

# 개선된 순시무효전력 보상기를 이용한 IPMSM의 센서없는 속도제어

## A Sensorless Control of IPMSM using the Improving Instantaneous Reactive Power Compensator

나 재 두\*  
(Jae Du La)

**Abstract** - A improving sensorless compensator for the IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) drive system is proposed. Generally, the motor drive system is required the robust parameter variation and disturbance. The speed estimation methods of the conventional IRP(Instantaneous Reactive Power) compensator is improved by the speed estimation techniques of the current model observer with the proposed instantaneous reactive power compensator. Performance evaluations of the novel speed error compensator and sensorless control system are carried out by the experiments.

**Key Words** : Sensorless control, Instantaneous reactive power compensator, IPMSM

### 1. 서 론

현대 사회에서 전동기 구동 시스템은 지난 수십 년간 전기에너지를 기계에너지로 변환시키는 에너지 변환장치로서 다양한 산업분야에서 광범위하게 사용되어 왔다. 또한 전기차, 항공 및 전철 등의 운송 시스템과 에어컨, 냉장고 등의 가전시스템 등 다양한 분야에도 널리 적용되고 있다. 전력변환 기술과 마이크로프로세서의 고성능화와 융합되어 더욱더 가속화되어 왔다[1,2].

영구자석 동기 전동기의 고성능 토크 제어를 수행하기 위해서는 회전자의 위치를 검출하기 위한 센서가 필수적이다[3,4]. 그러나 위치를 검출하는 센서의 경우 고가의 가격과 위치 계산을 위한 알고리즘 및 하드웨어가 필요한 단점이 있다. 또한 센서의 탈부착과 유지관리 측면에서 시스템의 신뢰도 저하 등의 단점이 존재하여 속도 및 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다[5-8].

센서리스 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 기본적으로 전압방정식과 운동 방정식 모델을 사용할 수 있다. 운동 방정식 모델의 경우 관성 계수나 점성마찰계수와 같은 파라미터의 측정의 어려움과 운전 조건에 따른 정수변화 반응이 어려운 단점으로 전압방정식을 적용한 센서리스 알고리즘을 많이 적용한다. 또한 전류 모델의 적용은 가상의 회전자 위치에 기반을 두고 이상적인 전류와 실제 전류의 오차를 이용해 회전자의 위치를 추정한다. 실제와 추정좌표계에서 d, q축 각각의 전류 오차는 회전자의 위치 및 역기전력에 관한 정보를 가지고 있으므로 이 차이를 이용해 회전자의 위치를 추정한다[9-11].

더욱이 전동기 제어에 필수적인 회전자 위치 또는 속도 정보를 추정하기 위하여 상태 관측기를 이용한다. 관측기 구현을 위하여 운동방정식을 적용하는 경우 관성, 마찰 계수 그리고 부하 토크 등을 정확하게 추정하는 것이 매우 어렵다. 따라서 전압방정식을 이용한 추정 기법이 주로 사용되며 추정 전류와 실제 전류 사이의 오차를 이용해 역기전력 성분을 추정한다. 구현된 관측기에서 발생하는 노이즈의 저감을 위하여 LPF(Low Pass Filter)사용하나 필터의 지연으로 인한 동적 응답 특성이 저하되는 단점을 가지기도 한다[12,13].

센서리스 제어 알고리즘은 제어 시스템의 파라미터 변화 및 외란 토크의 가변성을 극복해야하는 현실적인 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제에 대응하기 위해 순시 무효전력 보상기를 적용한다[14]. 그러나 이 알고리즘은 인덕턴스가 대칭인 SPMSM을 대상으로 하여 인덕턴스가 비대칭인 IPMSM에는 직접적으로 적용이 불가능하고 파라미터에 의존적인 속도 추정기법과 오차 보상기법을 사용하는 단점을 가진다. 그러므로 이에 대한 개선이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 순시무효전력 보상기를 전류 모델 관측기의 속도 추정기법을 이용해 개선하고 실험을 통해 성능평가를 수행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 기존의 순시무효전력 보상기

센서리스 제어는 파라미터의 오차, 전전류 및 입력전압 검출시의 오차 그리고 부하의 갑작스런 인가 등으로 인하여 실제 속도와 추정속도 사이에 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차를 보상해주기 위하여, 기존의 순시 무효전력을 이용한 보상기법은 그

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Information, Inha Technical College, Korea.

E-mail: jdna@inhatc.ac.kr

Received : August 29, 2018; Accepted : September 27, 2018

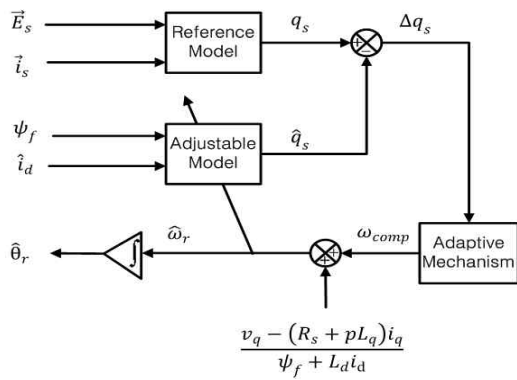


그림 1 기존 순시 무효전력 보상기의 블록도  
**Fig. 1** The block diagram of the conventional IRP compensator

림 1과 같이 센서리스 제어 및 속도 오차 보상을 수행한다 [14,15].

기존의 순시 무효전력 보상기는 다음과 같은 단점을 가진다. 첫째, 회전자 기준 좌표계에서 센서리스 제어를 위한 속도 및 위치를 추정한다. 따라서 실제 회전자 위치가 아닌 추정된 회전자 기준 좌표계에서 제어가 수행되므로 정확한 추정기법이라 보기 어렵다. 둘째, 추정 속도를 계산해 주기 위하여 그림 1과 같이 회전자 좌표계의 전압방정식을 직접적으로 이용한 오픈루프 기법을 사용한다. 그러므로 디지털 제어에서 미분을 사용함에 따른 노이즈에 의한 문제점이 발생될 수 있으며, 측정 전압과 전류의 정확성에 영향을 받고 전동기 파라미터의 불확실성이 위치 추정 연산에 큰 오차를 발생시킬 수 있는 단점을 가진다. 셋째, 속도와 위치 오차 보상을 위한 무효전력은 역기전력 상수와 추정속도만을 이용해 계산된다. 따라서 인덕턴스가 비대칭인 SPMSM을 대상으로 한 시스템으로 IPMSM에 직접적으로 적용이 불가능하며, 운전 조건의 변화로 인한 역기전력의 변화를 정확히 반영해 주기 어려운 단점을 가진다. 넷째, 역기전력을 추정하기 위한 관측기와 속도를 추정하기 위한 관측기의 기준 좌표계가 다르다. 역기전력을 추정하기 위한 관측기는 고정자 좌표계의 관측기를 사용하나 속도 추정 및 오차 보상을 위한 알고리즘은 회전자 좌표계에서 수행된 뒤 고정자 좌표계로의 변환을 통해 이루어진다. 이는 변환 과정에서 오차 및 시간지연이 발생할 수 있는 단점을 가진다.

그러므로 기본 방법의 단점을 개선하고 안정하게 속도와 위치를 추정하는 보상기법을 제시하기 위해 본 논문은 개선된 순시무효전력 보상기를 제안한다.

## 2.2 제안하는 개선된 순시무효전력 보상기

적응 제어를 통해 실제 역기전력과 추정 역기전력 그리고 추정 전류와 실제 전류 사이의 오차는 0으로 수렴한다. 따라서 실제 무효 전력과 추정 무효전력은 같게 된다. 위의 가정을 적용한 이상적인 순시 무효전력  $q_s$ 의 기준 모델(reference model)은 다음과 같이 전동기의 선전류  $\vec{i}_s$ 와 역기전력  $\vec{e}_s$ 의 벡터 외적으로 정의할 수 있다.

$$q_s = \vec{i}_s \times \vec{e}_s = e_q i_d - e_d i_q \quad (1)$$

여기서,  $\vec{i}_s = i_d + j i_q$ ,  $\vec{e}_s = e_d + j e_q$

식 (1)을 참고하여 적응 모델의 순시 무효전력을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{q}_s = \hat{e}_q \hat{i}_d - \hat{e}_d \hat{i}_q \quad (2)$$

센서없는 제어를 위하여 실제의 회전자 위치 대신 적응 모델의 무효 전력은 다음과 같이 측정값을 이용하여 표현한다.

$$\hat{q}_s = \hat{e}_q \hat{i}_\gamma - \hat{e}_d \hat{i}_\delta \quad (3)$$

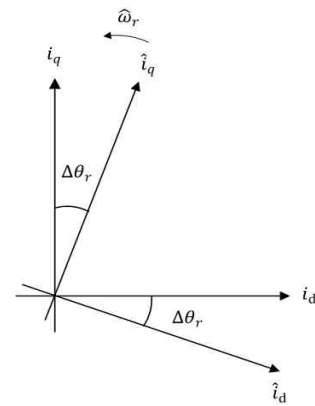


그림 2 실제 전류와 추정 전류에 대한 위치 추정 오차  
**Fig. 2** Position estimation error for the real and estimated currents

그림 2의 회전자 좌표계에서 실제 전류  $\vec{i}_s$ 에 대해 추정전류  $\vec{i}_s$ 가  $\Delta\theta_r$ 만큼 벗어나 있다면 식 (3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{q}_s = \hat{e}_q (i_d \cos \Delta\theta_r - i_q \sin \Delta\theta_r) - \hat{e}_d (i_d \sin \Delta\theta_r + i_q \cos \Delta\theta_r) \quad (4)$$

식 (4)에서  $\omega_r \neq 0$ ,  $\Delta\theta_r \cong 0$ 의 조건이 만족된다면 식 (5)와 같이 근사화할 수 있다.

$$\hat{q}_s = \hat{e}_q (i_d - i_q \Delta\theta_r) - \hat{e}_d (i_d \Delta\theta_r + i_q) \quad (5)$$

식 (1)과 (5)로부터 순시 무효전력의 오차 방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다. 여기서 적응 제어를 통해 추정 역기전력은 실제 역기전력과 같도록 안정히 수렴한다고 가정한다.

$$\Delta q_s = -\hat{e}_q i_q \Delta\theta_r - \hat{e}_d i_d \Delta\theta_r \quad (6)$$

추정전류가 실제 전류보다 앞선 경우와 추정전류가 실제 전류보다 뒤진 경우를 고려하여 식 (7)과 식 (8)의 조건을 만족하도록 비례이득과 적분이득을 적절히 선정하여 다음과 같이 보상값

$\omega_{comp}$ 를 결정한다.

$$\Delta\theta_r > 0 \text{이면, } K_{cp} \cdot \Delta q_s < 0 \tag{7}$$

$$\Delta\theta_r < 0 \text{이면, } K_{cp} \cdot \Delta q_s > 0 \tag{8}$$

$$\omega_{comp} = \left( K_{cp} + \frac{K_{ca}}{p} \right) \cdot \Delta q_s \tag{9}$$

제안하는 방법은 식 (1)로부터 (9)의 과정을 통해 속도 오차를 보상하며 전류 모델 관측기를 이용한 센서리스 제어를 수행한다. 이 보상기를 이용해 전류 모델 관측기를 이용한 기존 센서리스 제어기법의 오차 보상기와 순시 무효전력 보상기를 사용한 기존의 오픈루프 속도 추정기법을 개선할 수 있다.

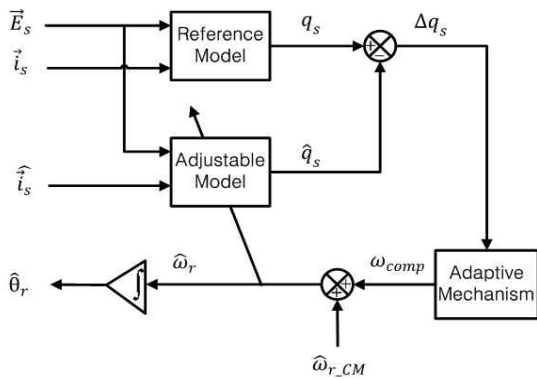


그림 3 제안하는 순시 무효전력 보상기의 블록도  
**Fig. 3** The block diagram of the proposed IRP compensator

이 기법은 속도 기전력 뿐만 아니라 돌극성 역기전력까지 추정하는 방법이므로 IPMSM에 직접적으로 적용이 가능하다. 또한, 갑작스런 부하 인가나 제정수의 오차 등으로 인한 추정 속도와 실제 속도 사이의 오차 성분을 파라미터의 영향 없이 순시 무효전력을 계산하여 보상할 수 있는 장점을 가지며, 센서리스 제어를 수행하는 좌표계와 속도와 위치 추정을 위한 좌표계가 일치하므로 추가적인 좌표 변환을 수행할 필요가 없는 방법이다. 그림 3은 제안하는 순시 무효전력을 이용한 위치 오차 보상기의 블록도를 보인다.

### 3. 시스템 구성 및 실험결과

#### 3.1 시스템 구성

제안하는 순시 무효전력 보상기를 적용한 IPMSM 센서리스 제어 시스템의 성능을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험은 표 1과 같은 정수를 바탕으로 수행하였다. 그림 4는 실험 시스템의 구성블럭도이다.

시스템 구동하기 위한 인버터의 전원은 계통 연계된 3상 전원을 사용하였으며 시스템을 보호하기 위하여 220/380V로 델타 결선된 3상 변압기를 사용하였다. 3상 전원은 3상 다이오드 모듈

표 1 영구자석 동기 전동기의 파라미터

Table 1 Parameters of PMSM

Rated Power	2[kW]
Rated Voltage	380[V]
Rated current	7.7[A]
Number of pole pairs	2
Rated speed	1800[rpm]
Armature resistance	0.324
d-axis inductance	10[mH]
q-axis inductance	27.3[mH]
Back-EMF constant	0.4

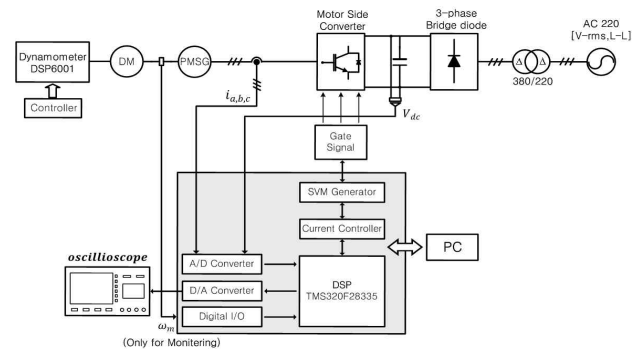


그림 4 실험 시스템의 블럭도  
**Fig. 4** The block diagram of the experiment system

정류기를 이용해 정류하여 공급되고 인버터의 DC링크는 400[V], 4700[uF] 용량의 전해 커패시터 2개를 직렬로 연결하여 입력 전압원으로 사용하였다. 3상 전압형 인버터의 스위칭 소자는 정격 1200[V]와 50[A] 정격을 가지는 IGBT(insulated gate bipolar transistor) 모듈로 3상 풀 브리지 형태를 취하는 전력 회로로 구성하였다. 암 단락을 막기 위한 휴지시간은 약 3u[sec]로 선정하였다. 전동기의 부하 장치로는 vibro-meter社の 2PB65 다이아모미터와 MAGTROL社の DSP6001 다이아모미터 제어기를 사용하였다. 영구자석 동기 전동기의 축과 다이아모미터 부하의 축은 커플러를 통하여 연결하였다.

연속적인 순시 전류를 검출을 위하여 전류는 50A급의 LEM社の 전류센서(current transducer, CT) LA 55-P를 이용하였다. 또한 공간벡터 제어와 과전압 보호를 위한 DC링크단의 전압 검출은 500V급의 LEM社の 전압센서(voltage transducer, VT) LV-25P를 사용하였으며 검출한 전압과 전류는 DSP 내부의 12bit A/D 변환기를 통해 제어 회로에 입력된다. 시스템의 추정 성능의 분석과 실제 속도의 비교를 위한 목적으로 512[ppr]의 로터리 엔코더를 사용하였다. 제어 알고리즘을 구형하기 위하여 TI社の 32bit floating point DSP(TMS320F28335)를 적용하였으며 시스템의 스위칭주파수는 10k[Hz], 샘플링 타임은 100u[s]로 선정하였다.

#### 3.2 실험결과

제안하는 순시 무효전력 보상기 및 제안하는 센서리스 제어시

시스템의 성능 평가를 위해 IPMSM의 무부하 및 부하 실험을 다음과 같이 수행하였다.

그림 5 무부하 조건 시 정격속도에 대한 관측기의 스텝 응답 특성을 보여준다. 초기 무부하 기동 시 정상상태 1800[rpm]에 도달한 후 거의 오차 없이 실제 속도를 추정하는 것을 보이며 정상상태까지 약 0.25[s]가 걸리는 빠른 응답특성을 볼 수 있다.

그림 6는 정격 속도 1800[rpm]에서 무부하 구동 후 100[%]

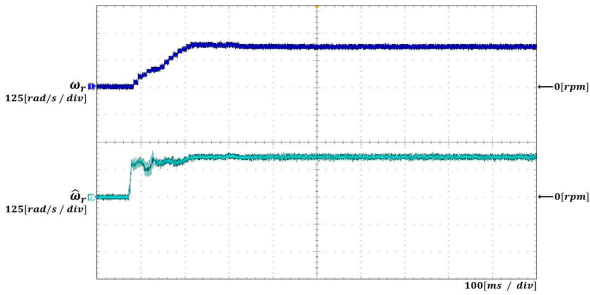


그림 5 제안하는 시스템의 실제 속도와 추정 속도 (무부하, 0[rpm]→1,800[rpm])

Fig. 5 Real and estimated speed of the proposed system (no load, 0[rpm]→1,800[rpm])

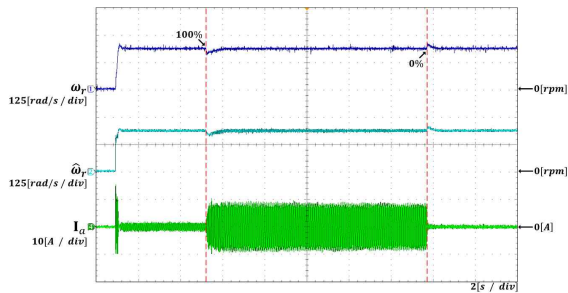


그림 6 제안하는 시스템의 실제 속도, 추정 속도 및 a상 전류 (100% 부하, 0[rpm]→1,800[rpm])

Fig. 6 Real, estimated speed and a-phase current of the proposed system (100% load, 0[rpm]→1,800[rpm])

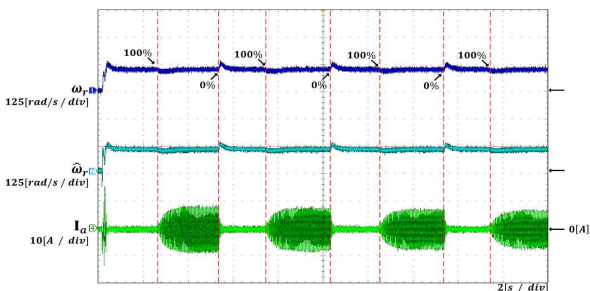


그림 7 제안하는 시스템의 실제 속도, 추정 속도 및 a상 전류 (100% 연속 스텝 부하, 0[rpm]→1,000[rpm])

Fig. 7 Real, estimated speed and a-phase current of the proposed system (100% continuous step load, 0[rpm]→1,000[rpm])

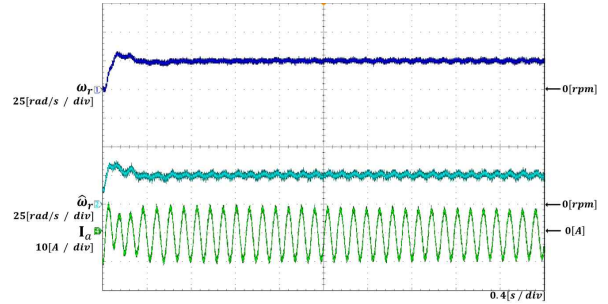


그림 8 제안하는 시스템의 실제 속도, 추정 속도 및 a상 전류 (100% 부하, 0[rpm]→250[rpm])

Fig. 8 Real, estimated speed and a-phase current of the proposed system (100% load, 0[rpm]→250[rpm])

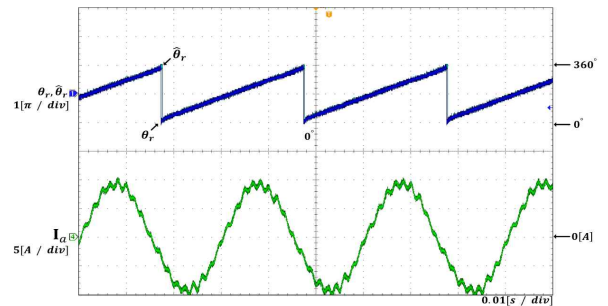


그림 9 제안하는 시스템의 실제 위치, 추정 위치 및 a상 전류 (100% 부하, 0[rpm]→250[rpm])

Fig. 9 Real, estimated position and a-phase current of the proposed system (100% load, 0[rpm]→250[rpm])

(10[N·m])의 정격 부하를 인가한 실험 결과를 보인다. 갑작스런 부하 인가로 인해 약 2[%]의 속도 변동을 보이거나 제안하는 센서리스 제어기와 오차 보상기로 인해 약 0.8[sec]후 정확히 지령 속도를 추종하는 것을 보인다.

그림 7은 1,000[rpm] 속도 운전 시 연속적으로 100[%] (10[N·m])의 정격 부하를 인가한 경우의 실험 결과이다. 제안하는 보상기를 적용한 제어 시스템은 연속적인 스텝 부하 인가에도 시스템을 안정하게 동작시키며, 빠르게 정상상태에 도달하도록 제어함으로써 연속적인 외란에도 강인하게 동작함을 확인 가능하다.

그림 8은 전 부하 인가 시 250[rpm] 속도 지령의 스텝 응답 실험 결과이다. 고속 운전시와 마찬가지로 정격 부하 조건에서 약 0.6[s] 내에 안정하게 지령 속도를 추종함을 보인다.

그림 9의 경우 제안하는 보상기의 적용으로 인해 속도와 위치 오차를 보상하며 실제 위치와 추정 위치 사이의 오차가 거의 0으로 수렴시킴으로써 안정하게 시스템을 동작시킴을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

제안하는 논문은 IPMSM 구동시스템의 정수 변동과 외란에 강인한 동특성을 가지는 개선된 속도 센서리스 제어기에 대한 연

구를 제안하였다. 센서리스 제어 기술 자체는 다양한 논문들의 의하여 효율성 및 신뢰성 있는 기술로 검증이 되었다. 그러나 제어 시스템의 파라미터 변화 및 외란 토크의 가변성을 극복해야 하는 현실적인 문제점을 가지고 있다.

기존 기법은 인덕턴스가 대칭인 SPMSM을 대상으로 한 제어 시스템이므로, 인덕턴스가 비대칭인 IPMSM에는 직접적으로 적용이 불가능하고 파라미터에 의존적인 속도 추정기법과 오차 보상 기법을 사용하는 단점을 가진다. 따라서 제안하는 논문은 기존 시스템의 단점을 개선하기 위해 개선된 순시 무효전력 보상기를 사용한 속도 오차 보상 시스템과 센서리스 제어 시스템에 대한 연구를 수행하였다.

실험 결과를 통해 새롭게 제안하는 오차 보상기를 적용한 제어 시스템의 정상 상태 토크와 속도 특성을 검증하였고, 제안하는 시스템이 부하 및 정수 변동에 대해 견실한 특성을 갖는 고성능 제어기임을 확인하였다.

## References

- [1] Rahman, M. A., and M. A. Hoque., "On-line adaptive artificial neural network based vector control of permanent magnet synchronous motors", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 1998, 13, (4), pp. 311-318.
- [2] Chandler, John., "PMSM technology in high performance variable speed applications", *Control Design White Paper*, 2006.
- [3] Kaewjinda, Weera, and Mongkol Konghirun., "Vector control drive of permanent magnet synchronous motor using resolver sensor", *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 2007, 5, (1), pp. 134-138.
- [4] Kaewjinda, Weera, and Mongkol Konghirun., "A DSP-based vector control of PMSM servo drive using resolver sensor". *TENCON, IEEE*, 2006, pp 1-4.
- [5] Liu, J. M., and Z. Q. Zhu., "Sensorless Control Strategy by Square-Waveform High-Frequency Pulsating Signal Injection Into Stationary Reference Frame", *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, 2014, 2, (2), pp. 171-180.
- [6] Yuan, Qian, et al. "Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with Stator Flux Estimation", *Journal of Computers*, 2013, 8, (1), pp. 108-112.
- [7] Khaief, Amor, Mohamed Boussak, and Abdessetar Chaari. "A MRAS-based stator resistance and speed estimation for sensorless vector controlled IPMSM drive", *Electric Power Systems Research*, 2014, 108, pp. 1-15.
- [8] Guoqiang, Zhang, et al., "Active flux based full-order discrete-time sliding mode observer for position sensorless IPMSM drives", *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 17th International Conference on. IEEE*, 2014, pp. 3569-3572.
- [9] Matsui, Nobuyuki, Takaharu Takeshita, and Kouji Yasuda. "A new sensorless drive of brushless DC motor", *Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the 1992 International Conference on. IEEE*, 1992.
- [10] Mizutani, Ryoji, Takaharu Takeshita, and Nobuyuki Matsui. "Current model-based sensorless drives of salient-pole PMSM at low speed and standstill", *Industry Applications, IEEE Transactions on 34.4* (1998): 841-846.
- [11] Lee, Jung-Hyo, et al., "A new hybrid sensorless method using a back EMF estimator and a current model of permanent magnet synchronous motor", *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008.*, pp. 4256-4262.
- [12] Ichikawa, Shinji, et al. "Sensorless control of synchronous reluctance motors based on an extended EMF model and initial position estimation", *IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, 2003, 3, pp. 1264-1274.
- [13] Morimoto, Shigeo, et al. "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame", *Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, 2001., (4), pp. 2637-2644.
- [14] Kim, Y. S., Y. K. Choi, and J. H. Lee. "Speed-sensorless vector control for permanent-magnet synchronous motors based on instantaneous reactive power in the wide-speed region", *Electric Power Applications, IEE Proceedings-*, 2005, 152, (5), pp. 1343-1349.
- [15] Matsui, Nobuyuki, Takaharu Takeshita, and Kouji Yasuda. "A new sensorless drive of brushless DC motor", *Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the 1992 International Conference on. IEEE*, 1992.

## 저 자 소 개



### 나재두 (Jae Du La)

1970년 10월 10일생. 1994년 인천대학교 전기공학과 졸업. 1996년 인하대학교 전기공학 졸업(석사). 2008년 영국 The University of Birmingham EECE 졸업(공학박), 2008. 3.-현재 인하공업전문대학 전기정보과 부교수  
E-mail : jdna@inhac.ac