

제3 고조파 전류성분 주입에 의한 5상 농형 유도전동기의 속도제어 특성

김민회[†], 김남훈¹

A Speed Control Characteristics for Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Injecting 3rd Current Harmonics Component

Min-Huei Kim[†], and Nam-Hun Kim¹

Abstract - This paper proposes a improved speed control system for five-phase squirrel-cage induction motor(IM) injecting 3rd. current harmonic components with field oriented control (FOC) A five-phase IM drives present unique characteristics due to the additional degrees of freedom and also drives possess many others advantage compared with the traditional three-phase motor drive system, such as reducing a amplitude of torque pulsation at low frequency and increasing the reliability. In order to maximize the torque per ampere, the proposed motor has concentrated windings. The produced back-electromotive force is almost trapezoidal, and the motor is supplied with the combined sinusoidal plus third harmonic of currents. There is necessary to controlled 3rd harmonic current in order to high response characteristics. For presenting the superior performance of the proposed the speed control system, experimental results are presented using a 32-bit fixed point TMS320F2812 DSP with 1.5[kW] induction motor.

Keywords: five-phase induction motor, speed control system, 3rd harmonics current injection

1. 서 론

최근 전력전자분야의 기술이 비약적으로 발전함에 따라 신뢰성이 우수한 고성능 전력변환장치들의 실용화가 이루어짐과 동시에 다양한 전동기 제어기법들의 개발로 인해 정밀 전동기제어 시스템에 농형 유도전동기나 영구자석 동기전동기가 사용되고 있으며, 견고성이나 가격 및 유지보수 측면에서 상대적으로 우수한 특성을 가지는 농형 유도전동기의 적용이 확대되고 있다. 현재 보편화된 가변속 전동기 구동시스템에는 3상 농형 유도전동기가 대부분 적용되고 있으나, 3상 전동기 구동시스템에 비해 구동 특성에서 많은 장점을 가지는 다상 전동기 제어시스템에 대한 연구가 이루어지고 있는 추세에 있다^{[1]-[9]}.

다상 전동기는 산업분야에서 가장 많이 사용되고 있는 삼상 전동기에 비해 토크의 맥동이 저감되며, 주파수 증가에 따라 소음이 감소되고, 상당 전압의 증가 없이 전류의 밀도를 높일 수 있으며, 고조파 전류성분의 주입으로 출력 토크가 증가될 수 있으며, 상 권선의 개방 사고에서도 연속적으로 운전 할 수 있는 장점 등을 가지므로, 정밀하고 높은 신뢰성이 요구되는 전동기 가변속 시스템에서는 3상 전동기를 대체할 차세대 전동기로서 전기자동차나 선박 추진시스템 및 우주항공 산업분야 등에서 부분적으로 적용되고 있으며 점차적으로 적용분야가 확대 되어 이에 대한 연구도 대단히 활발하게 진행되고 있다^{[10]-[23]}.

일반적으로 인버터에 의해 구동되는 다상 전동기는 공급전원의 고유특성과 호환성의 우수한 특성 및 제작의 편의성 측면에서 고정자의 권선을 집중권의 형태로 제작한다. 집중권선을 가지는 전동기에서는 공극 자속이 제3 공간 고조파 성분을 포함하고 있으므로 정현파 형태가 아닌 사다리꼴 형태의 파형으로 나타나게 되므로, 전동기에서 발생하는 역기전력도 사다리꼴 형태의 파형이 된다. 정현파 형태의 공극자속 분포를 지닌 전동기에

Paper number: TKPE-2013-18-3-11 ISSN: 1229-2214
[†] Corresponding author: mhkim@ync.ac.kr, Dept. of Electrical Automatic Engineering, Yeungnam College of Science & Technology

Tel: +82-53-650-9263 Fax: +82-53-624-4736

¹ Principal Research Engineer, Samsung Techwin

Manuscript received Jan. 7, 2013; accepted Mar. 26, 2013

서는 코어의 일부분에서만 포화현상이 나타나므로, 공극의 자속밀도가 사다리꼴 형태의 파형을 가지는 경우에는 코어 활용도가 높아질 수 있다. 따라서 전동기에 공급되는 전류파형이 정현파 전류보다는 3차 고조파 성분이 포함된 전류파형이 토크발생에 있어 보다 유리한 장점을 가질 수 있으므로 5상 유도전동기 제어에서는 제3 고조파 전류의 주입으로 높은 전류밀도를 가질 수 있으며, 15[%] 정도의 출력 토크 상승을 가져 올 수 있다.

고정자 권선이 집중권으로 구성된 5상 전동기의 구동 시스템에 관한 연구로, 다상 전동기의 등가회로 및 모델링^{[1][7][11]}, 회전자 좌표기준 벡터제어^{[2][3][4][12]}, 직접 토크 제어^{[4][16][19]}, 고조파 전류에 의한 토크 맥동 저감^{[2][20][22]}, 제3 고조파 전류성분 주입^{[5][10][17]}, 공극에서 자속과 기자력의 포화현상^{[6][8]}, 전동기의 직병렬 운전^{[18][21][23]}, 사고해석과 운전^{[7][9][11]}, 등에 대한 연구가 중점적으로 이루어지고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 점차적으로 고성능화되고 있는 산업현장에서의 다양한 전동기제어 시스템들의 요구사항에 부합될 수 있는 제3 고조파 전류성분을 주입한 5상 농형 유도전동기의 회전자 자속기준 벡터제어 시스템에 의한 속도 응답특성 개선을 위하여, 전동기 단자에서 얻어지는 부하전류를 검출하여 속도지령에 따라 기본파 성분과 제3 고조파 전류 성분을 제어하는 속도 제어 시스템을 제안하였다. 제안된 제어기법의 구현과 운전특성을 관찰하기 위해, 전압형 인버터와 디지털 제어기로 TMS320F2812 DSP를 사용하여, 1.5[kW]의 5상 농형 유도전동기의 제3 고조파 전류성분의 주입에 의한 속도제어 응답특성을 비교 고찰하였다.

2. 5상 유도전동기의 수학적 모델

2.1 전압방정식

일반적으로 2극 5상 농형 유도전동기의 고정자 권선의 각 상은 공간적으로 72도의 위상차를 가진 N턴의 집중권으로 구성되며, 5상 유도전동기의 고정자 권선분포도는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다^{[5][14]}. 이때 권선의 역기전력과 전류파형을 이론적으로 분석한 결과는 그림 2에서 보는 바와 같이 역기전력은 사다리꼴 형태이며, 전동기에 흐르는 전류는 기본파 성분과 제3 고조파 성분으로 분해하여 포함된 성분을 계산할 수 있다.

5상 유도전동기의 수학적 모델은 a b c d e의 기준 좌표계 상에서 행렬 형태로 간략히 표현될 수 있으며, 고정자 전압 및 쇄교자속 방정식은 식(1)과 (2)로, 회전자 전압 및 쇄교자속 방정식은 식(3)과 (4)로 표시된다^{[3]-[5][15]}.

$$V_{abcde} = R_s I_{abcde} + \frac{d\lambda_{abcde}}{dt} \tag{1}$$

$$\lambda_{abcde} = L_s I_{abcde} + L_{sr} I_{abced} \tag{2}$$

$$V_{abced} = R_r I_{abced} + \frac{d\lambda_{abced}}{dt} \tag{3}$$

$$\lambda_{abced} = L_{sr}^T I_{abcde} + L_{rr} I_{abced} \tag{4}$$

따라서 5상 유도전동기 토크는 다음 식(5)와 같이 나타낼 수 있다^{[5][15]}.

$$T_e = \frac{P}{2} I_{abcde}^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_{abced} \tag{5}$$

$$= \frac{5}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{de1} I_{qe1} - \lambda_{qe1} I_{de1} + 3\lambda_{de3} I_{qe3} - 3\lambda_{qe3} I_{de3})$$

여기서, I_{de1} , I_{qe1} , I_{de3} , I_{qe3} 은 회전좌표계로 변환된 전류이며, λ_{de1} , λ_{qe1} , λ_{de3} , λ_{qe3} 는 회전좌표계로 변환된 회전자 쇄교자속을 나타낸다.

5상 유도전동기의 전압방정식은 임의의 회전좌표계 $dqe1$ 과 $dqe3$ 에 대해서 다음과 같이 식(6)~(9)로 나타낼 수 있다.

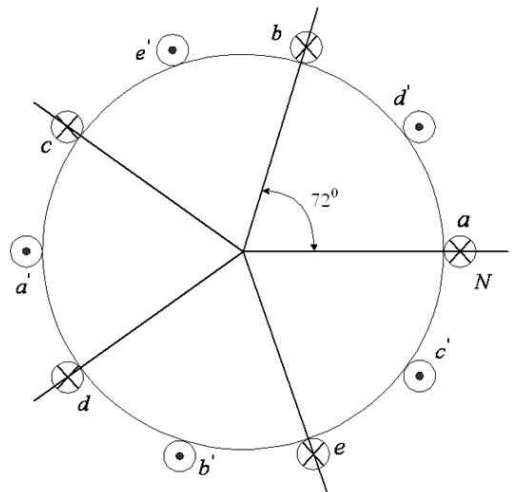


Fig. 1 Five-phase concentrated winding of squirrel-cage IM

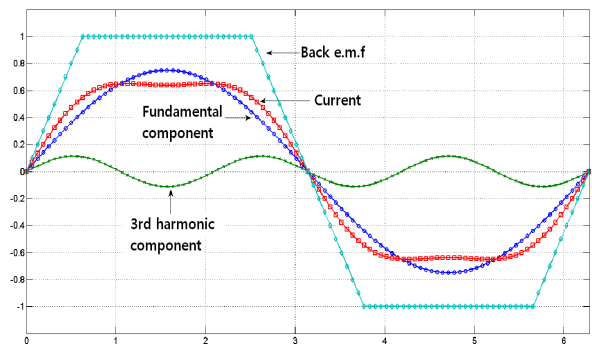


Fig. 2 Analyzed back-EMF and current waveform of five-phase IM

$$V_{qe1} = R_s i_{qe1} + \omega \lambda_{de1} + \frac{d\lambda_{qe1}}{dt} \quad (6)$$

$$V_{de1} = R_s i_{de1} - \omega \lambda_{qe1} + \frac{d\lambda_{de1}}{dt} \quad (7)$$

$$V_{qe3} = R_s i_{qe3} + 3\omega \lambda_{de3} + \frac{d\lambda_{qe3}}{dt} \quad (8)$$

$$V_{de3} = R_s i_{de3} - 3\omega \lambda_{qe3} + \frac{d\lambda_{de3}}{dt} \quad (9)$$

이들 식들은 고정자의 전압과 전류벡터는 식(10)과 (12)로, 회전자 전압 및 전류벡터는 식(11)과 (13)으로 되며, T 는 벡터의 전치행렬을 나타내며, P 는 극수이다. R_s 는 각 고정자 상저항으로 구성된 5차원 대각행렬이다. R_r 은 역시 각 회전자 전압의 상저항으로 구성된 5차원 대각행렬이다.

$$V_{abcde s} = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs} \ v_{ds} \ v_{es}]^T \quad (10)$$

$$V_{abcde r} = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr} \ v_{dr} \ v_{er}]^T \quad (11)$$

$$I_{abcde s} = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{ds} \ i_{es}]^T \quad (12)$$

$$I_{abcde r} = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr} \ i_{dr} \ i_{er}]^T \quad (13)$$

5상 전동기 모델의 간략화를 위하여 좌표변환에서 기본과 성분은 동기속도로 회전하는 좌표계이고, 3차 공간 고조파 성분은 동기속도의 3배로 회전하는 좌표계이다. 영벡터 성분을 제외하고 as, bs, cs, ds, es상 변수를 등가적으로 표현할 수 있는 두 공간벡터는 일반적으로 식(14)와 같이 정의될 수 있다^{[3]-[5][12]}. 이 식(14)는 5상을 기본과 제3 고조파 성분으로 좌표변환 시키는 일반식으로, $F_{dqe1dqe3}$ 은 회전좌표계에서 본 기본과 성분과 제3 고조파 성분을 나타내며, $F_{abcde s}$ 는 고정좌표계에서 본 성분을 나타낸다. 여기서 $T_{13}(\theta)$ 는 매트릭스 변환식이다^[5].

$$F_{dqe1dqe3} = T_{13}(\theta) F_{abcde s} \quad (14)$$

2.2 고조파 해석

5상 유도전동기의 고조파 해석을 위하여, 농형 유도전동기는 정상상태 조건 하에서 구동되며, 자계의 중첩 허용을 위해 포화현상과 고주파에서 고정자의 표피효과는 무시한다. 그림 3과 같이 a상 좌표축은 권선함수 $N(\phi)$ 를 정의하기 위한 경계 각도 ϕ 를 위한 기준점으로 사용되었고, N 은 각 상의 극당 권선수를 나타낸다.

그림 3에 나타난 권선함수를 각각 푸리에 급수로 표시하면 식(16)과 같다.

$$N(\phi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{n\pi}\right) \left(\frac{N}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos n(\phi + \alpha), n = 1, 2, 3... \quad (16)$$

여기서 ϕ 는 공간상의 각도이고, α 는 상과 상 사이의 공간각도이며, n 은 고조파의 차수이다. 이 경우 각 코일에서는 72° 펄스로 구성된 반 직사각형 형태의 전류가 흐르며, 전류파형을 푸리에 급수로 나타내면 식(17)으로 표시 된다^{[12][14]}.

$$i_a(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{4}{m\pi}\right) I_m \cos(m\beta) \sin(m\theta + \delta), m = 1, 2, 3... \quad (17)$$

여기서 $\theta = \omega t$, $\beta = \pi/10$, δ 는 임의의 위상각, 그리고 I_m 은 직류링크 전류의 평균값이다. 또한 각 코일에 의해 생성된 합성 기저력 $F_{abcde s}$ 는 다음 식(18)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{abcde s} &= N_a I_a + N_b I_b + N_c I_c + N_d I_d + N_e I_e \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1}{nm}\right) \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \frac{N I_m}{2} \cos\left(\frac{m\pi}{10}\right) ((\cos(m\omega t - n\psi) \\ &\quad (\cos\frac{(m-n)2\pi}{5} + \cos\frac{(m-n)4\pi}{5} + \frac{1}{2}) \\ &\quad + (\cos\frac{(m+n)2\pi}{5} + \cos\frac{(m+n)4\pi}{5} + \frac{1}{2})) \\ &= F_{ds} + jF_{qs} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)을 이용하면 집중권 형태의 5상 전동기의 공간 자계 고조파와 시간 전류 고조파 간의 관계를 산술적으로 쉽게 계산되며, 5상 전류성분은 2상 전류성분인 $i_{abcde s} = i_{ds} + j i_{qs}$ 형태로 변환하여 표현 할 수 있다.

따라서, 언급된 고조파 해석을 기초로, 사다리꼴과 유사한 형태의 파형으로 5상 전동기 단자에서 나타나는 기본과 제3 고조파가 합성된 전류파형은 사다리꼴 형태의 전류파형이 간단하게 계산 될 수 있으며, 제3 고조파 성분은 공간 자계 고조파와 시간 전류 고조파에서 모두 기본과 성분에는 영향을 주지는 않는다. 기본과 제3 고조파에 의해 생성되는 기저력과 자속은 동일한 동기속도로 회전하므로, 제3 고조파는 전동기에서 등가적인 기본과 성분으로 동작한다. 기본과 제3 고조파로 인한 영향은 두 개의 동일한 주파수 성분들로 볼 수 있으므로 기본과 제3 고조파 전류를 포함한 5상 농형 유도전동기는 두 개의 독립적인 5상 유도전동기로 해석 된다.

일반적으로 PWM 인버터로 구동되는 5상 유도전동기 제어시스템에서 공간전류벡터 궤적에 따른 전류성분의 파형은 그림 4와 같다. 또한 5상 유도전동기에서는 기본

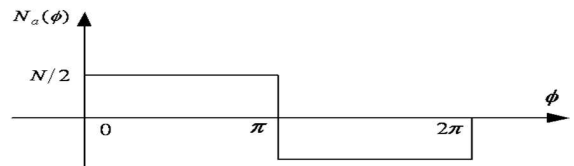


Fig. 3 Winding function for a-phase of five-phase IM

파 성분의 등가회로와 제3 공간 고조파 성분의 등가회로를 적용하여 각각 독립적으로 기본파는 물론 제3 고조파 전류성분을 제어하지 않으면 그림 4(b)에서 보는바와 같이 제3 고조파 전류성분이 전동기에 유입되어 합성된 전류파형의 왜곡을 가져 올 수 있다. 따라서 5상 농형유도전동기는 구형파 형태의 역기전력을 가지고 있으므로 최대 토크를 얻기 위해서는 식 (5)에서 알 수 있듯이 역기전력과 같은 구형파 형태의 전류를 인가해 주어야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 회전자 자속기준 벡터제어 시스템 구성

그림 5는 5상 농형 유도전동기에 포함된 기본파와 제3 고조파 성분의 전류를 빠른 응답으로 제어하기 위해 제안된 속도제어 시스템의 제어 블록도를 나타낸 것이다. 그림에서 비례계수 K는 토크성분 전류 지령치의 기본파 성분 dq_{e1}^* 대한 고정자 전류 지령치의 제3 고조파 dq_{e3}^* 의 상대적인 값에 관계된다. 사다리꼴 형태의 고정자 상전류를 공급하기 위해서 제3차 고조파 전류성분이 더해졌으며, 그림 2에서 이론적으로 푸리에 급수에 의해 계산된 값을 실험을 통해 얻어진 결과로 15[%]로 설정되었다^{[5][14][17]}.

제안된 속도제어 시스템은 속도지령 ω_r^* 과 실제 전동기 속도 ω_r 를 비교하여 PI 제어기로 기본파의 토크성분

전류 I_{qe1}^* 를 제어하며, 전동기의 정격속도 범위에서 일정한 자속성분 전류 I_{de1}^* 가 얻어진다. 이들 기본파 성분에서 제3 고조파에 포함되는 성분의 비를 결정하는 비례계수 K의 값에 의하여 주입되는 제3 고조파 성분 I_{qe3}^* 와 I_{de3}^* 를 결정하게 된다. 또한 전동기의 고정자의 단자전류 $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}, i_{ds}, i_{es}$ 를 검출하여 역변환(Inverse VR 5/2)에 의해 식 (15)를 사용하여 $I_{qe1}, I_{qe3}, I_{de1}, I_{de3}$ 를 연산하며, 각각 PI 제어기를 사용하여 지령값 $V_{qe1}^*, V_{qe3}^*, V_{de1}^*, V_{de3}^*$ 를 결정하며, VR 2/5의 좌표 변환에 의해 인버터의 게이트에 가해지는 스위칭 함수를 PWM 제어하는 시스템이다.

결과적으로, 제안된 알고리즘은 기본파 성분과 제3고조파 성분의 전류를 각각 정밀제어하기 위하여 PI 제어기를 사용하며, 고정자의 제3 고조파의 토크와 자속 성분 전류 I_{qe3}^* 및 I_{de3}^* 는 기본파 성분인 I_{qe1}^* 와 I_{de1}^* 의 15[%]를 주입하기 위하여 K=0.15로 설정된다.

따라서 좌표축 변환에서 동기 회전각 θ_e 는 식(19)와 같이 3개의 각 합으로 계산된다.

$$\theta_e = \theta_r + \theta_{slip} + \alpha \tag{19}$$

여기서 θ_r 는 식(20)으로 회전자의 위치를 나타내는 각도이며, 슬립 각 θ_{slip} 는 식(21)이며, 식 (22)에서 α 는 부하 변화에 따른 동적 응답특성을 보정하는 각을 나타낸다^[17].

$$\theta_r = \int \omega_r dt \tag{20}$$

$$\theta_{slip} = \int \omega_{slip} dt = \int \left(\frac{R_r I_{qe1}}{L_r I_{de1}} \right) dt \tag{21}$$

$$\alpha = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{I_{qe1}^*}{I_{de1}^*} \right) \tag{22}$$

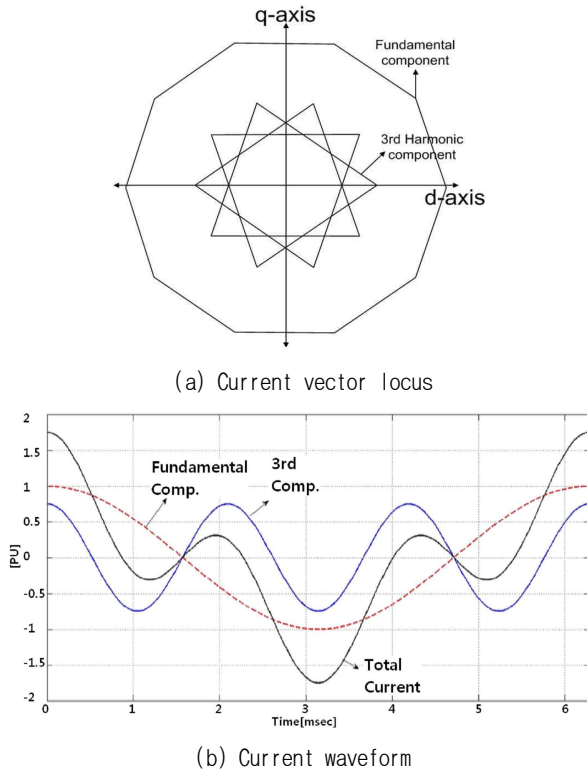


Fig. 4 Five-phase space vector locus in dq1-dq3 frame and corresponding current waveform

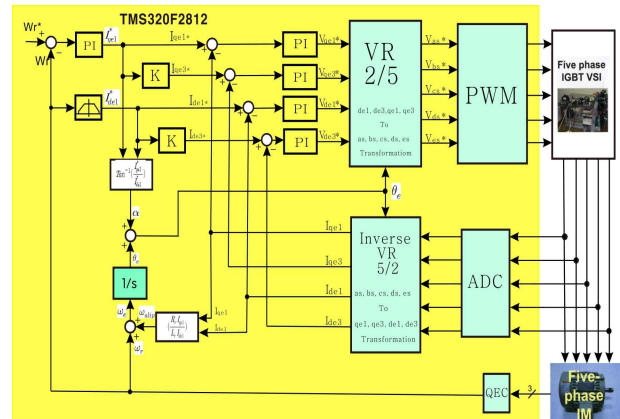


Fig. 5 Block diagram of proposed speed control system for 5-phase IM

또한 집중권의 고정자 권선을 가진 5상 농형 유도전동기에서는 공간 고조파 성분이 포함되어 있으며, 이러한 고조파 성분은 전류파형을 왜곡시킨다. 기본과 전압 성분과 제3 고조파 전압성분은 서로 다른 등가회로에 적용되므로, 고조파 전류성분은 서로 다른 위상변위를 가지게 됨을 알 수 있다.

4. 시스템 구성 및 실험방법

4.1 시스템 구성

제안된 자속기준 벡터제어 기법은 1.5[kW] 5상 농형 유도전동기와 전압형 인버터를 통해 구현하였다. 제어기는 TI사의 TMS320F2812 DSP를 통해 디지털적으로 구현하였으며, 세미크론사의 SKM75GD124D IGBT를 5상 인버터의 스위칭 소자로 적용하였다. 표 1에서는 연구를 위해 실험용으로 개발 제작된 5상 농형 유도전동기의 주요 사양과 파라미터를 보여준다^[3].

4.2 실험방법

제안된 속도제어 시스템에서, 제3 고조파 성분의 영향을 비교 관측하기 위하여 고조파 주입의 정도를 나타내는 비례계수 K는 0[%]와 15[%]로 설정하여 응답특성을 관측한다. 속도제어는 과도상태인 0[rpm]에서 시작하여 1000[rpm]으로 운전한 후 다시 역방향인 -1000[rpm]으로 지령 하였을 때, 전동기의 a상과 b상의 선전류 파형을 관측하며, 토크성분 전류 I_{qe} 와 실제 속도응답 $N(\omega_{rpm})$ 의 변화 상태를 관측한다. 여기에서는 자속성분 지령전류는 전동기의 무부하 전류가 1[A]이므로 $I_{de1}^* = 1.0[A]$ 가 되게 설정하였다. 부하는 전동기 정격의 1/2 실부하인 4.2[Nm]으로 설정하여 a상과 b상의 선전류 파형을 측정하며, 이때 전류파형에 포함된 고조파 성분을 전력변환 프로그램인 PSIM를 사용한 FFT 고조파 성분을 분석한다.

5. 실험결과

5.1. K=0.0인 경우

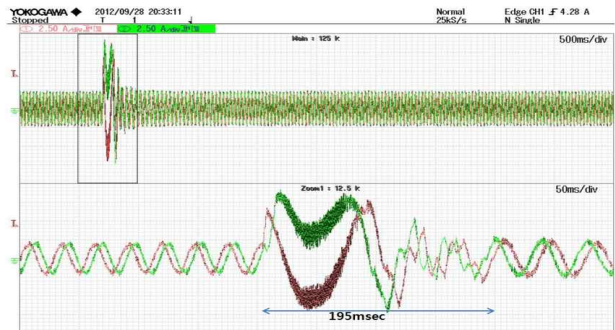
K=0.0은 제3 고조파 성분을 고려하지 않는 경우로, 부하 토크 $T_L = 4.2[N \cdot m]$ 로 설정하여, 정역운전인 0 속도에서 +1000으로 운전한 후 다시 반대 방향인 -1000[rpm]으로 지령하였을 때 속도제어 응답특성을 그림 6에서 보여준다.

그림 (a)는 과도상태에서 a상과 b상의 선전류의 파형(상)과 확장한 전류파형(하)이다. 그림(b)는 정상상태에서 확장된 a상(상) 및 b상(하) 선전류의 파형이다. 이 파형은 정현파 형태이므로 제3 고조파 성분이 적게 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 (c)는 그림 (b)의 a상 선전류 파형을 PSIM에 의해 고조파 성분을 분석한 결과

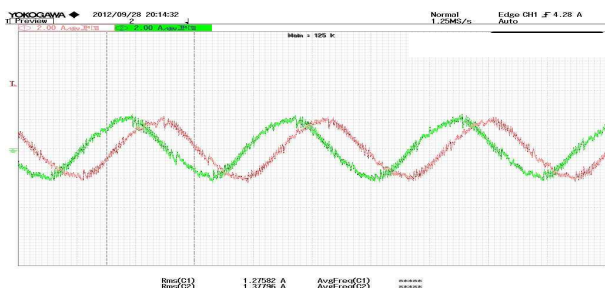
Table 1 Specifications and parameters of the five-phase IM

Item	Specifications	Parameters	Value
Rated capacity	1,500[W]	Stator winding resistance R_s	7.752[Ω]
Rated voltage	220[V]	Rotor conductor resistance R_r	6.868[Ω]
Rated current	9.571[A]	Stator leakage inductance L_{ls}	41.03[mH]
Pole numbers	4	Rotor leakage inductance L_{lr}	41.03[mH]
Rated frequency	60[Hz]	Iron core inductance L_m	539.67[mH]
Rated RPM	1720[rpm]	Stator leakage reluctance X_{ls}	30.94[Ω]
No-load current	5.002[A]	Rotor leakage reluctance X_{lr}	30.94[Ω]
Current per phase	1.914[A]	Iron core reluctance X_m	203.45[Ω]
Power factor	79.0[%]	Iron core resistance R_m	7.769[Ω]
Efficiency	89.0[%]	Iron core loss P_i	39.2[W]

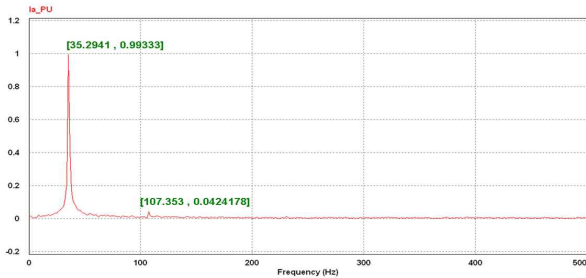
를 보여준다. 그림 (d)는 토크 성분 전류 지령 $I_{qe}^* - ref$ 와 실제 선전류에 포함된 토크성분 전류 I_{qe-act} 의 응답 특성이며, 그림(e)는 자속성분 전류 지령 $I_{de}^* - ref$ 와 실제 자속성분 전류 I_{de-act} 의 응답특성이다. 또한 그림 (f)는 속도지령 $\omega_{rpm-ref}$ 와 실제속도 $\omega_{rpm-act}$ 의 응답 특성을 보여준다.



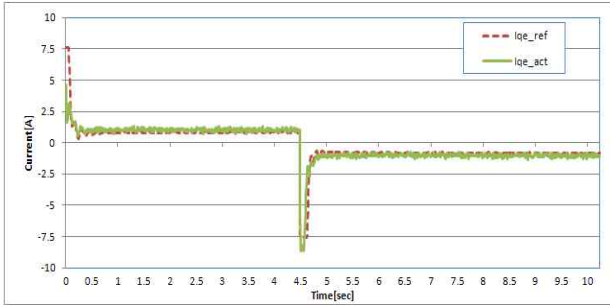
(a) Waveform of "a" and "b" phase line current(upper), extended line current at transient state(lower)



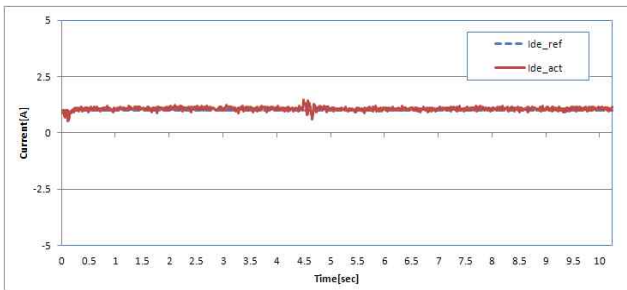
(b) Extended current waveform of "a" and "b" phase at steady state



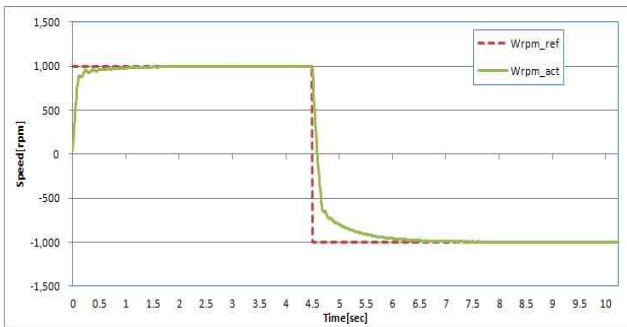
(c) FFT harmonics analysis result a-phase line current by PSIM



(d) Torque current component I_{qe-ref}^* and actual torque current component I_{qe-act}



(e) Flux current component I_{dc-ref}^* and actual flux current component I_{dc-act}



(f) Speed command $\omega_{rpm-ref}$ and actual speed $\omega_{rpm-act}$

Fig. 6 Response characteristics of speed control with load torque 4.2[Nm] at K=0.0

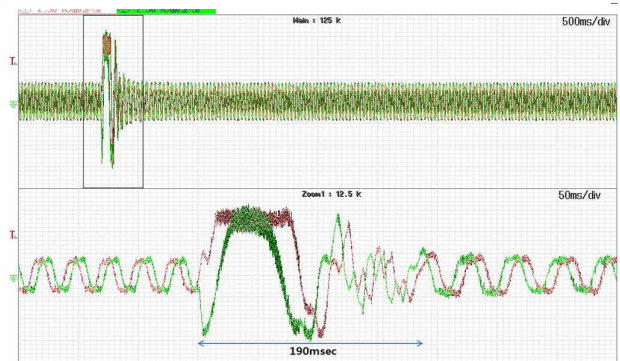
5.2. K=0.15인 경우

K=0.15인 경우는 제3 고조파 전류성분을 15[%] 주입

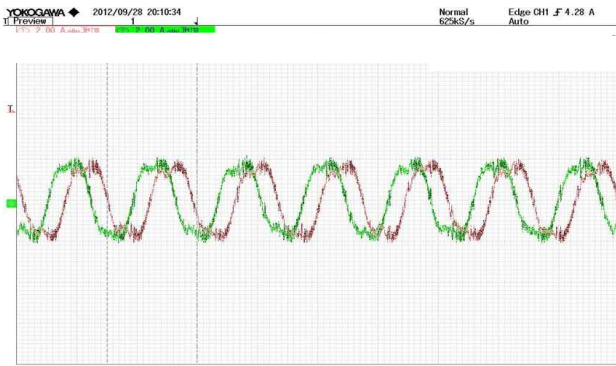
하는 경우로, K=0.0인 경우와 같은 조건에서 속도지령을 하였을 때 속도제어 응답 특성을 그림 7에서 보여준다. 그림 (a)는 과도상태에서 a상과 b상의 선전류 파형(상)과 확장한 전류파형(하)이다. 그림 (b)는 정상상태에서 확장된 a상(상) 및 b상(하) 선 전류의 파형이다. 이 파형은 사다리꼴 형태이므로 제3 고조파 성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 (c)는 그림 (b)의 a상 선 전류 파형을 PSIM에 의해 고조파 성분을 분석한 결과를 보여준다. 그림 (d)는 토크성분 전류지령 I_{qe}^* 와 실제 선전류 성분 I_{qe} 의 응답특성이며, (e)는 자속성분 전류지령 I_{dc}^* 와 실제 선 전류에 포함된 자속성분 전류 I_{dc} 의 응답특성이며, 그림 (f)는 속도지령 $\omega_{rpm-ref}$ 와 실제 속도 $\omega_{rpm-act}$ 의 응답특성을 보여준다.

5.3. 응답 특성 비교

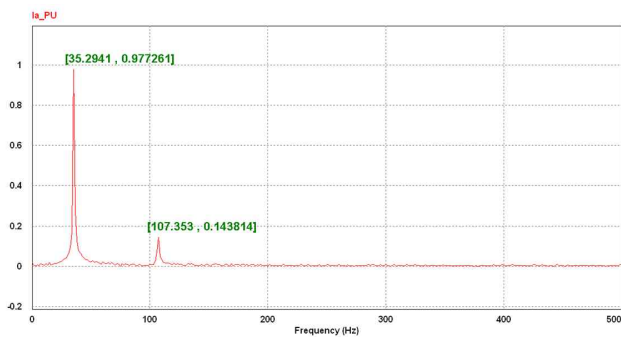
제안된 속도제어 시스템에서, 제3 고조파 성분의 영향을 비교 관측하기 위하여 제3 고조파 전류성분이 주입하지 않는 K=0.0인 경우와 기본파 성분의 15[%]를 주입하는 K=0.15인 경우에 있어 토크 전류성분의 응답특성을 비교한다. 주입되는 제3 고조파 전류성분의 영향을 보다 쉽게 비교 될 수 있도록 무부하인 토크지령 전류 성분 $I_{q1}^* = 0.0$ 으로 설정하였으며, 자속성분 지령전류는 전동기의 무부하 전류성분이 $I_{de1}^* = 1.0[A]$ 가 되게 설정하였다. 속도제어는 과도상태인 0[rpm]에서 시작하여 1000[rpm]으로 운전한 후 다시 역방향인 -1000[rpm]으로 지령하여 제안된 속도제어 시스템의 응답특성 상태를 관측한 결과는 그림 8과 같다. 그림 (a)는 K=0.0에서 토크성분 전류지령 I_{qe}^* ($I_{qe-Ref-Sine}$)와 실제 토크 전류 성분 I_{qe} ($I_{qe-Act-Sine}$)의 과도응답 특성이며, (b)는 K=0.15에서 토크성분 전류지령 I_{qe}^* ($I_{qe-Ref-Trap}$)와 실제 토크 전류 성분 I_{qe} ($I_{qe-Act-Trap}$)의 응답특성이다. (c)는 속도지령이 $\omega_{rpm-ref}$ 일 때, K=0.0에서 실제 속도 $\omega_{rpm-Act-Sine}$ 및 K=0.15에서 실제속도 $\omega_{rpm-Act-Trap}$ 의 응답특성을 보여 준다.



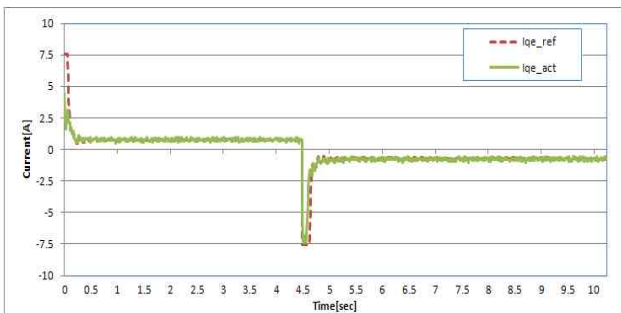
(a) Waveform of "a" and "b" phase line current(upper), extended line current at transient state(lower)



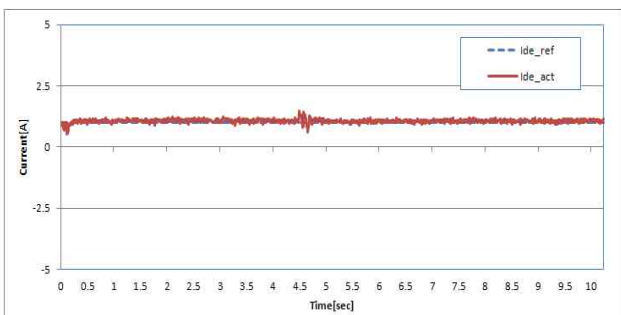
(b) Extended current waveform of "a" and "b" phase at steady state



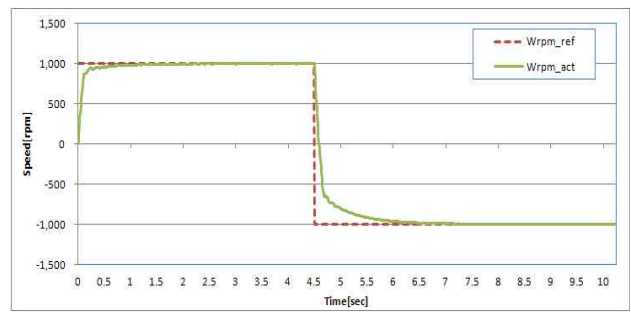
(c) FFT harmonics analysis result of a-phase line current by PSIM



(d) Torque current component I_{qe}^* and response actual current I_{qe-act} .

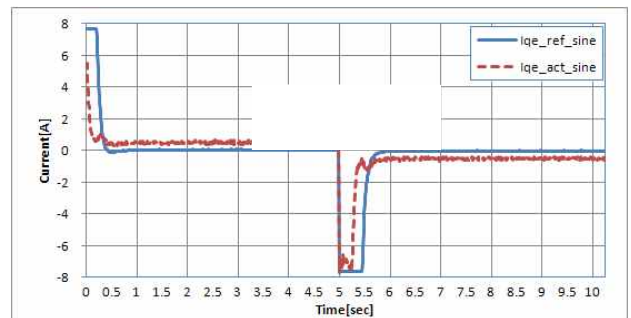


(e) Torque current component I_{de}^* and response actual current I_{de-act}

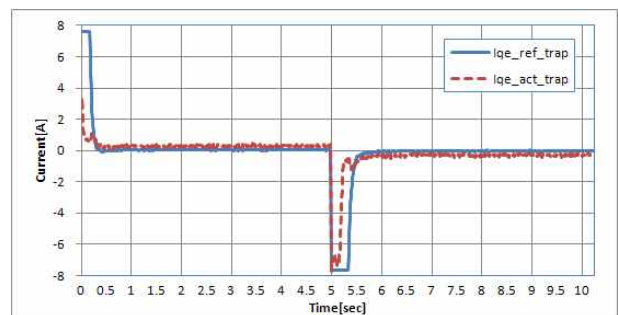


(f) Speed command $\omega_{rpm-ref}$ and actual speed $\omega_{rpm-act}$

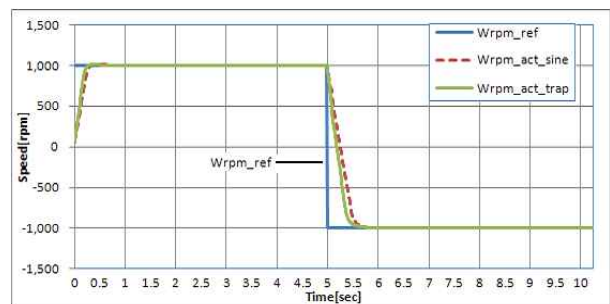
Fig. 7 Response characteristics of speed control with load torque 4.2[Nm] at K=0.15



(a) Torque current component I_{qe}^* and response actual torque current I_{qe} at K=0.0



(b) Torque current component I_{qe}^* and response actual torque current I_{qe} at K=0.15



(c) Speed command $\omega_{rpm-ref}$, actual speed $\omega_{rpm-act-sine}$ and $\omega_{rpm-act-trap}$

Fig. 8 Comparison response characteristics of speed control

6. 제안된 제어시스템의 검토

본 연구에서 제안된 제어시스템의 특성실험 결과는 다음과 같이 요약 된다.

- 일반적으로 자속기준 벡터제어에서는 공극의 자속과 회전자의 자속 공간 위상각 사이의 작은 기계적인 부하의 변화에 의존되므로 전류제어기는 회전자 자속 공간 위상각 성분들이 d축과 잘 결합(aligned) 되도록 동작 하여야 한다. 즉 기본과 좌표계 d_{e1} 축에서는 기본과 자속성분이, 제3 고조파 좌표계 d_{e3} 축에서는 제3 고조파 자속성분의 위상각 제어가 잘 이루어져야 한다. 그러나 본 연구에서는 시스템을 보다 간단하게 하기 위하여 유도전동기 제어시스템에서 일반적으로 많이 사용하는 방법인 자속성분 전류의 제어는 무부하 전류에 해당하는 일정한 값으로 고정하였다.
- 제3 고조파 성분을 고려하지 않은 경우는 $K=0.0$ 으로, 그림 6과 같이 운전특성이 관측 되었으며, 제3 고조파 성분을 고려한 $K=0.15$ 인 경우는 그림 7과 같은 운전특성을 얻었다.
- 그림 6(b)의 파형과 그림 7(b)의 파형을 비교하면, 제3 고조파 성분을 주입하지 않은 경우가 주입하는 경우보다도 정현파 형태에 더 근접됨을 알 수 있다. 또한 그림 7(b)의 전류파형은 사다리꼴 형태의 파형으로 제3 고조파 성분이 많이 포함되고 있음을 알 수 있다.
- 그림 6(b)의 a상 전류파형을 사용하여 PSIM 프로그램으로 FFT 고조파 성분을 분석한 결과는 그림 6(c)이다. 이 결과에서 a상 전류에 포함된 기본과 성분은 35.29[Hz]에서 99.33[%]이며, 제 3고조파 성분은 4.24[%]가 포함되고 있음을 알 수 있다.
- 그림 6(d), (e), (f)와 그림 7(d), (e), (f)에서 보는 바와 같이 전류제어와 속도제어가 잘 이루어짐을 알 수 있다.
- 그림 7(b)의 a상 전류파형을 사용하여 PSIM 프로그램으로 FFT 고조파 성분을 분석한 결과는 그림 7(c)이다. 이 결과에서 a상 전류에 포함된 기본과 성분은 35.29[Hz]에서 97.73[%]이며, 제 3고조파 성분은 14.38[%]가 포함되고 있음을 알 수 있다.
- 그림 7(c)에서 보는 바와 같이 $K=0.15$ 인 경우 제3 고조파 성분의 주입이 약 15[%]로 제3 고조파 성분의 주입에서도 전류제어가 잘 이루어짐을 알 수 있으며, 또한 전류밀도가 증가됨을 확인 할 수 있다.
- 따라서 제안된 속도제어 시스템에서, 제3 고조파 전류주입에 의한 응답특성을 비교하기 위하여 무부하시의 속도제어 응답특성을 관측한 결과를 그림 8에서 보여 주었다. 그림 8(a)와 8(b)에서는 실제 토크 성분 전류가 지령치 전류가 $I_{qe1}^* = 0.0$ 임에도 불

구하고 약간 흐르고 있다. 이는 전동기 축에 시험장 치인 파워더 블레이크의 부하가 0.4[N.m] 정도 인가됨에 다른 영향으로 사료된다. 그림(c)에서 보는 바와 같이 제3 고조파 전류성분을 주입하는 경우가 토 크성분 전류 및 속도제어 응답에서도 특성이 약간 개선됨을 보여주고 있다.

7. 결 론

최근 점차적으로 고성능화되고 있는 산업현장에서의 다양한 전동기제어 시스템들의 요구사항에 부합하기 위하여 현재 많이 사용하고 있는 3상 유도전동기에 비해 저주파에서 토크의 맥동이 저감되며, 상의 권선이 개방되더라도 계속하여 운전 할 수 있는 등의 우수한 운전 특성을 가지는 5상 농형 유도전동기의 구동특성을 개선하기 위해 제3 고조파 전류성분을 주입하는 벡터제어기법을 적용한 속도제어 시스템을 제안하였다.

5상 유도전동기는 단위전류 당 발생토크의 크기를 최대한으로 하기 위해 집중권 형태의 고정자 권선을 가지며 공극에서 자속의 파형은 사다리꼴 형태의 파형이 된다. 또한 전동기로 유입되는 전류의 파형은 기본과 성분과 제3 고조파 성분이 합성된 전류성분이므로 운전 응답특성을 개선하기 위해서 제3 고조파 전류성분을 기본과의 15[%]를 주입하여 전동기에 인가되는 전류파형을 구형파 형태로 만들어 전류를 제어 할 수 있는 시스템으로 구성하였다.

따라서 제3 고조파 전류성분의 영향을 고려하여 우수한 응답특성이 얻어지는 농형 유도전동기의 회전자 자속기준 벡터제어 시스템의 구현을 위하여, 전동기 단자에서 얻어지는 부하전류를 검출하여 속도지령에 따라 기본과 성분과 제3 고조파 전류 성분을 각각 독립적으로 제어하여 부하의 속도변화에 따라 빠른 응답으로 추종 할 수 있는 PWM 제어방식에 의해 d축과 q축의 고정자 전류를 제어하는 새로운 형태의 속도제어 시스템이다.

제안된 벡터제어에 의한 농형 유도전동기의 속도제어 기법을 검증하기 위하여, 디지털 제어기로는 TMS320 F2812 DSP를 사용하였다. 실험용으로 설계 제작하여 개발된 1.5[kW] 농형 유도전동기와 IGBT 전압형 인버터로 벡터제어 시스템을 구현하였으며, 실험을 통해 제어시스템의 응답특성을 전동기의 정역 1000[rpm] 속도제어 영역에서 정상상태와 과도상태에서 제3 고조파 전류성분의 영향과 속도제어 응답특성을 고찰한 결과 제안된 제어시스템의 타당성을 확인하였다.

References

- [1] Ayman S, Abdel-Khalik, Mahmoud I. Masoud, and Barry W. Williams, "Improved Flux Pattern With Third

- Harmonic Injection for Multiphase Induction Motor," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 27, No. 3, pp. 1563-1758, Mar. 2012.
- [2] Emil Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 5, pp. 1893-1909, May 2008.
- [3] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, Won-Sik Baik, "A Five-Phase IM Vector Control System Including 3rd Current Harmonics Component," *8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia*, pp. 2519-2524, May 2011.
- [4] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, "A Vector Control System for Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Considering 3rd Current Harmonics Component," *The KIEE*, Vol. 61P, No. 4, pp. 206-213, Dec. 2012.
- [5] Min-Huei Kim, Nam-Hun kim, Won-Sik Baik, "A Five-Phase Induction Motor Sped Control System Excluding Effects of 3rd Current Harmonics Component," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 3, May 2011.
- [6] Luis Alberto Pereira, Cesar Cataldo Scharlau, Luis Fernando Alves Pereira, and Sergio Haffner, "Influence of Saturation on the Airgap Induction Waveform of Five-Phase Induction Machines," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 1, pp. 29-41, Mar. 2012.
- [7] Hyung-Min Ryu, Jang-Hwan Kim and Seung-Ki Sul, "Analysis of Multiphase Space Vector Pulse-Width Modulation Based on Multiple d-q Spaces Concept," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 20, No. 6, pp. 1364-1371, Nov. 2005.
- [8] Aynam S. Abdel-Khalik and Shehab Ahmed, "Performance Evaluation of a Five-Phase Modular Winding Induction Machine," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 6, pp. 2654-2669, June 2012.
- [9] Martin Jones, Slobodan N. Vukosavic, Drazen Dujic, and Emil Levi, "A Synchronous Current Control Scheme Multiphase Induction Motor Drives," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 24, No. 4, pp. 860-868, Dec. 2009.
- [10] Cesar Cataldo, and Sergio Haffner, "Performance of a Five-Phase Induction Machine With Optimized Air Gap Field Under Open Loop V/F Control," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 4, pp. 1046-1056, Dec. 2008.
- [10] Libo Zheng, Jhon E. Fletcher, Barry W. Williams, and Xiangning He, "Dual-Plane Vector Control of a Five-Phase Induction Machine for an Improved Flux Pattern," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 5, pp. 1996-2005, May 2008.
- [11] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, and Michele Dai Pre, "Impact of Stator Winding of a Five-Phase Permanent Magnet Motor on postfault Operations," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 5, pp. 1978-1987, May 2008.
- [12] S. Sadeghi and L. Parsa, "Design and Dynamic Simulation of Five Phase Interior Permanent Magnet Machine for Series Hybrid Electric Vehicles," *2010 Green Technologies Conference*, pp. 1-6, 2010.
- [13] N. Bianchi and S. Bolognani, "Strategies for the Fault Tolerant Current Control of a Five-Phase Permanent Magnet Motor," *IEEE Transactions. on Industry Applications*, Vol. 43, pp. 960-970, 2007.
- [14] Leila. Parsa and Hamid. A. Toliyat, "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, pp. 30-37, Jan/Feb 2005.
- [15] H. A. Toliyat, "Analysis and Simulation of Five-Phase Variable Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections," *IEEE Transection on Power Electronics*, Vol. 13, pp. 748-756, Jul. 1998.
- [16] Nam-Hun Kim and Min-Huei Kim, "Modified Direct Torque Control System of Five Phase Induction Motor," *Journal of Electrical Engineering Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 266-271, June 2009
- [17] Mario. J. Duran, Francisco Salas, and Manuel R. Arahal, "Bifurcation Analysis of Five-Phase Induction Motor Drives With Third Harmonic Injection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 5 pp. 2006-2014, May 2008.
- [18] Emil Levi, Martin Jhnes, Slobodan N. Vukosavic, and Harmid A. Toliyat, "Stady-State Modeling of Series-Connected Five-Phase and Six-phase Two-motor Drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 5, pp. 1559-1568, Sep. 2008.
- [19] Libo Zheng, Jhon E. Fletcher, Barry W. Williams, and Xiangning He, "A Novel Direct Torque Control Scheme for a Sensorless Five-Phase Induction Motor Drive," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 2, pp. 503-513, Feb. 2011.
- [20] Drazen Dujic, Martin Jhnes, and Emil Levi, "Analysis of Output Current-Ripple RMS in Multiphase Drives Using Polygon Approach," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 25, No. 7, pp. 1838-1849, July 2010.
- [21] Drazen Dujic, Martin Jhnes, Slobodan N. Vukosavic, and Emil Levi, "A General PWM Method for a (2n+1)-Leg Inverter Supplying on Three-Phase Machines," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 10, pp. 4107-4118, Oct. 2009.
- [22] Drazen Dujic, Martin Jhnes, Emil Levi, Joel prieto, and Federico Barrero, "Switching Ripple Characteristics of Space Vector PWM Schemes for Five-Phase Two-Level Votag Source Inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 7, pp. 2789-2798, July 2011.
- [23] Emil Levi, Martin Jhnes, Atif Iqbal, Slobodan N. Vukosavic, and Harmid A. Toliyat, "Induction Machines/Ryn-Rel Two-Motor Five-Phase Series Connected Drives," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 281-289, June 2007.



김민회(金玟會)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1979년 3월~현재 영남이공대학교 전기자동화과 교수.



김남훈(金男勳)

1973년 6월 12일생. 1998년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2000년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2004년~2007년 Texas A&M Univ. Post Doc. 2007년~2010년 청주대 전임 강사. 2008년~2010년 NH Consulting 대표. 2010년~2012년 씨앤엠 수석연구원. 2012년~현재 삼성테크윈 수석연구원.