

SV PWM을 이용한 고속 릴럭턴스 동기 전동기 구동

김민태^{*)}, 오성업^{*)}, 성세진^{*)}, 백동기^{**)}
^{*)}충남대학교 전기공학과, ^{**)}주성대학 전기과

Reluctance Synchronous Motor Driving using SV PWM

Mintae Kim, Sungup Oh, Sejin Seong, Tongki Paek
^{*)}Dept. Electronic Engineering CNU, ^{**)}Dept. Electronic Engineering JSC

Abstracts

Many Harmonics components is contained within the stator currents of the High-speed Reluctance Synchronous Motor with salient pole rotor. They cause the power factor of RSM to get worse.

In this paper, the mathematical model of RSM is investigated. And SV_PWM control method is applied to reduce Harmonics components in the stator currents.

Simulation results shows the fast response of speed and the reduction of Harmonics components at steady state

1. 서론

고속회전이 요구되는 부하의 증가와 장치의 소형, 경량화의 필요에 따라 초고속 전동기의 수요가 날로 증가하고 있다. 초고속 전동기로는 유도전동기가 많이 사용되고 있으나, 초고속 회전시 회전자의 견고성 및 2차 동손과 고조파 2차동손에 의한 회전자 발열등의 치명적인 결함을 가지고 있다.

릴럭턴스 동기전동기(Reluctance Synchronous Motor;RSM)는 유도전동기에 비해 회전자의 구조가 간단하고 견고하며, 발열이 적다는 장점을 가지고 있어, 초고속 적용에 대한 연구가 활발하게 제안되고 있다.^{[1]~[5]}

RSM은 역률이 나쁘다는 결점을 가지고 있으나, 본질적으로 초고속 회전에 적합하여 10만 rpm 이상의 초고속회전에서 10[KW]이하 정도의 소용량 전동기에 유용하게 적용되고 있다. 따라서 RSM은 소출력의 특수용도 전동기로서 이용되고 있었지만, 최근에는 인버터 기술의 발전으로 가변속 구동기로서의 응용이 기대되고 있다.^{[1]~[5]}

RSM의 역률을 개선하기 위한 방안으로 d축 인덕턴스를 크게하고, q축 인덕턴스는 적게 하기위해, 회전자의 돌극부와 고정자간의 간격을 가능한한 적게 할 필요가 있다. 또한 이를 극대화 시키기 위해 회전자를 성층하여 제작하기도 한다. 그러나, 회전자를 성층하여 제작하는 경우에는 고속회전시 원심력에 의해 이탈될 수 있다는 큰 문제점을 가지고 있다.

교류 전동기를 제어하기 위한 PWM제어 기술은 고조파 성분을 감소시키고, 최대 토크를 얻기 위해 이용 가능한 DC전압을 높이는 제어 기법이 연구되었다. 그 중에서 SV_PWM제어 방식은 위의 조건을 만족시키는 제어방식이다.^{[6]~[7]}

본 논문에서는 그림 1과 같은 형태의 돌극형 회전자를 갖는 릴럭턴스 동기 전동기를 수식적으로 해석하였고, 시스템을 모델링 하였다. 또한 RSM의 전류 파형에 포함된 고조파를 감소시키는 방안으로 SV_PWM제어 방식을 적용하였으며, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검토하였다.

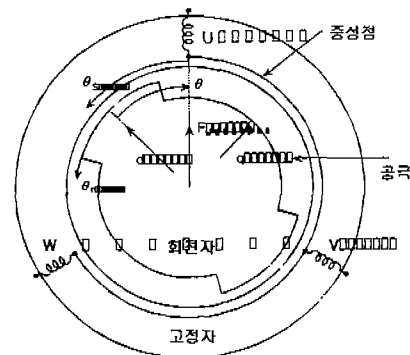


그림 1. 돌극형 릴럭턴스 동기 전동기 구조

2. 릴럭턴스 동기 전동기 모델링

RSM는 돌극형 동기전동기에서 계자권선을 없앤 구조로 되어 있으므로, 전기자 전류 성분을 주자속분

전류(I_d)와 토크분 전류(I_q)로 나누어 제어하는 돌극형 동기기의 벡터 제어와 원리적으로 같다고 볼 수 있다. 회전자 시동 권선이 없는 릴럭턴스 동기 전동기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\overline{V}_s = R_s \overline{I}_s + p \overline{\lambda}_s + j \omega \overline{\lambda}_s \quad (1)$$

여기서, V_s 는 전기자 전압, R_s 는 전기자 권선 저항, I_s 는 전기자 전류, λ_s 는 전기자 쇠교자속, ω 는 각속도. p 는 미분연산자, 또,

$$\overline{V}_s = V_d + jV_q, \quad \overline{\lambda}_s = \lambda_d + j\lambda_q, \quad \overline{I}_s = I_d + jI_q \text{이다.}$$

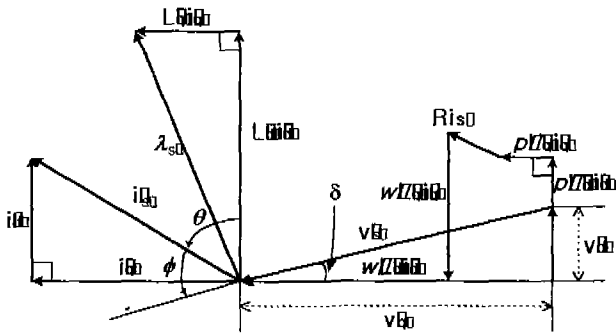


그림 2. RSM 벡터도

그림 2는 릴럭턴스 동기 전동기 1상분의 벡터도를 나타낸 것이다. 이것은 보통의 동기기의 벡터도에서 계자 권선에 의한 유도기전력을 0으로 하고, 지상역률로 한 것이다. 여기서, L_d, L_q 는 각각 d 축 인덕턴스, q 축 인덕턴스이다. 전기자 쇠교자속 λ_s 는 d 축 기자력에 의해 발생한 d 축 자속 λ_d 와 전기자 반작용에 의해 발생한 q 축 자속 λ_q 의 벡터합이다. 또,

$$\lambda_d = L_d I_d, \quad \lambda_q = L_q I_q \text{이다.}$$

벡터도에서 전압·전류 방정식의 동적 모델은 식(2)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

릴럭턴스 동기 전동기의 토크는 동기기인 경우와 동일하다. 즉, 정상상태에서의 토크 식은 식(3)과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3)$$

여기서, P 는 극수이다.

식(3)에 $\lambda_d = L_d I_d$ 와 $\lambda_q = L_q I_q$ 을 대입하여 정리하면 토크는 d - q 전류식에 의해 식(4)과 식(5)과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) I_d I_q \quad (4)$$

$$T_e - T_L = J \frac{dw}{dt} + Bw \quad (5)$$

여기서 J 는 관성모멘트이다.

전기자 전압의 d - q 성분이 일정할 때, 전압 및 전류 방정식은 일정하게 된다. 이때 전류의 d - q 성분을 구하면 다음과 같다.

$$I_d = \frac{-(\omega L_q V_q + R V_d)}{R^2 - \omega^2 L_d L_q} \quad (6.a)$$

$$I_q = \frac{\omega L_d V_d + R V_q}{R^2 - \omega^2 L_d L_q} \quad (6.b)$$

식(4)에 식(6.a)과 (6.b)을 대입하여 정리하면 식(7)과 같은 최대 토크식을 얻을 수 있다. 이때 권선 저항 R_s 는 무시된다.

$$T_{e(max)} = \frac{3}{4} \frac{p}{2} \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \left(\frac{V_s}{\omega} \right)^2 \quad (7)$$

3. SV_PWM 제어방식

SV_PWM은 기준전압벡터의 위치를 기준으로 스위칭 시간함수를 결정하는 방식으로 3상 인버터에서는 유효전압을 전동기에 공급할 수 있는 6개의 유효전압벡터($V_0, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$)와 한쪽부분의 스위치가 모두 단락되는 2개의 영전압벡터(V_0, V_7)의 조합으로 결정한다. 그림 4의 상태공간벡터도와 같이 유효전압 벡터는 $\frac{2}{3} V_{dc}$ 의 크기에 60° 의 위상차를 갖는 정육각형을 형성한다.

SV_PWM 제어 방식은 정밀한 전압생성, 전류리플을 최소화하기 위해 ON, OFF 한 주기를 대칭이 되도록 배열하는데 섹터 I에서는 $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow$

$V_7 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$ 의 스위칭 패턴을 구성한다.

표 1은 섹터 I에서의 게이팅 시퀀스를 나타내고 있으며 게이팅 시간(T_{ga}, T_{gb}, T_{gc})은 시간지연을 의미하고 있다.

그림 5는 SV_PWM 제어기의 1주기당 인가되는 유효전압이며, 그림 6은 이때의 전압 지령치이다.

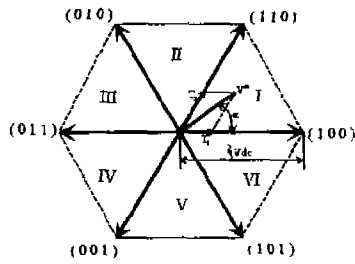


그림 4. 상태공간 벡터도

표 1. 섹터 I에서의 게이팅 시간

ON Gateing Time	OFF Gateing Time
$T_{ga} = \frac{T_0}{2}$	$T_{ga} = \frac{T_0}{2} + T_1 + T_2$
$T_{gb} = \frac{T_0}{2} + T_1$	$T_{gb} = \frac{T_0}{2} + T_2$
$T_{gc} = \frac{T_0}{2} + T_1 + T_2$	$T_{gc} = \frac{T_0}{2}$

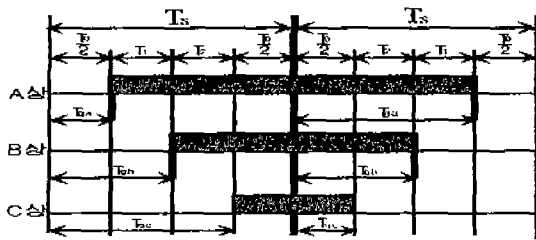


그림 5. 한 주기당 유효전압(섹터 I)

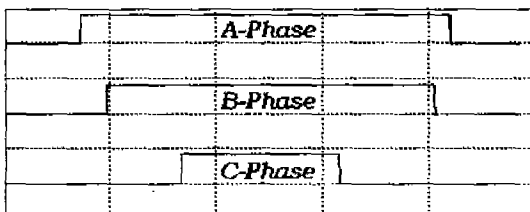


그림 6. SV_PWM 전압 지령치

4. 시뮬레이션

전체 시스템 구성은 그림 7과 같이 하였으며, 실험용으로 릴럭턴스 동기 전동기를 제작하였다. 이 전동기의 변수는 표 2와 같다. 제 2장의 수식을 적용한 RSM의 모델을 확인하기 위해 그림 8에서는 3상 상용전원을 인가 하였을 때 속도 및 토크 전류파형 및 고조파 스펙트럼 분석을 나타내었다.

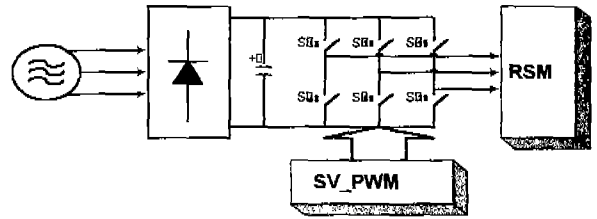
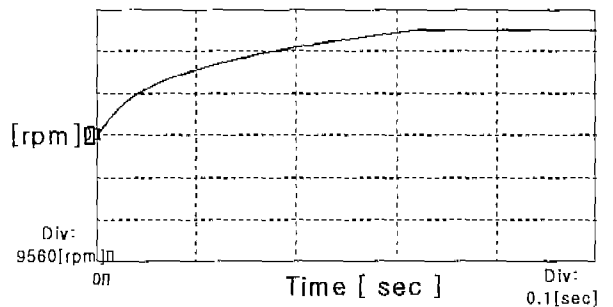


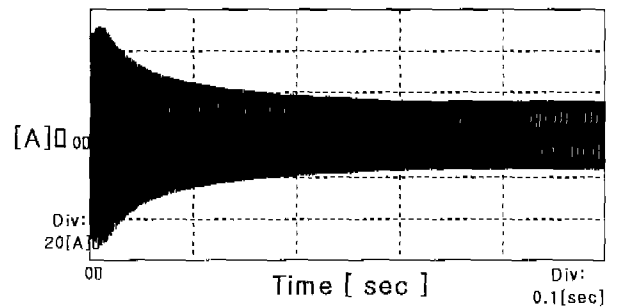
그림 7. 전체 시스템 블록도

표 2. 릴럭턴스 동기 전동기 변수

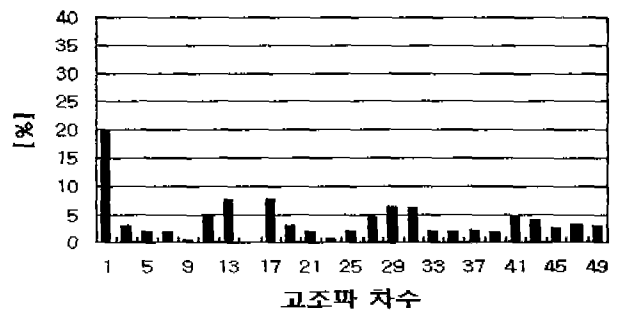
정격 전압	220[V]	R _s	0.18[Ω]
정격 전류	16[A]	L _d	3.22[mH]
정격 주파수	1000[Hz]	L _q	1.04[mH]



(a) 속도 파형



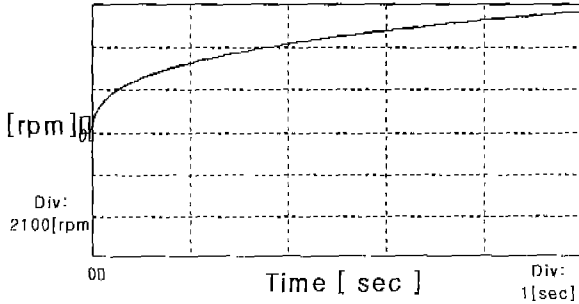
(b) 3상 전류 출력 파형



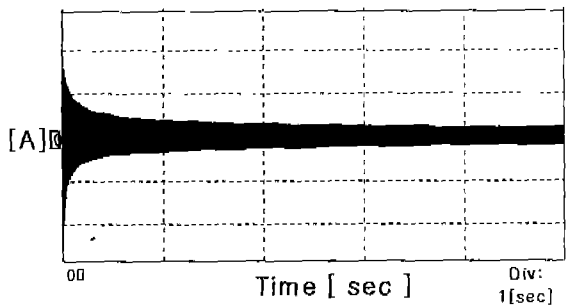
(c) 상전류 스펙트럼 분석

그림 8. 3상 상용전원 적용시 출력파형

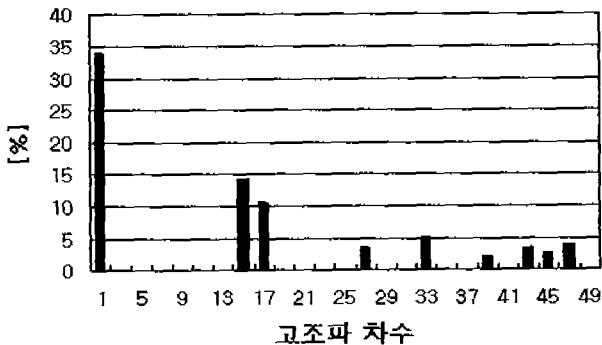
그림 9는 SV_PWM 제어 방식을 적용한 RSM의 출력 파형과 전류의 스펙트럼 분석이다. 입력주파수는 1000[Hz]로 하였다.



(a) 속도 파형



(b) 3상 상전류 파형



(c) 상전류 스펙트럼 분석

그림 9. SV_PWM을 적용한 RSM 출력파형

[참고 문헌]

[1] 千葉明, 深尾正, “超高速リラクタンس電動機の高速度トルク制御方式”, 電学論 D, 107 卷 10号, 昭62, pp.1229.-1235.
 [2] 深尾正, 千葉明, “超高速リラクタン스電動機閉のループ制御の一方式”, 電学論 D, 107 卷 10号, 昭62, pp.271.-278.
 [3] 千葉明, 池田絃一, 中村福三, 泥堂多積, 深尾正, “リラクタン스電動機インダクタンスに関する一考察”, RM92-30, 平成4年5月18日, pp.1.-10.
 [4] Synchronous Reluctance Motors and Drives, IEEE IAS 1994
 [5] Reluctance Synchronous Machines and Drives, by I.Boldea.
 [6] 김준석 외1인, “공간전압 벡터 PWM의 새로운 기법”. 대한전기학회논문지. Vol 44 No7, pp. 865.-874., 1995.7
 [7] J.Holtz, “Pulse Width Modulation - A Survey”, Conf. Record of IEEE, PESC, pp. 11.-18.,1992.

5. 결 론

돌극형 회전자를 갖는 RSM를 수식적으로 해석하여 전체 시스템을 모델링 하였고, 전류파형에 포함된 고조파를 감소시키는 방안으로 SV_PWM제어 방식을 적용하였으며, 60,000[rpm]에 4.8[sec]에 도달하는 빠른 속도 응답과 고조파 성분이 적게 포함 되어 있음을 볼수 있었다.