인버터가 일정한 전류 레벨에서 1.8배 이상 전류가 빨리 정착하는 것을 알 수 있다. 이는 인덕턴스의 변화가 없는 최소영역에서 스위치를 온할 경우 단순한 R-L회로로 등가화 할 수 있으므로 전류의 정착은 전압의 크기에 비례하기 때문이다.

그림 12(b)에서 보이고 있는 바와 같이 상 전류의 소호에 있어서도 기존의 인버터에 비해 제안된 인버터가 빨리 소호됨을 알 수 있다. 이는 토오크 발생영역의 활용도를 증대시켜 기계적 출력 및 에너지 비를 증대시킬 수 있는 중요한 요인이 된다.

그림 13은 속도에 따른 제안된 인버터와 기존의 인버터의 출력특성을 비교하였다. 여기서 도통각은 일정하게 하였다. 정격출력에서 콘덴서 전압을 전원전압의 1.8배가 되도록  $Q_{UP}$  및  $Q_{LO}$  스위치의 도통비를 조정했을 때, 기존의 인버터에 비해 제안된 인버터의 출력특성이 1.8배정도 증가하였으며 고속 영역에서 안정된 출력을 낼 수 있다. 기존 인버터의 경우에도 스위칭 각의 조정으로 어느 정도의 출력보정은 가능하나 이 특성그림은 같은 조건에서 여자특성이 우수함을보인 것이다.

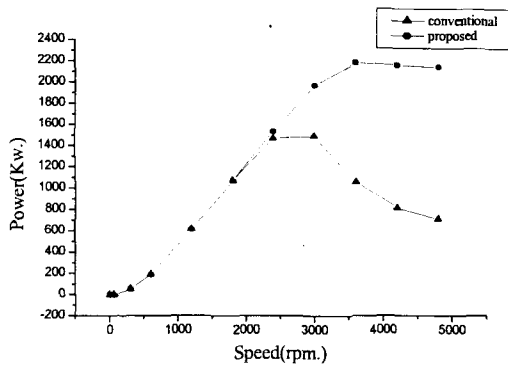


그림 13 속도에 따른 두 인버터의 출력특성 비교  
 Fig. 13 Power characteristics of each inverter according to the Speed

5.2 제안된 인버터의 실험

실험에 사용된 SRM은 고정자와 회전자극의 극이 8/6이고 2[Hp] 5000[rpm], 300[V]기기로써 그림 14(a)와 같은 구조를 가지며, 이를 구동시키기 위해 그림 5와 같은 새로운 5-level 인버터를 사용하였다.

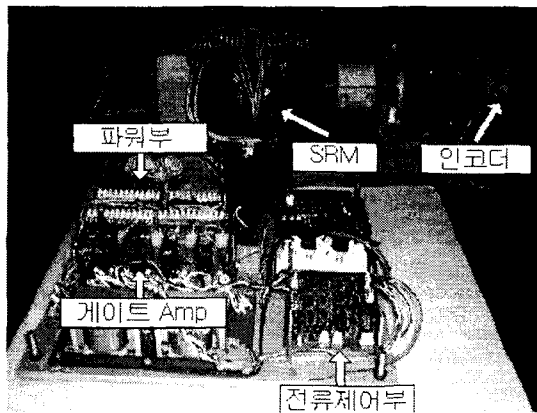
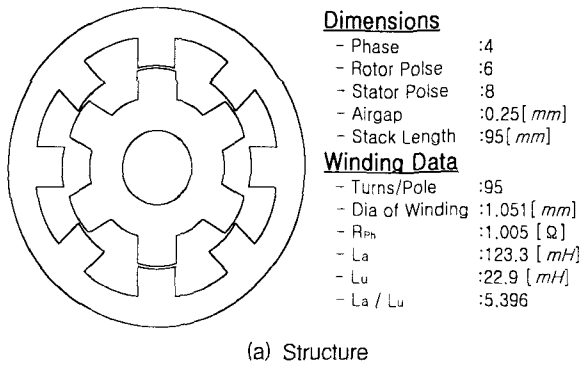
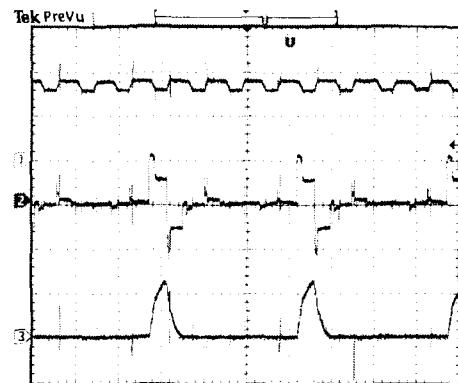


그림 14 8/6 SRM의 구조 및 실험장치도  
 Fig. 14. Motor structure & experimental setup

SRM의 견인구동을 위해 제안된 5-레벨 인버터 특성을 검토하기 위해 그림 14(b)와 같이 실험장치를 구성하였다. 그림 14(b)에서 나타난 구동장치에는 IGBT모듈을 사용한 인버터, 전류 및 위치센서, 전동기 등으로 구성되어 있다. 제어기는 상전류를 제어하기 위한 전류제어기인 PWM발생기, 속도제어기, 엔코더의 출력신호에 의한 속도계산기 등으로 구성되어 있다. 콘덴서 전압의 효과적인 제어를 위한  $Q_{UP}$  및  $Q_{LO}$  스위치 제어를 위해 전압 비교기를 구성하였다.  $Q_{UP}$  스위치는 회수에너지를 통한 콘덴서의 높은 전압을 전류의 정착 및 소호를 위해 사용할 수 있도록 제어 되어야 한다. 따라서 전압 지령치에 비해서 콘덴서 전압이 높을 경우에  $Q_{UP}$  스위치를 온 시키고, 콘덴서 전압과 전원 전압이 같아 질 경우  $Q_{UP}$  스위치가 오프 될 수 있는 간단한 제어회로가 가능하다.  $Q_{LO}$  스위치는 회수에너지를 외부 초퍼없이 효과적으로 회수하기 위해 회수 경로를 콘덴서와 전원이 분리 될 수 있도록 제어 되어야 한다. 이는  $Q_{UP}$  스위치와 동일한 제어 동작으로 구현이 가능하므로  $Q_{UP}$  스위치와  $Q_{LO}$  스위치는 동일한 제어신호로 제어가 가능하다.

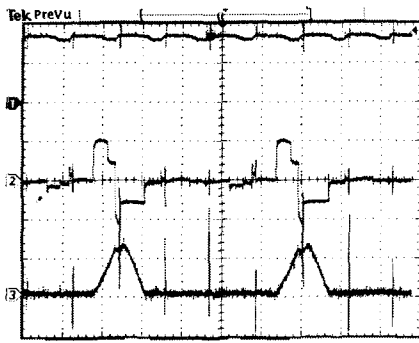
그림 15은 SRM을 전동기 및 발전기 모드로 동작할 시 전압 및 전류 및 콘덴서 전압 파형을 나타내고 있다. 그림 15(a)는 SRM을 전동기 모드로 구동할 시 권선 저항손을 적게하기 위해서 어드벤스 각도를 영으로 설정하고 상전류 정착과 소호를 신속히 하기 위해 높은 여자전압과 감자전압을 인가할 때, 위로부터 콘덴서 전압, 상전압, 상전류 파형이다. 전동기의 상전압과 상전류를 측정하기 위해서 50/1 절연전압 프르브와 50A/4V 변류기(CT)를 사용하여 측정하였다. 그림 15(b)는 인덕턴스 상승구간에서의 여자 전류 확립 및 발전전류의 발산을 막기 위해 높은 여자전압을 인가할 때, 위에서부터 콘덴서 전압, 상전압, 상전류 파형이다. 그림 15(b)에서 보듯이 전류가 어느 임계값 이상이 되면 전류가 발산하게 되고 이때 발산된 전류를 큰 전압으로 막지 못하면 상 스위치는 과전류에 의해 파괴된다. 그림 15(c)는 기존의 비대칭형 브릿지 인버터에서 전동기 모드로 구동시 상전압 및 상전류 파형이고, 그림 15(d)는 제안된 5-level 인버터에서 전동기 모드로 구동시 상전압, 상전류 파형이다. 그림 15(c)와 (d)는 동일한 드웰각 및 전압에 실험이 이루어 졌으며 기존의 비대칭형 브릿지 인버터에 비해 제안된 인버터의 전류 정착 및 소호가 빨라짐을 알 수 있다.



6. 결 론

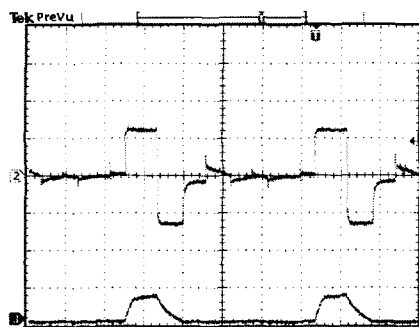
본 연구는 전기 자동차에서와 같이 전동기 및 발전기 모드의 두 동작모드를 동시에 이용할 수 있도록 다양한 레벨의 여자전압을 형성할 수 있는 인버터 전력회로의 구성과 스위칭방식에 대한 연구이다. 본 연구에서는 높은 여자전압으로 신속한 전류 정착과 높은 감자전압으로 신속히 전류를 소호함으로써 도통비를 증대시킬 수 있도록 기존의 비대칭형 브릿지 인버터와 스위칭 소자수가 동일하면서 다양한 레벨의 여자전압 형성이 가능한 인버터 토폴로지를 제안하였고, 그 결과 전동기 영역시 기존의 비대칭 브릿지 인버터에 비해 도통비가 20%정도 증대 하였음을 알 수 있었다. 또한 SRM을 발전기 모드로 동작시켰을 경우 전류의 레벨이 임계치 이상으로 발산하는 경우 높은 콘덴서 전압으로 상전류의 발산을 막아 시스템을 안정화 시킬 수 있었으며, 높은 콘덴서 전압은 전동기 모드를 최소화 하여 발전기모드의 시간을 상대적으로 증대할 수 있어 에너지를 효과적으로 사용할 수 있었다.

향후 제안된 인버터에서 콘덴서 전압을 원활히 이용하기 위해 추가된 스위치에 대한 스위칭 방식의 정밀한 해석 및 분석과 SRM 발전 모드의 원활한 최적인전을 위한 고정도은, 오프제어기에 대한 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.



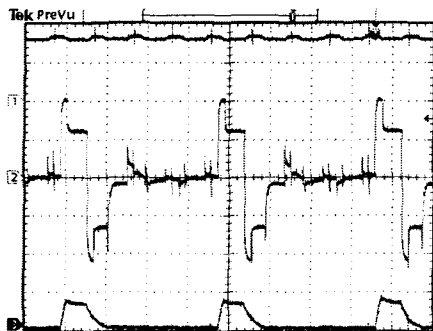
(b) Regenerating mode

(Upper:DC link voltage, Mid:phase voltage, Lower:phase current)



(c) Phase voltage and current in conventional inverter

(Upper:DC link voltage, Lower:phase current)



(d) Phase voltage and current in proposed inverter

(Upper:DC link voltage, Lower:phase current)

그림 15 각 모드에서의 상전압 상전류 및 콘덴서 전압파형(전압:200V/div.,전류: 2.5A/div.)

Fig. 15. Voltage, current according to each mode(voltage:200V/div.,current: 2.5A/div.)

감사의 글

본 연구는 과학재단 목적기초연구(연구과제 R01-2001-00000300-0)지원으로 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001.
- [2] J. W Ahn, et al, " Digital PLL Technique for Precise Speed Control of SRM Drive", Proceedings of IEEE/PESC, pp. 815-819, 1999
- [3] 추영배, 황영문; "자기에너지 회수에 의한 VRM의 여자 특성개선," 대한전기학회 논문지 44권2호, pp.203-209, 1995.2
- [4] 이상훈, 박성준, 안진우, 김철우; "SRM의 최대도통비를 갖는 여자전압제어," 대한전기학회 하계학술대회, pp. 977-979, 2001.
- [5] J.-W. Ahn et al; "Five-Level Inverter for Optimal Excitation of SRM Drive," Proceedings of IEEE/ISIE, vol. 3, pp.1401-1406, 2001.6



저 자 소 개



**이 상 훈(李相勳)**

1974년생, 2000 경성대 전기전자컴퓨터 공학부 졸업, 2002년 동 대학원 졸업(공학석사), 2002~현재 KT전기 기술 연구소 연구원.

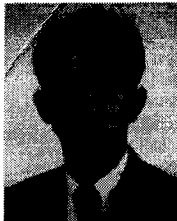
Tel : 051-294-0330, Fax : 294-0327  
E-mail : lsh9104@hanmail.net



**안 진 우(安珍雨)**

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

1992년~현재 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수.  
Tel : 051-620-4773, E-mail : jwahn@ks.ac.kr



**박 성 준(朴晟濬)**

1965년생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 졸업(공학박사), 1996~2000 거제대학 교수, 2001~현재 동명대 전기자동화계열 교수