

SRM의 4상한 구동을 위한 제어방식

강유정, 박성준*, 안진우
경성대, 동명대*

A Study on the Four Quadrant Operation of SRM Drive

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

ABSTRACT

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 are complicated up to the present. This paper proposes reference current limitation strategy for stable generation and switching angle control in motoring mode. The proposed method is verified by simulation and experiments.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 펄스형의 여자 전원에 의한 고정자와 회전자의 릴럭턴스 토 오르크를 이용하는 전동기구로써, 기계적인 구조가 매우 간단하고 견고하다. 또한 다른 전동구에 비하여 효율이 높고, 단위 체적당 발생토크가 크고, 기동특성이 직류직권전동기와 같은 특성을 갖고 있다. 따라서 SRM은 견인특성이 좋으며 고속회전 특성이 우수하여 견인용 전동기구와 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 결정되어 진다. 역기전력을 형성하는 항 중에서 속도는 상전류 및 인덕턴스의 변화에 비하여 상당히 큰 시정수를 갖고 있고 상 전류제어기 내에서는 상수하는 중요 항은 상 전류의 크기가 된다. 즉 SRM의 로 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 형성상 전류의 크기에 따라 역기전력성분이 직류전원보다 큰 경우가 존재한다.^{[4],[5]} 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 발전을 행함으로써 SRM이 전동모드 및 발전모드로 동작시 안정된 4상한 운전이 가능함을 실험 및 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

2. 발전영역에서의 제한전류 산정

2.1 SRM의 발전원리

SRG는 직류직권 발전기와 동일한 특성을 가지고 있다. 따라서 SRM의 발전기동작을 해석하기 위해서 우선 직류직권전동기의 발전특성을 살펴볼 필요성이 있다. 그림 1은 직류직권 발전기의 등가회로 및 특성곡선이다.

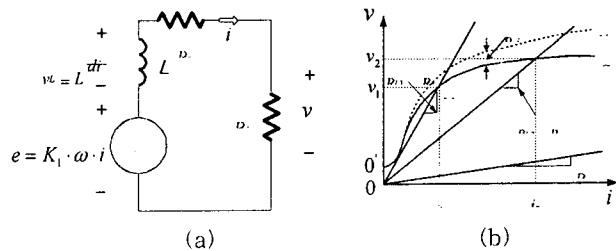


그림 1. 직류직권발전기의 등가회로 및 외부특성곡선
(a) 등가회로 (b) 특성곡선
Fig. 1. Equivalent circuit and characteristic curve of series DC generator
(a) equivalent circuit (b) characteristic curve

그림 1에서 R_L 은 부하저항이며, R_e 는 정류자를 포함한 발전기의 등가저항이고, 점선 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 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 2와 같다.

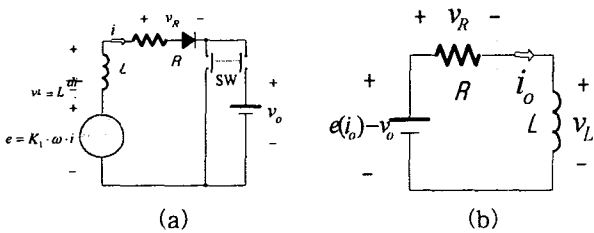


그림 2. 직류전원 연결형 직류직권발전기의구성도 및 발전모드의 등가회로
(a) 직류전원 연결형 직류 직권발전기의 구성도
(b)발전모드의 등가회로

Fig. 2. 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 직류 전원으로 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

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

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

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_1 이 상수가 아니고 식 (2)와 같이 인덕턴스 변화분으로 주어진다.

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

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 (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 범위의 지령전류를 제한하여 안정된 발전을 가능하도록 제안하였다.

2.2 시뮬레이션 결과

그림 2(a)는 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 데이터로 사용된다.

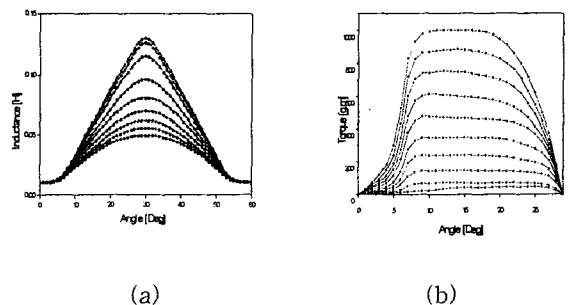


그림 2. 측정된 인덕턴스 프로파일 및 토크 프로파일
(a) 인덕턴스 프로파일 (b) 토크 프로파일
Fig. 2. Measured inductance profiles and torque profiles
(a) Inductance profiles (b) Torque profiles

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 2(b)는 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 프로파일에 의해 SRM의 시뮬레이션을 행할 수 있는 구간을 마련했다 할 수 있다.

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

그림 3은 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 제한전류의 크기 및 토크를 나타내고 있다. 저속으로 SRM 구동시에는 저령전류의 값이 정격전류에 도달하여도 상 전류는 발산하지 않지만, 속도가 고속으로 갈수록 전류의 발산확율이 높아져 각 속도에 따라 전류를 제한하여 구동해야 함을 알 수 있다.

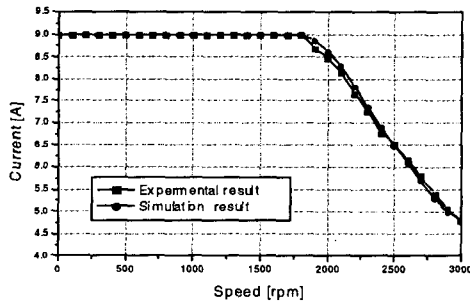


그림 3. 발전모드에서 전류가 발산되지 않기 위한 제한전류

Fig. 3. Current level limitation curve not to be divergent mode

3. 실험결과

3.1 전동모드 실험

SR기기의 전동영역 실험을 위하여 사용한 기기는 앞서 시뮬레이션에 적용했던 1.5[kW], 200[V], 3000[rpm]으로 4상의 8/6 SRM이며 부하로는 DC Motor 3.5[HP], 72[V], 5000[rpm]의 기기를 사용하였으며, 엔코더는 500 pulse 증분형 엔코더를 사용하였다. 실험은 각종 특성시험의 가변성과 편의성을 고려하여 PC기반으로 시행하였다.

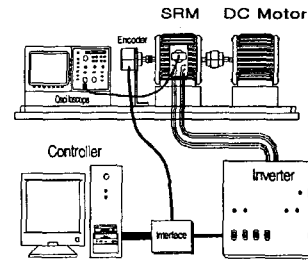


그림 4. 실험 장치도
Fig. 4. Experimental setup

그림 4는 실험장치 구성도 및 전반적인 개략도를 나타내고 있다.

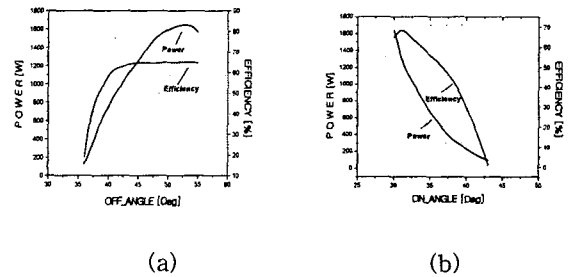


그림 5. 전동모드 1000[rpm]운전시 출력 및 효율
(a) on 각 고정(30°) (b) off 각 고정(60°)
Fig. 5. Power and efficiency of motoring mode
(a) Fixed on angle(30°) (b) fixed off angle(60°)

그림 5는 전동모드 운전시 전동기가 1000[rpm]으로 회전시 최대 출력을 내는 각도 범위에서의 출력 및 효율을 나타내고 있다.

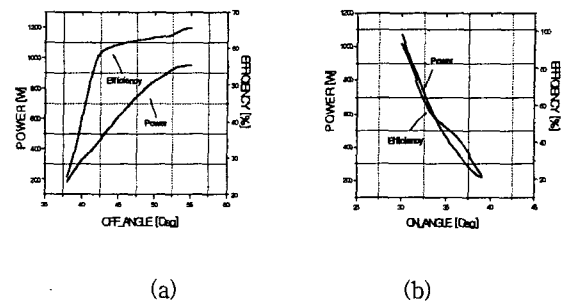


그림 6. 전동모드 1500[rpm]운전시 출력 및 효율
(a) on 각 고정(32°) (b) off 각 고정(62°)
Fig. 6. Power and efficiency of motoring mode
(a) Fixed on angle(32°) (b) fixed off angle(62°)

그림 6은 SRM이 전동모드로 1500[rpm]운전시의 출력과 그에 따른 효율곡선을 나타내고 있다. 1500[rpm] 운전역시 최대 출력에 가까운 각도 범

위에서 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.

3.2 발전모드 실험

SRM의 발전모드 운전시에는 앞에서 언급했듯이 SRM의 상 전류의 크기에 따라 역기전력 성분이 직류전원보다 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 on, off angle 에 따른 발전량을 실험을 통하여 구하였다.

그림 7은 속도별 발전량을 나타낸다.

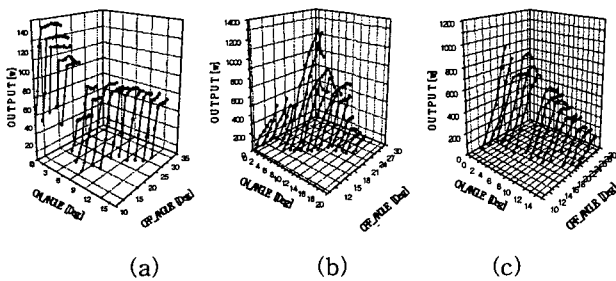


그림 7. 발전모드 운전시 발전량

(a) 1000[rpm] (b) 2000[rpm] (c) 3000[rpm]

Fig. 7. Generation energy by generation mode drive

SRM의 발전모드 운전에서는 그림 7에서 알 수 있듯이 속도가 증가함에 따라 발전량이 많아짐을 알 수 있다.

그림 7(c)는 시뮬레이션에 의한 제한전류치 보다 1[A] 더 낮추어서 실험한 결과로 에너지의 증분률이 조금 감소함을 알 수 있다.

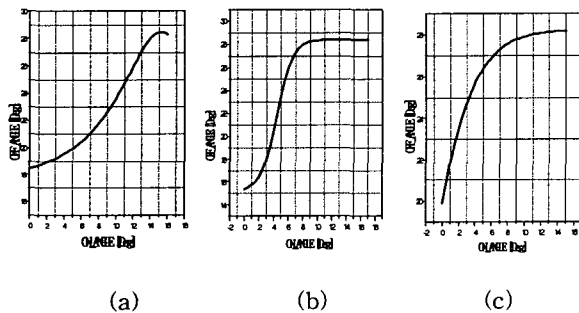


그림 8. on, off angle에 따른 상 전류 발산 영역

(a) 1000[rpm] (b) 2000[rpm] (c) 3000[rpm]

Fig. 8.

(a) 1000[rpm] (b) 2000[rpm] (c) 3000[rpm]

그림 8은 SRM의 발전영역 운전시 스위칭 각도에 따른 발산하지 않는 최대 영역을 그래프로 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 상 전류의 발산영역은 1° 단위로 매우 민감하게 반응하는 것을 알 수 있기에 SRM을 발전기 영역으로 운전시에는 매우 정밀한 on, off angle의 선정이 필수임을 알 수 있다.

또한 실험결과로부터 SRM 발전영역 운전시에는 고속으로 갈수록 회수되는 에너지가 많음을 알 수 있으며, 최대 발전량을 갖는 angle은 off각을 고정 시 고속으로 갈수록 드웰이 앞당겨 짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 SRM을 전기자동차등과 같은 견인용 전동기기로 사용하게 될 경우 안정된 전동기 모드 및 발전기 모드로 운전하기 위한 SRM 4상한 운전 에 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 인덕턴스 프로파일과 토크 프로파일을 근거로 하여 시뮬레이션을 행하였다. 이 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도에 따른 상전류 지령치의 안정영역을 구하였으며 이 안정영역 내에서 전류지령치를 형성하여 그 지령치 내에서 on, off 각도제어를 하여 제동 및 발전시 안정된 동작을 행함으로써 SR 기기의 전동기 동작 및 발전기 동작의 4상한 운전이 안정적으로 행하여짐을 실험을 통하여 입증하였다.

이 논문은 목적기초 R0-2001-00300-0 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Arthur Radun, "Generating with the Switched Reluctance Motor", Proceedings APEC. pp. 41-47, 1994.
- [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, "SRM drive의 새로운 제동제어에 대한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 43-45, 2002.
- [5] 강유정, 박성준, 안진우 "SRM의 안정된 발전을 위한 지령전류 제한에 관한 연구", 대한전기학회 부산지부, pp. 6-10, 2002.