

고속 동기 릴럭턴스 전동기 비간섭 벡터제어

김민태*, 백동기**, 최재동†, 성세진*, 전철환†

* 충남대학교, ** 주성대학, † 한국항공우주연구소, † 군산대학교

Decoupling Vector Control for High Speed Synchronous Reluctance Motor

M.T. Kim*, T.K. Peak**, J.D. Choi†, S.J. Seong*, C.H. Jeon†

* Chungnam National University, ** Jusung College

† Korea Aerospace Reserch Institute, † Kunsan National University

Abstract

In the high speed range for Vector control of Synchronous Reluctance Motor, the effect of iron loss and the cross-coupling of dq axis currents is dependent on the increase of the operating frequency can not be negligible

In this paper, we propose a decoupling Vector control of dq axis current that the effect of iron loss is eliminated, and confirm that through simulation results.

1. 서 론

동기 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor ; SynRM)는 고속 부하의 증가와 구동원 및 이에 부속되는 소형·경량화의 요구로부터 주목을 받고 있으며, 제조업, 연삭기, 공작기계와 같은 고속 응용분야에서 적용이 시도되어지고 있다.

고속 부하용으로 많이 사용되는 유도기는 고속회전으로 인한 회전자가 이환되는 난점을 내포하고 있으나, SynRM은 회전자의 구조가 단순하며 견고하여 고속 부하용으로 적합하다. 이에 반하여 SynRM은 동기기와 같이 회전자에 계자권선이 없기 때문에 여자전류를 고정자 권선으로 공급해주게 되어 일차 전류가 비교적 크고 역률이 낮다는 단점을 가지고 있다.^[1~6]

SynRM의 철손저항은 저속영역에서는 무시될 수 있으나, 고속영역에서는 동작 주파수의 증가에 따라 철손도 증가하게 되기 때문에 무시할 수 없게 된다. 철손은 고정자 내의 등가 와전류에 의해서 발생한다고 가정하였다.^[6~8]

또한, 벡터제어에 있어 dq 축 쇄교자속의 상호 간

섭은 전체시스템에 악영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 단일구조를 갖는 돌극형 SynRM에 대하여 철손저항을 고려한 전압방정식을 기반으로, 철손저항의 영향을 제거하고, dq 축 비간섭항의 영향을 제거하여 비간섭 벡터제어를 행하였다.^[8~10] 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. SynRM의 수학적 해석

일체 구조를 갖는 돌극형 SynRM의 구조는 그림 1과 같다. 고정자는 교류전동기와 같으며, 회전자는 계자 권선이 없는 돌극 구조를 갖고 있다.

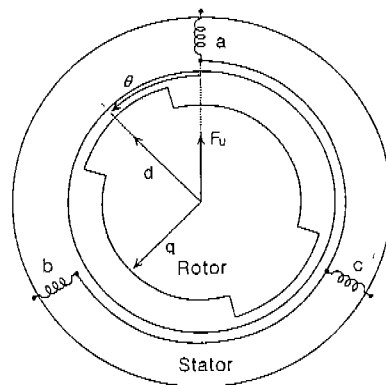


그림 1. SynRM의 구조

철손을 고려한 전압 방정식을 회전자 각속도 ω_r 로 회전하는 dq 축상으로 나타내면 식(1)과 같다. 해석에 있어 철손은 고정자 내의 등가 와전류에 의해 발생하며^[7], 여자 인덕턴스에 직렬로 삽입된 모델로 해석하였다. 그림 2는 SynRM의 dq 축 권선 모델을 나타내었다.

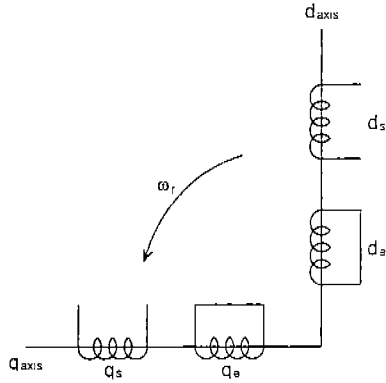


그림 2. SynRM의 dq축 권선모델

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_m & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + R_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서, R_s 는 고정자 저항, R_m 은 등가 철손 저항을 L_{dq} 는 고정자 dq축 자기 인덕턴스를 나타낸다.

또한 고정자 철손을 고려한 과도상태 전압 방정식은 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_m + pL_d & -\omega_r L_q + pR_m/\omega_r \\ \omega_r L_d - pR_m/\omega_r & R_s + R_m + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

dq 축 자속쇄교수는 식(3)과 같으며, 전자토크의 순시값은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_d i_{ds} + (R_m/\omega_r) i_{qs} \\ \lambda_{qs} &= L_q i_{qs} - (R_m/\omega_r) i_{ds} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left\{ (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs} + \frac{R_m}{\omega_r} (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, P 는 극수 이다.

고정자 철손을 고려한 식(2)를 통해 알 수 있듯이 dq축이 등가 철손 저항을 통해 상호 간섭하고 있음을 볼 수 있다.

3. 비간섭 벡터 제어

벡터제어 적용에 의한 SynRM구동 제어에 있어서 dq축 전류의 간섭은 동기좌표계에서 간섭항이 외란으로 시스템에 영향을 주게 되며, 속도가 증가하면서 영향은 더욱 커지게 된다. 따라서, 등가 철손저항의 영향을 무효로 하고, dq축을 비간섭화 시키는 비간섭제어가 필요하게 된다.

고정자 철손을 고려한 과도상태 전압 방정식, 식(2)를 전류 동적 상태 방정식으로 전환하면 식(5)와 같

이 표현된다.

$$pL_d i_{ds} = v_{ds} - (R_s + R_m) i_{ds} + \left(\omega_r L_q - p \frac{R_m}{\omega_r} \right) i_{qs} \quad (5)$$

$$pL_q i_{qs} = v_{qs} - \left(\omega_r L_d - p \frac{R_m}{\omega_r} \right) i_{ds} - (R_s + R_m) i_{qs}$$

여기서, p 는 미분연산자 이다.

식(5)를 라플라스 변환을 행하여 i_{ds} 와 i_{qs} 로 표현하면 식(6)과 같다.

$$i_{ds} = \frac{1}{sL_d + R_s + R_m} v_{ds} + K_d \omega_r i_{qs} \quad (6)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{sL_q + R_s + R_m} v_{qs} - K_q \omega_r i_{ds}$$

$$\text{여기서, } K_d = \frac{L_q - s \frac{R_s}{\omega_r^2 L_d}}{s + \frac{R_s + R_m}{L_d}}, K_q = \frac{L_d - s \frac{R_s}{\omega_r^2 L_q}}{s + \frac{R_s + R_m}{L_q}} \text{ 이다.}$$

식(6)에서 d축 전류 간섭항은 $K_d \omega_r i_{qs}$ 이며, q축 전류 간섭항은 $K_q \omega_r i_{ds}$ 가 된다. 간섭항은 정상상태에서 간략화 되며, 전동기의 변수를 알고 있다면, 전류 검출을 통해 이를 보상하는 것과 같이 전압을 인가하면 전압 v_{ds} 와 v_{qs} 는 식(7)과 같다.

$$v_{ds} = v_{ds}' - \omega_r L_q i_{qs} \quad (7)$$

$$v_{qs} = v_{qs}' + \omega_r L_d i_{ds}$$

여기서, $v_{ds}' = (pL_d + R_s + R_m) i_{ds}$,

$v_{qs}' = (pL_q + R_s + R_m) i_{qs}$ 이다.

식(7)에 의하여 피드포워드 보상입력을 갖는 PI제어의 블록도는 그림 3과 같다.

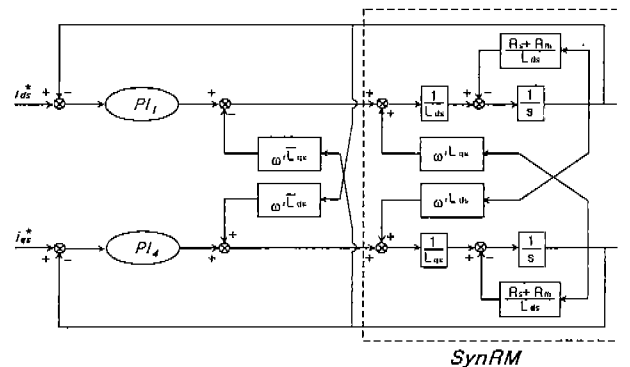


그림 3. 피드포워드 보상입력을 갖는 PI제어기

비간섭은 식(8)와 같은 전압 지령을 선택함으로써 수행 된다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^* &= \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{ds}^* - i_{ds}) - \omega_r \widehat{L}_q i_{qs} \\ V_{qs}^* &= \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{qs}^* - i_{qs}) - \omega_r \widehat{L}_d i_{ds} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $K_p, K_i > 0$ 은 비례와 적분 이득을 나타내고, $\widehat{L}_d, \widehat{L}_q, \widehat{R}_m$ 는 각각 L_d, L_q, R_m 의 계산값을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

일체형 구조를 갖는 볼극 SynRM의 비간섭 벡터 제어 시스템의 타당성을 고찰하기 위하여 시뮬레이션을 행하였다. 그림 4는 피드포워드 보상입력을 갖는 속도 제어 시스템의 구성도이다. 시뮬레이션에 사용한 SynRM의 파라미터는 표 1과 같다.

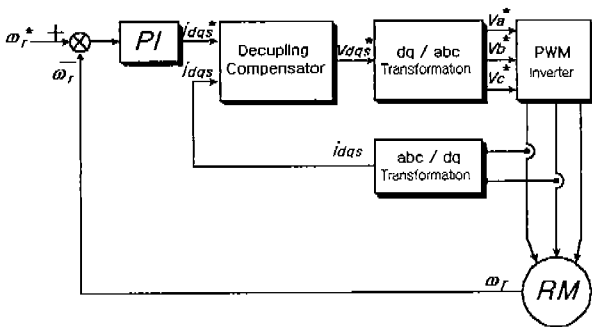


그림 4. 시스템 구성도

표 1. 시뮬레이션에 사용된 SynRM의 변수

정격출력 [kW]	3.5	R_s [Ω]	1.3
정격전압 [V]	220	R_m [Ω]	1.03
극수	2	L_d [mH]	29.1
동작주파수 [Hz]	120	L_q [mH]	11.9

그림 5는 철손을 고려한 SynRM에 대하여 비간섭 제어를 행하지 않은 속도 제어 시스템에서의 응답을 보여주고 있다. 0[sec]에서 11[sec]에서는 무부하상태로 가변속 운전을 행하였고, 11[sec]에서 20[sec]는 정속도 운전으로 지령 하였으며, 15[sec]에서 40[%]의 부하를 인가 하였다.

그림 6은 철손을 고려한 SynRM에 대하여 비간섭 제어를 행한 속도 제어 시스템에서의 응답으로, 속도 지령은 그림 5와 동일하게 인가하였다.

그림 5와 그림 6에서 볼수 있듯이 비간섭제어를 행한 시스템이 속도 및 i_{dq} 의 오차가 적음을 알 수 있다.

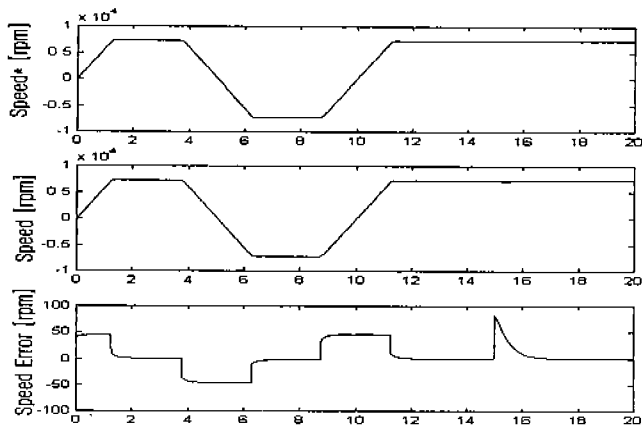
5. 결 론

본 논문에서는 고속 볼극형 SynRM에 대하여 철손저항을 고려한 전압방정식을 기반으로, 철손저항과 dq축 간섭항의 영향을 제거하고 피드포워드 보상입력을 갖는 PI제거기를 이용하여 비간섭제어를 구현하였다.

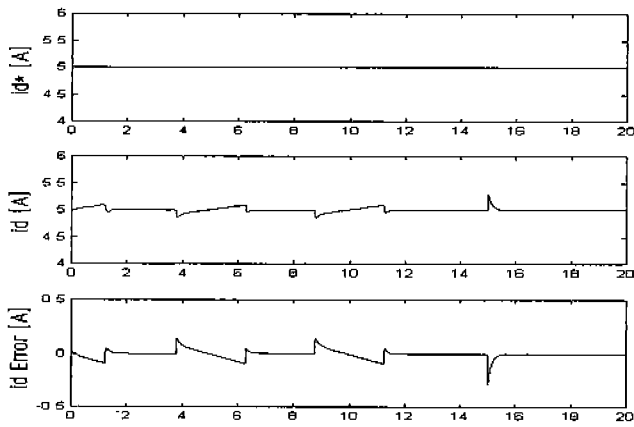
시뮬레이션 결과를 통하여 비간섭 제어를 행하지 않은 속도 제어 시스템보다, 비간섭화를 행한 비간섭 속도 제어 시스템이 보다 안정적으로 동작하며, 응답의 양호함을 확인하였다.

참 고 문 헌

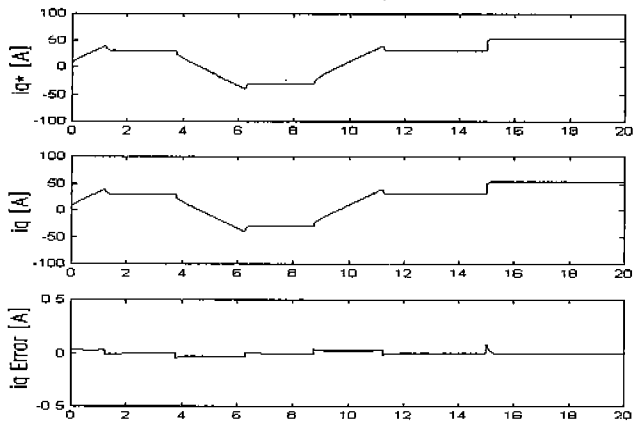
- [1] 深尾 正, 千葉 明, 松井幹彦, "超高速リラクタンス電動機閉ループ制御の一方式", 電學論D, 107卷2号, pp.271~278, 昭62.
- [2] Akira Chiba, Tadashi Fukao, "A Closed-Loop Operation of Super High-Speed Reluctance Motor for Quick Torque Response", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, No.3, May/June 1992.
- [3] Min-tae Kim, Hang-shin Jo, Se-jin Seong, Tong-ki Paek, "Speed Control of High Speed Synchronous Reluctance Motor By Vector Control", ICPE98, pp.742~747, 1998.
- [4] Sung-up Oh, Min-tae Kim, Se-jin Seong, Tong-ki Paek, "Harmonics reduction in the High-speed Synchronous Reluctance Motor by Space-Vector PWM Control", ICPE98, pp.758~762, 1998.
- [5] 김민태, 오성업, 성세진, 백동기, "SV-PWM을 이용한 고속 동기 릴럭턴스 전동기 구동", 전력전자 학술 대회 논문집, pp.204~207, 1998.7.
- [6] 오성업, 김민태, 성세진, 백동기, "동기 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 고찰", 전력전자 학술대회 논문집, pp.208~211, 1998.7.
- [7] 楊 仲慶, 深尾 正, "鐵損を考慮した超高速リラクタンス發電機の等價回路と定常特性の考察", 電學論D, 110卷6号, pp.746~754, 平成2年.
- [8] 杉本英彦, 小山正人, 玉井仲三, ACサーボシステムの理論と設計の實際, 総合電子出版社, pp.104~121, 1990.
- [9] 水野孝行, 高山順一, 市岡忠士 外, "固定子鐵損を考慮した誘導電動機の非干渉制御法", 電學論D, 109卷11号, pp.841~848, 平成元年.
- [10] Jinhwan Jung, Sunkyoung Lim, Kwanghee Nam, "PI Type Decoupling Control Scheme for High Speed Operation of Induction Motors" PESC97 IEEE PELS, Vol.2. pp.1082~1085, June 22-27, 1997.



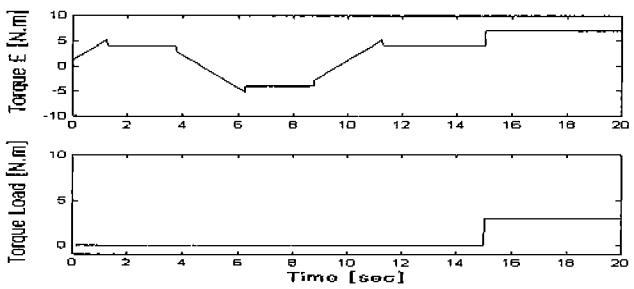
(a) Speed



(b) id

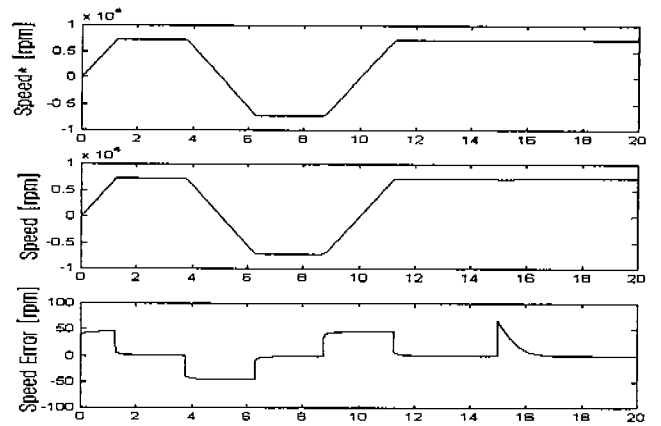


(c) iq

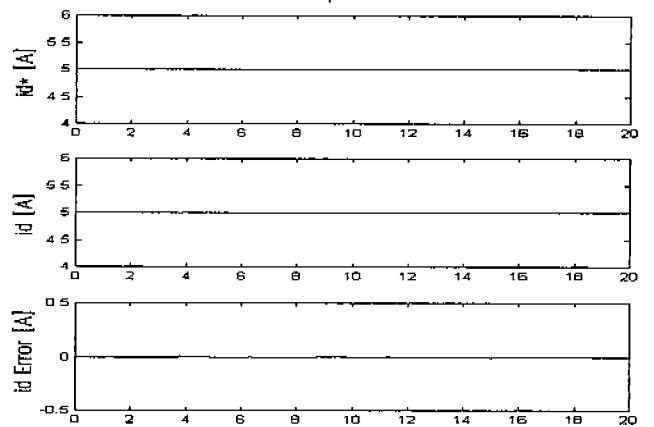


(d) Torque

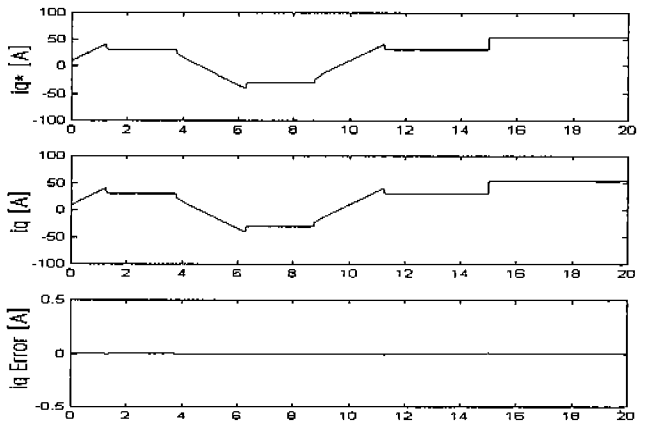
그림 5 비간섭 제어를 하지 않은 경우



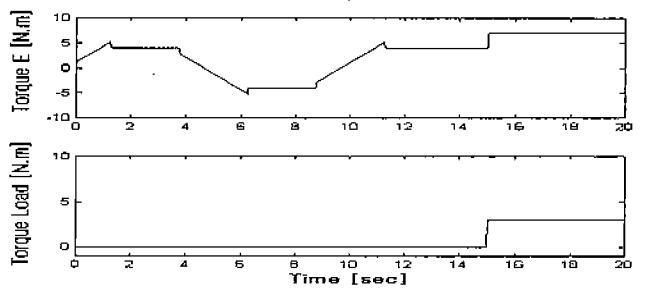
(a) Speed



(b) id



(c) iq



(d) Torque

그림 6 비간섭 제어를 행한 경우