

## SRM의 4상한 구동을 위한 전류제한 방식

安珍雨\*, 姜有貞\*\*

## Current Limit Control for a Four-quadrant Operation of SRM Drive

Jin-Woo Ahn and Yu-Jung Kang

## 요 약

스위치드 릴럭턴스 전동기는 고출력, 고효율 및 직권전동기 구동특성 등으로 견인구동용으로 주목받고 있다. 그러나 전동기를 4상한 구동하기 위한 발전영역에서 제어는 쉽지 않다. 본 논문은 전류제한법에 의해 안정된 발전제동이 가능한 제어방식을 제안하였다. 전동기 구동시는 기준전류제한방식과 위상각 제어방식으로 속도제어를 행하고, 발전제동모드에서는 상전류가 발산하지 않는 조건을 산정하여서 이 값을 기준전류로 한 전류제한방식을 채택하였다. 시뮬레이션과 실험에 의해 제안한 방식의 타당성을 확인하였다.

## ABSTRACT

Switched reluctance machine has much attention as a traction drive because of high efficiency, high power and DC series torque characteristics. But the motor has to have a regenerative mode when it is adopted in electric vehicle and current divergence during the regeneration makes difficulties in the control. This paper proposes a reference current limitation strategy for a stable regeneration based on simulations and experimented tests. The motor is operated with conventional current limit and switching angle control method in motoring mode. Simulations and experiments are executed to verify the feasibility of the proposed method.

**Key words** : SRG, current limitation, four-quadrant operation

## 1. 서 론

SRM(Switched Reluctance motor)은 펄스형의 여자 전원에 의한 고정자와 회전자의 릴럭턴스 토크를 이용하는 전동기구로서, 기계적인 구조가 매우 간단하고 견고하다. 또한 다른 전동기구에 비하여 효율이 높고, 단위 체적당 발생토크가 크며, 기동특성이 직류직권

전동기와 같은 특성을 갖고 있다. 따라서 SRM은 견인 특성이 좋으며 고속회전 특성이 우수하여 전기자동차 등의 견인구동에의 적용연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1]</sup>.

SRM을 견인용으로 사용할 경우 빈번한 발전동작이 필요하나, SRM은 직류직권전동기와 같은 특성을 갖고 있어 제동 및 발전기로 동작할 경우 그 동작이 매우 어렵다<sup>[2][3]</sup>.

SRM의 발전영역 동작에서 역기전력의 크기는 전동기의 속도, 상 전류의 크기 및 인덕턴스의 변화율에 의해 결정되어진다. 역기전력을 형성하는 항 중에서 속도는 상 전류 및 인덕턴스의 변화에 비하여 상당히 큰 시정수를 갖고 있고, 상수로 취급할 수 있다. 또한 인덕턴스의 변화율은 전동기의 속도와는 무관하고 회

\* 정회원, 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수

E-mail : jwahn@star.ks.ac.kr

\*\* 정회원, 금호전기 연구소 연구원

접수일자 : 2003. 2.24

1차심사 : 2003. 5. 7

심사완료 : 2003. 5.16

전자의 위치와 전류의 크기에 따라 변하게 되나 인덕턴스 프로파일에 의해 그 정보를 얻을 수 있다. 따라서 역기전력을 형성하는 중요 항은 상 전류의 크기가 된다.

즉 SRM의 상 전류의 크기에 따라 역기전력 성분이 직류전원보다 큰 경우가 존재하게 되는데, 이 경우 SRM에서 상 전류를 소호할 능력을 상실하게 되어 상 전류는 발산하게 된다. 따라서 본 연구에서는 SRM이 제동 및 발전모드로 동작할 경우 역기전력의 크기를 고려하여 상 전류의 발산을 막을 수 있는 전류 지령치를 형성한다, 이를 위해서 SRM의 속도에 따른 안정된 운전을 행할 수 있는 상 전류의 크기를 구하는 방법으로 실측한 인덕턴스 프로파일과 토크 프로파일을 근거로 하여 시뮬레이션을 행하였다<sup>[4]</sup>. 이 시뮬레이션을 통하여 속도에 따른 상 전류 지령치의 안정영역을 구하였으며, 이 안정영역 내에서 전류지령치를 형성하여 그 지령치 내에서 온, 오프 각도제어를 하여 제동 및 발전시 안정된 동작을 행함으로써, SRM의 전동기 동작 및 발전기동작의 4상한 운전이 안정적으로 행하여짐을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 입증하였다.

## 2. 발전영역에서의 제한전류산정

### 2.1 SRG의 여자특성

SRM이 여자구간의 변화에 따라 발전기 영역에서 동작할 수 있으며, 이를 SRG라 한다. 그림 1에서는 스위칭 온 각 변화에 따른 발전기모드에서의 상전류파형을 보여준다. 최대 인덕턴스의 영향으로 전동기 영역보다 전류의 확립을 위한 시간 지연이 많이 발생하게 되고, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 감소하는 시점보다 앞선 각(어드밴스 각 :  $\theta_A$ )에서 상 스위치를

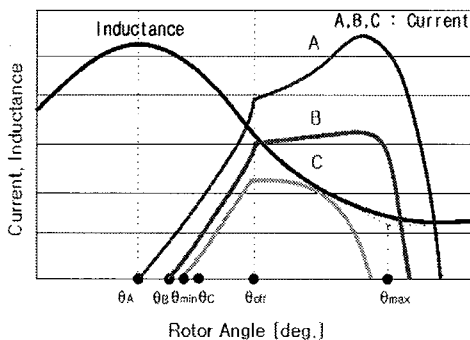


그림 1 스위칭 온 각 변화에 따른 SRG의 상 전류파형  
Fig. 1 Current in SRG according to switching-on angle

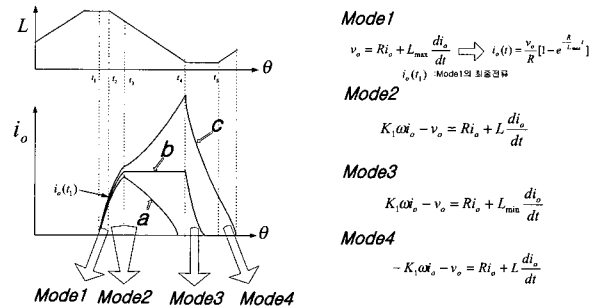


그림 2 SRG의 동작모드  
Fig. 2 Modes of SRG operation

온 하여야 한다. 그러나 일반적인 SRM에서는 인덕턴스의 최대영역은 적절한 상 전류를 형성할 수 있도록 큰 영역을 갖지 못하고 있으며, 설사 이러한 조건을 만족시키는 전동기를 설계, 제작하더라도 최대 및 최소 인덕턴스 비가 적어 상대적으로 출력이 작은 전동기가 되어 바람직하지 못하게 된다. 따라서 원하는 상 전류를 형성하기 위해서는 제한된 어드밴스 각에서 인가전압의 크기를 조정하는 방법이 고려될 수 있다.

그림 2는 인덕턴스 변화에 따른 각 모드별 전류 파형을 나타내고 있다.

- 모드 1 : 인덕턴스 최대영역에서 전류정착을 위한 모드로서, 이 구간에서는 인덕턴스의 기울기가 없어서 상 전류에 의한 역기전력이 존재하지 않는다. 따라서 이 영역에서는 단순한 R-L 부하로 해석할 수 있다.
- 모드 2 : 역기전력 전압보다 여자전압이 높은 상태로 전류의 증가가 2차 함수로 급속히 이루어지는 영역이다.
- 모드 3 : 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 모드이며, 이 모드의 시작 전류값에 따라 전류의 수렴 및 발산여부가 결정된다.
- 모드 4 : 발전기로 동작하며 전류가 감소하는 구간이며, 전류(commutation)가 일어난다.

### 2.2 발전영역에서의 전류제한

SRM의 발전영역에서의 안정된 동작을 위해서는 역기전력이 직류전원보다 작아야한다는 전제조건이 필요하다. 그러나 역기전력은 전동기의 속도와 전류의 곱으로 나타나고 속도는 전동기의 외부제어변수가 되므로 앞의 전제조건을 성립하기 위해서는 전류의 제한이 필수적이다. 전류의 발산을 막기 위한 전류치는 다음과 같다.

$$i(0) \leq \frac{v}{K_1 \omega} \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 직류전원전압,  $\omega$ 는 회전속도이다. 전류 정착최종치인  $i(0)$ 는 직류전원 연결시 초기치가 되므로 이 값이 식 (1)을 만족하도록 그 전류의 크기를 제한하면 된다. SRM의 경우 직류직권 전동기와 상이한 점은 전동기의 설계에 따른 역기전력의 비례상수인  $K_L$ 이 상수가 아니고 식 (2)와 같이 인덕턴스 변화분으로 주어진다.

$$K_L = \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

본 연구에서  $K_L$ 은 인덕턴스 변화분 중에서 제일 큰 것을 취한다. 따라서 발전모드로 동작할 경우 SRM의 회전자 위치에 역기전력 중 최대치를 취하여 그 역기전력이 직류전원전압을 초과하지 않는 범위의 전류치를 취하였다. 이를 위해 식 (1)과 식 (2)를 만족하는 전류값으로 발전을 행하여 전류가 발산하는 것을 방지하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 전류의 발산을 방지하여 발전기 영역에서 안정된 동작을 위해서는 전류가 발산하지 않는 범위로 지령전류를 제한하여 안정된 발전을 가능하도록 제안하였다<sup>[5]</sup>.

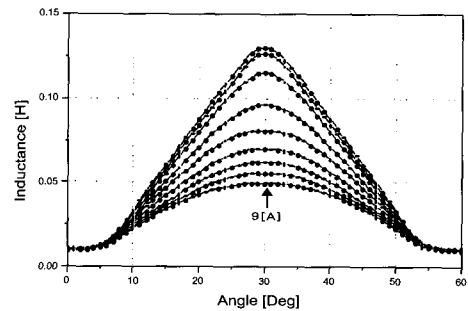
### 2.3 시뮬레이션 및 결과

그림 3(a)는 피시험 전동기에서 일정한 전류를 흘렸을 때 회전자 위치각  $1^\circ$  마다 측정된 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있다. 이 데이터는 시뮬레이션에서 인덕턴스의 전압 강하분을 계산하는 데이터로 사용된다.

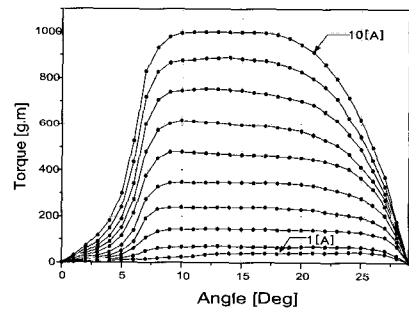
SRM의 토크 및 역기전력 항은 인덕턴스의 변화분으로 표현되므로 측정된 인덕턴스 데이터로부터 인덕턴스의 변화분을 정밀하게 찾기는 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 토크를 측정하여 이 측정된 데이터로부터 인덕턴스의 변화분을 얻음으로써 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 1(b)는 측정된 토크 데이터를 나타낸 것으로 전류는 1~10[A]의 일정한 전류를 흘렸을 때 마다, 회전자 위치각은  $1^\circ$  마다 토크 값을 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서 측정된 SRM의 인덕턴스 및 토크 프로파일에 의해 SRM의 시뮬레이션을 행할 수 있는 구간을 마련했다 할 수 있다.

그림 4는 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 제한전류의 크기 및 토크를 나타내고 있다. 시뮬레이션은 측정된 인덕턴스 및 토크 프로파일에 의하여 속도

범위에 따른 상 전류 및 토크를 계산하여 SRM 운전시 전류가 발산하지 않는 범위를 구한 것이다. SRM의 저속구동시에는 지령전류의 값이 정격전류에 도달하여도 상 전류는 발산하지 않지만, 속도가 고속으로 갈수록 전류의 발산확율이 높아져 각 속도에 따라 전류를 제한하여 구동해야 함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3 시작전동기에서 측정된 인덕턴스 및 토크 프로파일 (a) 인덕턴스 프로파일 (b) 토크 프로파일

Fig. 3 Measured inductance profiles and torque profiles

(a) Inductance profiles (b) Torque profiles

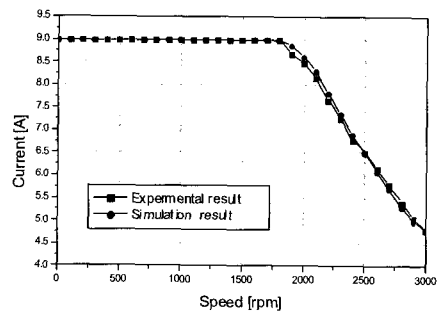


그림 4 발전모드에서 전류가 발산되지 않기 위한 전류제한 값

Fig. 4 Current limit level without divergence

### 3. 실험 및 결과

제안한 구동방식의 타당성을 보이기위해 전동 및 발전영역에서 실험을 행하였다. 실험에 사용한 기기로는 앞서 시뮬레이션에 적용했던 SRM은 4상의 8/6극으로 정격 1.5 [kW], 200 [V], 3000 [rpm]이며, 부하로는 3.5 [HP], 72 [V], 5000 [rpm]의 직류기를 사용하였고, 엔코더는 500 pulse 증분형 엔코더를 사용하였다. 실험은 각종 특성시험의 가변성과 편의성을 고려하여 PC기반으로 시행하였다. 그림 5는 실험장치 구성도 및 전반적인 개략도를 나타내고 있다.

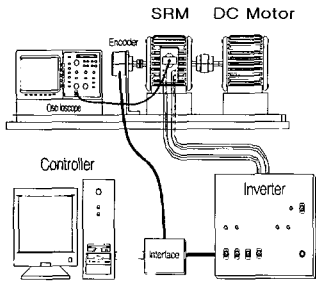
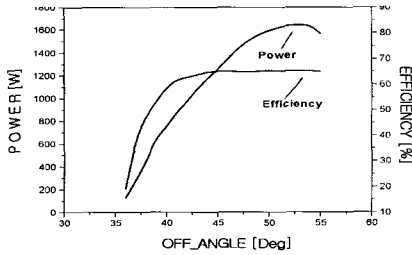
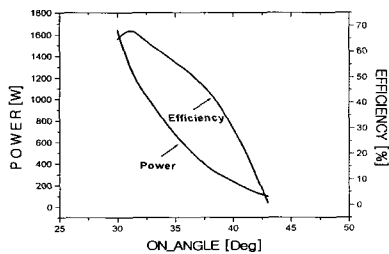


그림 5 실험 장치도  
Fig. 5 Experimental setup



(a)



(b)

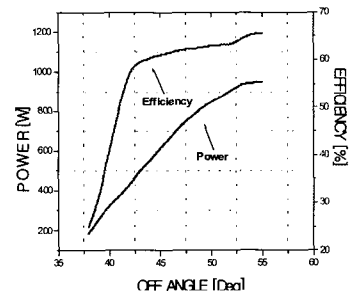
그림 6 전동모드 1000 [rpm] 운전시 출력 및 효율  
(a) 온각 고정(30°) (b) 오프각 고정(60°)  
Fig. 6 Power and efficiency during motoring mode  
(a) on angle fixed(30°) (b) off angle fixed(60°)

### 3.1 전동모드의 실험적 해석

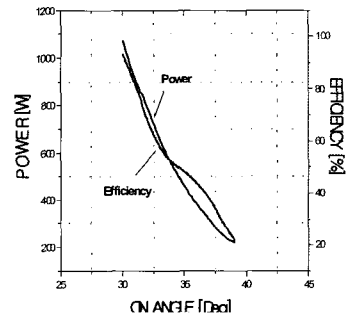
그림 6은 전동모드 운전시 전동기가 1000 [rpm]으로 회전시 최대 출력을 내는 각도 범위에서의 출력 및 효율을 나타내고 있다.

그림 6은 (a)는 온각을 30°로 고정하고 오프각을 기계각 1°씩 변화시 출력과 그 때의 효율을 나타내고 있으며, 그림 (b)는 오프각을 60°로 고정시키고 온각을 1°씩 변화시 출력 및 효율을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 전동기가 1000 [rpm]으로 회전시 출력은 최대 약 1.5 [kw]이며 그 때의 효율은 약 70 [%] 정도임을 알 수 있다. 또한, 최대출력점이 최대효율점과 일치하지는 않지만, 최대 효율점의 범위는 최대 출력범위내에서 찾을 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 SRM이 전동모드로 1500 [rpm] 운전시의 출력과 그에 따른 효율곡선을 나타내고 있다. 1500 [rpm] 운전역시 최대 출력에 가까운 각도 범위에서 최대 효율점을 찾을 수 있음을 알 수 있다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 동일한 운전조건에서 속도를 변화시킬 경우 속도가 증가하면 출력이 저하되나 그에 따른 효율은 증가됨을 알 수 있다.

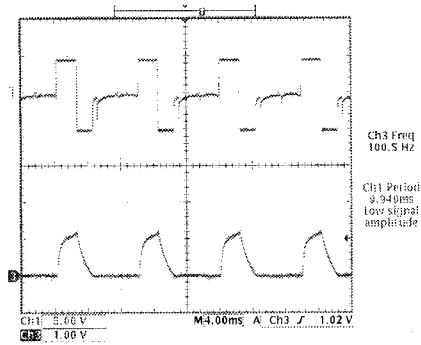


(a)

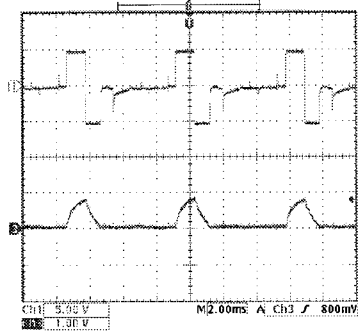


(b)

그림 7 전동모드 1500 [rpm] 운전시 출력 및 효율  
(a) 온각 고정(32°) (b) 오프각 고정(62°)  
Fig. 7 Power and efficiency during motoring mode  
(a) on angle fixed(32°) (b) off angle fixed(62°)



(a)



(b)

그림 8 드웰각 12° 에서의 상전압 및 상전류  
(a) 1000 [rpm] (b) 1500 [rpm]

Fig. 8 Voltage and phase current at dwell angle 12°  
(a) 1000 [rpm] (b) 1500 [rpm]

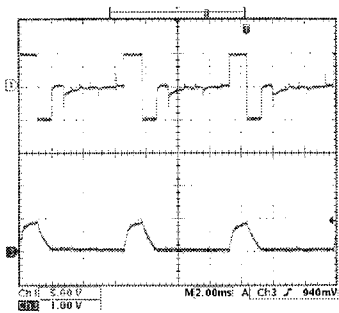


그림 9 드웰각 14° 에서의 상전압 및 상전류  
(1500 rpm 운전시)

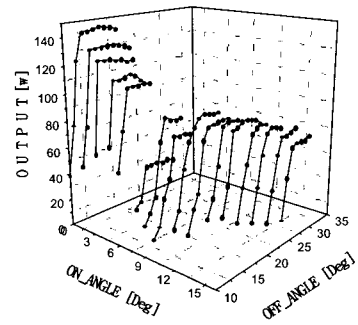
Fig. 9 Voltage and phase current at dwell angle 14°  
(1500 rpm)

그림 8은 동일한 온, 오프각에서의 속도별 상전압 및 상전류 파형을 나타내고 있다.

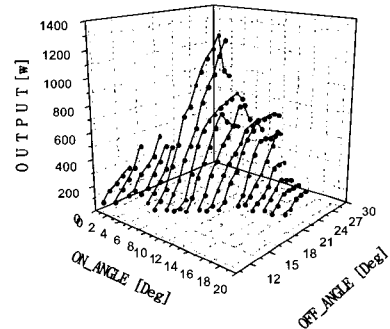
그림 8에서 보는바와 같이 동일한 온, 오프각에서의

전동영역 운전시에는 1000 [rpm] 운전시에는 평탄전류에 가까운 상 전류가 형성되지만 속도가 1500 [rpm]으로 증가시에는 상 전류의 확립이 부족함을 알 수 있다.

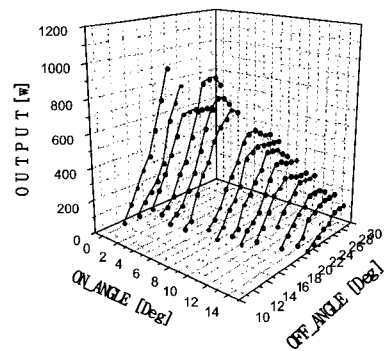
이 경우 온각을 앞으로 당겨주게 되면 고속에서도 평탄전류를 형성할수 있는데 그림 9는 1500 [rpm] 운전시 온각을 기계각 2° 앞당긴 파형이다.



(a)



(b)



(c)

그림 10 발전모드 운전시 발전량  
(a) 1000[rpm] (b) 2000[rpm] (c) 3000[rpm]

Fig. 10 Generation power during generation mode  
(a) 1000[rpm] (b) 2000[rpm] (c) 3000[rpm]

### 3.2 발전모드의 실험적 해석

SRM의 발전모드 운전시에는 앞에서 언급했듯이 SRM의 상 전류의 크기에 따라 역기전력 성분이 직류 전원보다 큰 경우가 존재한다. 이 경우 SRM에서 상 전류를 소호 할 능력을 상실하게 되어 상 전류는 발산하게 된다. 따라서 시뮬레이션에서 구한 속도에 따른 제한 전류치에 의거하여 속도와 온, 오프각에 따른 발전량을 실험을 통하여 구하였다.

그림 10은 속도별 발전량을 나타낸다. SRM의 발전모드 운전에서는 그림 10에서 알 수 있듯이 속도가 증가함에 따라 발전량이 많아짐을 알 수 있다.

그림 10(c)는 시뮬레이션에 의한 제한전류치 보다 1[A] 더 낮추어서 실험한 결과로 에너지의 증분률이 조금 감소함을 알 수 있다. 이는 실험시 시험장치의 안전확보와 전류의 발산을 방지하기 위한 것이다.

그림 11은 SRM의 발전영역 운전시 스위칭 각도에 따른 발산하지 않는 최대영역을 도시한 것이다.

파형의 상단부터 상 전압, 상 전류 그리고 전력 파형을 나타낸다. 전력 파형에서 한 주기 동안의 평균치가 SRG 운전시 발전되는 발전량을 나타내는데 그림 12에서 보듯이 발전량은 음의 값을 가지게 된다.

발전모드 운전도 전동모드 운전시와 마찬가지로 적정 드웰각에서 출력이 최대가 됨을 알 수 있다.

또한 실험결과로부터 SRM 발전영역 운전시에는 고속으로 갈수록 회수되는 에너지가 많음을 알 수 있으며, 최대 발전량을 갖는 작은 오프각을 고정시 고속으로 갈수록 온각이 앞당겨야 함을 알 수 있다.

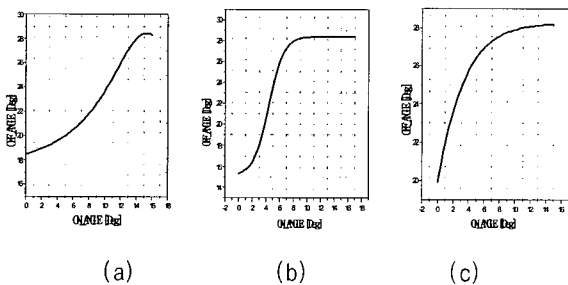


그림 11 발전영역에서 온, 오프각에 따른 상 전류 안정영역  
 (a) 1000[rpm]  
 (b) 2000[rpm]  
 (c) 3000[rpm]

Fig. 11 Phase current limit during generation mode  
 (a) 1000[rpm]  
 (b) 2000[rpm]  
 (c) 3000[rpm]

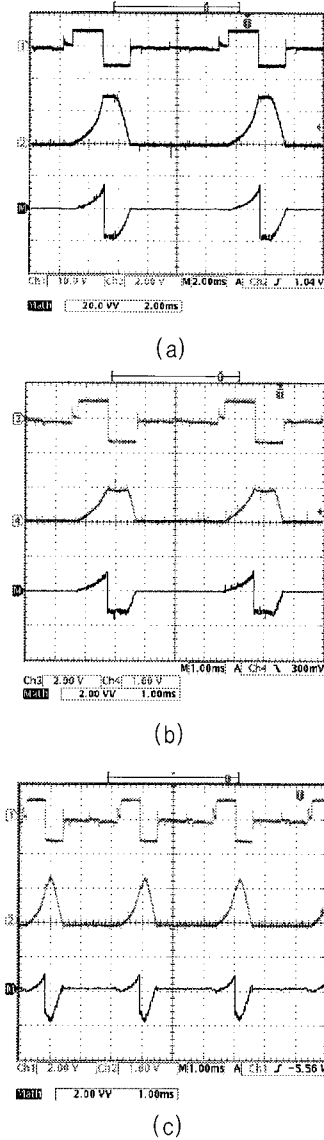


그림 12 온, 오프각에 따른 상 전압 및 전류파형  
 (상: 상전압, 중: 상전류, 하: 발전전력)

(a) 1000[rpm] (b) 2000[rpm] (c) 3000[rpm]  
 Fig. 12 Phase voltage and current by on and off angle  
 (upper: phase voltage, mid: phase current, lower: generation power)  
 (a) 1000[rpm] (b) 2000[rpm] (c) 3000[rpm]

### 4. 결 론

본 연구는 SRM을 전기자동차등과 같은 견인용 전동기구조로 사용하게 될 경우 안정된 전동기 모드 및 발전기 모드로 운전하기 위한 SRM 4상한 운전에 관한

연구이다.

SRM의 제동 및 발전모드로 동작할 경우 역기전력의 크기를 고려하여 상 전류의 발산을 막을 수 있는 전류 지령치를 형성한다. 이를 위해서 SRM의 속도에 따른 안정된 운전을 행할 수 있는 상 전류의 크기를 구하는 방법으로 실측한 인덕턴스와 토크 프로파일을 근거로 하여 시뮬레이션을 행하였다. 이 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 상전류 지령치의 안전영역을 구하였으며 이 안전영역 내에서 전류지령치를 형성하여 그 지령치 내에서 온, 오프각도제어를 하여 제동 및 발전시 안정된 동작을 행함으로 전동기 및 발전기 동작의 4상한 운전이 안정적으로 행하여짐을 실험을 통하여 입증하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001.
- [2] Radun A. "Linearizer for a Switched Reluctance Generator", US Patent 5204604. April 20, 1993.
- [3] A. Radun, "Generating with the switched-reluctance motor", Proc. of the IEEE Applied Power Electronics Conf., pp. 41~47, 1994.
- [4] 강유정, 오석규, Chen Hao, 안진우, "SRM Drive의 새로운 제동제어에 대한 연구", 대한전기학회 EMECS춘계학술대회, pp. 43~45, 2002
- [5] 강유정, 박성준, 안진우, "SRM의 안정된 발전을 위한 지령전류 제한에 관한 연구", 대한전기학회 부산지부학술대회, pp. 6~10, 2002

- [6] 안진우 외, "병렬권선 운전시 SRM의 부하분담 특성에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제8권 1호, pp. 30~38, 2003. 2
- [7] 안진우 외, "3상 6/8극 SRM의 설계 및 운전특성", 전력전자학회 논문지, 제8권 1호, pp. 48~54, 2003. 2.

### 저 자 소 개



#### 안진우(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. 당 학회 학술이사.



#### 강유정(姜有貞)

1977년생. 2001년 경성대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2003년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2003년 금호전기 연구소 연구원.