

견인용 SRM의 4상한 구동을 위한 제어시스템

황형진, 박성준*, 안진우

경성대학교, *전남대학교

Four-Quadrant Control System of SRM for Traction Drive

Hyung-Jin Hwang, Sung-Jun Park*, Jin-Woo Ahn

Kyungsung Univ., *Chonnam National Univ.

ABSTRACT

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

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance motor)은 기계적인 구조가 매우 간단하고 견고하며 다른 전동기구에 비하여 효율이 높다. 또한 단위 체적당 발생 토크가 크며, 견인특성 및 고속회전 특성이 우수하여 전기자동차와 같은 견인구동 분야에 적용연구가 활발히 진행되고 있다.^[1]

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.^[2,3]

SRM의 발전영역 동작에서 역기전력의 크기는 전동기의 속도, 상전류의 크기 및 인덕턴스의 변화율에 의해 결정되어진다. 역기전력을 형성하는 항중에서 속도는 타 요소에 비해 상당히 큰 시정수를 갖고 있어, 상 전류기 내에서는 상수로 취급할 수 있고 인덕턴스의 변화율은 인덕턴스 프로파일의 의

해 그 정보를 얻을 수 있다. 따라서 역기전력을 형성하는 중요 항은 상전류의 크기가 된다. 즉 SRM에서는 상전류의 크기에 따라 역기전력 성분이 직류전원보다 큰 경우가 존재하게 되고, 이 경우 상전류를 소호할 능력을 상실하게 되어 상전류는 발산하게 된다. 따라서 본 연구에서는 SRM이 제동 및 발전모드로 동작 시 역기전력의 크기를 고려하여 상전류의 발산을 막을 수 있는 전류 지령치를 형성하고자 한다. 이를 위해서 실측된 인덕턴스 프로파일과 토크 프로파일을 근거하여 SRM의 속도에 따른 안정된 운전을 행할 수 있는 상전류의 크기를 구하는 방법에 대해 시뮬레이션을 행하였다.^[4] 이 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 상전류 지령치를 통하여 안정영역 내에서 온, 오프 각도제어를 하여 제동 및 발전 시 안정된 동작을 행함으로써, SRM의 전동기 동작 및 발전기 동작의 4상한 운전이 안정적으로 행하여짐을 입증하였다.

2. 본 론

2. 1 발전영역에서의 제한전류 산정

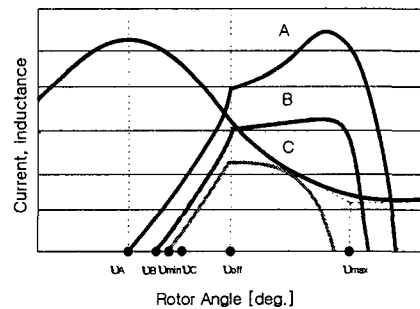


그림 1. 스위칭 온 각 변화에 따른 SRG의 상전류 파형
Fig 1. Current in SRG according to switching-on angle

SRM이 발전기 영역에서는 그림 1과 같이 상권

선의 최대 인덕턴스의 영향으로 전동기 영역보다 전류 확립을 위한 시간 지연이 많이 발생하게 된다.

이를 보상하기 위해 인덕턴스가 감소하는 시점보다 앞선 각(θ_A)에서 상 스위치를 온 하여야 하나 일반적인 SRM에서는 적절한 상전류를 형성할 수 있는 충분한 인덕턴스의 최대영역을 갖지 못한다. 따라서 원하는 상전류를 형성하기 위해서는 제한된 어드밴스 각에서 인가전압의 크기를 조정하는 방법이 고려될 수 있다.

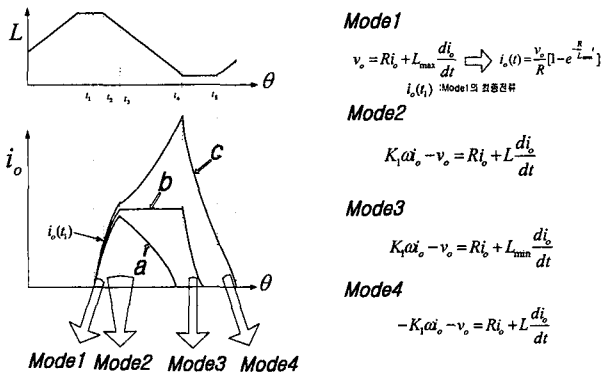


그림 2. SRG의 동작모드
Fig. 2 Modes of SRG operation

그림 2는 인덕턴스 변화에 따른 각 모드별 전류 파형을 나타내고 있다. SRM의 발전영역에서의 상전류의 수렴 및 발산여부는 모드 3구간의 시작값에 의해 결정되며 이 구간은 기계적 에너지가 전기적 에너지로 변환되는 구간이다.

2.2 발전영역에서의 전류제한

SRM의 발전영역에서의 안정된 동작을 위해서는 역기전력이 직류전원보다 작아야한다는 전제조건이 필요하다. 그러나 역기전력은 전동기의 속도와 전류의 곱으로 나타나고, 속도는 전동기의 외부제어 변수가 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, ω 는 회전속도이다. 전류 정착최종치인 $i(0)$ 는 직류전원 연결 시 초기치가 되므로 이 값이 식 (1)을 만족하도록 그 전류의 크기를 제한하면 된다. SRM의 경우 직류직권 전동기와 상이한 점은 K_1 이 상수가 아니고 식 (2)와 같이 인덕턴스 변화분으로 주어진다.

$$K_1 = \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

본 연구에서 K_1 은 인덕턴스 변화분 중에서 제일 큰 것을 취한다. 발전모드로 동작할 경우 SRM의 회전자 위치에 역기전력 중 최대치를 취하여 그 역기전력이 직류전원을 초과하지 않는 범위의 전류치를 취하였다. 이를 위해 식 (1)과 식 (2)를 만족하는 전류값으로 발전을 행하여 전류가 발산하는 것을 방지하고 이 범위로 지령전류를 제한하여 안정된 발전을 가능하도록 제안하였다.^[5]

2.3 시뮬레이션 및 결과

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

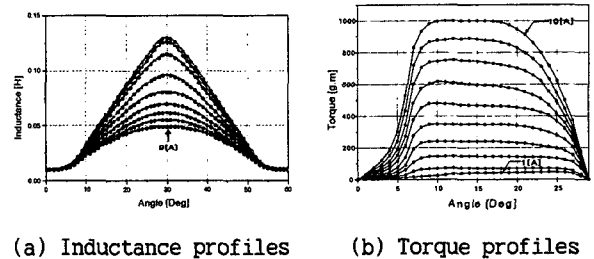


그림 3. 측정된 인덕턴스 및 토크 프로파일
Fig 3. Measured inductance profiles and torque profiles

SRM의 토크 및 역기전력 항은 인덕턴스의 변화분으로 표현된다. 측정된 인덕턴스 데이터로부터 인덕턴스의 변화분을 정밀하게 찾기는 매우 어려우므로 토크를 측정하여 이 측정된 데이터로부터 인덕턴스의 변화분을 산출, 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 3(b)는 측정된 토크 데이터를 나타낸 것으로 전류는 1~10[A]의 일정한 전류를 흘렸을 때, 회전자 위치각 1° 마다 측정된 토크이다.

그림 4는 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 제한전류의 크기 및 토크를 나타내고 있다. 시뮬레이션은 인덕턴스 및 토크 프로파일에 의하여 속도 범위에 따른 상전류 및 토크를 계산하여 SRM 운전 시 전류가 발산하지 않는 범위에서 행하였다. 저속 구동 시에는 지령전류의 값이 정격전류에 도달하여도 상전류는 발산하지 않지만, 속도가 고속으로 갈수록 전류의 발산확률이 높아지므로 속도변화에 따라 전류를 제한하여 구동해야 함을 알 수 있다.

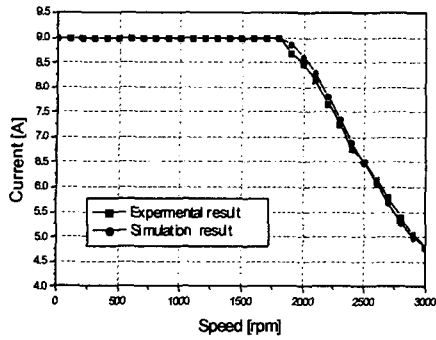


그림 4. 발전모드에서 전류가 발산되지 않기 위한 제한 전류조건
Fig 4. Current level limit without divergence

3. 실험 결과 및 검토

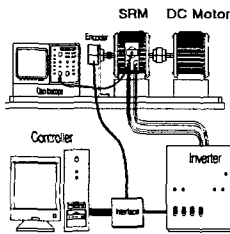
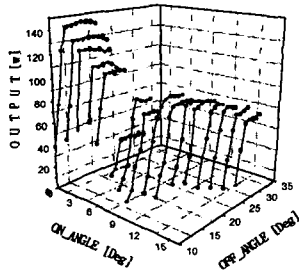
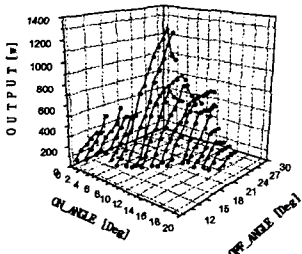


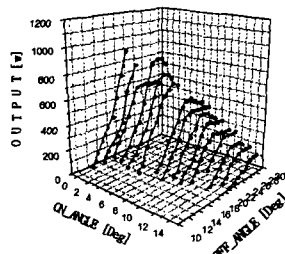
그림 5. 실험 장치도
Fig 5. Experimental setup



(a) 1000[rpm]



(b) 2000[rpm]



(c) 3000[rpm]

그림 6. 발전모드 운전시 발전량
Fig 6. Generation power during generation mode

제한한 구동방식의 타당성을 보이기 위해 그림 5

와 같은 구성의 실험장치 구성을 통해 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.

SRM의 발전모드 운전실험에서 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도별 제한 전류치에 의거, 속도와 온-오프각에 따른 발전량을 측정하여 그림 6과 같은 결과를 얻었다.

SRM의 발전모드 운전에서는 그림 6에서 알 수 있듯이 속도의 증가에 따라 발전량이 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 SRM의 발전영역 운전 시 스위칭 각도에 따른 발산하지 않는 최대 영역을 도시한 것이다.

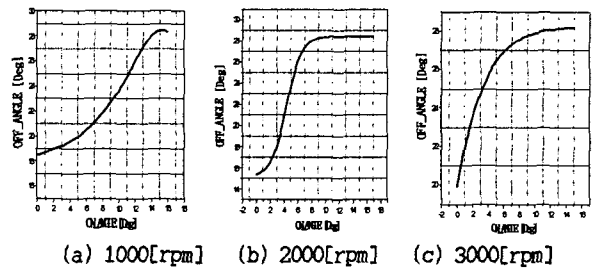


그림 7. 발전영역에서 온, 오프각에 따른 상 전류 안정영역
Fig. 7 Phase current limit during generation mode

그림에서 보듯이 상전류의 발산영역은 1° 단위로 매우 민감하게 반응하는 것을 알 수 있기에 SRM을 발전기 영역으로 운전 시에는 매우 정밀한 on, off angle의 선정이 필수임을 알 수 있다.

그림 8은 온, 오프각에 따른 상전압 및 상전류 파형을 나타내었다. 파형의 상단부터 상전압, 상전류 그리고 전력 파형을 나타낸다. 전력 파형에서 한 주기 동안의 평균치가 SRG 운전 시 발전되는 발전량을 나타내는데 그림 8에서 보듯이 발전량은 음의 값을 가지게 된다. 또한 실험결과로부터 SRM 발전영역 운전 시에는 적정 드릴락에서 출력이 최대가 되며, 고속으로 갈수록 회수되는 에너지가 많음을 알 수 있으며, 최대 발전량을 갖는 각은 오프각 고정 시 고속으로 갈수록 온각이 앞당겨야 함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 안진우 저, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, pp. 1-454, 2004.
- [2] Arthur Radun, "Generating with the Switched Reluctance Motor", Proceedings APEC. pp. 41 ~ 47, 1994
- [3] Radun A. "Linearizer for a Switched Reluctance Generator" US Patent 5204604. April 20,1993
- [4] A. Radun, "Generating with the switched-reluctance motor", Proc. of the IEEE Applied Power Electronics Conf., pp.41-47 1994
- [5] 강유정, 오석규, Chen Hao, 안진우, "SRM drive의 새로운 제동제어에 대한 연구", 대한전기학회 춘계 학술대회, pp.43-45, 2002
- [6] 강유정, 박성준, 안진우 "SRM의 안정된 발전을 위한 지령전류 제한에 관한 연구", 대한전기학회 부산지부, pp.6-10, 2002

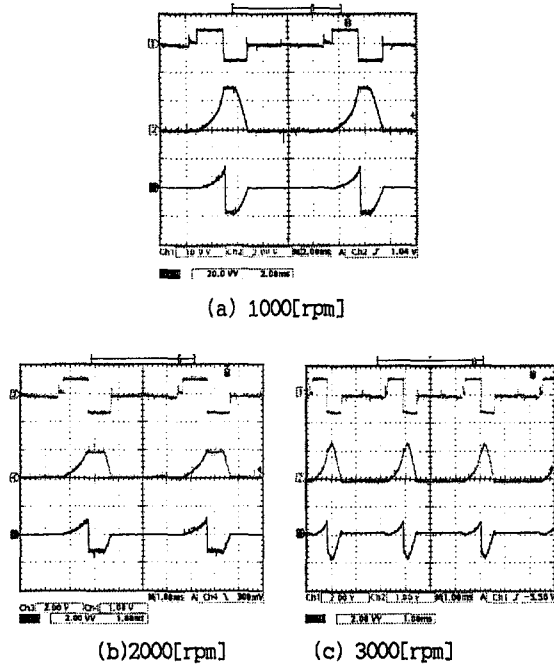


그림 8. 온, 오프각에 따른 상전압 및 상전류 파형
(상:상전압, 중:상전류, 하:발전전력)

Fig. 8 Phase voltage and current by on and off angle
(upper : phase voltage, mid : phase current
lower : generation power)

4. 결 론

본 연구는 SRM을 전기자동차와 같은 견인용 전동기기로 사용하게 될 경우 안정된 발전영역에서의 운전을 위한 SRM 4상한 운전에 관한 연구이다.

SRM이 제동 및 발전모드로 동작할 경우 역기전력의 크기를 고려하여 상전류의 발산을 막을 수 있는 전류 지령치를 형성한다. 이를 위해서 SRM의 속도에 따른 안정된 운전을 행할 수 있는 상전류의 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 형성하고 그 지령치 내에서 온, 오프각도제어를 하여 제동 및 발전 시 안정된 동작을 행함으로써 전동기 및 발전기 동작의 4상한 운전이 안정적으로 행하여짐을 실험을 통하여 입증하였다.

이 연구는 BB 21 Project 지원에 의하여 수행되었음