

권선형 유도전동기의 고정자 자속기준 벡터제어에 의한 전원선의 고조파 보상

김운호, 조용현, 박경수, 정연석
중앙대학교 전기공학과 전력전자연구실

Harmonic Compensation by A Flywheel System Based on Stator Flux-Oriented Vector Control of WRIM(Wound Rotor Induction Machine)

Yoon-Ho Kim, Yong-Hyun Cho, Kyung-Soo Park, Yeon-Suk Jeong
CHUNG-ANG University Electrical & Electronics Eng.

ABSTRACT

An increase of pulsed power demand and load variation produce bad effect to power system. This causes power factor decrease. This paper proposes the excitation of the secondary side of wound rotor induction machine as one of harmonic compensation systems. In this paper, a harmonic compensation scheme based on stator flux-oriented vector control is proposed.

By using the flux-oriented vector control, a voltage source PWM(Pulse Width Modulation) control scheme can be applied with fast dynamic response time. The designed control scheme is verified through simulation.

1. 서 론

일반적으로 유도전동기는 농형 유도전동기와 권선형 유도전동기로 분류된다. 농형 유도전동기는 구조가 간단하고 가격이 저렴하여 산업 현장에서 널리 사용되고 있으며 권선형 유도전동기는 기동토크가 큰 이점이 있어, 크레인의 호이스트에 사용되고 있다. 권선형 유도전동기는 일반 농형 유도전동기와 달리 2차측 즉, 회전자 측에 1차측과 다른 전원을 인가할 수 있도록 슬립링 밖으로 권선이 나와 있어 고정자는 전원선, 회전자는 인버터, 전동기 측에는 플리이휠을 취부해 에너지 저장 시스템으로 사용하는 연구가 이루어지고 있다.[1,2] 또한 전동기 측에 터빈을 연결해 풍력 에너지를 전기 에너지로 변환하는 풍력 발전 장치로 사용되고 있다.[3-6] 위의 두 경우에 고정자에 전원선이 연결되므로 전원선의 전압 및 주파수 변동이 없다는 가정하에 고정자 전압 및 자속이 거의 일정함을 의미한다. 이러한 특징을 이용해 고정자 전력을 제어하기 위해 회전자에 인버터를 채용한 회전자 자속기

준 벡터 제어 방식이 연구되었다.[4]

그림 1은 기존의 능동 필터의 구조를 보여주고 있다. 여기서 전원전류(i_s)는 입력전류(i_L)과 보상전류(i_F)의 차로 정의된다.[7]

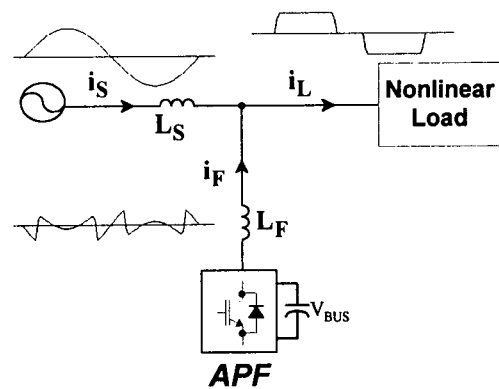


그림 1 기존의 능동필터

Fig. 1 Conventional active power filter

그림 1의 구조를 갖는 능동 필터가 고압 전원선에 설치될 경우 IGBT의 VA 정격이 높아지는 단점을 갖고있어 이러한 단점을 극복하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그림 2는 본 연구에서 제안한 능동 필터의 구조로, 기존의 능동 필터의 단점을 극복하려는 시도로 5.5 대 1의 권선비를 갖는 권선형 유도전동기를 사용하여 고정자 자속기준 벡터제어에 의한 전원선의 고조파를 보상하는 기법을 제안하였으며, 제안된 기법을 모의시험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 권선형 유도전동기의 수식적 모델

그림 2는 권선형 유도전동기를 이용한 제안된 것으로서, 고정자는 전원선에 연결되고 회전자는 PWM 인버터에 연결되기 때문에 회전자 전압 방

정식은 농형 유도전동기의 전압 방정식과 달리 단락권선으로 가정하지 않는다. 이때 전압, 전류, 자속 및 토크 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + p \lambda_{ds}^e - \omega \lambda_{qs}^e \quad (1)$$

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + p \lambda_{qs}^e + \omega \lambda_{ds}^e \quad (2)$$

$$V_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + p \lambda_{dr}^e - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}^e \quad (3)$$

$$V_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + p \lambda_{qr}^e + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}^e \quad (4)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (5)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad (6)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_m i_{ds}^e + L_r i_{dr}^e \quad (7)$$

$$\lambda_{qr}^e = L_m i_{qs}^e + L_r i_{qr}^e \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3}{4} p (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e) \quad (9)$$

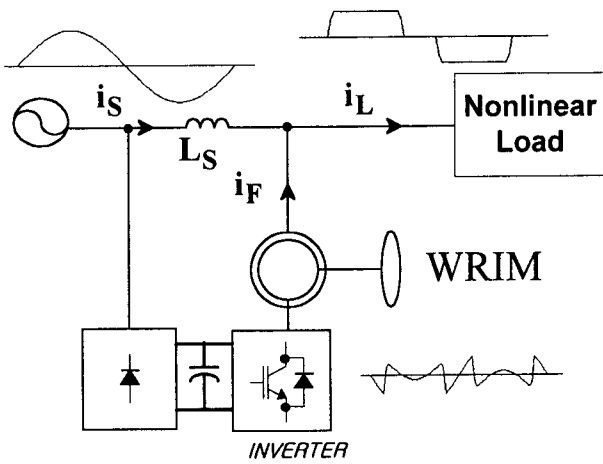


그림 2 제안된 능동필터
Fig. 2 Proposed active power filter

3. 비간섭제어기 설계

보다 나은 전류제어를 위하여 d, q축의 상호 간섭 성분을 분류, 전향 보상하는 비간섭 전류 제어기를 다음과 같이 표현된다. 식 (5), (6)을 고정자 전류로 표현하면 다음과 같다.

$$i_{ds}^e = \frac{\lambda_{ds}^e}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr}^e \quad (10)$$

$$i_{qs}^e = \frac{\lambda_{qs}^e}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{qr}^e \quad (11)$$

식 (10), (11)을 식 (7), (8)에 대입하여 정리하면 식 (12), (13)과 같이 표현된다.

$$\lambda_{dr}^e = \sigma L_r i_{dr}^e + \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds}^e \quad (12)$$

$$\lambda_{qr}^e = \sigma L_r i_{qr}^e + \frac{L_m}{L_s} \lambda_{qs}^e \quad (13)$$

식 (12), (13)을 식 (3), (4)에 각각 대입하여 정리하면 식 (14), (15)로 표현된다.

$$V_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + p \alpha L_r i_{dr}^e + p \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds}^e - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr}^e - \omega_{sl} \frac{L_m}{L_s} \lambda_{qs}^e \quad (14)$$

$$V_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + p \alpha L_r i_{qr}^e + p \frac{L_m}{L_s} \lambda_{qs}^e - \omega_{sl} \sigma L_r i_{dr}^e - \omega_{sl} \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds}^e \quad (15)$$

고정자 자속기준 벡터제어에서 $\lambda_{qs}^e = 0$ 의 관계를 식 (14), (15)에 적용하면 식 (16), (17)과 같이 표현된다.

$$V_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + p \alpha L_r i_{dr}^e - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr}^e \quad (16)$$

$$V_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + p \alpha L_r i_{qr}^e + \omega_{sl} (\sigma L_r i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e) \quad (17)$$

식 (16), (17)에서 등가 저항과 등가 인덕턴스는

$$R = R_r \quad (18)$$

$$L = \alpha L_r \quad (19)$$

식 (18), (19)가 되고 d-q축 역기전력은

$$E_{ds}^e = -\omega_{sl} \sigma L_r i_{qr}^e \quad (20)$$

$$E_{qs}^e = \omega_{sl} (\sigma L_r i_{dr}^e + \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds}^e) \quad (21)$$

식 (20), (21)로 표현된다. 여기에서 제어도는 그림 3과 같이 표시된다.

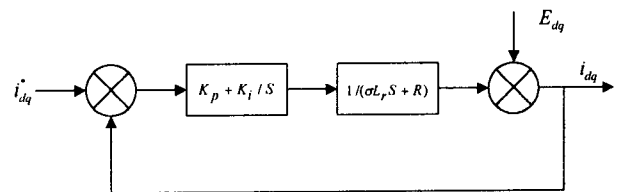


그림 3 전류제어
Fig. 3 Current control diagram

4. 고정자 자속 벡터제어

고정자축이 전원선에 연결되어 있기 때문에 동기 각속도는 항상 일정한 값을 갖으며 고정자 자속기준 동기 좌표계에서 $\lambda_{qs}^e = 0$ 이므로 식 (6)을 식(22)과 같이 표현된다.

$$i_{qs}^e = -\frac{L_m}{L_s} i_{qr}^e \quad (22)$$

식 (22)를 식 (9)에 대입하여 나타낸, 유도전동기 토크 식은 (23)와 같다.

$$T_e = -\frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_s} i_{ds}^e i_{qr}^e \quad (23)$$

슬립 각속도는 식 (24)와 같이 추정 할 수 있다.

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r \quad (24)$$

5. 고조파 보상

식 (6)으로부터 여자 전류식은 식 (25)와 같이 얻을 수 있다.

$$i_o = \frac{\lambda_{qs}^e}{L_s} = i_{qs}^e + (L_m / L_s) i_{qr}^e \quad (25)$$

동기 좌표계에서 고정자와 회전자와의 q축 전압, 전류 관계식은 식 (26), (27)과 같이 표현된다.

$$v_{qs}^e = e^{j\theta_{sl}} v_{qr}^r \quad (26)$$

$$i_{qs}^e = e^{j\theta_{sl}} i_{qr}^r \quad (27)$$

회전자 좌표계에서 회전자 전류방정식과 전류명령식은 식 (28), (29)로 표현된다.

$$i_{qr}^r = e^{-j\theta_{sl}} \frac{L_s}{L_m} (i_o - i_{qs}^e) \quad (28)$$

$$i_{qr}^{*r} = e^{-j\theta_{sl}} \frac{L_s}{L_m} (i_o^* - i_{qs}^{*e}) \quad (29)$$

고정자 회로는 전원선에 연결되어 있어 i_o 의 변화가 거의 없고 인버터의 동작이 이상적이라는 가정하에 다음과 같은 식이 성립하게 된다.

$$i_o \cong i_o^* \quad (30)$$

$$i_{qr}^r \cong i_{qr}^{*r} \quad (31)$$

$$i_o - i_{qs}^e \cong i_o^* - i_{qs}^{*e} \quad (32)$$

$$i_{qs}^e \cong i_{qs}^{*e} \quad (33)$$

6. 시뮬레이션

전동기 토크는 i_{qr}^e 와 반비례하는 것을 식 (23)을 통해 알 수 있고 (16), (17)식을 통해 동기좌표계의 q축전류는 v_{qr}^e 에 의해, 동기좌표계 d축전류는 v_{dr}^e 에 의해 제어됨을 알 수 있다. 그림 6은 전동기의 전류제어도이다.

고조파가 발생된 입력전류를 검출하여 만든 회전자축의 전류 지령치로, 입력전류로 발생된 고조파를 보상할 수 있는 신호를 회전자에서 생성하게 된다. 시뮬레이션 결과파형인 그림 4는 고조파 보상 전 전압, 전류이고 그림 5는 고조파 보상후의 전압, 전류이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 입력전류로 발

생된 전원전류가 권선형 유도전동기를 자속기준 벡터제어를 통해 보상됨을 모의시험을 통해 알 수 있다.

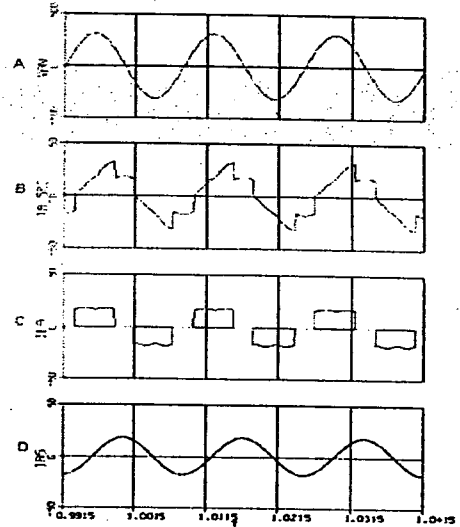


그림 4 고조파 보상전

- (A) 고정자 전압
- (B) 전원전류
- (C) 입력전류
- (D) 고정자 전류

Fig. 4 Simulation waveforms without harmonic compensation.

- (a) Phase voltage of power source
- (b) Phase current of power source
- (c) Load current
- (d) Primary current of machine

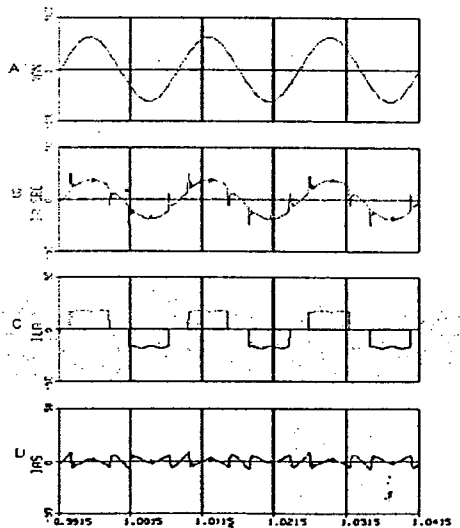


그림 5 고조파 보상후

- (A) 고정자 전압
- (B) 전원전류
- (C) 입력전류
- (D) 고정자 전류

Fig. 5 Simulation waveforms with harmonic compensation

- (a) Phase voltage of power source
- (b) Phase current of power source
- (c) Load current
- (d) Primary current of machine

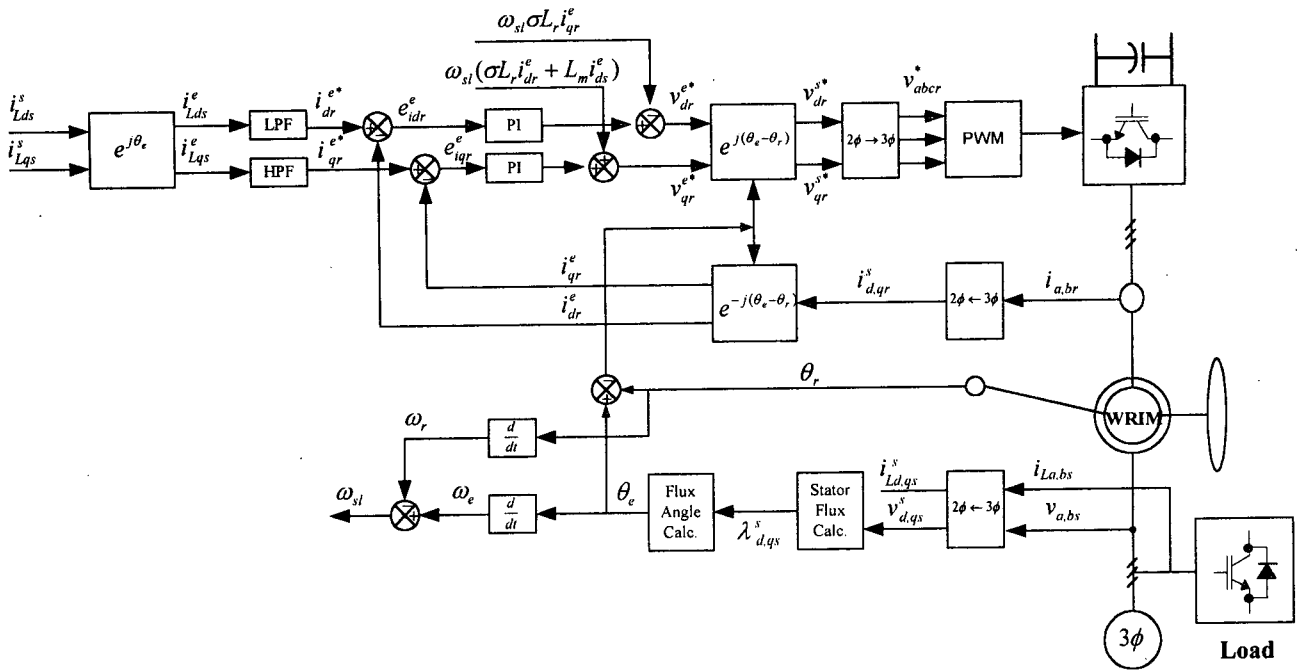


그림 6 고조파 보상 전체 제어도
 Fig. 6 Control block diagram for harmonic compensation

7. 결 론

고정자 자속을 기준으로 하여 전원 각속도와 전 동기 각속도를 측정, 이를 이용하여 권선형 유도 전동기의 회전자 전압제어에 의한 고정자 자속기준 벡터제어를 통하여 전원선의 고조파 보상을 행하였다.

- (1) 본 연구에서 제안한 제어 시스템은 고전압에 연결되는 고정자 회로의 전력제어를 권선형 유도전동기의 권선비에 의해 저전압이 형성되는 회전자 회로를 제어하는 방법이므로, 저전압 인버터를 사용해 고전압 전원선의 전력을 제어할 수 있다.
- (2) 전압원으로 제어하기 때문에 공간벡터 변조방식등을 적용하여 우수한 제어성능을 달성할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] C. Brune, R. Spee and A. K. Wallace, "Experimental Evaluation of a Variable Speed, Doubly-Fed Wind-Power Generating System," IEEE Ind. App. Society Annual Meeting, Toronto, Canada, October, pp. 480-487, 1993.

[2] M. Yamamoto and O. Motoyoshi, "Active and Reactive Power Control for Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 6, No. 4, pp. 624-629, 1991.

[3] M. Y. Uctug, I. E. skamdarzadeh, H. Ince, "Modelling and output power optimisation of a wind turbine driven double output induction generator", IEE Proc.-Electr.Power Appl., Vol. 141, NO. 2, pp. 3338, 1994, March.

[4] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back to back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 143, NO. 3, pp. 231-241, 1996, May.

[5] R. Li, A. Wallace and R. Spee, Y. Wang, "Dynamic Simulation of Brushless Doubly-Fed Machines," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 445-452, 1991.

[6] L. Xu and Y. Tang, "High efficient wind power generation by the doubly excited brushless reluctance machine", The American Wind power Energy Association Wind Power '93 Conference, San Francisco, CA, pp. 266-273, 1993.

[7] L. A. Pittorino, A. Horn, and J.H.R. Enslin, "Power Theory Evaluation for the Control of an Active Power Filter", AFRICON, pp. 676-681, 1996.