

고속회전을 위한 Switched Reluctance Motor의 Advance Angle 변화에 따른 특성해석

조 관열[○], 임 준영, 신 두진, 김 창현, 김 정철
LG 전자, 생활 시스템 연구소

Speed Characteristics of Switched Reluctance Motor
at High Speeds with Advance Angle Variation

K. Y. Cho, J. Y. Lim, D. J. Shin, C. H. Kim, and J. C. Kim
LG Electronics Inc., Living System Lab.

Abstract

Switched reluctance motors and drives are increasingly used in high speed applications due to their robust mechanical structures, low inertia, and reduction in the rotor losses. The turn-on angle has to be advanced as the motor speed increases, but it may cause the starting problem in some rotor positions. In this paper, the characteristics of the maximum speed and input voltage with the advance angle at high speeds is investigated. To overcome the starting problem and reduce the torque ripple, conduction overlapping is added in adjacent phases. The effectiveness of conduction overlapping is verified through the simulation and experiments.

1. 서론

산업 및 가전에서의 고속용 전동기로는 제어의 용이성으로 인해 주로 정류자 전동기(universal motor)가 사용되고 있다. 그러나 정류자 전동기는 회전자의 권선에 의해 관성 모멘트(inertia moment)가 크고 고속으로 회전시 balancing의 문제가 있다. 또한 정류자 전동기는 기계적 정류(mechanical commutation)에 의한 브러쉬(brush)와 정류자(commutator)의 마모에 따라 전자적 정류(electronic commutation)를 하는 전동기에 비해 수명이 짧다. 브러쉬없는 직류 전동기(brushless dc motor)는 고속회전에 의한 영구자석(permanent magnet)의 비산방지 문제 및 과전류나 열에 의한 영구자석의 감자(demagnetization) 현상이 일어날 수 있다. 반면에 switched reluctance motor는 회전자에 권선이나 영구자석이 없으므로 구조가 간단하고 기계적으로 안정되어 있어 고속용으로 적합하다. 또한 전동기 및 drive의 가격면에서도 브러쉬없는 직류 전동기에 비해 낮고 drive 회로의 구성상 inverter의 arm-short와 같은 문제점이 없어 신뢰성이 높다[1, 2].

Switched reluctance motor를 고속으로 운전하기 위해서는 인덕턴스가 증가하는 구간에서 전류가 흐르게 하기 위해서 상전류를 빨리 build up 시키고 상 스위치의 turn off시 권선에 남아있는 전류를 빨리 감소시켜야 한다. 이를 위해서는 상 스위치를 turn on 시키는 advance angle을 크게 해야 한다[3, 4]. 그러나 advance angle이 어느각 이상 커지면 기동시 회전 토크를 발생시키지 못하는 구간을 포함하게 되어 기동이 되지 않는 문제가 발생하게 된다. 이런 문제점은 속도에 따라 advance angle을 조절하거나 기동회로를 첨가함에 따라 해결할 수 있지만 이는 drive의 가격을 상승시킨다. 본 논문에서는 advance angle에 따른 입력 전압 및 최대 속도에 대해 고찰하고, 고속으로 회전시 advance angle에 의해 발생하는 starting 문제를 해결하기 위하여 상 스위치의 conduction overlapping에 의해 기동 토크를 크게 하여 기동시키는 방법에 대해 실험 및 simulation을 통하여 고찰한다.

2. 고속회전을 위한 Advance Angle 및 Conduction Overlapping

Switched reluctance motor의 기본적인 구조는 고정자와 회전자가 돌극(salient pole) 구조로 되어 있고, 고정자에만 권선이 감겨 있다. 그림 1은 6/4 구조인 3상 switched reluctance motor의 상 인덕턴스 및 상 여자신호(gating signal)를 나타낸다. 회전자의 위치에 따라서 각 상의 인덕턴스가 변하며 고정자 권선에 전류를 가하면 자기회로의 인덕턴스를 크게하는 방향으로 토크를 발생시킨다. 각 상의 기본 도통각(conduction angle)은 30°이며 1회전시 각 상에는 4회의 도통구간이 존재한다. Switched reluctance motor의 전압 및 토크 식은 core가 포화(saturation)가 되지 않았을때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + \omega i \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

Switched reluctance motor의 전기적 토크는 식 (2)에 주어진 바와 같이 상 전류의 흐르는 방향에는 관계없고 전류의 크기 및 상 인덕턴스의 회전자 위치에 대한 변화량에 비례한다. 인덕턴스가 증가하는 구간에서는 정 토크(positive torque)가 발생하고 인덕턴스가 감소하는 구간에서는 역 토크(negative torque)가 발생한다. 토크를 크게 하기 위해서는 인덕턴스가 증가하기 전에 미리 전류를 증가시켜 인덕턴스가 증가하는 구간에서 최대 토크를 발생하게 하여야 한다. 또한 역 토크의 발생을 방지하기 위해서는 인덕턴스가 감소하는 구간에서 전류가 흐르지 않도록 전류를 빨리 감소시켜야 한다. 이를 위해서는 상 스위치를 정상적인 turn on 시간보다 미리 turn on 시켜야 하며 스위치의 turn on 각은 advance angle로 조정한다. 그림 1(b), (c)에 나타난 바와 같이 advance angle은 상 스위치의 turn on 각이 normal conduction angle(γ)보다 앞선 각의 크기(α)로 정의한다. 최대 토크를 발생하기 위한 advance angle은 상 전류의 크기 및 회전자 속도에 따라서 변한다. 특히 고속으로 운전시 발생하는 토크는 advance angle에 의해 많은 영향을 받으며 switched reluctance motor를 고속으로 운전하기 위해서는 advance angle을 크게 하여야 한다. 그러나 고속 운전을 위하여 advance angle을 너무 크게 설정해 놓으면 전동기의 회전자를 처음 기동시킬때 회전자의 위치에 따라서 어느 구간에서는 기동이 되지 않거나 또는 반대로 회전하는 경우가 발생한다. 그림 1(b)에서 회전자가 P_A 근처에 있을때 A상을 여자시키면 토크는 매우 작아 회전자를 구동시킬 수 있는 회전력을 발생시키지 못한다. 6/4구조에서 advance angle이 15° 보다 작은 경우에는 P_A 를 포함하지 않으므로 기동상의 문제가 발생하지 않지만 advance angle이 15° 보다 큰 경우에는 A상 스위치의 turn on 되는 각이 P_A 를 포함하게 되어 기동시 회전자가 P_A 근처에 있을때 기동이 되지 않는 경우가 발생한다. 기동이 되지 않는 구간의 영역은 부하조건에 의해 영향을 받는다. Switched reluctance motor를 20,000[rpm] 이상의 고속으로 운전하기 위해서는 15° 이상의 advance angle이 필요한데 이때 상 스위치의 conduction 구간은 P_A 를 포함하게 되므로 기동이 되지 않는 경우가 발생하게 된다. 이러한 기동상의 문제점은 상 스위치간의 conduction overlapping에 의해 해결할 수 있다. 기동이 되지 않는 구간을 없애기 위해 필요한 최소의 overlapping각은 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_o = \beta_o - \beta_n \geq \alpha - \frac{2\pi}{N_r} \left(\frac{1}{2} - \frac{N_s - N_r}{N_s} \right) \quad (3)$$

식 (3)에서 δ_o 는 overlapping각이고, β_o 와 β_n 은 각각 overlapping시와 overlapping이 없는 정상(normal) 상태의 conduction angle이다. 또한 α 는 advance angle이고, N_s 와 N_r 은 각각 고정자와 회전자의 극수(number

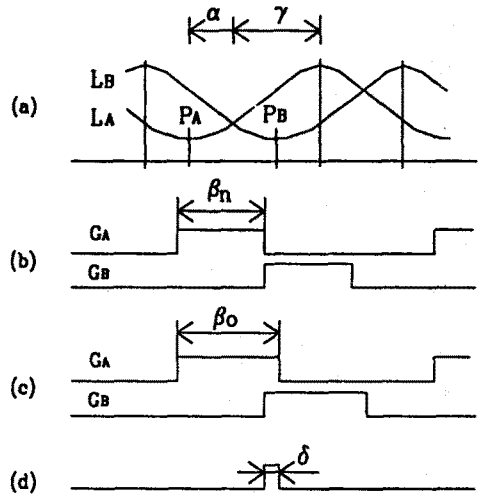


그림 1. (a) 상인덕턴스, (b) 여자신호 (overlap이 없을때), (c) 상여자신호 (overlapi시), (d) overlapping 각

of pole)를 나타낸다. 기동시 회전자의 위치가 상 스위치의 overlap 되는 구간(그림 1(d)의 δ 구간)에 존재하게 되면 A와 B상이 동시에 여자되고 $\frac{dL_A}{d\theta} \gg \frac{dL_B}{d\theta}$ 이므로 정 방향의 기동 토크(starting torque)가 발생하게 된다. 그러나 overlapping각이 어느 이상 커지게 되면 상 스위치의 turn off 신호가 너무 늦게 발생하여 인덕턴스가 감소하는 구간에서 전류가 많이 흐르게 되므로 역 토크가 커지게 된다.

6/4 구조의 switched reluctance motor를 20,000[rpm]의 고속으로 회전시킬 경우 상 스위치 여자시간은 250[μ s]로 매우 짧고, 역 기전력은 크므로 각 상에 흐르는 전류를 빨리 build up시키기 위해서는 높은 인가 전압이 필요하게 된다. 동일한 속도로 회전할때 advance angle이 변함에 따라 인가되는 입력 power는 비슷하지만 전압과 전류의 형태는 크게 변한다. Advance angle이 작은 경우는 큰 경우에 비해 인가되는 전압은 크게 되고 전류는 작게 된다. 고속으로 회전시 최대속도는 DC link 전압에 의해 제한되므로 advance angle이 작은 경우에는 큰 경우에 비해 최대속도가 작게 된다. Advance angle이 큰 경우에는 advance angle이 작은 경우에 비해 인가되는 전압이 작아도 되므로 속도는 더 증가시킬 수 있지만 전류의 크기가 더 크게 되므로 스위칭 소자의 제한을 받게 된다. 그러므로 주어진 속도로 회전하기 위해서 가장 적합한 advance angle은 전압과 전류의 제한을 고려하여 결정해야 한다. 본 논문에서는 실험을 통하여 advance angle과 인가전압의 상관관계를 고찰하고 주어진 속도에서 가장 적합한 advance angle을 결정한다.

3. Simulation 및 실험결과

Simulation 및 실험에 사용된 switched reluctance motor는 고속용으로 설계된 6/4 구조로, 상 저항 $R_s = 0.85 [\Omega]$ 이고 상 인덕턴스는 $L_{min} = 3 [mH]$, $L_{max} = 15 [mH]$ 이다. 속도를 제어하기 위하여 PWM 전압제어를 사용하였고 PWM carrier 주파수는 16 [kHz]이며 부하는 fan을 사용하였다. 그림 2는 overlapping시 advance angle을 변화시켰을 때 동일출력을 내기 위해 주어진 input power에서 필요한 전압의 실효치이다. 인가입력이 400 [W]일때 motor에서 실제 필요한 전압의 실효치는 advance angle이 9°일때 146 [V], 15°일때는 106 [V]이고 27°일때는 88 [V]였다. Advance angle이 작아지면 전류가 충분히 build up 하기 전에 인덕턴스가 증가하는 구간에 도달하여 역기전력(back emf)이 커지게 된다. 이때 전류를 더 증가시키기 위해서는 더 높은 전압을 필요로 하게 된다. 반면 advance angle이 커지면 인덕턴스가 작은 구간에서 전압이 인가되는 시간이 길어지므로 전류가 충분히 build up 된다. 그러므로 고속으로 회전하기 위해 필요한 전압의 크기가 advance angle이 작을 때보다 더 작게 되므로 고속회전에 유리하다. 그러나 advance angle이 어느 이상 커지면 토오크가 발생되지 않는 구간을 포함하게 되어 기동이 되지 않거나 또는 순간적으로 반대로 회전하는 경우가 발생하게 된다. 또한 advance angle이 커질수록 상 전류의 크기가 더욱 커지게 되어 전류 rating이 높은 스위칭 소자가 필요하게 되는 반면, 고속회전을 하기 위해 필요한 전압의 크기는 거의 비슷해진다. 그림 2의 실험결과에 나타난 바와 같이 advance angle이 24° 이상이 되면 필요한 전압의 크기는 거의 비슷해진다.

그림 3은 overlapping시와 overlapping을 하지 않았을 때의 advance angle의 변화에 따라 증가시킬 수 있는 최대 회전수(maximum rpm)를 나타낸다. Overlapping을 하지 않았을 경우 최대 회전수는 advance angle이 9°일때 19,600 [rpm], 18°일때는 21,600 [rpm]이다. Advance angle이 16° 보다 작은 경우에는 전류가 충분히 증가하기 전에 역기전력이 증가하므로 주어진 전압으로는 전류를 더 증가시킬 수 없게 되어 속도를 더 증가시키는데 제한을 받는다. 반면 advance angle이 21° 이상이 되면 상에 흐르는 전류가 더욱 증가하게 되어 스위칭 소자의 전류제한에 의해 증가시킬 수 있는 최대 속도가 제한을 받게 된다. Advance angle이 18°에서 21°사이에서는 최대 회전수는 거의 비슷한 값을 갖는다. 그러나 같은 속도의 조건에서는 advance angle이 작을수록 상 전류의 크기가 작고 더 안정하다. 그러므로 실험에 사용된 전동기의 경우 주어진 조건하에서 가장 적합한 advance angle은 18°이다. 그러나 advance angle이 15° 이상이 되면 초기 기동시 기동이 되지 않는 구간을 포함하게 되므로 기동에 문제가 발생하게 되고, advance angle의 값이 어느 이상 커지게 되면 과도한 전류가 흐르게 된다. 이러한 문제들은 상간에서 conduction overlapping을 함으로써 어느 정도 해결할 수

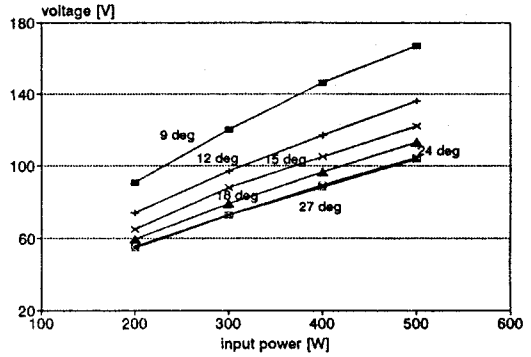


그림 2. Advance angle에 따른 인가전압의 변화

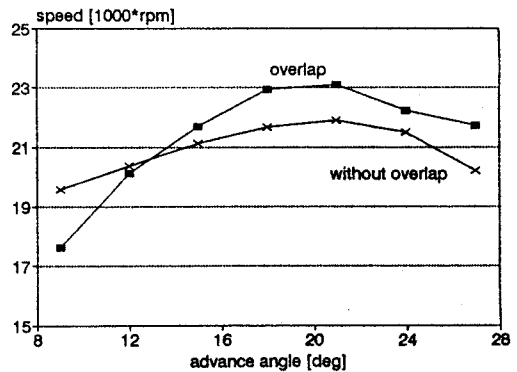


그림 3. Advance angle에 따른 전동기 최대 회전수

있다. 식 (3)에서 advance angle이 18°일 경우 3°이상의 conduction overlapping이 있게 되면 기동시 문제가 발생하지 않는다. 본 실험에서는 overlapping각을 약간의 여유를 두어 4°로 하였다. Conduction overlapping시 전동기의 최대 회전수는 advance angle이 9°일때 17,600 [rpm]이고 18°일때 22,950 [rpm]이다. 그림 3에 나타난 바와 같이 advance angle이 13° 보다 큰 경우에는 overlapping을 했을 때가 overlapping을 하지 않았을 때보다 최대 회전수가 크다. 그러나 advance angle이 13° 보다 작은 경우에는 이와 반대로 overlapping을 할 때가 overlapping을 하지 않을 때보다 최대 회전수가 작게 된다. 이는 advance angle이 작을 때에는 overlapping을 할 경우 도통구간이 길어짐에 따라 상 스위치의 turn-off가 overlapping을 하지 않을 경우보다 더 늦게 발생하게 되어 전류의 감소가 더 늦게 되므로 역 토오크(negative torque)가 발생하기 때문이다. 그림 2, 3에서 알 수 있는 바와 같이 실험에 사용된 switched reluctance motor는 23,000 [rpm]으로 회전시 가장 적합한 advance angle은 18°이고 overlap 각은 약 4°이다.

그림 4는 overlapping을 하지 않고 advance angle이 18°일때의 상 인덕턴스, 상 전류의 simulation 및 실험 파형, 상 토크 및 total 토크의 simulation 결과를 나타낸다. 그림 5는 overlapping을 했을 경우의 결과이다. 그림 4, 5의 전류파형에서 simulation과 실험 결과가 잘 일치하고 있으며, overlapping시의 상 전류의 최대치가 overlapping을 하지 않았을 경우에 비해 작음을 알 수 있다. 또한 토크 리플의 크기는 overlapping시 30%, overlapping을 하지 않았을 때가 55%로 overlapping에 의해 토크 리플도 저감됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 switched reluctance motor를 고속으로 운전시 advance angle의 변화에 따른 인가 전압 및 최대 속도의 상관관계를 실험을 통하여 고찰하였다. Advance angle은 속도의 제어범위와 스위칭 소자의 정격을 고려하여 적당한 값을 결정할 수 있다. 또한 advance angle에 의해 기동시 발생하는 문제를 해결하기 위해서 상 스위칭간의 conduction overlapping을 인가함에 따라 기동 토크를 크게 하고 토크 리플을 줄일 수 있어 고속 회전에 유리하다는 것을 실험과 simulation을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] T. J. E. Miller, *Switched reluctance motors and their control*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993
- [2] P. J. Lawrenson et al., "Variable speed switched reluctance motors," *Proc. Inst. Elec. Eng.*, July 1980, pp. 253-265
- [3] M. F. K. Vergalle et al., "Excitation advance control schemes for switched reluctance motors," *IEEE IAS Annual Meetings*, 1992, pp. 257-264
- [4] Akira Chiba and Tadashi Fukao, "A closed loop operation of super high speed reluctance motor for quick torque response," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 3, May/June 1992, pp. 600-606

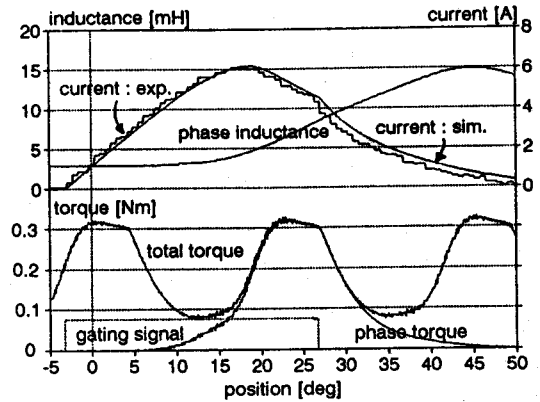


그림 4. 전류 및 토크의 실험 및 simulation 결과 (conduction overlapping이 없을때)

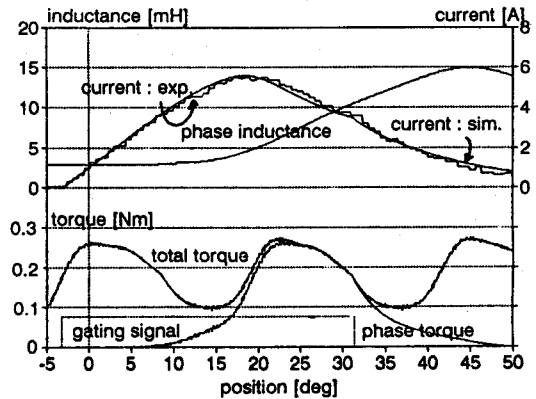


그림 5. 전류 및 토크의 실험 및 simulation 결과 (conduction overlapping시)