

SRM의 안정된 발전을 위한 지령전류 제한에 관한 연구

강유정*, 박성준**, 안진우*
경성대*, 동명대**

Reference Current Limitation Strategy for Stable Generation of SRM

Yu-Jung Kang*, Sung-Jun Park**, Jin-Woo Ahn*
Kyungsung Univ.*, Tongmyung College**

Abstract - A Switched Reluctance Generator attracts much attention because of high efficiency, simple controllability, with traction drive. But the theories that have been adopted as SRG control methods up to the present are complicated.

This paper proposes reference current limitation strategy for stable generation of SRM.

The proposed method is verified by simulation and experiments.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 펄스형의 여자 전원에 의한 고정자와 회전자의 릴럭턴스 토크를 이용하는 전동기구조로써, 기계적인 구조가 매우 간단하고 견고하다. 또한 다른 전동기구조에 비하여 효율이 높고, 단위 체적당 발생토크가 크고, 기동특성이 직류직권전동기와 같은 특성을 갖고 있다. 따라서 SRM은 견인특성이 좋으며 고속회전 특성이 우수하여 견인용 전동기구조와 전기자동차의 구동부에 대한 응용이 활발히 연구되고 있다.^{[1],[2],[3]} SRM을 견인용으로 사용할 경우 빈번한 발전동작이 필요로 하고 있으나, SRM은 직류직권전동기와 같은 특성을 갖고 있어 제동 및 발전기로 동작할 경우 그 동작이 매우 어려운 실정이다. SRM의 발전영역 동작에서 역기전력의 크기는 전동기의 속도, 상 전류의 크기 및 인덕턴스의 변화율에 의해 결정되어진다. 역기전력을 형성하는 항 중에서 속도는 상전류 및 인덕턴스의 변화에 비하여 상당히 큰 시정수를 갖고 있고 상 전류제어기 내에서는 상수로 취급할 수 있다. 또한 인덕턴스의 변화율은 전동기의 속도와는 무관하고 회전자의 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 역기전력성분이 직류전원보다 큰 경우가 존재한다. 이 경우 SRM에서 상 전류를 소호 할 능력을 상실하게되어 상 전류는 발산하게 된다. 따라서 본 연구에서는 SRM의 제동 및 발전모드로 동작할 경우 역기전력의 크기를 고려하여 상 전류의 발산을 막을 수 있는 전류 지령치를 형성한 한다. 이를 위해서 SRM의 속도에 따른 안정된 운전을 행할 수 있는 상 전류의 크기를 구하는 방법으로 실측한 인덕턴스 프로파일과 토크 프로파일을 근거로하여 시뮬레이션을 행하였다. 이 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 상전류 지령치의 안전영역을 구하였으며 이 안전영역내에서 전류지령치를 형성함으로써 제동 및

발전시 안정된 동작을 행할 수 있었다. 또한 제한된 제어방법에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 행한 결과 본 제어방식의 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 여자특성

자기적 구조를 매개로 하는 전기기계 에너지변환 기구의 토크 발생기구에는 상호 토크(mutual torque)와 릴럭턴스 토크(reluctance torque)가 있다. 상호 토크는 고정자와 회전자에 각각 여자에너지를 인가할 때 극대화되는 토크로 일정 회전자계 여자특성에서 발생된다. 릴럭턴스 토크는 고정자 또는 회전자 한 쪽에만 여자에너지를 인가할 때 자기적 구조에 의존하여 발생하는 토크로서 자기회로의 릴럭턴스와 여자에너지의 변화로 유도되며, 여자에너지를 인가한 상의 릴럭턴스가 최소화되려는 특성에 기인한다.

그러므로 자기구조는 전동기가 회전함에 따라 릴럭턴스가 지속적으로 변화하는 돌극형이 필요하지만 기하학적 구성에는 한계가 있으므로, 일정한 회전구간마다 연속적인 펄스 여자전원의 인가가 필요하다.

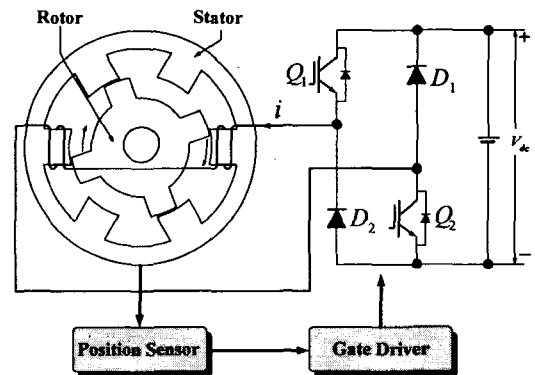


그림 1. SRM 구동시스템
Fig. 1. SRM Drive system

그림 1은 이중 돌극형 SRM 드라이브의 기본 구성도이다. 그림에서 보는바와 같이 SRM 구동 시스템은 회전자 위치 얻기위한 위치센서와 적절한 펄스전원을 인가하기 위한 컨버터로 구성되어있다. SRM은 릴럭턴스 토크를 동력화한 전동기로 자기회로의 릴럭턴스가 최소가 되는 방향으로 토크가 발생한다. 전동기의 토크 식을 구하기 위하여 coenergy, W' 의 개념을 도입하면 이중돌극형

SRM의 자기구조상 자기회로의 coenergy W_c' 는 식 (1)과 같다.

$$W_c' = \frac{1}{2} i^2 \cdot L(\theta, i) \quad (1)$$

여기서 i 는 상권선의 전류, L 은 인덕턴스를 의미하며, 한 상에 대한 토오크 T_e 는 회전자의 위치각, θ 에 대한 coenergy의 편미분항으로서 식(2)와 같이 구해진다.

$$T_e = \frac{dW_c'}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

식 (2)로 부터 SRM의 발생토오크는 전류의 제공에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다. 토오크가 전류의 제공에 비례함으로써 상전류의 방향과 무관하게 토오크를 발생시킬 수 있으며, 인덕턴스의 기울기에 따라서 토오크의 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토오크인 부토오크(negative torque)가 발생하는 회전자의 위치각도가 존재하게 된다. 그러므로 SRM은 부토오크의 억제를 위해서 반드시 회전자의 위치각에 동기시켜 스위칭 여자를 이루어야 한다.

SRM에서 정착한 스위칭 동작으로 원하는 토오크를 발생시키기 위해서는 상전류에 대한 해가 필수적이다. 전동기에서 상전류를 해석하기 위한 기초가 되는 상 전압방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} V_i &= Ri + \frac{d\lambda}{dt} \\ &= Ri(t) + \frac{d[L(\theta, i)i(t)]}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 R 은 권선저항, λ 는 총 쇄교자속이다. 식(3)에서 총 쇄교자속은 인덕턴스와 전류의 곱으로 표현되나 인덕턴스 값이 위치각과 전류의 함수로 표현되므로 편미분을 이용하여 다시 표현하면 아래와 같다.

$$V_i = Ri(t) + i(t) \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega + L(\theta, i) \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

ω : 회전자 각속도

식(4)의 상전압 방정식에서 우변의 두 번째 항은 SRM의 역기전력에 해당된다. 따라서 역기전력항은 아래 식으로 표현된다.

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega i(t) = K \omega i(t) \quad (5)$$

단 $K = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$

식 (5)에서 보는 바와 같이 역기전력은 직류전동기와 동일한 형태를 취하고 있으며, 또한 식(1)의 토오크 식은 직류직권전동기와 동일한 형태를 취하고 있다. 따라서 SRM의 속도-토오크 특성은 직류 직권전동기와 동일한 특성을 갖고 있다.

2.2 SRM의 발전원리

SRG는 직류직권 발전기와 동일한 특성을 가지고 있다. 따라서 SRM의 발전기동작을 해석하기 위해서 우선 직류직권전동기의 발전특성을 살펴볼 필요성이 있다. 그림 2는 직류직권 발전기의 등가회로 및 특성곡선이다.

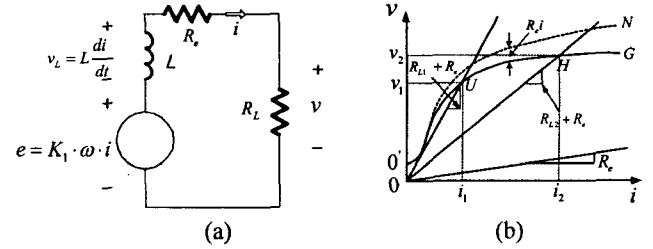


그림 2. 직류직권발전기의 등가회로 및 외부특성곡선
(a) 등가회로 (b) 특성곡선
Fig. 2. Equivalent circuit and characteristic curve of series DC generator
(a) equivalent circuit (b) characteristic curve

그림 2에서 R_L 은 부하저항이며, R_e 는 정류자를 포함한 발전기의 등가저항이고, 점선인 곡선 $O'N$ 은 직류직권 발전기의 단자전류에 따른 발전전압 특성곡선이다. 실선 곡선 $O'G$ 는 단자전류에 따른 단자전압 특성곡선이다. 이 단자전압 특성곡선에서 알 수 있듯이 발전전류가 증가하면 단자전압도 증가하게 된다. 이 특성곡선은 다른 직류발전기와 거의 경향이 상이한 점이 된다. 예를 들어 외부 부하가 R_{L1} 이 연결되었다면 부하전류와 발전기의 등가저항에서의 전압강하와 발전기의 전압이 일치하는 점에서 단자전압이 결정되며 그림에서는 U 점이 되고 발전단자 전압은 v_1 이 되고 발전전류는 i_1 이 되나 외부부하가 R_{L2} 가 연결되었다면 발전단자 전압은 v_2 가 되고 발전전류는 i_2 가 된다. 이 특성곡선은 외부에 부하가 큰 경우 발전전압이 크게 되는 현상을 초래한다. 또한 부하전류에 따라서 단자전압이 현저하게 변하게 되어 발전기용으로는 잘 사용되지 않는다. 특히 직류 직권발전기가 직류전원으로 연결하여 사용할 경우 직류직권 발전기에서 속도와 부하전류에 의해서 결정된 단자전압과 직류전원의 전압이 서로 직결된 형태가 되어 발전기의 전류는 발산하여 발전기능이 불가능하게 된다. 이를 개선하기 위한 직류발전기의 회로구성은 그림 3과 같다.

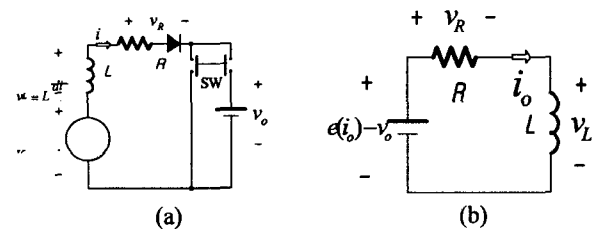


그림 3. 직류전원 연결형 직류직권발전기의구성도 및 발전모드의 등가회로
(a) 직류전원 연결형 직류 직권발전기의 구성도
(b)발전모드의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit and diagram of series DC generator to DC voltage connection
(a) Diagram of series DC generator to DC voltage connection
(b) Equivalent circuit of generation mode

우선 스위치 SW 를 통하여 발전기 단자를 단락시켜 인덕턴스 L 에 에너지를 축적하여 SW 를 통하여 직류전원에 연결하여 L 에 축적된 에너지를 직류전원으로 전달하게 된다. 이 회로의 동작은 승압형 초퍼회로와 유사하게 되고, 안정된 동작을 위해서는 역기전력이 직류전원보다 적어야 한다는 전제조건이 필요하다. 그러나 역기전력은 전동기의 속도와 전류의 곱으로 나타나고 속도는 전동기의 외부제어변수

가 되므로 앞의 전제조건을 성립하기 위해서는 전류의 크기제한이 필수적이다. 전류의 발산을 막기 위한 전류치는 다음과 같다.

$$i(0) \leq \frac{v}{K_1\omega} \quad (6)$$

전류 정착최종치인 $i(0)$ 는 직류전원 연결시 초기치가 되므로 이 값이 식 (6)을 만족하도록 그 전류의 크기를 제한하면 된다. SRM의 경우 직류직권 전동기와 상이한 점은 전동기의 설계에 따른 역기전력의 비례상수인 K_1 이 상수가 아니고 식 (7)과 같이 인덕턴스 변화분으로 주어진다.

$$K_1 = \frac{dL}{d\theta} \quad (7)$$

본 실험에서 K_1 은 인덕턴스 변화분중에서 제일 큰 것을 취한다. 따라서 발전모드로 동작할 경우 SRM의 회전자 위치에 역기전력 중 최대치를 취하여 그 역기전력이 직류전원을 초과하지 않는 범위의 전류치를 취하였다. 이를 위해 식 (6)과 식 (7)을 만족하는 전류값으로 발전을 행하여 전류가 발산하는 것을 방지하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 전류의 발산을 방지하여 발전기 영역에서 안정된 동작을 위해서는 전류가 발산하지 않는 범위의 지령전류를 제한하여 안정된 발전을 가능하도록 제안하였다.

그림 4는 SRM구동용 비대칭형인버터의 동작모드를 나타내고 있다. 이 비대칭형 인버터의 출력전압은 양의 직류전압(mode1), 음의 직류전압(mode3) 및 영전압(mode2)을 발생시킬 수 있으므로 SRM 구동용 인버터의 대부분을 차지하고 있다.

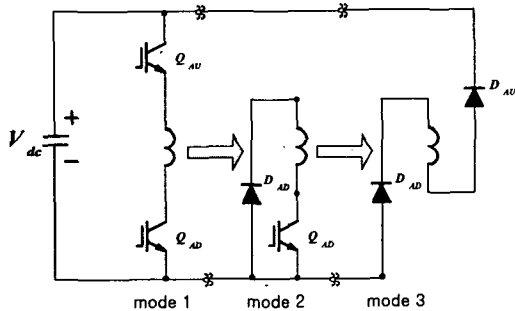


그림 4. SRM 구동용 비대칭형 인버터의 동작모드
Fig. 4. Operation mode of asymmetric bridge inverter for SRM driving

본 실험에서도 비대칭형 인버터를 사용하였다. 비대칭형 인버터를 사용할 경우 SRM의 전동기영역에서는 Mode1과 Mode2를 사용하여 단방향 PWM을 사용함으로써 전류의 리플을 양방향 PWM에 비하여 상당히 저감하였다. SRM을 제동 및 발전기로 동작할 경우 Mode1과 Mode3를 사용하여 양방향 PWM을 사용하여 전류제어시 에너지 회수를 가능하게 하였다.

그림 5는 피시험 전동기에서 1~9[A]의 일정한 전류를 흘렸을 때 회전자 위치각 1° 마다 측정된 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있다. 이 데이터는 시뮬레이션에서 인덕턴스의 전압 강하분을 계산하는 데 이 터 로 사 용 된 다

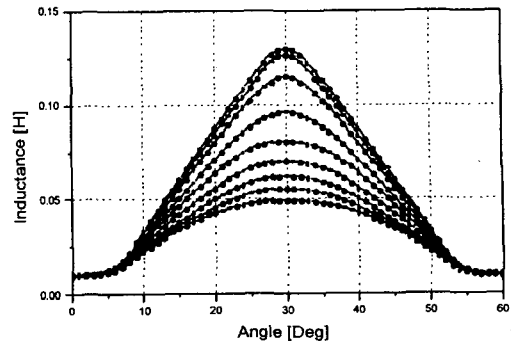


그림 5. 측정된 인덕턴스 프로파일
Fig. 5. Measured inductance profiles

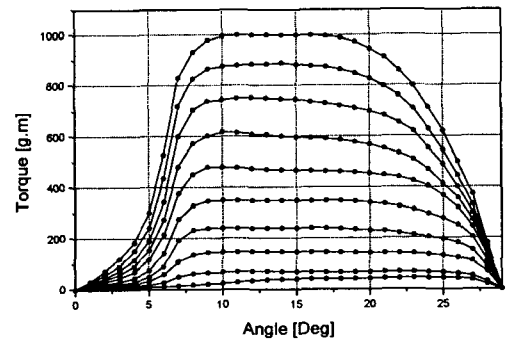


그림 6 토크 프로파일
Fig. 6 Torque profiles

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 있다. 그림 6은 측정된 토크 데이터를 나타낸 것으로 전류는 1~10[A]의 일정한 전류를 흘렸을 때 마다, 회전자 위치각은 1° 마다 토크 값을 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서 측정된 SRM의 인덕턴스 및 토크 프로파일의 의해 SRM의 시뮬레이션을 행할 수 있는 근간을 마련했다 할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 전류정착을 위한 제한전류값 산정

시뮬레이션은 측정된 인덕턴스 및 토크 프로파일의 의하여 속도 범위에 따른 상 전류 및 토크를 계산하여 SRM 운전시 전류가 발산하지 않는 범위를 구한 것이다.

그림 7은 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 제한전류의 크기 및 토크를 나타내고 있다. 저속으로 SRM 구동시에는 지령전류의 값이 정격전류에 도달하여도 상 전류는 발산하지 않지만, 속도가 고속으로 갈수록 전류의 발산확율이 높아져 각 속도에 따라 전류를 제한하여 구동해야 함을 알 수 있다.

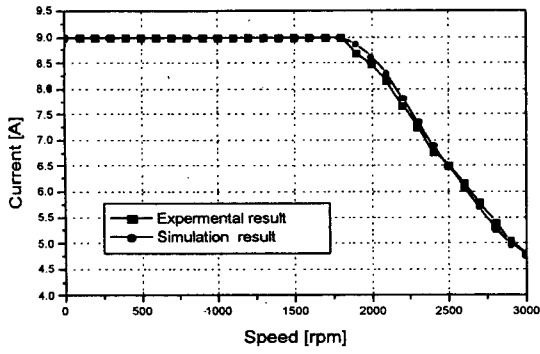


그림 7. 발전모드에서 전류가 발산되지 않기 위한 제한전류
 Fig. 7. Current level limitation curve not to be divergent mode

3.2 발전모드를 위한 전동기 특성시험

실험에 사용된 SRM은 고정자와 회전자극이 8/6이고, 1.5[kW], 200[V], 2000[rpm] 기기로써 그림 8과 같은 구조를 가진다.

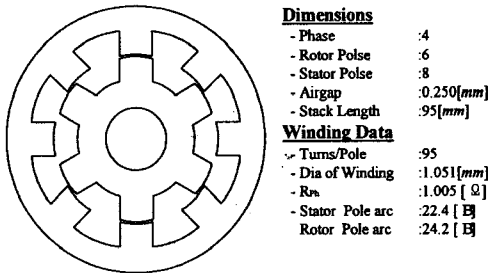
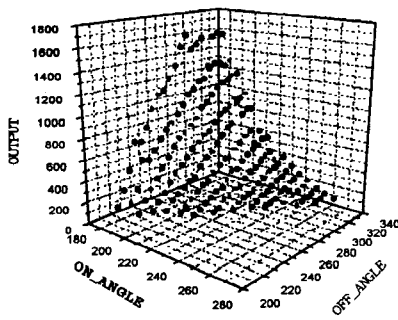
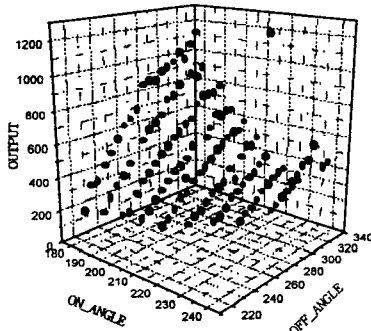


그림 8. 8/6 SRM의 구조
 Fig. 8. The structure of SRM



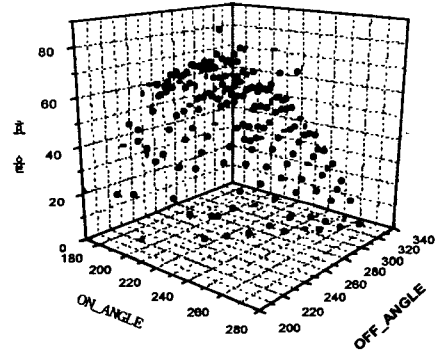
(a)



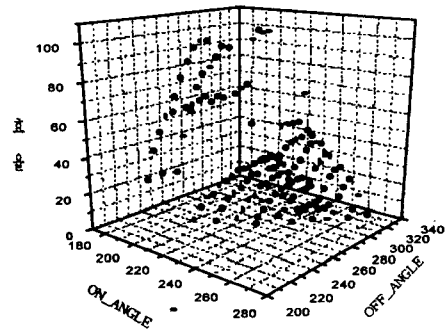
(b)

그림 9. on, off 각도에 따른 출력곡선
 (a) 1000 [rpm] 운전시 출력
 (b) 1500 [rpm] 운전시 출력
 Fig. 9. Output cuve according to on, off angle
 (a) output cuve at 1000[rpm]
 (b) output cuve at 1500[rpm]

그림 9는 8/6 SRM의 stroke angle은 15° 이므로 stroke angle 범위내에서 on, off angle을 1° 범위로 변화시켜 가면서 속도에 따른 출력을 구한 것이다. 따라서 최적출력에 대한 on, off angle 및 dewll에 따른 출력을 한 눈에 쉽게 알아볼 수 있다. 측정된 속도에 따른 출력 데이터로부터 각각의 효율곡선을 구할 수가 있다. 그림 10은 각도에 따른 효율을 나타낸 그래프이다.



(a)

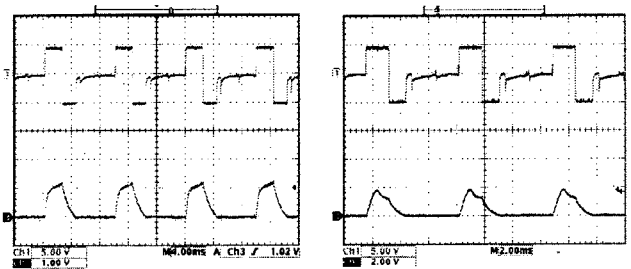


(b)

그림 10. 속도에 따른 효율곡선
 (a) 1000rpm (b) 1500rpm
 Fig. 10. Efficiency accoding to speed
 (a) 1000rpm (b) 1500rpm

그림 9와 10에서 볼 수 있듯이 각도변위에 따른 출력 및 효율점은 구의 표면을 이루고 있음을 알 수 있다. 이 데이터로부터 구의 표면점에서 효율과 출력이 최적의 조건을 이루는 각도변위를 구하여 실험에 적용할 수 있다.

그림 11은 SRM이 전동기영역으로 운전시 dewll 15° 에서의 상 전압 및 상 전류 파형을 나타내고 있다.



(a)

(b)

그림 11. 전동기영역 운전시 상 전압 및 상전류 파형
 (a) 1000rpm (b) 1500rpm
 Fig. 11. Waveforms of voltage and phas current in the motoring mode driving
 (a) 1000rpm (b) 1500rpm

그림 12는 발전영역 운전시의 상전압 및 상전류 파형으로써, 그림 12(a)는 제한전류하에서 초핑하는 것을 알 수 있고, 그림 12(b)는 단일펄스 여자시의 상전압 및 상전류 파형을 나타내고 있다.

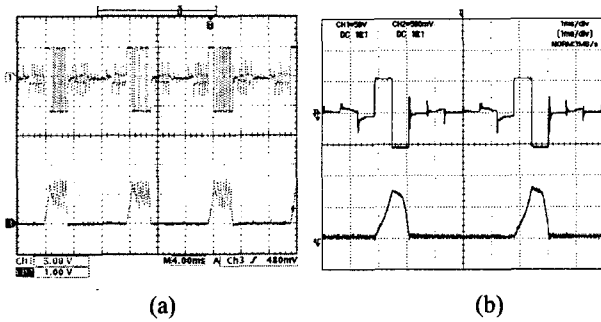


그림 12. 발전기영역 운전시 상전압 및 상전류 파형
 (a) 1000rpm (b) 1500rpm
 Fig 12. Waveforms of voltage and phas current in the
 generating mode driving
 (a) 1000rpm (b) 1500rpm

그림 11 및 12의 상전압, 상전류 파형을 살펴보면, 그림 4의 SRM구동용 비대칭 인버터의 동작모드에서 전동기영역 운전시에는 Mode 1과 Mode 2를 사용하여 단방향 PWM을 사용하고, 발전영역 운전시에는 Mode 1과 Mode 3을 사용하여 양방향 PWM을 사용하여 전류제어시 에너지 회수가 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

SRM이 제동 및 발전모드로 동작할 경우 발전영역에서 형성된 전류의 크기가 역기전력에 직접적으로 연관되어 있어 그 전류의 크기에 따라 역기전력 성분이 직류전원보다 큰 경우가 존재한다. 이 경우 SRM에서 상 전류를 소호 할 능력을 상실하게되어 상 전류는 발산하게 된다. 따라서 본 연구에서는 SRM의 제동 및 발전모드로 동작할 경우 역기전력의 크기를 고려하여 상 전류의 발산을 막을 수 있는 전류 지령치를 형성하여 안정된 운전을 할 수 있도록 제안하였다. 또한 제한된 제어방법에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 행한 결과 안정된 SRM의 제동 및 발전운전이 가능함을 입증하였다.

본 연구는 과학재단 목적기초연구 (R01-2001-000300-0) 지원으로 수행하였음

4. 참 고 문 헌

[1] 안진우, 황영문, "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", 신지서원, 1988

[2] M.Stiebler, K.Liu "Rotor Position Estimation of A Switched Reluctance Generator", ENE97, No.3 pp.575~579, 1997

[3] Arthur Radun, "Generating With the Switched Reluctance Motor", Proceedings APEC.pp.41~47,1994

[4] Radun A."Linearizer for a Switched Reluctance Generator" US Patent 5204604. April 20,1993