

LabVIEW를 이용한 소형 유도전동기의 권선고장 자동진단

論 文

55P-4-8

Auto-Detection of Stator Winding Fault of Small Induction Motor using LabVIEW

宋 明 現[†] · 朴 奎 南^{*} · 韓 東 奇^{*} · 禹 突 在^{**}

(Myung-Hyun Song · Kyu-Nam Park · Dong-Gi Han · Hyeok-Jae Woo)

Abstract - In this paper, an auto detection method of stator winding fault of small induction motor is suggested. The Park's vector pattern which is obtained from 3-phase current signal by d-q transforming, is very good to detect winding fault. Comparing the Park's vector pattern of testing motor with its of healthy motor, the Park's vector pattern of fault motor is became an ellipse and the asymmetry is increased by the winding fault series. So for detecting the dis-symmetry, id-filtered function, Min-value, and Max-value are suggested for auto detecting. Using LabVIEW programing, 3-phase healthy motor and several kind of winding fault motors are tested and the test results are shown that the suggested method can gives us a possibility of an auto detecting winding fault.

Key Words : Small induction motor, Park's vector pattern, LabVIEW, Stator winding fault, Auto detection

1. 서 론

유도전동기는 전원공급이 용이하고 속도제어를 위한 장치 구성이 저렴하다는 구조적인 강점 때문에 많은 주요 기기의 구동장치로 산업영역 전반에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있다. 유도전동기의 갑작스런 고장은 구동장치를 사용하는 전체 시스템에 대한 신뢰도 및 안정성을 저하시키고 경제적인 손실을 초래할 뿐만 아니라 인명 피해의 위험 등 많은 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 유도전동기에 대한 고장진단 및 감시에 관한 많은 연구가 수행되어왔다. 초기의 전기기기의 생산자와 사용자들은 신뢰할 수 있는 운전과 안전을 위해 과전류, 과전압 및 접지고장과 같은 간단한 차단장치에 의존해 왔다. 그러나 최근에 시스템이 복잡해지고 고속화됨에 따라 고장진단의 분야에서도 큰 발전을 이루게 되었다. 유도전동기의 상태진단과 고장상태에서의 동작에 대한 연구는 오래 전부터 진행되고 있다.

전동기의 고장은 비교적 오랜 기간의 악화과정을 거쳐 이루어짐으로 고장진행 초기에 또는 고장 발생 전에 전동기의 상태를 파악하고 진단하기 위해 많은 방법이 시도되었다. 그 중 고정자 권선의 고장진단에 주로 사용된 방법으로는 전동기 고정자 전류 주파수 분석이나 진동 주파수 분석, [1][2] 고정자의 권선고장 및 고장 상 검출에 파크벡터를 이용한 방법[3][4], 전동기에 고장이 발생하였을 때의 비대칭

성분인, 역상 전류를 이용한 방법[5], 그리고 역상 전류 보다 외부 조건의 변화에 영향이 적은 역상 임피던스를 이용하는 방법[5][6], 인공신경망을 이용한 파크 벡터의 패턴인식[7], 고정자 전류를 이용한 인공 신경망 방법[8] 등이 있다. 이러한 유도전동기 고정자 권선 고장의 고장진단 방법들은 각 특성 주파수를 발견하는 것이 어렵고, 찾는다 할지라도 작은 턴 수의 고장에서는 정상과의 차이를 구별하기 어렵다는 점과 작은 단락 턴 수의 패턴이 정상 패턴과 구분이 되지 않는 점, 외부 환경에 영향을 많이 받고, 임피던스를 이용하는 경우 3상전류, 전압을 이용하기 때문에 측정 장치가 복잡해질 수 있고, 전압 불 평형과 상 개방 고장에 국한되는 많은 단점들을 가지고 있다. 또한 숙달된 작업자가 직접 프로그램 조작을 통해 파크벡터 패턴을 만들어 고장진단을 해야 하므로 전문적인 지식을 갖는 관련분야 종사자가 아닌 작업자가 고장진단을 하기란 너무 어려웠다.

따라서 본 논문에서는 상기 문제를 해결하기 위하여 보다 간편한 상용 프로그램인 LabVIEW를 이용하여 자동으로 소형 유도전동기의 고정자 권선 고장을 검출할 수 있는 방법을 제시하였으며 제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 여러 가지 고정자 권선고장을 갖는 전동기에 적용하였다.

2. 본 론

2.1 파크 벡터 기법

3상전류의 변수(i_a, i_b, i_c)로부터 파크 벡터의 성분(i_d, i_q)으로 변환하는 식은 식(1), (2)과 같이 정의 한다.

$$i_d = \left(-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)i_a - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_b - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_c \quad (1)$$

[†] 교신저자, 正會員 : 順天大 電氣制御工學科 教授 · 工博

E-mail : mhsong@sunchon.ac.kr

^{*} 正會員 : 順天大 電氣制御工學科 碩士課程

^{**} 正會員 : 順天大 電氣制御工學科 博士修了

接受日字 : 2006年 11月 9日

最終完了 : 2006年 11月 16日

$$i_q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_b - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_c \quad (2)$$

이상적인 조건에서, 파크 벡터 성분은 다음과 같다.

$$i_{d-ideal} = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_m \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$i_{q-ideal} = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

여기서, i_m : 공급전류의 최대값(A)
 ω : 공급 각 주파수(rad/s)
 t : 시간변수(s)

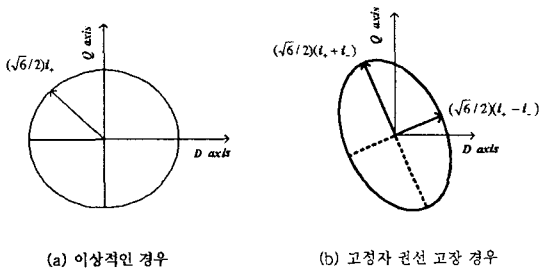


그림 1 파크 벡터 패턴
 Fig. 1 Park's vector pattern

위 식에 상응하는 그림은 좌표상의 원점에 중심을 둔 원 궤적이다. 정상 전동기의 경우는 이상적인 경우 완벽한 대칭전압이 공급되며, 전동기의 공급전류에는 단지 정상(positive-sequence)분(i_+)만을 포함하게 된다. 이것은 그림 1(a) 과 같은 전류에 대한 파크 벡터의 궤적을 완벽한 원으로 만든다.

전동기의 고정자 권선에 턴 간 단락이 발생하면 공급 전류에는 비대칭 성분이 발생하게 된다. 이 경우 전동기의 공급전류는 정상분과 역상(negative-sequence)분(i_-)의 합으로 표현된다. 이러한 두 성분의 존재는 전류의 파크 벡터의 궤적이 그림 1(b) 와 같은 타원이 되도록 한다. 장축의 길이는 직접적으로 전동기 공급전류의 정상과 역상분의 진폭의 합에 비례하며, 단축의 길이는 두 성분의 진폭의 차에 비례한다.

파크 벡터의 기법을 이용한 고정자 권선의 고장진단의 기본적인 원리는 단락된 턴 수가 증가할수록 공급 전류의 비대칭 성분이 증가한다. 유도전동기 전류의 파크 벡터 표현에 따라 얻어진 독특한 패턴을 구별하는 것에 기초하고 있다. 패턴의 d축 성분과 q축 성분을 분석한 결과 d축성분의 변화분이 보다 크므로 자동 측정을 위하여 d축 성분의 최소치와 최대치를 이용하여 판별력을 보다 높이기 위하여 식(5)와 같은 함수를 제안하였다. 또한 판별의 신뢰성을 높이기 위하여 식(6)과 같은 고장 진단의 판정 범위를 지정하였다.

$$i_{d-filtered} = i_{d-max} + |i_{d-min}| \quad (5)$$

$$Min-value < i_{d-filtered} < Max-value \quad (6)$$

식(5)에 의해 정상, 2턴, 10턴 및 20턴 단락 고장 진단의

가능성을 부하 변화에 따라 $i_{d-filtered}$ 값을 구하고 부하 변화에 따른 비교조건 비교함수를 적용하여 각각 최대값과 최소값의 범위 내에 있을 때 고장 판별할 수 있게 LabVIEW를 이용하여 프로그램 하였다.

2.2 LabVIEW

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)는 그래픽으로 프로그램을 작성할 수 있는 프로그램 언어이다. 포인터, 메모리 할당 등이 필요 없이 프로그램을 할 수 있도록 광범위한 함수와 라이브러리를 제공하며, 실행할 때 사용자에게 보여주는 출력은 사용자가 원하는 어떠한 형태로든 표현할 수 있다.

텍스트 명령어를 대신한 그래픽 아이콘들은 drag and drop으로 간단하게 결선을 할 수 있고, 아이콘들의 조합만으로 측정과 분석함수를 정의 할 수가 있다. 또한 subVI를 이용하여 텍스트 기반 프로그램이 외부프로그램을 불러오는 것과 같은 효과가 있고, 사용자에게 보여주는 창인 Front panel과 프로그램을 작성할 수 있는 Block diagram으로 구성 되어 사용자와 친근한 그래픽 기반 프로그래밍을 제공한다. 마지막으로 Graphic User Interface(GUI) 제공으로 간단하고, 직관적인 프로그램 작업을 할 수 있는 등 다양한 이점이 있다.

3. 실험 및 검토

3.1 시스템 구성

유도전동기 고정자 권선단락을 위한 고장검출 시스템의 실험에 사용한 전동기는 표준 삼상 유도전동기로서 60Hz, 1HP, 220/380V, 3.8/2.2A, 4극, 3상 농형유도전동기이며, 커플링으로 연결된 부하를 구동하도록 하였다. 그림 2 는 실험장치의 구성 및 LabVIEW를 이용한 자동고장검출 시스템 구성도를 나타내고 있다. 인버터는 전압형 PWM 제어방식의 전동기 구동용 주파수 변환기를 사용하였고 전동기 회전속도를 측정하기 위하여 SUGAWARA사의 디지털 회전계(S-126X)를 사용하였다.

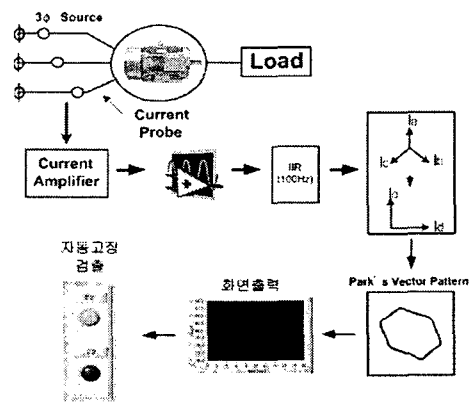


그림 2 시스템 구성도
 Fig. 2 System configuration.

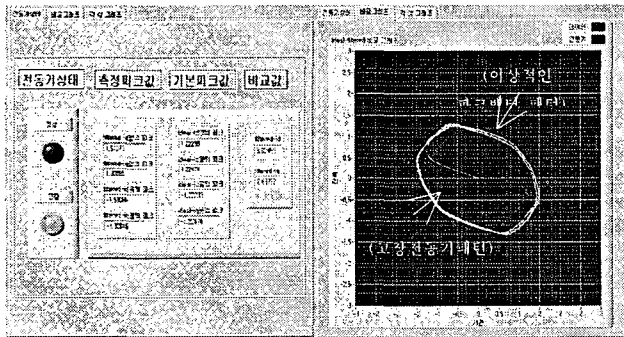
전류 측정을 위해 Tektronix사의 Current Probe와 증폭기를 사용하였으며, probe에는 AC 커플링을 사용하였다.

LeCroy 9314A 오실로스코프를 이용하여 데이터를 수집한 후, RS-232 인터페이스를 사용하여 데이터를 PC에 전송하였으며 전송된 데이터의 분석 및 처리는 PC에서 수행하였다.

그림 2는 시스템 구성도를 보여주고 있다. Current Amplifier를 통해 수집된 3상전류 데이터는 소프트웨어적으로 LabVIEW를 이용하였다. 필터는 디지털 필터의 한 종류로 입력신호의 값과 출력신호의 값이 재귀적으로(recursive, feedback) 적용되어 필터링이 수행되는 IIR 필터(infinite impulse response filter)로 역 f 필터를 적용하였으며, 필터링을 거친 3상전류신호는 파크 벡터로 변환되었으며, 변환된 파크 벡터로부터 파크 벡터 패턴을 구하고 패턴의 id, iq의 피크값을 구하였다. 패턴 피크값의 기준치인 이상적인 전동기의 피크값과 측정치를 비교함수에 적용하여 나타나는 편차를 이용하여 화면을 통해 패턴의 그래프와 자동으로 고장여부를 바로 판단 할 수 있게 화면으로 보여주도록 LabVIEW 프로그램을 개발하였다.

3.2 결과 검토

그림 3(a)은 수집된 3상 전류데이터를 이용하여 자동으로 고장을 검출하고 사용자가 모니터링 할 수 있는 화면이다. 그림에 보이는 측정 피크값은 필터링 된 전류신호를 이용하여 파크 벡터로 변환하고, 변환된 파크 벡터로부터 파크 벡터 패턴을 구하여 패턴의 id, iq 피크값을 나타내었다. 또한, 기본 피크값은 이상적인 파크 벡터 패턴의 피크값을 보여주고, 비교값은 측정 피크값의 id, iq의 양의 피크값과 음의 피크값의 각 합을 나타내고 있다.



(a) 전동기 상태 (b) 파크 벡터 패턴 비교

그림 3 프론트 패널
Fig. 3 Front panel

그림 3(b)은 파크 벡터 패턴을 보여주고 있다. 가운데 둥근 원은 실제 전동기의 패턴과 비교하기 위한 이상적인 파크 벡터 패턴이며 타원형의 원은 무부하 20턴 고장일 때의 실제 전동기의 패턴이다. 작업자가 패턴을 보고 고장여부를 판단하여야 하는 문제를 해결하기 위하여 그림 3(a)에 좌측에 보인 것처럼 전동기 상태 표시 창에 램프를 달아 정상, 고장여부를 보여주도록 하였다.

<표 1>은 각 부하상태에 대한 전동기의 측정 데이터의 평균값을 보여주고 있는데 i_{d-max} , i_{d-min} , i_{q-max} , i_{q-min} , $\sqrt{(i_{d-max})^2 + (i_{q-max})^2}$, $\sqrt{(i_{d-min})^2 + (i_{q-min})^2}$ 일 때, 부하에 따른 각각의 피크값의 차가 나지 않았고, 또한 $\frac{i_{d-max}}{i_{q-max}}$

$\frac{i_{d-min}}{i_{q-min}}$ 등 여러 방법을 이용하여 측정값을 구해보았지만 측정값의 차가 크게 나타나지는 않았다.

표 1 부하에 따른 전동기의 측정데이터
Table 1 Special function value for load change.

부하	전동기 상태	id-max	iq-max	id-min	iq-min	id-max+id-min	iq-max+iq-min	$\sqrt{(i_{d-max})^2 + (i_{q-max})^2}$	$\sqrt{(i_{d-min})^2 + (i_{q-min})^2}$
무부하	정상	1.224	1.215	-1.25	-1.205	2.47945	2.42155	1.7846	1.7166
	2턴	1.319	1.151	-1.32	-1.203	2.6435	2.3547	1.869	1.6963
	10턴	1.4023	1.199	-1.36	-1.199	2.7831	2.39941	1.968	1.6966
25% 부하	정상	1.5022	1.302	-1.520	-1.315	3.0231	2.617	2.137	1.8510
	2턴	1.431	1.589	-1.410	-1.593	2.9414	3.1932	2.0093	2.258
	10턴	1.5126	1.588	-1.485	-1.563	2.9982	3.1519	2.120	2.2289
50% 부하	정상	1.604	1.590	-1.59	-1.59	3.1944	3.1812	2.2588	2.249
	2턴	1.6964	1.707	-1.687	-1.691	3.37457	3.4026	2.385	2.405
	10턴	1.6545	1.903	-1.65	-1.779	3.30665	3.593	2.3381	2.5336
75% 부하	정상	1.5899	1.654	-1.577	-1.628	3.16734	3.2821	2.2397	2.325
	2턴	1.7806	1.796	-1.77	-1.790	3.5579	3.5863	2.5158	2.536
	10턴	1.8803	1.862	-1.882	-1.853	3.7609	3.7062	2.6422	2.623
100% 부하	정상	1.787	1.913	-1.784	-1.901	3.5725	3.9155	2.526	2.698
	2턴	1.8450	1.848	-1.84	-1.830	3.6905	3.678	2.609	2.601
	10턴	1.9474	1.944	-1.942	-1.920	3.8895	3.8644	2.750	2.73264
20턴	정상	1.9602	2.024	-1.968	-2.026	3.9137	4.0596	2.964	2.770
	2턴	1.8658	2.066	-1.859	-2.017	3.7254	4.0356	2.636	2.8985
	10턴	2.0061	1.9647	-2.00	-1.94	4.0101	3.9109	2.835	2.7654
20턴	정상	2.1339	2.0930	-2.130	-2.07	4.2645	4.172	3.0155	2.9504
	2턴	2.2158	2.1969	-2.24	-2.16	4.4581	4.3791	2.9999	2.940

보다 더 확실한 판별용 함수를 구하기 위하여 i_d 양의 피크값과 절대값을 취한 음의 피크값의 합을 이용하여 평균을 구했으며 그림 4에 그 결과를 보였다.

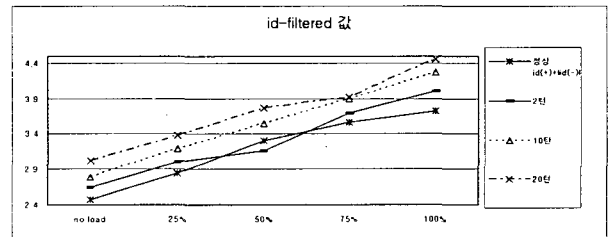


그림 4 $i_{d-max} + |i_{d-min}|$ 평균값 그래프
Fig. 4 $i_{d-filtered}$ value for load change

그림 4는 측정된 전류성분의 파크벡터 패턴을 얻고 매 패턴의 $i_{d-max} + |i_{d-min}|$ 을 구하여 측정된 패턴에 대하여 평균을 구하여 그래프로 나타냈다. 그림에서는 정상과 2턴 고장일 때는 50%부하에서 그래프가 겹치고 10턴과 20턴 고장은 75%부하에서 값의 차가 크지 않아 평균값을 이용하여서는 자동 고장진단이 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 식(5)에서 제안한 매 측정 전류성분의 파크벡터패턴의 $i_{d-max} + |i_{d-min}|$ 를 구하고 20회 측정치의 최대와 최소값을 구하여 식(6) 최대, 최소로 정하고 이를 판별에 이용하도록 제안하였다.

<표 2>는 정상, 2턴, 10턴, 20턴 고장의 부하별 데이터를 이용하여 $i_{d-filtered}$ 값을 구하고, 구해진 측정값의 최소값과 최대값을 나타내고 있다. LabVIEW 프로그램에서 사용되는 함수 중 최대값과 최소값을 입력해주고 어떤 데이터 값이 들어오면 그 값을 최대값과 최소값에 비교하여 참값과 거짓 값을 나타내는 비교함수를 이용하여 자동 고장진단을 시도하였다.

구하여진 최대값과 최소값은 <표 2>와 그림 5에서 보는 것과 같이 정상과 2턴 고장의 75% 부하 때를 제외하고 나

머지상태에서는 접치는 값이 없어 비교함수를 이용하여 자동고장진단이 가능하였다.

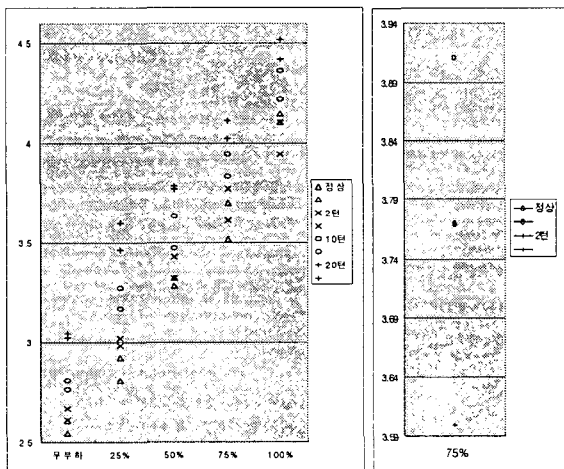
접치는 정상과 2턴 고장의 75% 부하일 때는 그림 3 프런트패널의 정상과 고장램프가 동시에 ON 상태가 되는데, 케이스구조를 이용하여 참값이 나올 때는 $i_{d-filtered}$ 값을 비교하고 거짓 값이 나올 때는 $i_{q-filtered}$ 값을 비교하여 고장진단하도록 프로그램 하였다.

표 2 부하에 따른 $i_{d-filtered}$ 의 최소값, 최대값

Table 2 $i_{d-filtered}$ max., min. value for load change.

		무부하 (i_d)	25% (i_d)	50% (i_d)	75% (i_d)	75% (i_q)	100% (i_d)
정상	최대값	2.547	2.806	3.282	3.515	3.77	4.11
	최소값	2.607	2.921	3.323	3.697	3.911	4.148
2턴	최대값	2.61	2.983	3.324	3.609	3.599	3.941
	최소값	2.669	3.019	3.429	3.771	3.769	4.109
10턴	최대값	2.762	3.169	3.47	3.829		4.218
	최소값	2.805	3.269	3.629	3.94		4.363
20턴	최대값	3.024	3.464	3.771	4.019		4.419
	최소값	3.045	3.599	3.782	4.119		4.519

그 결과 정상, 2턴, 10턴 및 20턴 단락 고장의 부하 변화에 대한 데이터 값을 알고 있을 경우 어떤 부하에 따른 고장의 종류도 자동으로 진단할 수 있게 되었다.



(a) $i_{d-filtered}$ 의 최대값과 최소값 (b) 75%부하일 때 $i_{q-filtered}$

그림 5 부하에 따른 최대값과 최소값

Fig. 5 Max. and min. value of $i_{d-filtered}$ value.

4. 결 론

본 논문에서는 LabVIEW를 이용하여 파크 벡터를 구현하고 파크 벡터 패턴의 피크값을 이용하여 유도전동기의 고정자 권선 고장을 자동으로 판별할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며 이것의 유용성을 실험을 통하여 확인하였다. 사용자가 쉽게 프로그램 할 수 있고 제어와 모니터링이 가능한 진단 모니터링 시스템을 GUI기반으로 구현함으로써 고장진단을 보다 편리하게 확인할 수 있도록 하였고, 기존의

숙련된 작업자가 모니터 앞에서 패턴의 변화를 보고 고장을 판별했던 종래의 진단방법에서 자동으로 권선고장을 진단할 수 있는 방법을 제안하였다. 앞으로 보다 효과적인 알고리즘 연구를 통하여 간단하면서 실용적인 검출 방법을 제안하고, 고정자 권선고장 뿐만 아니라 회전자고장과 베어링 고장도 자동으로 진단하는 프로그램을 개발하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] S. Williamson, and K. Mirzoian, "Analysis of cage induction motors with stator winding fault," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 7, pp.1838-1842, July 1985.
- [2] R. A. Leonhard, and W. T. Thompson, "Vibration and stray flux monitoring for unbalanced supply and inter-turn winding fault diagnosis in induction machines," British Journal of Nondestructive testing, pp.211-215, July 1986
- [3] A. J. M. Cardoso et al., "Inter turn stator winding fault diagnosis in three phase induction motors, by Park's Vector Approach," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29 no.3, pp.595-598, Sept. 1999.
- [4] A. J. M. Cardoso et al., "Computer-aided detection of air gap eccentricity in operating three-phase induction motors by park's vector approach," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol 29, pp. 897-901, Sept./Oct. 1993.
- [5] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koenig, and D. Hoeweler "A new approach to on-line turn fault detection in AC motors," Conference Records IEEE-IAS Annual Meeting, vol.1, pp.687-693, 1996.
- [6] Sang-Bin Lee, R. M Tallam, T. G Habetler, "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix", Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual, Volume 4, pp 2217-2223 17-21 June 2001.
- [7] Hamid Nejjari, Mohamed El Hachemi Benbouzid, "Monitoring and Diagnosis of Induction Motors Electrical Faults Using a Current Park's Vector pattern Learning Approach", IEEE Trans. Power Electron pp 730-735, 2000.
- [8] Filippetti, C, Franceschini, G, Tassoni, F, and Vas, P "Integrated condition monitoring and diagnosis of electrical machines using minimum configuration artificial intelligence" Proceedings of EPE97, Vol 2, pp. 983-988, 1997.

저 자 소 개



송 명 현 (宋 明 現)

고려대 전기공학과 졸업 공박, 1977년
-1981년 삼성전자(주) 모터설계, 1988
년~현재 순천대 전기제어공학과 교수

Tel : 061-750-3542

E-mail : mhsong@sunchon.ac.kr



박 규 남 (朴 奎 南)

전남대 전기공학과 졸업공박, 1984년 ~
현재 순천대 전기제어공학과 교수

Tel : 061-750-3541

E-mail : knpak@sunchon.ac.kr



한 동 기 (韓 東 奇)

1978년 9월 22일생. 2005년 순천대 전
기제어공학과 졸업. 2005년~현재 동
대학원 석사과정

Tel : 061-752-4928

E-mail : sfc78@mail.sunchon.ac.kr



우 혁 재 (禹 奕 在)

1996년 순천대 전기공학과 졸업. 1998년
동 대학원 전기공학과 석사, 동대학원 박
사수료. 2004~현재 서울마린(주)

Tel : 061-745-7808

E-mail : tkbworld@hotmail.com