

축방향 누설자속 측정에 의한 유도전동기의 회전자 결함검출에 관한 연구

(A Study of Rotor Fault Detection for the Induction Motor Using Axial Leakage Magnetic Flux)

신대철* · 김영환

(Dae-Cheul Shin · Young-Hwan Kim)

요 약

유도전동기에 대한 결함 검출의 도구로서 축방향 누설자속 측정 방법을 사용할 수 있는가를 평가하고 전동기 고장 검출에 관한 진단 알고리즘을 개발하기 위한 회전자에 관한 2번째 논문이다. 결함 검출을 위해 운전 중인 전동기의 끝단에 설치된 자속코일 센서로 누설자속 신호를 수집하며 전동기의 각종 결함을 검출하기 위해 시간과 주파수 영역에서 신호를 분석하였다. 센서 신호 형상이 전동기 각각의 결함에 대해 시간과 주파수 영역에서 해석하였다. 전동기의 회전자 관련 결함인 회전자봉 파손, 단락환 파손 및 회전자 편심이 축방향에서 측정된 고해상도의 스펙트럼으로부터 검출할 수 있는 방법을 확인하였다. 누설자속 스펙트럼으로부터 특정 주파수와 회전자봉 통과주파수의 측파대를 분석함으로써 회전자 결함을 검출하는 방법을 알았다. 또 유도전동기에 대하여 축방향 누설자속 측정을 위한 최적의 자속코일센서 및 측정시스템을 검증하고 회전자 결함을 검출하기 위한 방법을 개발하였다.

Abstract

The second part of paper related rotor failure is to evaluate that the axial magnetic flux measurement could be used as a tool of the condition monitoring system for the induction motor and to develop the diagnostic algorithm for the various fault in the electric motors. The magnetic leakage flux signal is captured by the flux coil located at the end of motor without the disturbance of the operation. And the signal is analyzed both time and frequency domain to detect the failure of the motor. Specific signature can be described in time and frequency domain for each fault of the motor. The experimental test found that the rotor failures - broken rotor bar, broken end ring and rotor eccentricity, could be detected from the spectrum with high resolution. The method of detecting the rotor fault was found by analysing the specific frequency and the sideband of the rotor bar pass frequency from axial leakage flux spectrum. In addition the optimal flux coil and measuring equipment for the axial leakage flux measurement was verified and the diagnostic method for the detection of the rotor related failure was developed.

Key Words : Flux coil, Axial leakage flux measurement, Rotor bar failure, Rotor bar passing frequency

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 교수

Tel : 041-540-5651, Fax : 041-549-5651, E-mail : dcsin@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2005년 12월 1일, 1차심사 : 2005년 12월 5일, 2차심사 : 2006년 1월 6일, 심사완료 : 2006년 1월 13일

1. 서 론

3상 유도전동기는 펌프, 팬과 같은 주요한 설비를 구동하기 위해 산업현장에서 널리 사용된다. 이런 설비가 갑작스럽게 정지하면 생산에 손실을 초래하고 결과적으로 막대한 비용손실의 결과가 된다. 중요한 전동기는 어떤 형태로든 초기 결함을 감지하여 계획적인 예방정비 또는 적기에 수리가 이루어질 수 있는 결함검출방법이 필요하다.

유도전동기에서 회전자의 고장은 자주 발생하는 결함 중에 하나이다. 회전자 결함은 회전자에 작용되는 전자기, 열, 동적, 환경 및 기계적인 여러 가지 복합적인 스트레스에 의해 야기된다. 이러한 스트레스는 전동기가 알맞게 설계, 제작, 설치, 작동, 유지되는 경우 억제될 수 있다. 그러나 부적당한 캐스팅과 같은 제작 상의 결함, 과부하 또는 과도시동과 같은 비정상적인 작동조건 및 적절하지 못한 유지보수는 회전자 권선에 영향을 미친다. 회전자 회로의 고장은 토크와 속도 맥동 또는 진동을 증가시킨다. 이것은 불평형, 정렬불량 또는 구동기계 결함과 같은 다른 메커니즘으로 잘못 인식되어 파손된 회전자봉의 인식을 어렵게 만들고, 종종 회전자의 밸런싱과 축정렬 작업을 반복 실시하는 불필요한 보수작업을 초래하게 할 수 있다.

유도전동기에 대해 파손된 봉에 따른 토크성능 저하는 파손된 회전자봉이 1개(40개중)인 경우 성능저하는 2~4[%]이고 3~5개의 파손인 경우 10~15[%]로 연구되었다[1]. 회전자봉의 부서진 파편은 고정자와 회전자 사이의 공극에 끼어서 고정자 권선의 표면을 손상시키는 고장을 초래하여 높은 수리비용을 지불하게 한다.

유도 전동기에서 파손된 봉에 대한 일반적인 증상은 전동기가 시동되는 동안 과도한 진동과 소음을 발생시킨다. 회전자의 파손된 봉과 파손된 단락환을 검출하기 위해 적용할 수 있는 간단한 방법은 축방향 누설자속의 측정이다[2,3].

본 연구에서는 운전 중의 유도전동기에서 축방향 누설자속을 측정하여 유도 전동기의 회전자 고장의 상태 감시를 연구하였다. 그리고 정상전동기와 각종 결함을 가진 전동기로부터 실험적인 자료를 수집하

고, 수식에 의해 실험적 측정 자료를 평가하였다. 누설자속 코일센서는 작동 중 계측이 가능하도록 제작하였다. 축방향 누설자속 코일로부터 검출한 신호를 주파수변환(FFT) 처리하여 얻은 스펙트럼정보에 기초하여 전동기의 상태를 평가하는 진단 시스템의 알고리즘을 개발하는데 목표를 두었다.

2. 이론적 배경

2.1 회전자 슬롯자속

회전자 슬롯으로 인한 퍼미언스의 변동은 회전수와 슬롯수의 곱에 해당하는 높은 주파수를 일으킨다. 기본주파수에 대한 회전자 슬롯 주파수는 식 (1)과 같다[4].

$$f_{RS} = f_{sync}(1-s)(Q_r \pm 2p) \quad (1)$$

여기서 f_{sync} : 회전자계 주파수, Q_r : 회전자 슬롯수, p : 극수 이다.

회전자에 대한 슬롯통과 주파수는 전원주파수와 슬립주파수의 차에 회전자봉수를 곱한 주파수로서 식 (2)와 같이 계산될 수 있다[5].

$$f_{PSPR} = Q_r(f_{sync} - f_s) \quad (2)$$

여기서 Q_r : 회전자 슬롯수, f_s : 회전자의 슬립주파수이다.

실제 고정자 누설자속에 슬롯통과 주파수 $\pm 2n$ 배의 전원주파수에서 발생하여 식 (3)과 같다.

$$f_{2LFR} = Q_r f_r \pm 2n f_{sync} \quad (3)$$

여기서 n : 정수 (0, 1, 2, 3...), f_r : 회전자 회전주파수이다.

슬롯통과 주파수 $\pm 2n$ 배의 전원주파수에 대하여 회전주파수, 슬립주파수 또는 전원주파수에 의해 변조되어 식 (4)~(6)과 같은 측파대 주파수성분이 나타난다.

$$f_{RSR} = [Q_r(f_{sync} - f_s) \pm 2n f_{sync}] \pm k f_r \quad (4)$$

여기서 f_{RSR} 는 회전자 슬롯의 회전속도 측파대, n 은 정수(0, 1, 2, 3...), k 는 정수(1, 2, 3...)이다.

$$f_{SFR} = [Q_r (f_{sync} - f_s) \pm 2nf_{sync}] \pm ksf_{sync} \quad (5)$$

여기서 f_{SFS} 는 회전자슬롯의 슬립주파수 측파대, n 와 k 는 정수(1, 2, 3...)이다.

$$f_{LFR} = [Q_r (f_{sync} - f_s) \pm 2nf_{sync}] \pm f_{sync} \quad (6)$$

여기서 f_{LFS} 는 회전자슬롯의 전원주파수 측파대이고, n 은 정수(0, 1, 2, 3...)이다.

식 (4)~(6)까지 소개된 모든 주파수 성분은 "회전자 슬롯통과주파수 패밀리"이다.

2.2 회전자 불균형의 검출

회전자 불균형은 케이지 정렬불량과 전도율의 변화, 베어링 정렬불량등과 파손된 회전자봉과 같은 불균일성에 의해 초래될 수 있다. 축방향 자속 전압의 스펙트럼으로부터 회전자의 여러 종류의 불균형이 검출될 수 있다. 기본적인 고조파만이 고려될 때 양과 음 시퀀스 회전자 전류가 흐르므로 공극에 존재하는 축방향 자속 주파수는 식 (7)과 같다[4].

$$f_{RA} = Q_r f_r \pm m f_{sync} (1 - s) \quad (7)$$

여기서 m 은 기수 고조파(1, 3, 5...)의 차수이다. 회전자의 불균형에 의한 성분은 또한 전원주파수에 회전주파수가 변조를 일으키게 되므로 식 (8)과 같이 저주파수에서도 나타난다.

$$f_{UB} = f_{sync} [1 \pm \frac{2k}{p} (1 - s)] \quad (8)$$

여기서 f_{UB} 는 회전자 불균형 주파수, k 는 고조파 차수이다($k = 1, 2, 3$).

2.3 파손된 회전자봉 검출

파손된 회전자봉의 경우 전류는 주변 회전자봉에서 재분배 된다. 파손된 봉에서 흘러야할 대부분의

전류는 그것에 인접한 2개의 봉에서 흐른다. 이 자계는 슬립 주파수로 맥동하며 코일에 유도된 전압을 변조시키는 성분으로 식 (9)와 같다[4].

$$f_{RB} = n f_{sync} (1 \pm kps) \quad (9)$$

여기서 f_{RB} 는 회전자봉 결합 주파수, p 는 극수, s 는 슬립, f_{sync} 는 동기회전자계 주파수이다.

식 (8)과 식 (9)를 비교하면 기본주파수($n=2, k=1$)에서 두 식이 비슷한 결과를 준다는 것을 알 수 있다. 특히 $p=2$ 인 경우 회전자봉 결합 주파수와 같은 성분이 된다. 불균형에 의한 성분은 2배의 전원주파수 좌측파대 진폭이 회전자봉 결합에 의한 진폭보다 더 크게 나타난다. 따라서 좌우측 측파대 진폭을 조사함으로써 불균형과 파손된 회전자봉 결합이 구별된다.

축방향 자속스펙트럼에 의해 회전자 상태에 관하여 식 (8)과 식 (9)를 포함하여 식 (10)을 유도할 수 있다[5].

$$f_{RR} = n f_{sync} \pm p (f_{sync} - f_r) \pm f_r \quad (10)$$

여기서 f_{RR} 는 회전자 결합 주파수, n 는 고조파 차수, f_r 은 회전주파수이다($n = 1, 2, 3$).

회전자의 상태는 전원주파수의 좌우측에 나타나는 p 배 슬립주파수 성분과 전원주파수와 회전주파수를 더한 성분의 진폭에 의해 평가될 수 있다. 회전자 봉의 결합 정도에 따라 좌우측파대가 커져서 전원주파수와 측파대 성분 사이의 진폭차가 감소한다.

3. 측정 시스템

3.1 자속코일 센서

자속코일 센서의 신호는 코일의 주파수특성에 따라 출력이 나타난다. 자속코일은 누설자속에 의해 코일에 유도되는 신호이므로 직류신호나 2[Hz] 이하의 저주파 신호가 측정될 수 없는 것이 단점이다. 자속코일 센서의 유용한 주파수 영역은 대략 2[Hz]에서 10[kHz]까지로서 교류 전동기의 상태를 관찰하는 데는 충분히 적용할 수 있다. 왜냐하면 낮은 속도로 회전하는 전동기를 제외하고 직류신호나 2[Hz]

이하의 주파수를 측정할 필요가 없기 때문이다. 센서의 감도는 주파수 증가와 함께 증가하는 특성을 가지고 있다. 회전자 슬롯통과 주파수 성분은 높은 주파수 대역에 있기 때문에 이런 특성은 고정자권선 결함을 검출하는데 유효하게 활용될 수 있다. 센서의 감도는 직경 또는 코일의 턴수를 증가시켜 향상할 수 있다. 자속 센서를 전동기 케이스 밖에 설치할 때 센서의 출력전압은 수 [mV] 수준으로 작고, 전동기 케이스 내에 설치하면 출력전압이 증가된다. 출력전압이 작은 경우 노이즈의 영향을 받으며, 신호를 증폭해야 할 필요가 있었으므로 센서를 전동기 외부에 설치할 경우 100[mV] 정도의 출력전압을 얻을 수 있도록 코일의 턴 수를 조절하여 제작하였다. 그림 1은 0.1[mm] 에나멜 동선을 300회 감은 여러 가지 자속 코일을 나타낸다.

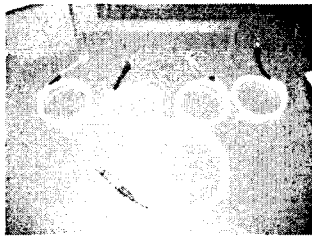


그림 1. 제작된 자속코일 센서
Fig. 1. Fabricated flux coil sensor

3.2 실험 전동기

실험에 사용한 3상 농형유도전동기의 사양은 용량 : 1[HP], 정격전압 : 220[V], 정격전류 : 2.2[A], 극수 : 2, 고정자 슬롯수 : 24, 회전자봉 : 34개이다. 이 전동기의 회전자봉 3개를 드릴로 단선하여 회전자봉 결함, 회전자의 통풍 덕트를 절단하여 회전자 불평형, 그리고 회전자 베어링 하우징을 개조하여 0.2[mm]의 회전자 편심을 삽입한 결함전동기를 각각 제작하였다.

3.3 전동기 누설자속의 측정 시스템

실험장치는 기계결함시뮬레이터에 결함전동기를 설치하여 부하 조절이 가능하도록 제작되었다. 결함

검출을 위해 직경 200[mm], 턴 수 300회 감은 자속코일을 전동기의 끝단 축 중심에 자속코일을 설치하였다. 축방향 누설성분을 분석하기 위해 스펙트럼 분석기를 사용한 측정시스템은 그림 2와 같다. 운전 중인 유도전동기의 파손된 회전자봉 및 회전자 결함을 실험하였다.

자속코일로 축방향 누설자속 신호가 검출되었고 2 채널 FFT(Fast Fourier Transform) 분석기를 사용하여 신호성분을 분석하였다.

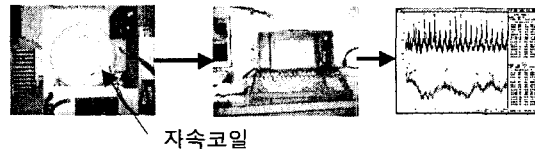


그림 2. 자속코일을 사용한 측정시스템
Fig. 2. Measurement system using flux coil

4. 실험 및 검토

4.1 회전자 슬롯에 의한 진폭

주파수 변환기에 의해 구동되는 전동기에서 축방향 자속전압 신호를 3200샘플로 측정하여 주파수 스펙트럼을 얻었다. 측정 시 선정한 주파수 영역은 0~800[Hz]이고 스펙트럼의 해상도는 1600라인이다. 결과는 그림 3~5와 같다.

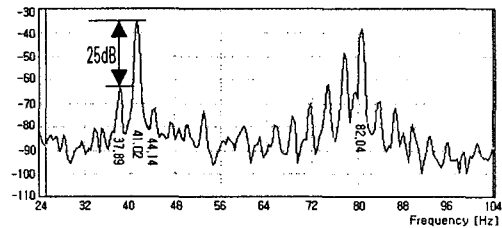


그림 3. 축방향 누설자속 코일 전압 스펙트럼
Fig. 3. Axial leakage flux coil voltage spectrum

그림 3의 첫 번째 주파수 성분은 주파수 변환기의 출력 주파수(41[Hz])와 고조파의 진폭을 나타낸다. 기수고조파는 우수고조파의 진폭에 비해 훨씬 크게 나타나있다. 고조파는 예상한 것과 같이 높은 주파수로 갈수록 감쇠된다. 그림 3의 고조파 성분에 추가

하여 회전자 슬롯전류에 의해 발생하는 회전자봉 통과주파수가 나타나 있다. 이 성분은 주위의 고조파 성분에 비해 큰 진폭을 갖는다. 시간 파형에서 이 성분을 검출하는 것은 불가능하였다. 여러 가지 결합 정도를 가진 전동기를 제작하여 정상전동기와 신호 성분을 비교하여 특징주파수를 찾아내었다.

4.2 회전자봉 결합 검출

공급 주파수 주위의 측파대가 회전자 봉의 상태를 평가하는데 이용할 수 있다. 주파수 변환기에 의해 공급되는 회전자봉 결합 전동기에 대해 출력 주파수의 주위에 이런 측파대를 검출하는 것이 가능한지를 확인하기 위해 실험하였다.

그림 4와 그림 5는 정상 전동기와 회전자봉 결합 전동기에서 0~800[Hz]까지 고해상도 1600라인으로 측정된 것을 24~104[Hz](160라인) 영역만을 확대하여 표시한 것이다.

정상전동기에서는 그림 4와 같이 출력 주파수 주위에 측파대 성분이 거의 없으나, 회전자봉 결합 전동기에서는 그림 5와 같이 출력주파수의 좌우측에 측파대(37.89[Hz] 및 44.14[Hz]) 성분이 나타나 있다. 측파대는 변환기의 출력주파수(41.02[Hz])로부터 ± 3.12 [Hz] 떨어진 슬립주파수의 2배($p=2$) 성분이다.

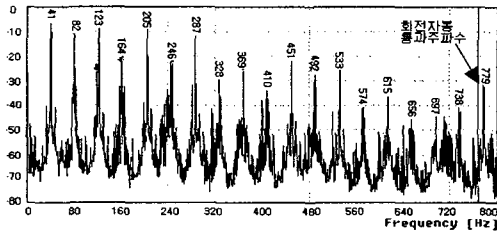


그림 4. 정상전동기에 대한 축방향 누설자속 코일 전압 스펙트럼
Fig. 4. Axial leakage flux coil voltage for normal motor

동종의 다른 전동기로 다양한 운전조건하에서 식 (8)~(9)가 실험되었다. 실험결과 출력주파수(41.02[Hz]) 성분과 측파대(37.89[Hz])의 성분의 진폭 차이가 파손된 봉에서는 25[dB]이었고, 정상 회전자에서는 40[dB] 이상으로 크게 나타났다. 또한 결합

주파수 성분들은 부하가 증가하고 고정자 전압이 증가함에 따라 증가되었다.

다른 전동기에도 유사한 연구를 실시하여 같은 측파대가 존재한다는 결과를 얻음으로서 누설자속으로 회전자봉 결함을 확실히 검출할 수 있음이 증명되었다.

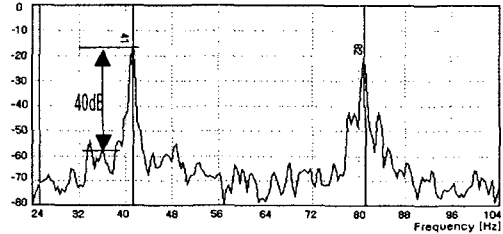


그림 5. 회전자봉 결합에 의한 측파대 성분
Fig. 5. Sideband component according to rotor bar fault

4.3 동기 회전자주파수 주변의 주파수 성분

동기 회전자계 주파수 주위의 주파수 분포를 정상 전동기에 대해 실험 검토하였다. 측정에서 선정한 주파수 범위는 0~72[Hz]이고 스펙트럼의 해상도는 256라인이다. 그림 6은 정상전동기의 스펙트럼을 보여주고 있다.

1.56[Hz], 5.89[Hz], 8.59[Hz] 및 13.28[Hz]의 4개의 주파수 성분이 낮은 주파수 범위에 존재한다. 33.59[Hz] 및 48.4[Hz], 35.55[Hz] 및 46.48[Hz]의 주파수는 변환기 출력 주파수 41[Hz]의 양쪽에 동일하게 떨어져 위치한 측파대이다. 변환기의 출력 주파수와 이 측파대 사이의 차이는 각각 5.45[Hz], 7.41[Hz]이다. 이 주파수 성분은 전동기 부하의 영향으로 나타난 성분으로 부하의 벨트와 기어 주파수로 확인되었다.

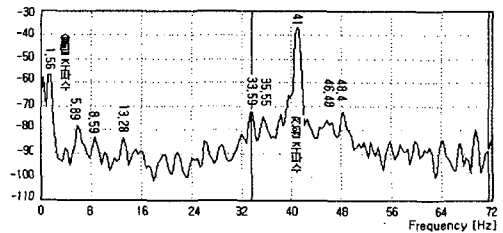


그림 6. 동기주파수 주변의 성분과 슬립주파수
Fig. 6. Slip frequency and the component aground synchronous frequency

4.4 결함진단 시스템을 위한 알고리즘

이론적인 수식과 실험을 바탕으로 누설자속 스펙트럼분석으로부터 진단시스템에 응용할 회전자 결함검출 알고리즘을 완성하였다. 이것을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

(1) 회전자봉 파손 : 전원주파수로부터 좌우에 극통과주파수(pf_s) 만큼 떨어져있는 좌우 측파대의 진폭과 전원주파수의 진폭의 차이에 의해 회전자봉 파손을 검출한다.

(2) 회전자 불균형 : 전원주파수와 회전자주파수의 합 주파수($f_{sync} + f_r$) 진폭의 크기에 의해 회전자 불균형을 검출한다. 이 진폭의 절대적인 크기로부터 불균형량을 예측할 수는 없다. 따라서 주기적으로 계측하여 이 주파수 성분을 경향 분석하여야 회전자 불균형의 변화상태를 검출할 수 있다.

(3) 회전자 주파수 : 극통과주파수(pf_s) 또는 회전자 불균형주파수($f_{sync} + f_r$)로부터 회전자 주파수를 검출할 수 있다. 회전자봉 파손이 없는 경우 극통과주파수는 나타나지 않으나 회전자의 불균형은 항상 나타나므로 회전자주파수를 검출할 수 있다.

5. 결 론

전동기의 주파수성분 분포는 고정자 권선계수, 동작상태 및 기계적 부하에 영향을 받기 때문에 누설자속에 의한 신호성분은 전동기마다 고조파의 패턴이 서로 다르게 나타났다. 따라서 누설자속에 의한 결함 검출방법의 응용은 정상상태의 전동기에서 기준스펙트럼을 저장하고 동일 부하에서 결함 전동기의 스펙트럼을 비교하는 모니터링 기법으로 적용 가능하다.

누설자속 신호를 취득하기 위한 자속코일은 운전 중인 전동기의 외부에 간단히 설치하여 측정이 가능하였다. 자속코일은 자체 제작한 것을 사용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자속코일은 전동기의 누설자속 신호를 충분히 검출할 만한 감도를 갖도록 턴 수 300회를 감아 제작하였다. 이 경우 출력 신호전압은 대략 100[mV] 정도를 얻을 수 있었다.

(2) 결함검출을 위한 신호분석은 시간신호와 주파수 스펙트럼으로 이루어질 수 있으나 스펙트럼에서 결함검출이 편리함을 알았다.

(3) 회전자 결함을 가진 전동기를 제작한 후 실험하여 진단 시스템을 위한 회전자 결함 검출 알고리즘을 완성하였다.

향후 전동기 분류에 따른 고장 판단 레벨의 설정 및 전동기 각종 결함에 따른 스펙트럼 패턴에 관한 데이터베이스 확보에 관한 연구를 계속하여 산업현장에서 널리 응용될 수 있는 기법으로 발전시킬 예정이다.

References

- [1] Elkasabgy NM, Eastham AR & Dawson CE, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine", IEEE Transactions on Industry Applications 28(1), pp. 165~171, 1992.
- [2] Lang, G.F., "Of cages, induction, deduction, bars, vars and squirrels,... an update on methods to detect broken bars in induction motors". Journal of Sound and Vibration, pp. 4~21, 1994.
- [3] Kliman CB, Koegl RAA, Schulz Jr., Max W & Grabkowski SE, "Rotor fault detector for induction motors", US Patent no. 4 761 703, 1987.
- [4] Henao H, Assaf T & Capolino GA, "Detection of voltage source dissymmetry in an induction motor using the measurements of axial leakage flux", Proc. ICM 2000, Helsinki, 2, pp. 1110~1114, 2000.
- [5] CSI, "Motor View Software Manual ", Computational Systems Incorporated, pp. 23~54, 1997.
- [6] 정병훈, 신대철, "전류신호를 이용한 유도전동기의 회전자봉 결함 검출에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제12권, 제4호, pp. 287~293, 2002.

◇ 저자소개 ◇

신대철 (申大澈)

1952년 3월 2일생. 1973년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원(박사). 1989~1990년 나가사키대학 visiting scholar. 1979년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.

김영환 (金榮煥)

1957년 11월 1일생. 1983년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1997년 호서대학교 산업경영대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학교 대학원 전기공학과 박사과정수료.