

유도전동기 구동시스템 평가를 위한 실시간 고조파 파라미터 분석장치

임영철* 정영국**

*전남대학교 전기공학부 **Daebul대학교 전기전자공학부

Real-Time Harmonic Parameters Analyzer for Evaluating Induction Motor Drive System

Young-Cheol Lim* Young-Gook Jung**

*Chonnam National University **Daebul University

Abstract- In general, motor parameters can be divided into mechanical/electrical parameters and harmonic parameters. Mechanical/electrical parameters identification of motor have been studying systematically for a long time. But, systematic study on harmonic parameters analysis for efficient motor drive system are very poor. The goal of this paper is to propose analyzing method of harmonic parameters for motor drive system with various experimental graphic screens and numerical results and to develop harmonic parameters analyzer. A developed analyzer is made up 586-PC and DSP (digital signal processor) board, motor drive system, power and harmonic parameters analyzing software for windows. Harmonic parameters are analyzed using correlation signal processing techniques based on the correlation between voltage and current waveforms. Analysis results are visualized by 3-D current coordinates, and it is compared and evaluated with conventional time/ frequency domain. To verify the validity of the proposed system, I/4HP capacitor run type single phase induction motor and thyristor speed controller is used for analyzing. Harmonic parameters of motor drive system is analyzed and verified, with varying fire angle of thyristor speed controller, and the proposed approach is to confirm validity.

동과 소음, 회전맥동을 발생시키고 심지어는 고조파 전류에 의한 과도한 전류유입을 유발하여 전동기 권선절연을 파괴하며, 또한 무효전류는 전동기의 전체역률을 저하시키는 등의 심각한 문제점을 발생시키고 있다. 따라서 전동기 구동 시스템의 고조파 파라미터 분석은 전기 에너지 절약의 관점에서, 전동기 설계 및 해석과는 무관하게, 대단히 중요하다.

따라서 본 연구에서는 유도전동기 구동장치를 평가하기 위한 PC 화면상의 다양한 그래픽 화면과 수치로 디스플레이 가능한 사용자 위주의 고조파 파라미터 분석 시스템을 개발하였다. 분석시스템은 586-PC, DSP(digital signal processor)보드, 고조파 파라미터 분석 소프트웨어 및 전동기 구동시스템으로 구성되어 있다. 고조파 파라미터는 전압, 전류파형의 상호상관함수 알고리즘에 의해 분석되며, 이 분석 알고리즘을 DSP가 전달하여, 고조파 파라미터를 실시간 분석하였다. 분석결과를 가시화를 위해 저자가 제시한 3차원 전류좌표계 [5-6]로 행하였으며, 종래의 시간/ 주파수 영역에서의 2차원적인 해석법과 비교 평가하였다. 적용대상 전동기로는 기동 토오크가 크며, 역률, 효율이 좋다는 장점 때문에 널리 이용되고 있는 단상 캐패시터 구동형 유도 전동기와 그 싸이리스터로 제어되는 구동 시스템을 선정하였다. 캐패시터 구동형 단상 유도전동기의 속도제어를 위하여 싸이리스터의 위상각을 변화시켰으며, 위상각 변화에 따른 전동기의 고조파 파라미터를 분석 검토하여 본 연구의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

최근에 응용기술이 급속히 발달한 전동기는 산업용 로봇, NC공작기계 및 컴퓨터의 주변장치등 마이크로닉스 영역에서 정확한 위치제어나 속도제어를 위한 구동장치로서 널리 사용되고 있다.[1] 이러한 전동기의 파라미터에는 전기적/기계적 파라미터와 그 전동기의 소모하는 고조파 파라미터로 크게 구별가능하다. 전자는 전동기의 기계적인 설계 및 모델링을 위한 파라미터로서 제어계를 해석하기 위해서 뿐만 아니라 전동기 구동장치의 설계에도 중요하다. 정확한 모델링을 하기 위해서는 전동기의 여자 리액턴스, 권선저항, 권선 리액턴스, 토오크, 슬립, 관성 모멘트, 점성마찰계수등 각종 전기적, 기계적인 파라미터를 정확하게 구할 수 있어야 한다.[2] 또한 후자를 측정 분석하여 전동기에서 소모되는 비효율적인 전력에너지의 원인을 파악하여 그 억제대책을 강구할 수 있으며, 피측정 전동기 구동시스템의 고조파 파라미터를 기준치와 비교, 평가할 수 있게 된다. 고조파 파라미터 분석은 전기적/기계적 파라미터에 의해 설계, 제작된 전동기의 전기적 특성을 파악하여 전동기의 등가회로 해석시에 중요한 정보를 제공해 주는 역할을 할 수 있다.

전동기의 전기적/기계적 파라미터 동정에 관한 연구는 pasek과 Lord등에 의해 연구되어져 최근에는 브리시리스 전동기 적용에 까지, 비교적 오랜기간에 걸쳐 체계적인 연구가 진행되어져 왔다.[3] 그러나 전동기 구동시스템의 효율적인 에너지 관리를 위한 고조파 파라미터의 측정 분석에 관한 체계적인 연구[4]는 매우 미진한 형편이다. 전동기 구동 시스템에서 발생되고 있는 고조파 전류는, 전동기의 슬롯등 기계적 구조 및 전동기의 속도 및 위치를 제어하기 위한 전력전자장치가 그 주된 원인이다. 고조파 파라미터는 전동기의 전

2. 캐패시터형 유도 전동기 구동시스템

그림1은 캐패시터형 단상 유도전동기의 구동시스템을 고조파 파라미터에 관한 등가회로로 표현한 것이다. 전원측으로부터 전력공급의 관점에서 본, 전동기 구동 시스템은 유효전류, 무효전류 그리고 고조파 전류가 각각 나누어 흐르는 병렬등가부하 G, B, K로 볼 수 있다. G는 전동기 구동 시스템이 일을 할 수 있도록 하는 유효전류가 흐르는 등가부하이며, B는 무효전류가 흐르는 등가부하로서, 전동기 구동시스템에서 발생하는 성분과 전동기가 유도성 부하이기 때문이며, 이는 역률을 저하시킨다. 또한 등가부하 K에 흐르는 고조파 전류는, 전동기의 슬롯등 기계적 구조 및 전동기의 속도 및 위치를 제어하기 위한 전력전자장치가 그 주된 원인이라 할 수 있다. 이 고조파와 관련된 전력파라미터들은 전동기의 진동과 소음, 회전맥동을 발생시키며 심지어는 과도한 전류유입을 유발하여 전동기 권선절연을 파괴한다.

3. 고조파 파라미터의 분석 알고리즘

상관함수(correlation function)를 이용하면, 다양한 속도에 따른 전동기 구동 시스템의 전력 및 고조파 파라미터의 순시치 및 실효치를 계산할 수 있다. 상관변수를 r 할 때, 식(1)의 전압실효치V는 식(2)로 나타낸 전압v(t)의 자기상관함수(autocorrelation function)에 의해 계산할 수 있다. 그러나 식(1)과 같은 무한대의 적분계산은 실제 불가능하며, 측정되고 있는 전압신호의 순시치들이 랜덤하기 때문에, 이론과는 다르게 된다. 따라서 전압의 순시치로부터 식(3)과 같은 전압실효치 $R_{vv}[0]$ 를 예측하기 위해서, 적분은 고정된 구간

dT를 통하여 수행되어야 한다.

$$V^2 = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t v^2(t) dt \quad (1)$$

$$R_{vv}(\tau) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t v(t)v(t-\tau) dt \quad (2)$$

$$R_{vv}[0] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad (3)$$

그리고 전류 $i(t)$ 의 실험치 I 를 구하기 위한 자기상관함수는 전압과 동일한 방법으로 계산되며, 전압실험치, 전류실험치 그리고 피상전력은 식(4) - 식(6)과 같다.

$$V = \sqrt{R_{vv}[0]} \quad (4)$$

$$I = \sqrt{R_{ii}[0]} \quad (5)$$

$$S = VI \quad (6)$$

또 유효전력 P 는 전압과 전류의 상호상관함수(crosscorrelation function) $R_{vi}[0]$ 에 의해서 계산된다.

$$R_{vi}[0] \approx \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t v(t)i(t) dt \quad (7)$$

$$P = R_{vi}[0] \quad (8)$$

식(8)에 의해 유효전력을 구하고, 식(6)으로 피상전력을 구하면, 선형부하인 경우, 관계식 $\sqrt{S^2 - P^2}$ 에 의해 무효전력 Q 가 구해진다. 전압과 전류파형이 가장 근사하며 동상일 때 구해지는, 최대 상호상관 함수값 $R_{vi}[\phi]$ 은 유효전력 P 와 무효전력 Q 의 벡터합이며, 최대 상호상관 함수값은 비선형 부하가 아닌 선형부하인 경우에는 피상전력 S 와 같다. 또 상관함수차가 최대일때의 상호상관축이(crosscorrelation shift) ϕ_1 는 전압과 기본파 전류의 위상차 즉 변위각이고, $R_{vi}[0]$ 는 식(7)에 의해 이차 구한 유효전력이다.

$$Q = \sqrt{R_{vi}^2[\phi_1] - R_{vi}^2[0]} \quad (9)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (10)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (11)$$

이상의 분해된 전력성분으로 부터, 등가 전동기 구동 시스템의 변수 G, B, K 가 얻어진다.

$$G = \frac{P}{R_{vv}[0]} \quad (12)$$

$$B = \frac{Q}{R_{vv}[0]} \quad (13)$$

$$K = \frac{D}{R_{vv}[0]} \quad (14)$$

고조파 파라미터로 등가 표현된 전동기 구동 시스템의 전류의 순시치는 식(15) - 식(18)로 구할 수 있고

$$i_a(t) = G v(t) \quad (15)$$

$$i_b(t) = B [v(t) \text{의 } 90^\circ \text{이동}] \quad (16)$$

$$i_c(t) = i(t) - i_a(t) \quad (17)$$

$$i(t) = i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) \quad (18)$$

실험치는 식(19) - 식(22)로 된다.

$$I_a = G \sqrt{R_{vv}[0]} \quad (19)$$

$$I_r = B \sqrt{R_{vv}[0]} \quad (20)$$

$$I_d = K \sqrt{R_{vv}[0]} \quad (21)$$

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_d^2 \quad (22)$$

따라서 유도전동기 구동시스템의 입력전류를 그림2와 같이, 3차원 전류좌표계상에서 표현하면 식(18)에 의해서 전류계좌도와, 식(22)에 의해서 전류벡터도를 그림2로 나타낼 수 있다. 또한 각 전류성분들과 전류벡터와의 관계는 식(23) - 식(25)로 표현가능한데, 이는 각각 3차원역률, 3차원 무효율, 3차원 왜형율을 나타내고 있으며, 그림1에 나타나있는 전동기 구동시스템의 등가변수 G, B, K 에 흐르는 전류크기의 비율이라 말할 수 있다.

$$\cos \varphi = I_a / I \quad (3\text{차원역률}) \quad (23)$$

$$\cos \beta = I_r / I \quad (3\text{차원무효율}) \quad (24)$$

$$\cos \delta = I_d / I \quad (3\text{차원왜형률}) \quad (25)$$

그림2 a)의 나타나 있는 3차원 전류좌표계를 보면, 전류벡터의 고도각 λ 와 총고조파 왜형률 %THD와의 관계는 식(26), 식(27)과 같다.

$$\%THD = (I_d / I_1) 100 \quad (26)$$

$$\lambda = \tan^{-1}(\%THD/100) \quad (27)$$

따라서 λ 는 전류의 총고조파 왜형률의 기준이 될 수 있으며, λ 가 클수록 전동기 구동시스템의 입력전류에는 고조파가 많이 함유돼 있고 정현파에서는 0° 로 된다.

4. 시스템 구성

4.1 하드웨어 구성과 기능

그림3에 전동기 구동 시스템의 고조파 파라미터 분석 하드웨어를 나타내었다. 고조파 파라미터 분석 대상은 전동기 구동시스템이며, 캐패시터 구동형 단상 유도 전동기와 2개의 역병렬 싸이리스타에 의한 속도제어장치로 구성되어있다. 표1은 본 연구에서 고조파 파라미터 분석을 위한 전동기 구동시스템의 하드웨어 사양을 나타내고 있다. 먼저 홀센서에 의해서 검출된 전동기 구동시스템의 입력전압, 전류는 DSP(TMS320C31)전용 A/D변환기(최대 A/D샘플링 주파수:48KHz, 최대 D/A샘플링 주파수:100KHz)를 통해 12비트 디지털 값으로 DSP에 입력된다. A/D변환기와 함께 16채널 아날로그 멀티플렉서를 사용하여, 센서부로부터 측정된 2개의 측정량을 순서적으로 변환시킨다. 샘플링 주기는 60Hz전원의 한주기 동안 128회 샘플링을 기준으로 하였을 때, 약 130 μ sec (7.8KHz)가 되며 이때마다 DSP의 부 인터럽트에 의해서 샘플링 및 고조파 파라미터 분석을 수행하게 된다. DSP에 의해 분석된 결과는 DSP보드의 DPRAM (Dual port RAM)에 의해 586-PC로 전송되어, 사용자가 원하는 수치 또는 그래픽 출력을 윈도우상의 화면으로 보여준다.

4.2 소프트웨어의 특성과 기능

연구개발된 장치를 구동하기 위한 프로그램은 윈도우즈용으로 개발하였기 때문에, 윈도우즈상에서 다양한 프로그램을 동시에 수행할 수 있는 멀티태스킹이 가능하다. 이 프로그램은 그림4와 같이 호스트 프로그램과 DSP 프로그램으로 구분된다. 이 중에서 호스트 프로그램은 비주얼 베이직 (Visual BASIC)을 이용해서, DSP 프로그램은 DSP용 C-언어를 사용하여 개발하였다. 또 하드웨어 및 O/S는 각각 586-PC와 윈도우즈 96을 기준으로 하였다. 586-PC상에서 이 호스트 프로그램을 구동시키면, 호스트 프로그램은 DSP용 실행파일을 DSP보드로 다운로드하고 실행시킴과 동시에 사용자가 원하는 정보를 586-PC상에 나타낸다. DSP는 고조파 파라미터 분석 알고리즘을 담당하며, 호스트 프로그램으로부터 시작신호를 받고 분석을 수행하게 된다. PC는 DSP보드의 DPRAM으로 부터 DSP에서 계산된 값을 업로드 받아 수치와 그래픽으로 화면에 나타낸다.

5. 실험결과 및 고찰

그림5는, 점호각 γ 가 60° 에 해당되는 속도에서 유도전동기 구동시스템의 입력전류파형을, 본 시스템에 의해서 측정된 것과 오실로스코프에 의해서 측정된 것을 서로 비교한 것으로 전압, 전류측정에 관한 본 시스템의 정밀도는 양호함을 알 수 있었다. 따라서 이와같이 측정된 데이터로 상관함수에 의해 고조파 파라미터를 분석하여, 수치 및 그래픽으로 가시화하여도 타당하다는 것을 입증할 수 있다. 표2를 보면, 전동기 구동시스템의 입력전류를 등가부하G에 흐르는 유효전류, 등가부하B에 흐르는 무효전류 그리고 등가부하K로 흐르는 고조파전류의 3성분으로 각각 분해 가능함을 알 수 있다. 또한 분석된 전류성분 외에 유효전력, 무효전력, 왜형전력 그리고 총고조파 왜형률, 역률, 무효율, 왜형률, 고도각에 의해 가시화한 총고조파 왜형률 등 전력 및 고조파 파라미터들도 수치적으로 잘 나타내고 있다. 그

림6은 캐패시터 구동형 유도전동기의 점호각을 각각 30°, 85°로 하여 속도제어할 때, 입력전류를 등가부하G에 흐르는 유효전류파형, 등가부하B에 흐르는 무효전류파형 그리고 등가부하K로 흐르는 왜형전류파형을 보여주고 있다. 그림7은 캐패시터형 유도전동기 구동시스템의 입력전류품질을 나타낸 것이다. 점호각이 30°에서 85°로 커짐에 따라 유도전동기의 속도에 영향을 미치는 등가부하G에 흐르는 유효전류, 등가부하 B에 흐르는 무효전류, 등가부하K에 흐르는 왜형전류를, 종래의 시간/주파수 영역으로 관측해보면, 한눈에 파악하기 힘들고, 시간 영역과 주파수 영역의 평가가 항상 동시에 행해져야 함을 알 수 있다. 그러나, 전동기 속도제어시스템의 입력전류를 3차원 전류벡터로 가시화하면, 유효, 무효, 왜형전류를 기하학적으로 쉽게 파악할 수 있다. 그림8은 그림2에서 이미 설명한 3차원 전류벡터와 3차원 전류궤적도에 의해서 유도전동기의 속도제어에 따른 구동시스템의 입력전류파형을 나타내고 있는 것으로, 전류벡터궤적은 원점을 중심으로 하여 양 날개를 파고 있는 나비형태인데, 유효 및 무효성분에 의하여 나비의 양 날개 길이가 결정되고, 왜형성분에 의해서 각 날개의 높낮이 폭이 결정된다. 전류벡터궤적이 한쪽 날개에서 다른 쪽 날개로 이동하는 이유는 전류의 흐름이 반전되고 있기 때문이다. 즉 전류벡터궤적의 끝점을 이은 폐곡선은 전류의 주기성, 전류벡터 궤적도의 접혀진 수직형태는 고조파에 의해 전류가 순간적인 변화를 하고 있음을 나타낸다. 전류벡터궤적의 변화가 심하여 겹쳐진 궤적의 형태를 파악하기가 어려울 때는, 3차원 전류좌표계를 회전시키으로써, 겹쳐진 수직 형태의 궤적을 다른 각도에서 관찰할 수 있다. 그림9, 그림10은 3차원 전류좌표계를 회전시켜서, 보는 각도를 달리한 전류벡터 및 그 궤적도를 나타내고 있다.

6. 결론

유도전동기 구동시스템의 평가를 위한 실시간 고조파 파라미터 분석장치를 개발하여 캐패시터형 유도전동기에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 개발된 유도전동기 구동시스템을 평가하기 위한 실시간 고조파 파라미터 분석장치는 초보자라도 사용하기 쉬우며, 완전 소프트웨어화를 추구한 윈도우즈용으로 개발되었으므로, 전압 및 전류센서의 추가 하드웨어가 없으며, 노트북 PC에 의해서 컴팩트한 분석시스템을 구현할 수 있다.
- 2) 본 연구에서 고조파 파라미터를 분석하기 위해서 이용한 3차원 전류좌표계 해석법은 종래의 시간/주파수/3차원 전류좌표계의 다양한 수치와 그래픽 화면으로 나타낼 수 있었다.
- 3) 전동기 구동시스템의 고조파 파라미터를 싸이리스터 점호각의 변화에 따라 PC 화면상에 시간/ 주파수/ 3차원 전류좌표계의 다양한 수치와 그래픽 화면으로 나타낼 수 있었다.
- 4) DSP를 사용함으로써 고조파 파라미터 분석의 완전 소프트웨어화 및 실시간 처리가 가능하였고, 신뢰성과 유연성이 향상되었다.
- 5) 제작된 본 시스템은 고조파 파라미터 분석기능이 우수하며, 3차원 전류좌표계를 디스플레이하기 위한 소프트웨어 루틴에 제어 알고리즘을 내장시키고 약간의 하드웨어를 추가 한다면, DSP를 사용한 능동전력필터시스템도 구현가능하다.

참고 문헌

- [1] G.T.Park, Y.C.Lim, "Recent trends in servomotors", Proceeding of KIEE, Vol.35, pp.34-42, 1986.
- [2] O.Miyashita, T.Fujimaki, "Modeling of armature circuit of DC machine", IEEE, Vol.100, pp.625-628, 1980.
- [3] 임영철, 정영국, "브리시리스 직류전동기의 파라미터 동정에 관한 연구", 한국조명·전기설비학회 논문집, Vol.7, NO.2, pp.41-50, 1993.
- [4] D. R. Zrudsky, J. M. Pichler, "Virtual Instrument for Instantaneous Power Measurements", IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.41-41, No.4, pp.528-534, 1992.

- [5] 임영철, 정영국, "능동전력필터의 보상 성능평가를 위한 3차원 전류좌표 해석법", 대한전기학회 논문지 43-12-10, pp.35-46, 1994.
- [6] Y.C.Lim, Y.G.Jung, "A DSP Based Power Analyzing and Control System Using Three-Dimensional Current Coordinates", IEEE IECON, (TAIWAN), pp.1094-1099, 1996.

표1. 전동기 구동 시스템의 하드웨어 사양

Specifications of motor speed controller		
power rating	1 ϕ 0.5KVA	
supply voltage	110V	
supply current	4A	
switching device	thvristor(2P4M)	
Specifications of motor and load		
motor	Power rating	1 ϕ , 1/4 HP, capacitor run type induction motor
	Supply voltage	110V
	Supply current	1A
load	fan	

표2. 고조파 파라미터 분석 결과

γ [°]	30		60		85	
	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D
Coordinate system	100.40661		103.41499		102.64293	
V [V]	0.66338		0.55584		0.36773	
I [A]	0.58567		0.38452		0.16817	
i_a	- 0.28874		- 0.33450		- 0.25203	
i_r	- 0.11705		- 0.22184		- 0.20838	
i_d	-		-		-	
$\sqrt{i^2 + i^2}$	0.3156		0.40137		0.32696	
S [VA]	66.60800		57.48245		37.74509	
P [W]	58.80465		39.76548		17.26100	
Q [VAR]	- 28.99159		- 34.59195		- 25.87037	
D [VAR]	- 11.75272		- 22.94199		- 21.38364	
$\sqrt{Q^2 + D^2}$ [VAR]	31.28320		41.50823		33.54709	
%THD [%]	17.92587		43.52843		68.77346	
$\cos \phi$	0.88981		0.88285		0.69939	
λ [°]	- 10.16283		- 23.32274		- 0.45776	
$\cos \theta$	- 0.43525		- 0.60179		- 0.68539	
$\cos \delta$	- 0.17644		- 0.39911		- 0.56669	

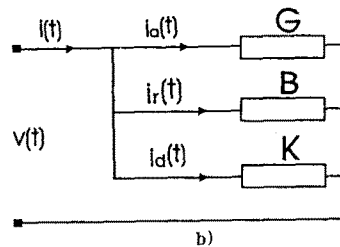
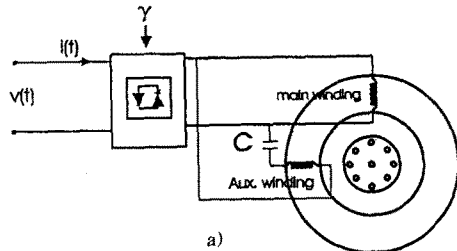


그림1. 캐패시터형 유도전동기의 구동시스템

a) 구동시스템 b) 고조파 파라미터로 나타낸 등가적 표현

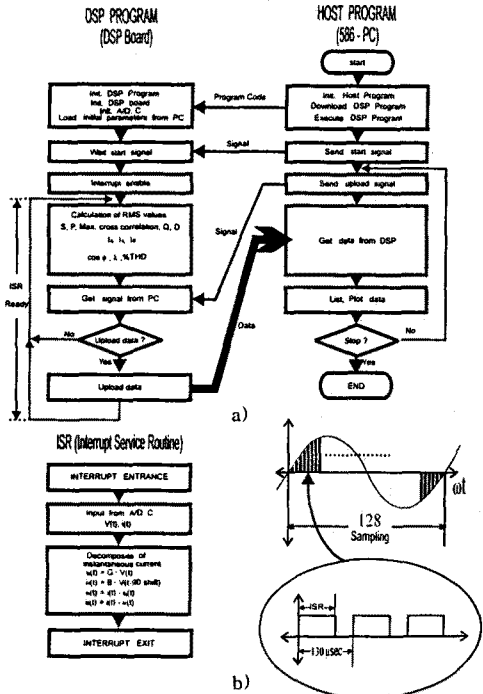
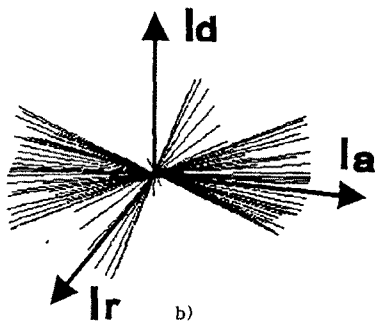
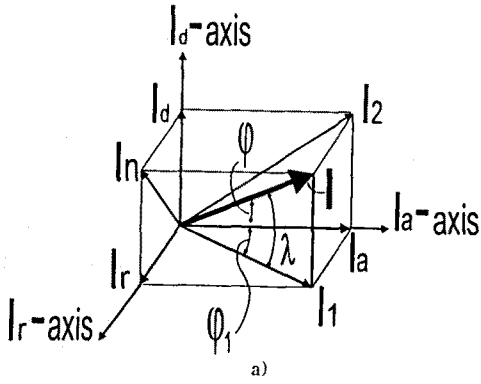


그림4.주 프로그램과 ISR(Interrupt service routine) 흐름도
a)주 프로그램 b) ISR

그림2.3차원 좌표계로 나타낸 전동기 구동시스템의 입력전류
a) 전류벡터도 b) 전류궤적도

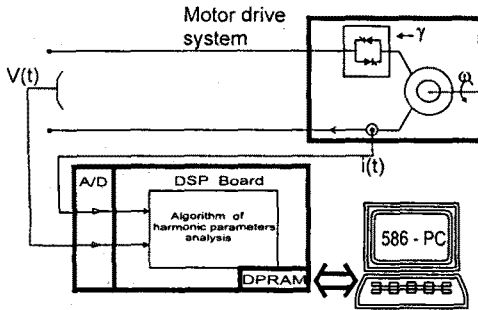


그림3.고조파 파라미터 분석 시스템의 하드웨어 구성도

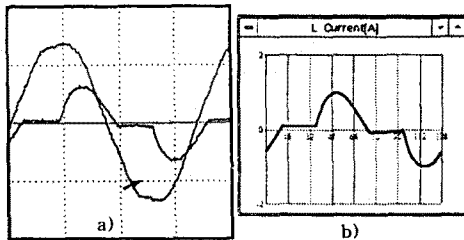


그림5.점도각 60도에서, 제안된 시스템의 측정 정확도를 검증하기 위한 실험과형

a)오실로스코프로 측정한 전류과형 b)제안된 방법으로 측정된 전류과형

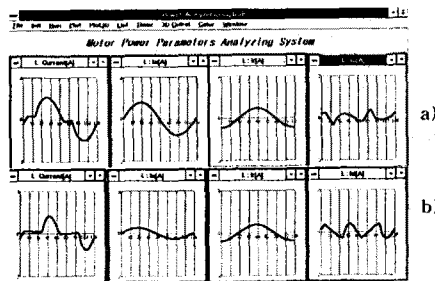


그림6.분해된 전동기 구동시스템의 입력전류과형
a) $\gamma = 30^\circ$ b) $\gamma = 85^\circ$

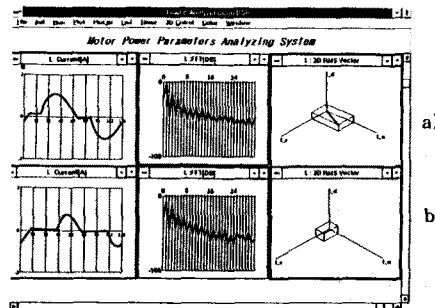


그림7.시간/주파수 영역/3-D 전류 좌표계에서, 전동기 구동시스템의 입력전류 품질평가
a) $\gamma = 30^\circ$ b) $\gamma = 85^\circ$

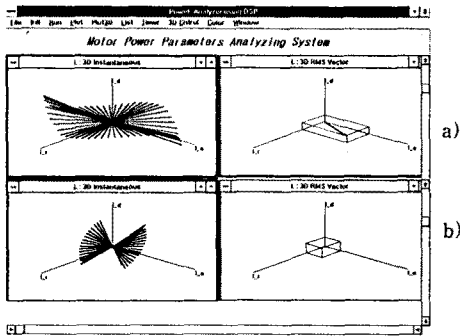


그림 8.3 차원 전류벡터와 전류궤적도
 a) $\gamma = 30^\circ$ b) $\gamma = 85^\circ$

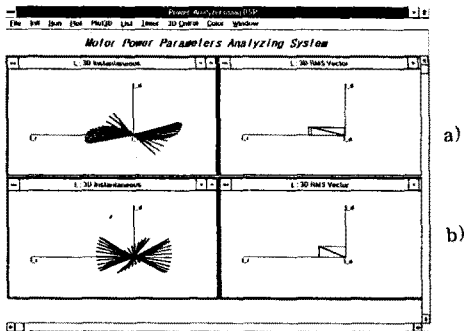


그림 9. 보는 각도를 달리한 전류벡터 및 궤적도
 a) $\gamma = 30^\circ$ b) $\gamma = 85^\circ$

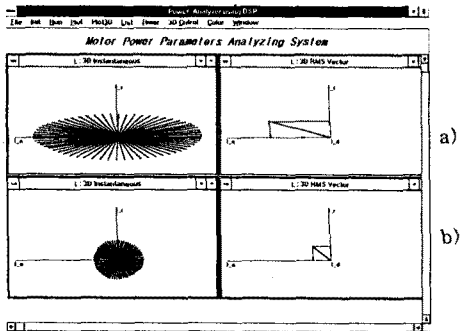


그림 10. 보는 각도를 달리한 전류벡터 및 궤적도
 a) $\gamma = 30^\circ$ b) $\gamma = 85^\circ$