

Switched Reluctance Motor의 스위칭각 조절에 의한 가변속 구동특성

황종규 공관식* 황영문
부산대학교

Variable speed drive of a Switched Reluctance Motor
by adjusting switching angles

Jong-Kyu Hwang Gwan-Sik Kong* Young-Moon Hwang
Pusan National University

Abstract

Inherent speed-torque performance of Switched Reluctance Motor is similar to that of series wound DC motor. Thus, the speed of the motor is extremely regulated according to load torque. For the purpose of controlling the speed and torque of SRM it is necessary to change the applied DC link voltage or the switch-ON and switch-OFF angles which control the phase current of the motor.

This paper describes speed-torque characteristics of an integral horse power Switched Reluctance Motor by adjusting the switch-ON and switch-OFF angles. Speed at rated load torque can be regulated by adjusting the switching angles and the control scheme is applied to 2kW, 3 phase, 6/4 SRM.

1. 서론

직류기, 유도기 및 동기기동의 일반 회전자가 고정자와 회전자간의 Mutual 토오크를 이용하는 반면, Switched Reluctance Motor(SRM)는 인덕턴스의 변화에 의한 상의 톨럭턴스 토오크를 이용하는 전동력기구로서 상의 인덕턴스가 증가하는 구간에서는 양의 토오크를, 감소하는 구간에서는 음의 토오크를 발생한다.

SRM의 토오크의 이용을 극대화하기 위해서는 상의 인덕턴스가 증가하는 구간에서만 전류를 흐르게 하여 양의 토오크만 발생하게 해야하므로 SRM의 회전자의 위치각에 따른 상전압의 스위칭이 필요하다. 그러므로 SRM을 구동하기 위하여 회전자의 위치각에 대한 검출이 요구된다.

SRM의 고유한 속도-토오크특성은 기존의 직류직전동기와의 유사하여 부하에 대한 속도의 변동율이 매우 크기 때문에 SRM을 가변속 제어시스템에 적용하기 위해서는 외부로 부터의 적절한 속도-토오크 제어기법이 요구된다.

본 연구에서는 SRM을 가변속 구동하기 위한 방법으로 회

전자의 위치각에 따른 인가전압의 스위칭각을 연속적으로 순시 조정하는 제어방식을 제안하였다. 토오크를 생성하는 상전류 제어를 위하여 스위칭각의 조절에 의한 가변구동특성을 실험적으로 고찰하였으며, 실제 제작된 2kW급 3상 6/4 SRM의 실험결과를 통하여 광범위한 속도-토오크 영역에서 구동됨을 확인하였다.

2. 스위칭각의 제어에 의한 가변속 SRM Drive

2.1 상전류와 토오크

SRM의 토오크 T는 자기적인 Coenergy를 W', 회전자의 위치각을 θ 및 상전류를 i라 할 때,

$$T = \frac{\partial W'(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

이며 고정자와 회전자간의 상호인덕턴스가 없다고 가정하면 토오크는 전류의 제곱과 인덕턴스 L의 변화분과의 곱으로서

$$T(\theta, i) = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

와 같이 된다.

SRM의 인가전압의 스위칭은 토오크 이용의 극대화를 위하여 전동기 상의 인덕턴스가 증가하는 구간에서만 전류가 흐르게 하는 것이 바람직하며, 그림 1과 같이 전류의 충분한 확립을 위하여 인덕턴스가 증가하기 시작하는 점인 θ_2 보다 앞선 θ_{on} 에서 Switch-ON하고 Switch-OFF후의 전류지연으로 인한 음의 토오크 발생방지를 위하여 인덕턴스 증가가 끝나는 점인 θ_1 보다 앞선 θ_{off} 에서 Switch-OFF해야 한다.

실제의 전동기에서는 인덕턴스 최소구간($\theta_1 \sim \theta_2$)에서의 철심 끝단의 자속누설현상과 상전류의 증가에 의한 자기포화현상 때문에 인덕턴스가 비선형적이고 그에 따른 상전류도 비선형이 된다. 그러므로 토오크 발생에 있어서 주요한 파라메타인 인덕턴스와 상전류에 대한 예측은 매우 중요하며 [1][3][6]등에서 연구되어 왔다.

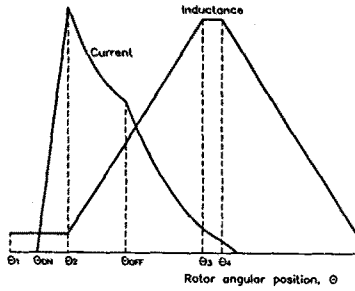


그림 1 인덕턴스 프로파일과 상전류

SRM의 한 상에 대한 전류 i 의 해를 구하기 위한 전압 등식은 전동기권선의 저항을 R , 자속쇄교를 λ 라 할 때 전압 V 는

$$V = R \cdot i + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

와 같다. 이 식으로 부터 전류에 관한 해를 구할 수가 있으며 비선형인 SRM의 상전류의 해를 얻기 위하여 Lawrenson, Blenkinsop 및 Stephenson^{[1][2]} 등에 의하여 시도되어 왔다. 전압등식으로 부터 유도되는 전류식은 회전자각도와 전류의 함수인 인덕턴스 $L(\theta, i)$ 과의 관련식인

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(\theta, i)} \{ V - [R + a \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}] i \} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 ω 는 회전자의 각속도이다.

전류해를 구하기 위한 과정에서 가장 어려운 점은 자속쇄교에 포함된 비선형 인덕턴스 $L(\theta, i)$ 을 정확히 아는 것이다. 인덕턴스는 비선형적이면서 철심에 의한 히스테리시스현상까지 갖고 있기 때문에 수치해석적으로 계산할 때 정확한 절대값을 예측하기가 힘들며 주로 설계시에 상대적인 수치를 얻는 데에 만족해야 한다. 전류파형의 정확한 예측을 위하여 전류값에 따른 포화된 인덕턴스 프로필을 실험적으로 측정하면 오차를 줄일 수 있다.

SRM의 운전시에 속도-토크 제어를 위한 상전류를 조정할 수 있는 파라메타는 그림 1과 식 (4)에 의해서 알 수 있는 것처럼 인가전압 V , 스위칭각 θ_{on} 및 θ_{off} 등이다. 상전류를 제어하기 위해 인가전압 V 를 가변하려면 SRM을 구동시키기 위한 Inverter 이외에 직류전압 V 를 조정하는 전력용 Converter가 필요하므로 경제적인 면에서 바람직하지 못하다. 그러므로 속도-토크의 제어를 위한 스위칭각 θ_{on} 및 θ_{off} 의 조정방식은 기존의 시스템에 추가되는 장치가 없어서 경제적이면서도 광범위한 속도-토크 구동특성을 갖고 있다.

2.2 스위칭각의 조정에 의한 상전류제어

전압스위칭을 위한 회전자의 위치각을 검출하는 방식에는 기존의 제품으로 개발되어 있는 Absolute 및 Incremental type의 Rotary encoder가 있다. 이들은 Rotating-disk에 회

전자의 각도를 분할한 Code를 만들어 놓은 방식이며, 보통의 Rotary encoder의 분해능은 1° 정도로서 스위칭각의 조정에 의한 상전류 제어에 적용하기에는 분해능이 낮다. 그리고, 기존의 Rotary encoder는 그의 용도가 NC공작기계, 프레스기계 및 로봇트압 등의 위치제어용으로 개발되었기 때문에 속도제어용 SRM 구동시스템에 적용하기에는 스위칭용 Encoder가 전체 가격에 차지하는 비중이 커져서 적합하지 않다.

SRM의 속도-토크 제어를 위한 스위칭각 제어방식에 있어 서스위칭각의 조정을 운전중에 연속적으로 하는 것이 가장 바람직하며 이러한 성능을 갖는 것이 SRM의 Slotted-disk encoder에 의한 회전자 위치각 검출장치^[3]이다.

SRM의 회전자 위치각 검출 및 스위칭각 조정을 위해서 개발된 Slotted-disk encoder는 Disk의 형상이 매우 단순하고 검출하는 Photo coupler 센서도 한 개만 필요하므로 매우 실용적이라 할 수 있다. Slotted-disk encoder는 특히 인덕턴스의 값이 거의 변하지 않는 인덕턴스 최소구간($\theta_1 \sim \theta_2$)에서도 분해능이 높아서 인덕턴스의 값을 검출하는 FM encoder에 의한 간접 검출방식^[4]에 비하여 신뢰도가 크다고 할 수 있다.

스위칭각의 연속적인 조정에 의한 시스템의 구성은 그림 2와 같이 Variable Reluctance Motor(VRM)와 스위칭 장치인 Inverter를 포함하여 Set value controller, Slotted-disk encoder, Gate signal generator 등으로 이루어져 있다.

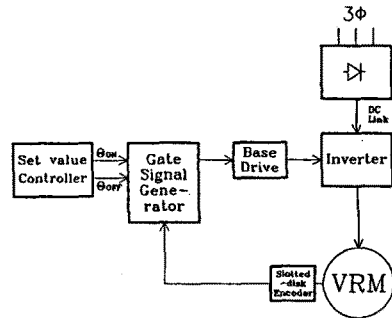


그림 2 스위칭각 제어에 의한 SRM시스템

SRM의 운전중에 스위칭의 조정기능은 Set value controller로부터 θ_{on} 및 θ_{off} 의 명령이 주어지면 Slotted-disk encoder와 Gate signal generator에 의해서 수행된다.

Slotted-disk encoder는 회전자와 형상이 유사한 Disk와 함께 Opto-Interrupter로 이루어져 회전자의 위치각에 따른 기준 펄스파를 생성한다. 본 연구에서는 회전자 1회전당 4개의 펄스파가 생성되며 펄스파의 한 주기내에 Duty ON과 Duty OFF의 비는 5:4가 되도록 하였다. 생성된 기준파가 입력되어 SRM에 양의 토크만 만들어 질 수 있도록 Gate signal generator에서 전압스위칭을 하며 상전류의 제어를 위하여 전압스위칭의 시작과 끝점인 θ_{on} 및 θ_{off} 를 Set value controller에서 제어한다.

2.3 인버터와 구동특성

SRM에 있어서 인버터에 대한 연구^{[2][5]}는 전력용 스위칭 소자의 절감 및 동작특성의 개선등의 관점에서 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 3상 6/4형 SRM을 4개의 전력용 소자를 사용하는 Common switch inverter^{[1][5]}로써 구동하였다(그림 3).

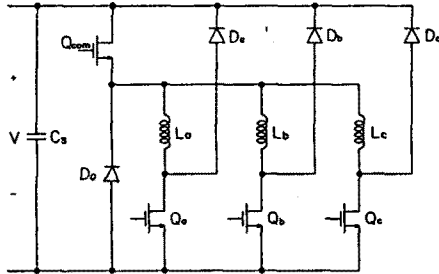


그림 3 Common switch inverter

Common switch inverter는 Classical inverter^[2]나 C-Dump inverter^[5]보다는 $\theta_{on} \sim \theta_{off}$ 사이의 조정영역이 다소 제한되지만 6/4 SRM의 경우에 전력용 스위칭 소자 2개와 Dump용 Capacitor가 절감되는 장점을 갖는다.

조정 가능한 $\theta_{on} \sim \theta_{off}$ 사이의 스위칭영역은 전동기의 권선 수, 공극의 길이, 고정자와 회전자 극의 기계적 각도등의 전동기의 설계시에 충분히 고려되어야 하며, 전동기의 회전수에 의해서도 영향을 받는다.

3. 실험결과 및 고찰

실험은 두가지의 경우에 대하여 수행하였으며, 1)정격 부하토크인 80kg.cm 에서 스위칭각 조정에 의한 가변속 구동특성과 2)2000rpm의 일정속도 조건에서 스위칭각 조정에 의한 토오크 가변 구동특성에 대한 실험을 하였다. 실험에 사용하기 위해 제작된 SRM의 사양은 표 1 과 같다.

표 1 설계된 SRM의 사양

○ 정격 출력	2 kW
○ 전 압	250 VDC
○ 전 류	9 ADC
○ 정격 토오크	80 kg.cm
○ 고정자 극수	6 극
○ 회전자 극수	4 극
○ 최소 인덕턴스	5 mH
○ 최대 인덕턴스	60 mH

3.1 정격 부하토크에서의 가변속 구동특성

부하 토크는 정격인 80kg.cm으로 일정하게 하면서 스위

칭각 θ_{on} 과 θ_{off} 를 변화시키면 속도가 변하므로 θ_{on} 과 θ_{off} 에 대한 속도 및 동작점에서의 효율을 측정한 결과를 그림 4에 나타내었다.

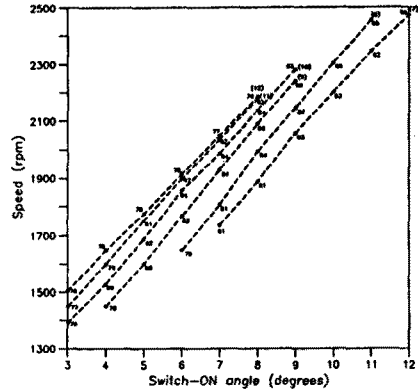


그림 4 정격 부하토크에서의 스위칭각에 따른 속도특성

그림 4의 상단의 괄호안에 표시한 숫자는 Switch-OFF각을 최소인덕턴스가 끝나는 지점인 θ_2 를 기준으로 한 $(\theta_{off} - \theta_2)$ 의 값이며, 횡축에 표시된 Switch-ON각은 $(\theta_2 - \theta_{on})$ 의 값이다. 각 동작점의 옆에 표시한 숫자는 그 점에서의 효율을 계산하여 나타내었다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 정격 부하토크에서 스위칭각의 조정에 의한 가변속 범위는 약 1400rpm 로 부터 2500rpm 까지이고 θ_{on} 은 $3^\circ \sim 12^\circ$, θ_{off} 는 $7^\circ \sim 12^\circ$ 의 조정영역을 나타낸다. 속도가 높은 영역에서는 θ_{on} 과 θ_{off} 사이가 넓게 되어야 하므로 Demagnetizing 할 때 전류의 소화가 불가능한 현상을 일으킬 우려로 인한 속도의 제한을 받았고, 속도가 낮은 영역에서는 요구하는 정격토크를 생성하기 위하여 좁은 스위칭구간 ($\theta_{on} \sim \theta_{off}$)때문에 전류의 최대치가 커져 스위칭소자의 피손 우려로 인한 속도의 제한을 받았다. 각 동작점에서 계산된 효율특성을 살펴보면 Switch-OFF각이 약 $8^\circ \sim 9^\circ$ 일 때 가장 좋은 것을 알 수 있다.

3.2 일정속도제어를 위한 스위칭각 조정

부하토크가 무부하에서 전부하로 가변할 때 전동기의 속도를 2000rpm으로 일정하게 하기 위하여 스위칭각 θ_{on} 과 θ_{off} 를 조정하였다. 일정속도로 운전하기 위한 적정 스위칭각을 그림 4 로 부터 알 수 있으며 각 동작점에서의 전류파형을 관측한 결과가 그림 5, 그림 6 에 나타나 있다.

그림 5는 Switch-OFF각을 9° 로 놓았을 때 가변부하조건에서 전동기의 회전속도를 2000rpm으로 운전하기 위한 Switch-ON각을 조정한 경우로서 그 때의 전류파형을 관측한 결과이다. 스위칭각의 연속적인 조정이 가능하므로 요구하는 가변 부하토크에 대하여 정확한 동작점을 맞출 수가 있었다. 무부하로

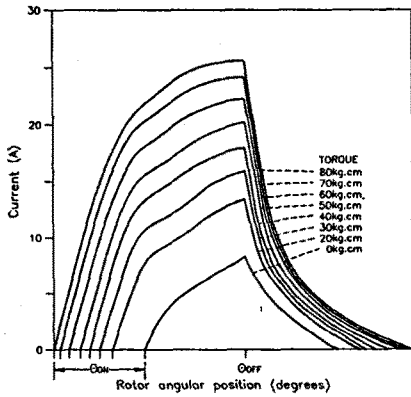


그림 5 가변 부하에서 일정속도제어를 위한 전류파형

부터 정격 부하토크인 80kg.cm까지로 조정하기 위한 Switch-ON각의 범위는 약 0° ~ 7.5° 까지 이다.

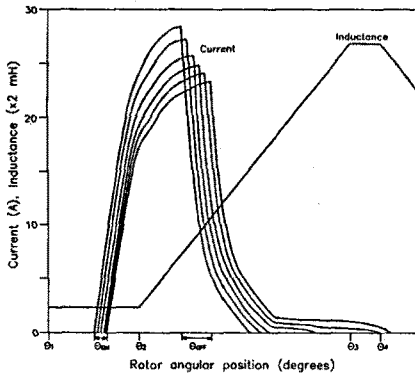


그림 6 정격부하토크, 일정속도에서의 전류파형

그림 6은 정격 부하토크 80kg.cm, 회전속도 2000rpm이 되는 동작점에서 스위칭각의 조합이 '여러가지로 될 수 있다는 것을 보여준며, 이 동작점을 만족시키는 스위칭각의 가변범위는 Switch-OFF각이 7° ~ 12°로 변할 때 Switch-ON각은 8.37° ~ 6.24°로 조정된다. 이러한 특성은 운전시의 효율을 향상 시키거나 소음을 줄이기 위한 목적으로 이용할 수 있다.

4. 결론

SRM을 가변속 구동하기 위한 운전중의 연속적인 스위칭각 조정방식을 제안하였다. 스위칭각의 조정을 위한 부가되는 장치는 없으며 기존의 SRM의 전압스위칭을 위한 회전자 위치각 검출기구에 Slotted-disk encoder를 사용함으로써 연속적인 스위칭각의 조정이 가능하였다.

실험을 위하여 설계 제작된 2kW급 3상 6/4 SRM에 적용한 결과 운전중에 스위칭각이 연속적으로 조정되는 것을 확인 하

였고 속도의 증감시에도 안정하게 운전할 수 있었다. 정격 부하토크에서 가변속의 범위는 약 1400rpm 에서 2000rpm 까지이며 각 동작점에서 전류파형과 효율을 측정하여 분석하였다.

연속적으로 가변하는 전동기의 부하에 대하여 보다 더 광범위한 속도영역에서 운전이 가능하였으며 스위칭각의 조정에 의한 전류파형을 관측하였다. 임의의 속도-토크 동작점에서의 스위칭각의 경우의 수는 여러가지이며 이러한 특성을 이용하여 효율의 개선이나 소음수준을 경감시키는 제어를 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J. Corda and N.N.Fulton., "Variable-Speed Switched Reluctance Motors" IEE Proc. B, Vol.127, No.3, pp.253-265, 1980.
- [2] Slobodan Vukosavic, Victor R.Stefanovic., "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation" IEEE trans. on IA, Vol.27, No.6, Nov/Dec, 1991.
- [3] STEPHENSON, J.M., and CORDA, J.: "Computation of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetisation data", Proc. IEE, 126, (5), pp393-396, 1979
- [4] Mehrdad Ehsani, Iqbal Husain and Ashok B.Kulkarni: "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched-Reluctance Motor Drive" IEEE Trans. on IA, Vol.28, No.1, Jan/Feb, 1992.
- [5] Vladimir Blasko, and Thomas A. Lipo: "A Modified C-Dump Converter for Variable-Reluctance Machines" IEEE Trans. on IA, Vol.28, No.5, Sep/Oct 1992.
- [6] 공관식, 황영문 외 "Switched-Reluctance Motor에서 인덕턴스 프로파일 따른 토크 특성", 대한전기학회 '92 하계종합학술대회 논문집 part A.
- [7] 공관식, 황영문 외 "SRM Drive 의 Analogue Switching 방식에 대한 고찰", 대한전기학회 '93 전력전자연구회 논문집