

스위칭각 변화에 따른 SRG 정전압 및 토크 특성

오재석, 오주환, 권병일
한양대학교

The Characteristics of SRG's Constant Voltage And Torque
According to Change Switching Angle

Jae Seok Oh, Ju Hwan Oh, Byung il Kwon
Hanyang University

Abstract - The SRG(Switched Reluctance Generator) consists of simple stator and rotor. The advantage of SRG is very endurance and low cost. Because of SRG have no magnetic, So we should obtain current of magnetic to stator. But in this step SRG have disadvantage. Disadvantage of SRG is more torque ripple, vibration and noise than other machines. This paper shows the simulation of SRG with 3phases, 6 stator poles and 4 rotor poles. We intpret the characteristics of SRG's constant voltage and torque ripple according to change switching angle.

2. SRG 및 발전과정

2.1 SRG의 구조

SRG는 그림 1과같이 회전자와 고정자 모두 돌극형으로 이루어져 있다. 고정자는 간단한 집중권이고, 회전자에는 어떠한 계자성분이 없다. 그렇기 때문에 동기발전기에 비하여 가격이 낮고, 발전기 효율면에서도 회전자의 저항손이 존재하지 않으므로 유리한점을 갖는다. 그러나 SRG는 DC전류를 상권선에 인가하여 발생된 기전력에 의해 발전을 하므로, 이로 인한 토크 리플과 전자기적인 소음진동이 발생하는 큰 단점을 지니고 있다.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 발전기(SRG: Switched Reluctance Generator)는 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)를 발전모드로 동작하여 발전기로 사용하기 때문에 SRM과 동일한 단순 돌극형 구조이며 영구자석을 가지고 있지 않기 때문에 내구성이 뛰어난 장점을 지니고 있고 4상한 동작이 모두 가능하여 SRG로써 응용이 가능한 발전기이다 [1]-[2]. 하지만 회전자에 계자성분이 없으므로 고정자에 계자분 전류를 인가해야한다. 따라서 계자분 전류를 공급해 주기위해 크게 두가지 동작으로 나누어 볼 수 있다. 스위치가 온(on)할 때 전원을 자상에 인가시키는 동작과 오프(off)할 때 프리휠링 다이오드를 통해 발전된 전류를 전원으로 회생시키는 발전 동작으로 구분할 수 있다. 이때 발생하는 전자기적인 비선형과 스위칭 방법에 따라 토크 리플 및 진동소음이 타 발전기보다 매우 크다[3].

SRG모드로 변환하여 발전기로 이용할 경우 소비부하 전력 변화에 따라 계자분 자속을 변환 시켜줘야 한다. 이 소비부하전력에 따라 자속변화는 SRG 스위칭각에 따라 발생하거나 속도를 가변하여 발생하게 한다[4]. 기존에는 고속영역을 이용하여 인덕턴스하강부분에서만 스위칭 온(θ_{on})과 오프(θ_{off})동작을 수행하여 최대의 발전효율을 얻었다[5]. 이 경우에는 일정한 부토크 발생만을 발생하게 된다. 하지만 고속영역이 아닌 정격속도에서 발전할 경우 최대 발전효율을 얻기 위해 스위칭 온(θ_{on})각을 앞으로 당겨 인덕턴스 상승구간을 이용하게 된다. 이때 정토크가 발생되고 또한 부토크가 발생되어 토크가 급변하는 지점이 발생되어 진동 및 소음에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 SRG 샤프트에 연결된 커플링의 손상 및 기계적 손실을 나타낼수 있는 우려가 크다.

본 논문에서는 SRM 정격속도영역에서 SRG로 동작할 경우 스위칭 온(θ_{on})·오프(θ_{off})각 변화에 따른 토크와 충전전압간의 상관관계를 고찰하였다.

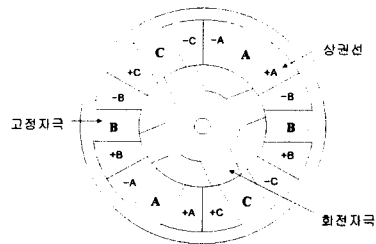


그림 1 SRG의 구조(6/4)

표 2 6/4 SRG 모델사양

고정자 극수	6	고정자 극호	30[deg]
회전자 극수	4	회전자 극호	30[deg]
고정자 상수	3	고정자 요크폭	16[mm]
상권선 저항	72.5[Ω]	회전자 요크폭	10[mm]
상 최소 인덕턴스	0.025[H]	상 최대 인덕턴스	0.295[H]
정격출력	50[W]	정격 토크	0.34[Nm]

2.2 SRG의 구동회로

SRG는 영구자석이 없으므로 배터리의 잔류전압을 이용한 자여자 방법과 일정한 DC기동전원을 이용하는 타여자 방법이 있다[6]. 본 논문에서는 그림 2와 같이 타여자 방식을 이용한 SRG 컨버터를 사용하였다. 타여자방식은 기동전원과 연결되어 단자전압을 상권선에 유지하고, 발전시에는 발전전압이 기동전원보다 커지므로 다이오드가 역바이어스되어 발전전압과 분리된다.



그림 2 타여자방식을 이용한 구동회로

2.3 SRG의 동작원리

그림 3은 SRG 한상에 대한 회생전류 발생과정을 나타내었다. 동작원리는 계자분 자속을 생성시켜야하는 여자 구간과 발생된 자속으로 발전시키는 발전구간으로 크게 나눌 수 있다. 여자구간은 스위칭 온(on)시켜 DC기동전원으로 SRG에 인가하여 여자한 후에 스위치를 오프(off)시킨다. 발생된 계자분 자속을 이용하여 인덕턴스가 시간에 대하여 음의 기울기를 가지는 구간에서 발전전류를 회생한다. 이 과정에서 DC기동전원은 충전되는 배터리 전원보다 낮은 전압을 갖게 되므로 공급되지 않는다. 이러한 동작은 그림 3과 같이 이루어진다. 두개의 스위치 Q_1, Q_2 를 여자구간 θ_{on} 에서 θ_{off} 까지 도통하여 SRG에 계자분 자속량을 충분히 만든다. 충분히 발생된 자속은 스위치가 오프(θ_{off})되면 발전구간 $\theta_{off} \sim \theta_{ext}$ 까지 발전되어 전류가 프리휠링 다이오드를 통하여 배터리에 충전된다. 이때의 배터리는 여자동작 시 여자전원으로 사용되고 또한 발전된 에너지를 저장하는 역할을 동시에 수행한다[7].

그림 3에서 I_1 구간의 등가회로는 그림 3(a)가 된다. 이때 전류는 식 (1)과 같다.

$$V = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{dL}{d\theta} \omega i^2 \quad (1)$$

이때 인덕턴스의 기울기는 양의 값을 가지므로 전류의 기울기는 발생하는 역기전력으로 크게 상승하지 못한다. I_2 구간의 등가회로는 그림 3(b)와 같고 이때 전류는 식 (2)와 같다.

$$V = iR + L \frac{di}{dt} - \frac{dL}{d\theta} \omega i^2 \quad (2)$$

이때는 인덕턴스 기울기가 음의 값을 가지므로 전류의 기울기는 발생하는 역기전력으로 크게 상승시킬 수 있는 구간이다. I_3 구간은 충분한 환류자속을 이용하여 프리휠링 다이오드 통하여 전류를 회생시키는 구간이다. 이때 발생하는 전류는 식(3)과 같다.

$$-V = iR + \frac{d\psi}{dt} - \frac{d\psi}{d\theta} \omega i \quad (3)$$

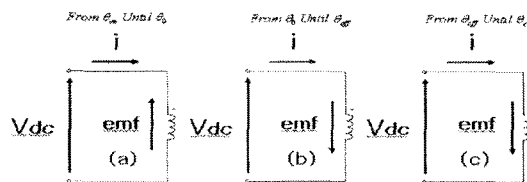
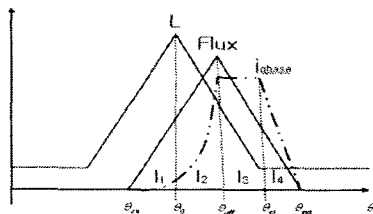


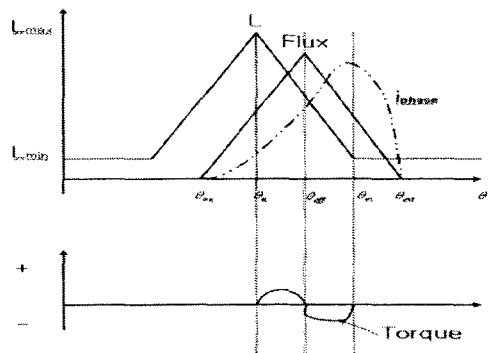
그림 3 SRG의 발전동작원리

3. SRG의 스위칭각에 따른 토크 및 전류특성

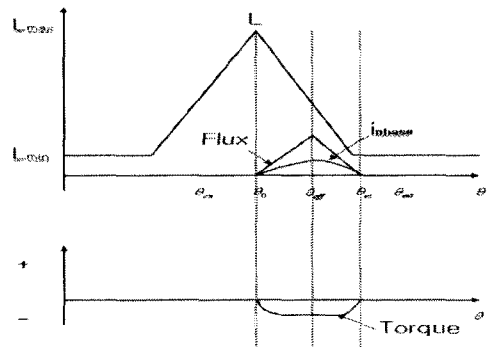
그림 4(a)는 부하소비전력이 큰 경우 충분히 여자전류를 공급했을 경우이다. 스위치를 온(θ_{on})후에 스위치를 오프(θ_{off})한 경우이며 이때 발생하는 회생전류는 여자전류보다 크지만 토크는 정토크와 부토크가 모두 존재한다.

그림 4(b)는 부하소비전력이 적은 경우 적은 여자전류를 공급했을 경우이다. 이때는 충분한 여자를 시키지 않아도 되므로 SRM동작모드 구간을 이용하지 않아도 되며 이때 발생하는 여자전류는 크지 않고 토크도 부토크만 발생되게 된다.

따라서 회생되는 전류량은 고정자에 잔류자속 양에 따라 좌우되므로 온(θ_{on})·오프(θ_{off})각에 따라 결정된다. 실제로 발전되는 전류는 여자전류를 뺀 만큼의 전류이므로 SRM 동작모드 영역을 사용한 만큼 순시무효전력은 더 커지게 된다.



(a) 부하전력 많은 경우 전류 및 토크 특성



(b) 부하전력이 적은 경우 및 토크 특성

그림 4 부하전력에 따른 전류 및 토크 특성

4. 시뮬레이션 및 고찰

SRG에서 정전압 및 진동소음은 스위칭각에 의해서 많은 영향을 받으므로 스위칭각 변화에 따른 정전압 및 진동소음특성을 알아보기 위해 SRG 구동회로를 고려하여 시뮬레이션이 가능한 상용해석 tool인 Ansoft EM 2D를 이용하여 해석하였다. 회전속도는 1000[rpm]이고 소비부하전력은 일정하다고 가정하였다. 이때 그림 3에서 스위칭 온(θ_{on})각과 오프(θ_{off})각을 변화시켜 발생하는

평균 토오크와 동일한 시간 때 배터리에 저장되는 전압을 비교하여 SRG의 출력특성을 크게 저하시키지 않으면서 진동 및 소음을 저감할 수 있는 스위칭각을 고찰하였다. 그림 5와 그림 6은 스위칭 온(θ_{on})각과 오프(θ_{off})각을 통해서 SRG의 평균 토오크와 동일한 시간 때 배터리에 저장된 전압의 평기를 산정한 그래프이다. 그래프에서 온(θ_{on}), 오프(θ_{off})각은 모두 기계각으로 표현되었으며, 여기서 (θ_{on})각에 0° 는 그림 3에 θ_o 인 고정자극과 회전자극이 일치한 경우이다. 5° 는 그림 3에서 정렬된 기준위치에서 반대방향으로 5° 앞선 인덕턴스 상승구간영역 I_1 구간을 말한다. 그리고 오프(θ_{off})각 30° 은 그림 3에서 인덕턴스 하강구간이 끝나는 지점 θ_{ext} 구간이다. 즉 최소인덕턴스의 지점이며, 10° 는 인덕턴스 최소값 구간 30° 에서 반대방향으로 10° 앞선 인덕턴스 하강구간 I_3 을 가리킨다.

그림 5는 음(-)의 평균 토오크가 큰 경우 음의 부토오크 방향으로 토오크 발생빈도가 큰 경우이다. 적은 경우는 양(+)의 정토오크와 부토오크 발생이 모두 발생하는 경우이다. 스위칭각 온(θ_{on})각이 0° 이고 오프(θ_{off})각이 30° 인 경우 평균 토오크는 매우 크고, 온(θ_{on})각이 5° 이고 오프(θ_{off})각이 10° 인 경우 평균 토오크는 최소가 되어 정토오크 및 부토오크가 순시적으로 발생하게 된다.

그림 6은 같은 방법으로 일정시간동안에 배터리에 충전되는 전압을 그래프로 나타낸 것이다. 그 결과 스위칭각 오프(θ_{off})각이 10° 인 경우 온(θ_{on})각에는 많은 영향을 미치지 못하고 그때 발생된 전압은 아주 적다. 하지만 스위칭 오프(θ_{off})각이 30° 이고 온(θ_{on})각이 5° 인 경우 충전전압이 크게 발생됨을 알 수 있다. 그 결과 스위칭 온(θ_{on})각의 변화에 따라 상권선에 역기전력의 변화로 전류의 상승률은 크게 변하지 않고 음(-)의 기울기를 갖는 인덕턴스 구간에서 충분한 자속이 발생되어 충전이 이루어지기 때문에 오프(θ_{off})각이 커야 충전전압이 크다는 것을 살펴볼 수 있었다.

그림 5와 그림 6을 비교함으로써 SRG의 토오크 및 충전전압 양상을 분석할 수 있다. 스위칭 온(θ_{on})각은 작을수록 오프(θ_{off})각은 클수록 토오크가 일정한 영역에서 발생되고 그때 충전전압도 발생됨을 볼 수 있다. 따라서 너무 앞선 온(θ_{on})각은 무효전력구간을 증가시키고 정토오크와 부토오크를 모두 발생시켜 토오크 리플을 크게 하는 원인이 될 수 있다.

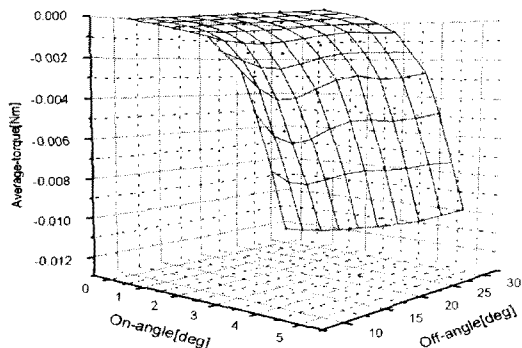


그림 5 On/Off 각의 변화에 따른 토오크 특성 곡선

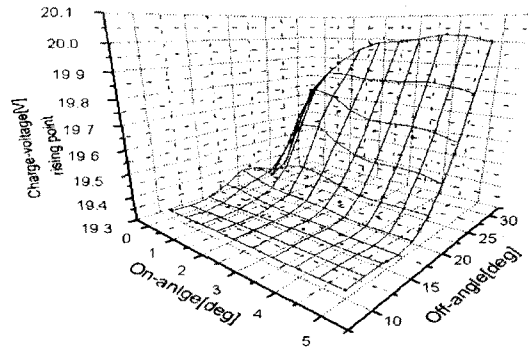


그림 6 On/Off 각의 변화에 따른 충전전압 특성 곡선

3. 결 론

본 논문에서는 6/4 SRG를 대상으로 외부회로와 FEA를 이용하여 스위칭각 변화에 따른 SRG의 토오크 및 정전압 특성을 고찰하였고, 일정한 속도에서 토오크 리플을 줄이고 일정시간동안에 충전전압 상승률을 크게 할 수 있는 스위칭 각(θ_{on} , θ_{off})을 결정하였다. 스위칭 온(θ_{on})각은 작을수록 즉 0° 에 가까울수록 오프(θ_{off})각은 클수록 즉 30° 에 가까울수록 토오크가 일정한 영역에서 발생되고 그때 충전전압도 발생됨을 볼 수 있다. 그 결과 본 논문에서 고찰된 SRG의 진동 및 소음 그리고 충전전압 특성분석은 SRG 제어시 발전기 성능을 저하시키지 않으면서 진동 및 소음을 저감할 수 있는 참고자료로 사용할 수 있으리라 사료되고, SRG 설계측면에서도 자기구조 형상변화 시 참고자료가 될 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- [1] M. Besbes, C. Picod, F. Camus, M. Gabsi, "Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors," IEEE proceeding Elctro Power Application, vol. 145, pp. 462-468, 1988
- [2] C. G. C. Neves, et al, "Vibrational behavior of switched reluctance motors by simulation and experimental procedures," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, pp. 3158-3161, 1998
- [3] Philip C. Kjaer, Jeremy J. Gribble, Timothy J.E. Miller, "High grade control of switched reluctance machines," IEEE Transactions On Industry Applications, vol. 33, pp. 1585-1593, 1997
- [4] Hao Chen, Chao Mang and Xucheng Zhao, "Research on the switched reluctance wind generator system," IEEE Systems, Man, and Cybernetics, vol. 3, pp.1936-1941, 2001
- [5] Erkan Mese, Yilmaz Sorzer, James M. Kokernak, David A. Torrey, "Optimal excitation of a high speed switched reluctance generator," IEEE Applide Power Electronic Conference and Exposition, vol.1, pp.362-368, 2000
- [6] Young Jo Kim, Sung Bo Oh, and Young-Seok kim, "The Position Sensorless Control of SRG using the Instantaneous Flux," The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics, vol.7 pp.472-481, 2002
- [7] P.P. de paula, W.M.da Silva, J.R.Cardoso and S.I.Nabeta "Assessment of the Influences of the Mutual Inductances on Switched Reluctance Machines Performance," IEEE Electric Machine and Drives Conference, vol.3, pp.1732-1738, 2003