

LPC 잔여신호의 에너지를 이용한 회전기기의 고장진단 시스템

Fault Diagnosis System of Rotating Machines Using LPC Residual Signal Energy

이 성 상, 조 상 진, 정 의 필

Sung-Sang Lee, Sang-Jin Cho, Ui-Pil Chong

요 약

운전 중인 기계들의 안전 운전과 예지 보전을 위한 설비의 고장 감지 및 진단과 상태감시는 산업 현장에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 이러한 설비의 많은 기기들은 회전기기로 이루어져있으며 회전기기의 고장진단은 오랜 기간 많은 분야에서 연구되고 있다. 본 연구에서는 회전기기의 고장신호는 주파수 영역의 신호의 변화로 나타나는 특징을 이용하여 보다 효율적인 주파수 영역에서의 신호 해석을 위하여 Linear Predictive Coding(LPC) 계수를 이용하였다. 사용된 데이터는 회전기기의 고장 신호의 습득을 용이하게 하기 위하여 유도전동기에 인위적인 고장 재현을 통하여 습득된 진동 신호를 사용하였다. 제안된 시스템은 LPC 분석을 사용하여 일반적으로 사용되는 주파수 영역 상에서의 다른 해석 방법들보다 빠른 시간에 연산 결과를 도출할 수 있는 장점을 가질 수 있었으며, 성공적인 실험 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

Monitoring and diagnosis of the operating machines are very important for safety operation and maintenance in the industrial fields. These machines are most rotating machines and the diagnosis of the machines has been researched for long time. We can easily see the faulted signal of the rotating machines from the changes of the signals in frequency. The Linear Predictive Coding(LPC) is introduced for signal analysis in frequency domain. In this paper, we propose fault detection and diagnosis method using the Linear Predictive Coding(LPC) and residual signal energy. We applied our method to the induction motors depending on various status of faulted condition and could obtain good results.

Key words : fault detection, diagnosis, rotating machine, LPC, residual signal

I. 서 론

설비의 고장 감지 및 진단은 중대한 역할을 담당하고 있다. 고장이 일어날 경우, 그 기계 자체에 손실을 줄 뿐 아니라 전체 공정의 중단 등 전체 시스템에 영향을 줌으로써 막대한 경제적 손실을 가져올 수 있다. 안정적인 설비 유지를 위하여 기술적인 진단 등을 통하여 설비의

상태를 정확하게 파악하고 많은 설비를 효율적이고 경제적으로 관리할 수 있는 체제를 구축하여야 한다[1]. 이러한 시스템의 이상 감지를 위해 상태 감시기법이 사용되며, 이상이 발견되었을 때 고장의 원인을 분석하고 적절한 조치를 계획하기 위한 이상 진단 과정이 따르게 된다[2]. 현재, 상태 감시에 사용되어지는 데이터는 유량, 온도, 압력, 진동 등이 사용되고 있으며, 특히 진동신호의 해석을 통한 회전기계의 상태 감시 및 고장 진단은 많은 연구를 통해 개발되어 왔다[3-7].

본 논문에서는 진동 데이터의 정보를 보다 효율적이고 간단하면서 신뢰적인 결과를 나타내는 해석 방법으로 LPC 분석을 이용하였다. 취득된 신호의 분석에는 시간영

*울산대학교 컴퓨터정보통신공학과
접수 일자 : 2005. 6. 14 수정 완료 : 2005. 7. 25
논문 번호 : 2005-2-3

역에서의 실효치(RMS), 첨두치(Peak-to-peak), 파고율(Crest Factor)과 주파수 영역에서의 스펙트럼 분석이 사용되어지고 있다. 특히 고장의 원인을 찾아내는 방법으로 FFT를 주로 사용하고 있다. 이는 신호의 주파수 특성을 자세히 알아 볼 수 있는 장점을 가지고 있으나 연산 속도가 비교적 오래 걸리는 단점이 있어 특정 파라미터를 구하는데 어려움이 있다.

본 연구에서는 FFT의 단점을 보완하기 위해 LPC 분석을 사용하였다. LPC 분석을 사용함으로써 주파수 영역에서의 신호 해석과 동시에 LPC 계수로 이루어진 적응필터(adaptive filter)를 통한 출력 값의 결과를 이용하여 고장 진단이 가능함을 보였다.

II. LPC를 이용한 분석 및 진단 시스템

2.1 Linear Predictive Coefficient(LPC)

선형 이산 시스템에서 과거의 파형에 가중치를 가한 합을 이용하면 현재의 파형을 추정할 수 있는데 이를 선형 예측이라 한다. LPC는 음성 분석에 쓰이는 방법 중 가장 효율적이고 강력한 해석 방법 중 하나로서 그림 1에서는 음성 발생 모델의 블록다이어그램을 보여주고 있다.

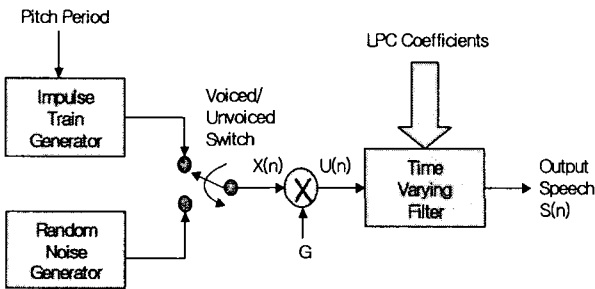


그림 1. 음성 발생을 위한 간단한 소스 필터 모델의 블록다이어그램

Fig. 1. Block diagram of the simplified source filter model of speech production

위의 모델에서의 입력신호는 유성음에서 임펄스 열을, 무성음에서는 랜덤 노이즈로 사용한다. 이러한 입력신호, $X(n)$ 은 가중치 G 에 의해 에너지가 보상된 $U(n)$ 으로 변형되고 LPC 계수를 이용한 시변필터를 거쳐 사람의 음성신호로 합성된다. 이때 시변필터의 시스템 전달함수는 식(1)과 같다.

$$H(z) = \frac{G}{1 - \sum_{j=1}^p a_j z^{-j}} = \frac{G}{A(z)} \quad (1)$$

여기서, G 는 입력신호의 에너지를 보상하기 위한 파라미터이며 p 와 a_j 는 LPC의 파라미터로서 각각 차수와 이상적인 LPC계수를 의미한다. 전달함수를 시간영역으로 나타내면 식(2)와 같으며, 이것이 LPC 차분 방정식

$$s(n) = Gx(n) + \sum_{j=1}^p a_j s(n-j) \quad (2)$$

(difference equation)이다.

이상적인 가중치를 나타내는 계수 a_j 의 예측값을 \hat{a}_j 로 하면 실제값과 예측값의 오차는 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$e(n) = s(n) - \sum_{j=1}^p \hat{a}_j s(n-j) \quad (3)$$

예측 오차를 MSE(Mean-squared error)로 나타내면 식(4)와 같다.

$$E[e^2(n)] = E\left\{ \left[s(n) - \sum_{j=1}^p \hat{a}_j s(n-j) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

E 를 최소값으로 하는 예측계수 \hat{a}_j 를 찾아내기 위해서는 오차가 각 샘플들 $s(n-j)$ 와 직교하도록 하는 예측계수를 찾는 직교 원리를 이용하였고 식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^p \hat{a}_j \phi_n(i, j) = \phi_n(i, 0), \text{ for } i=1, \dots, p \quad (5)$$

$$\phi_n(i, j) = E[s(n-i)s(n-j)] \quad (6)$$

식(5)를 해석하는 방법에는 Auto-correlation을 이용한 방법(AM)과 Covariance를 이용한 방법(CM)이 있는데, 본 연구에서는 AM을 이용하였다.

2.2 유도 전동기의 진동 데이터

실험에 사용된 데이터는 유도 전동기의 진동 데이터이다. 실 설비의 운행 중인 기기의 데이터를 취득하는 방법은 정상 데이터의 취득은 가능하나, 비정상 데이터를 취득하는데 어려움이 있다. 왜냐하면 모니터링에 의한 방법과 고장재현 실험에 의한 방법은 시간과 비용 그리고 안정성의 문제로 인해 실험을 하기엔 거의 불가능하기 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 실험실 단위에서 실험 가능한 유도 전동기의 데이터를 이용하여 실험을 하였다. 고장 신호는 인위적인 물리적 고장 재현을 통한 진동 데이터를 사용하여 실험을 하였으며, 실험에 사용된 진동 데이터는 부경대학교 지능기계연구실에서 제공되었다. 각 고장 재현 실험 방법은 다음과 같다.

- (1) 불평형(unbalance) - 회전자에 8.4g의 불평형 질량을 회전자에 부착
- (2) 정렬불량(misalignment) - 축 지지대를 조절하여 편각정렬불량과 편심정렬불량의 상태를 가지게 함.
- (3) 베어링 고장 - 여러 가지 원인 중 외륜(outer race)에 고장을 주어 얻어진 진동 데이터를 사용.
- (4) 굽은 회전자 - 최대 0.075mm로 회전자를 굽혀서 측

정된 진동신호를 사용

(5) 회전자 붕의 파손과 크랙 - 34개의 회전자 붕 중에서 12개의 붕을 파손하여 측정된 진동 신호 사용.

진동 데이터의 측정은 8kHz의 샘플링 주파수로 2.048초 동안 16384개의 샘플을 취득하였으며, 각 실험 조건마다 각각 20개의 진동 데이터를 선택하여 실험에 사용하였다.

2.3 LPC Coefficient의 취득과 그 결과

LPC 분석을 이용한 고장판별이 가능한지 분석하기 위하여 우선 LPC 시변 필터의 주파수 특성과 입력 신호의 주파수 특성의 유사성을 비교하였다. 그 결과 LPC 차수를 12차 이상으로 하였을 경우 입력 신호의 주파수 특성과 LPC 시변 필터의 주파수 특성이 유사함을 확인할 수 있었다. 그림 2에서 비교 결과의 예를 볼 수 있다.

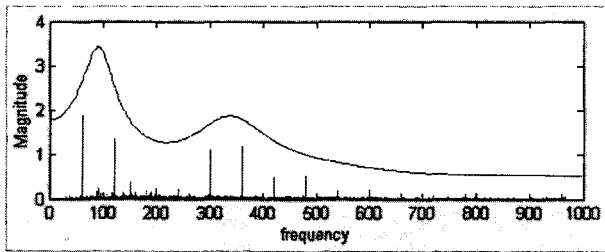


그림 2. 유도전동기의 주파수 특성과 LPC envelope
Fig. 2. Frequency characteristics and LPC envelope of induction motor

각 신호별로 8000개 샘플의 윈도우 크기를 갖는 해밍 윈도우(hamming window)에 800개 샘플의 오버랩을 취하여 프레임별로 12차 LPC 분석을 하였다.

표 4. 정상 및 각 이상별 LPC 계수

Table 1. LPC coefficients of normal and abnormal signal

Normal	Un balance	Angular Misalign ment	Parallel Misalign ment	Bowed Rotor Shaft	Fault Bearing	Broken Rotor Bar
0.8092	0.8038	1.0378	1.2439	-0.3395	0.2185	0.7834
0.3383	0.3736	0.2464	0.0362	-0.0241	0.5413	0.3279
-0.2501	-0.2199	-0.3245	-0.4705	-0.0997	-0.5652	-0.2678
-0.0728	-0.0554	-0.1170	-0.1973	0.0784	-0.2411	-0.0857
0.4816	0.4240	-0.0010	0.4653	0.4593	0.6512	0.4326
0.0273	0.0461	0.2566	-0.0124	0.3559	0.0314	0.1869
-0.4515	-0.4980	-0.4021	-0.4056	0.1989	-0.4119	-0.5885
-0.1158	-0.0569	0.1989	0.1890	0.0666	0.2736	0.0569
0.2001	0.1284	-0.0016	0.1299	-0.1647	0.1327	0.1310
-0.0079	0.0007	-0.0856	-0.1388	-0.1410	-0.2149	-0.0724
-0.0357	0.0457	0.1955	0.0572	0.0548	0.0713	0.0197
0.0180	-0.0295	-0.0830	0.0056	0.0344	0.1209	-0.0213

정상 및 비정상 진동 데이터별 총 12개의 프레임으로 LPC 분석을 하여 계수를 취득하고 각 LPC 차수별로 평균값을 취하여 정상과 각 이상별 LPC 계수를 선정하였다. 표 1에서는 그 결과 값을 보이고 있다.

III. 고장 진단 시스템 및 실험 결과

3.1 고장 진단 시스템

고장 진단 시스템은 그림 3의 구조를 가진다.

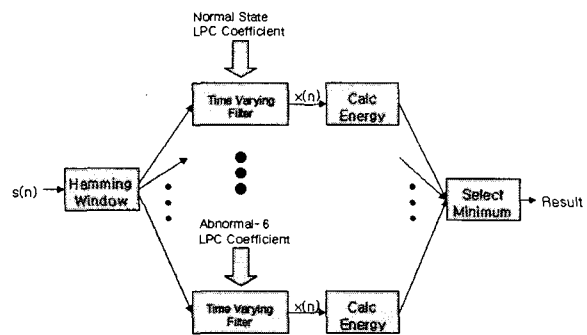


그림 3. LPC를 이용한 고장진단 시스템의 구조
Fig. 3. Fault diagnosis system structure using LPC

입력된 신호 $s(n)$ 은 해밍 윈도우를 거쳐 적응 필터의 입력으로 들어간다. 적응 필터의 전달함수는 식(7)과 같다.

$$H(z) = \frac{X(z)}{S(z)} = 1 - \sum_{j=1}^p \alpha_j z^{-j} \quad (7)$$

식(7)을 시간영역으로 역 z -변환을 하면 식(3)과 같게 된다. 필터를 거쳐 출력된 신호 $x_j(n)$ 은 잔여신호(residual signal)이며, 혹은 미리 해석된 LPC 계수에 의해 설정되어진 필터의 출력이므로 오차라 할 수 있다. 각각의 상태별 적응 필터를 거친 7개의 $x_j(n)$ 신호는 신호별로 에너지를 산출하게 된다. 신호의 에너지는 식(8)에 의하여 산출된다.

$$E = \sum_{n=1}^N |x_i(n)|^2 \quad (8)$$

이렇게 얻어진 7개의 잔여 에너지 값을 비교하여 최소값을 가진 필터를 찾아 입력신호의 상태를 분류함으로써 진단결과를 내게 된다.

이는 입력된 신호가 통과한 필터와 같은 상태의 필터를 통과한 것이라면 낮은 에너지 대역의 신호로 출력이 될 것이며, 그렇지 않다면 상대적으로 높은 에너지 대역의 신호로 출력이 될 것이라는 것을 이용한 것이다. 즉,

입력된 신호가 미리 정의된 각 이상 상태별 필터 중 가장 비슷한 필터에서 가장 낮은 에너지 대역의 출력신호를 얻게 되는 것이다.

3.2 실험 결과

실험은 정상신호 및 각 고장별 진동신호를 각각 12초의 데이터를 입력으로 하여 가장 작은 잔여 에너지값을 가지는 필터로 상태분류를 하였다. 표 2에서는 베어링 고장 신호를 진단 시스템에 입력으로 하였을 때 각 분류별 에너지를 보이고 있다. 각각 12개의 입력에서 베어링 고장을 나타내는 에너지 값이 가장 작음을 알 수 있다. 즉, 입력된 신호는 베어링 고장의 신호라고 분류할 수 있다.

표 5 Faulty bearing신호의 이상 진단 결과
Table 2. Diagnosis results of faulty bearing signal

Normal	Bowed Rotor Shaft	Broken Rotor Bar	Faulty Bearing	Mass Unbalance	Angular Misalignment	Parallel Misalignment
20.0542	21.1019	19.5281	13.9763	20.2449	24.2449	24.6712
19.8156	21.0654	19.3849	13.8222	19.8674	24.2871	24.5081
20.1414	23.2910	19.7312	14.3288	20.3256	24.5167	24.6319
21.3291	23.8035	20.8549	14.8466	21.3767	25.5359	26.3164
20.8626	24.5225	20.4249	14.8391	21.0251	24.9510	25.4882
21.2382	25.2951	20.6934	15.0405	21.3847	25.2143	25.7010
18.3701	19.9860	18.0414	13.3915	18.5081	22.3012	22.1925
18.2826	19.9738	17.9911	13.4674	18.4256	22.2785	22.1233
20.1822	21.5405	19.8111	14.0136	20.2804	24.7613	25.0987
19.9237	21.7863	19.4301	14.0586	20.0010	24.2704	24.4602
20.9701	23.8397	20.3796	14.6940	21.0292	25.0398	25.6787
19.8574	23.0268	19.5107	14.1739	20.0858	24.2816	24.2136

이와 같이 다른 이상신호와 정상신호에 대해서 실험을 진행하였으며 실험결과 모든 신호에 대하여서 정확한 진단 결과를 얻을 수 있었다.

IV. 결론 및 향후 연구 과제

본 실험에서 사용된 고장 진단 시스템은 회전기기의 고장 특성이 일반적으로 주파수 영역에서 잘 나타난다는 특징을 이용하여 주파수 영역에서의 값의 변화를 보고 진단을 하는 방법이다. 기존의 FFT와 같은 방법으로 주파수 해석을 하고 이를 이용하는 것은 속도의 측면과 더불어 신호의 애매성과 파라미터 추출의 어려움과 같은 단점을 가지고 있다.

이를 보완하고자 본 연구에서는 LPC 분석을 수행하였고, 이를 통하여 복잡한 파라미터 추출 과정 및 기존의 신경망의 설계를 거치지 않고, 비교적 빠른 속도로 결과를 얻을 수 있는 고장진단기법을 제안하였다. 즉, 시변

필터를 거치고 신호의 샘플 수만큼의 합을 통해 잔여 에너지 값을 산출하는 간략한 처리 과정을 거치므로 기존의 변환방법에 비해 많은 속도의 장점을 가진다 할 수 있다. 실험의 결과 또한 실험에 사용된 데이터 안에서 올바르게 분류된 결과를 얻을 수 있었다.

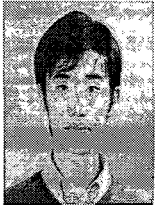
향후 실제 발전소의 발전기의 진동 신호와 이상신호를 취득하여 그에 맞는 LPC 계수를 얻고, 이를 통해 실제 현장에서 본 시스템의 성능여부를 보일 예정이다. 이를 위해서 실시간으로 모니터링 하고 진단할 수 있는 방법으로 프로그래밍 할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 전영갑 외, "전력설비사고예방 및 진단시스템개발", 한국전력공사, 1993
- [2] M. Jia and R. Du, "Fault diagnosing of large rotating machinery using evolutionary spectrum", Proceedings of the ASME, Vol.8, pp. 103-111, 1998
- [3] 서동욱, "웨이블렛 분석을 이용한 회전기계 및 공구 상태 감지 및 진단연구", 서강대학교, 2000
- [4] 이충휘, "회전설비의 이상고장진단 시스템의 개발", 한양대학교 석사학위 논문, 2000
- [5] 장은구, "기계 설비 모니터링 시스템의 기술적 현황", 대한기계학회 '99동역학 및 제어부문 하계학술대회는 문집, pp.105-110, 1999
- [6] J. Sumita, "A New Visual and Sound Monitoring System for Emergency Engine Generators", IEEE, 1998
- [7] Zerra, Esteve. Palau, Guerri, "Design and development of an industrial monitoring system using Windows NT as a real-time operating system", IEEE, 1999
- [8] P. Xufeng, G. Li'en, and L. Xiaolei, "The research of automobile transmission system fault diagnosis based on vibration signal", Proceedings of the 9th International Pacific Conference on Automotive Engineering, Vol.2, pp.117-123, 1997
- [9] Hul L.G, Kay P, "Expert system development methodology and management", Proceedings of the IEEE/ACM International Conference, pp38-44, 1991
- [10] A.V. Oppenheim, R.W. Schafer "Discrete - Time Signal processing", PRENTICE HALL,
- [11] H. Watanabe, Y. Matsumoto "Sound Monitoring Based On The Generalized Probabilistic Descent Method", IEEE 1998
- [12] A.M. Kondoz "Digital speech coding for low bit rate communication systems", John Wiley & Sons Ltd, pp.36~50, 1994,
- [13] 이성상, "화력발전 설비의 사운드 모니터링 시스템",

한국신호처리시스템 하계학술대회 pp.157-160, 2003

- [14] 김광진, "데이터 융합과 Dempster-Shafer이론을 이용한 유도 진동기의 고장진단 결과", 부경대학교 석사학위 논문, 2004



이 성 상(Sung-Sang Lee)

2003년 2월 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 (공학사)

2005년 2월 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 (공학석사)

2005년 3월~현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 (박사과정)

관심분야 : 신호처리, 소음 및 진동, 컴퓨터음악



조 상 진(Sang-Jin Cho)

1997년 2월 울산대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월 울산대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 3월~현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 (박사과정)

관심분야 : 신호처리, Digital Signal Processor, 컴퓨터음악



정 의 필(Ui-Pil Chong)

1978년 울산대학교 전기공학과 (공학사)

1980년 고려대학교 전기공학과 (공학석사)

1985년 미국 Oregon State University (공학석사)

1997년 미국 Polytechnic University (공학박사)

1997년 ~ 현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수

관심분야 : 신호처리, 멀티미디어, 컴퓨터음악