Chaos 이론의 전력설비 상태감시기법 응용에 관한 연구

강진수, 안상필, 김철환
성균관대학교

A Study on the Application of Condition Monitoring Technique in Power Facility using Chaos

J.S. Kang, S.P. Ahn, C.H. Kim
Sungkyunkwan University

Abstract - 많은 자연계가 선형성과 비선형성을 동시에 포함한 카오스적인 모습을 보여준다. 예를 들면 춤추는 불꽃, 부서지는 파도, 하늘에 떠다니는 무수한 구름 등 외관상으로는 불규칙해 보이는 듯 하면서 어떤 규칙성을 가진 다양한 모습을 나타낸다. 특히 공학분야에서는 거의 모든 현상이 비선형계로 이루어져 있다. 이러한 비선형계의 해석에 카오스 이론이 적용될 수 있는데, 최근 들어 카오스에 내재하는 질서구조가 밝혀짐에 따라 여러 공학분야에서 이를 활발히 응용하고 있다. 본 논문에서는 카오스 이론에 대해 간단히 논하고 이러한 카오스 이론이 응용될 수 있는 분야를 공학적 측면에서 일목요연하게 정리하였다. 특히 전력계통 및 송배전설비 분야 중 GIS 상태감시 및 부분방전 검출기법에 대해서 시계열 데이터를 이용한 카오스 이론의 적용 가능성을 타진하였다.

1. 서 론

과학문명은 사물의 운동을 미분방정식으로 해석한 뉴턴의 운동법칙으로부터 그 뿌리를 두고 있다. 그리고 미분방정식의 해석은 그 계(system)가 선형(linear)일 경우에만 가능하다. 그러나 대부분의 자연계에서 나타나는 현상은 비선형계(nonlinear system)이다. 해석학에서는 계의 비선형적인 영역을 제어 할 수 없는 영역으로 간주하고 비교적 선형에 가까운 영역만을 선형근사화시켜서 처리하였다. 그러나, 학문의 각 분야에서 이러한 해석은 모순된 현실로 드러나게 되었다. 결정론적인 인과성은 아인슈타인의 상대성이론으로, 기준의 절대성은 양자역학에 의해 붕괴되었으며, 세번째 큰 혁명이라고 할 수 있는 결정론적인 계에서 유발되는 확률적인 현상으로서 카오스(chaos)이론이 등장하였다. 유체 역학이나 생물체의 신경계 등을 포함하는 실세계의 동역학을 파악하기 위해서는 그들이 가지고 있는 비선형성에 대한 연구, 즉 카오스이론에 대한 연구는 더 이상 외면할 수 없는 주제가 되고 있다. 또한 카오스현상은 특정한 학문영역에서만 다루어질 주제가 아니며, 사회과학과 공학을 망라하는 거의 모든 영역에서 연구되어질 수 있는 주제이다.[1-7].

본 논문에서는 카오스의 이론에 대해서 서술하고 카오스 이론이 공학적으로 어떤 분야에 적용될 수 있는지 요약하였다.[8-12]. 특히 전력계통과 송배전설비분야중 GIS 상태감시와 부분방전 검출기법에 대한 카오스 이론의 적용 가능성을 제시하였다.

2. 카오스 이론

2.1 카오스 현상

카오스 현상이란 우주, 천체, 자연계, 생태계, 생체, 그리고 뇌에 이르기까지 그 상태가 액티브하게 변동하는 구도, 즉 비선형 역학계(nonlinear dynamical system)에 보편적으로 존재하는 현상이다. 예를 들어 대기의 흐름이나 밀물과 썰물의 흐름, 기타 사회현상이나, 물방울이 떨어지는 현상을 들 수 있다. 카오스 현상의 완전한 이해는 이러한 현상의 본질적 이해이기 때문에 대단히 어렵다. 하지만 카오스를 포착하고 싶다면 결정론적 역학계(deterministic dynamical system)에서 나오는 용어들을 이해할 수 있어야한다. 적용분야에 따라서는 카오스 이론 대상이 자연이고, 경제이고, 공학이고, 경우에 따라서는 인간 자체일 수 도 있지만 본 논문에서는 공학분야에만 접목을 시키도록 하겠다.

2.2 카오스 관련 용어

먼저 상태공간(state space)이라고 하는 것은 역학적 현상(dynamics)이 일어나고 있는 공간이고, 역학적 현상은 상태공간에서 운동을 지배하는 규칙을 말한다. 또한 시간의 경과에 따라 역학적 현상이 움직이는 경로를 궤도(orbit)라 한다. 궤도가 어느 안정한 상태로 끌려들고 있는 것을 어트렉터(attractor)라고 하는데 결정론적 역학계에서는 초기조건과 궤도가 확정되어 있다는 것에 주의해야 한다. 어트렉터는 그림 1과 같이 4가지 종류로 나누어진다. 우선 점, 폐곡선, 토러스에 대응하는 질서가 매우 잘 잡힌 그림 1(a), 그림 1(b), 그림 1(c)의 3개의 어트랙터가 있고, 마지막으로 기묘한 도형에 대응하는 스트레인지 어트랙터(strange attractor)인 그림 1(d)가 있다. 전자는 뉴턴 이래의 역학 역사에 있어서 그 존재가 당연하다고 여겨지는 것이고, 이것을 카오스와 구분하기 위해서 코스모스(cosmos)라고 부른다. 카오스 안에는 제멋대로의 성질이 있기 때문에 상태공간의 좌표 수(차원)와 같은 수만큼 존재하는 오차의 시간 확대율(리아프노프(Lyapunov) 지수)에는 양(+)으로 되어 있는 것이 존재한다. 이것은 상태공간에 있어서 초기 조건의 사소한 차가 시각적으로 증대시키는 효과(버터플라이 효과)를 가져오기 때문에 장기 예측이 불가능하다.

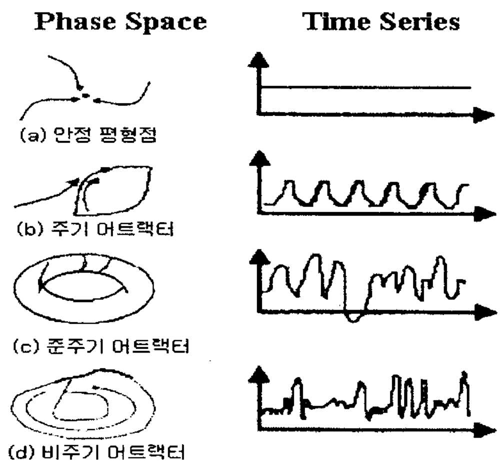

그림 1 어트랙터의 종류

2.3 카오스 이론의 공학적 적용분야

카오스 이론이 유망한 가장 큰 이유중의 하나는 그 적용될 수 있는 분야가 넓다는 점이다. 이미 여러 분야, 즉 전기전자회로, 광학시스템, 정보망 등에서 카오스 이론이 실제적으로 적용될 수 있음을 보였고, 현재 소수 자유도를 가진 단순한 비선형 역학계를 카오스적 거동으로 표시하고 이것을 '단순한 디바이스에 의해 복잡한 기능을 실현하는 가능성을 실현'하고 있다.

실제로 스위칭 커런트회로 기술이나 스위칭 패터회로 기술을 이용하여 카오스 직접회로를 설계하는 것이 어렵지 않다는 것이 여러 논문에서 증명되었다. 또한 카오스 데이터의 시계열 해석에 관하여는 현재의 디지털시스템으로 충분하다. 표 1은 카오스가 공학적으로 적용이 되고 있는 분야를 기술하였다.

표 1 카오스이론이 적용 될 수 있는 공학분야

분야	구체적 사례
컴퓨팅	① 카오스 뉴럴네트워크 ② 일반화, 최적화 문제 ③ 학습, 자기조직화 ④ 차세대 아날로그 컴퓨터
식별과 모델링	① 원자로, 전력계통 등의 모니터링과 이상검출 ② 음성합성 ③ 필터링
메모리	① 대용량 메모리 ② 동적 연상 메모리 ③ 고속 동적 메모리 검색
부호화	① 반복함수계의 어트랙터에 의한 화상 압축 ② 카오스 암호 및 난수 ③ 카오스 통신
패턴인식	① 프랙탈 화상 인식, 특징 추출 ② 미세한 차이의 고감도 식별 센서 ③ 음성인식
가전	① 에어컨, 세척기, 세탁기, 선풍기, 온풍기, 형광등
실용화	① 전기 전자회로, 광전자회로, 레이저, 인공막
제어	① 카오스 진동의 제거 ② 난류나 연소의 제어, 핵 융합로의 플라즈마에 관한 문제 ③ 카오스적 공진 ④ 로봇제어

3. 시계열 데이터 분석

시계열 데이터(time series)가 카오스 신호처럼 비주기성과 불규칙성이 클 경우에는 일반적인 선형 시계열 분석법(linear time series analysis)을 이용하여 적당한 특징을 추출하기 어렵다. 따라서, 이러한 신호의 인식에는 카오스 이론을 이용한 비선형 시계열 분석법(nonlinear time series analysis)을 통한 특징추출이 시도되고 있다.

먼저 시계열 신호에서 카오스 특징인 상관차원과 리아프노프 지수를 추출하기 위해서는 임베이딩(embedding) 차원과 시간지연에 의한 어드렉터 재구성이 필요하다. 임베이딩 차원을 결정하기 위해 Kennel이 제안한 FNN(False Nearest Neighbor)방법[13]을 이용하였다.

FNN이란, 어떤 임베이딩 차원에서는 두 어트렉터위의 점이 근접점(nearest neighbor)이지만 임베이딩차원이 한차원 증가 될 경우에는 근접점이 되지 않는 점을 말한다. 즉 FNN 방법이란, 임베이딩 차원을 증가시키면서 FNN비를 계산하여 FNN비가 0[%] 근처일 때의 임베이딩 차원을 찾아 그 시계열 데이터의 임베이딩차원으로 결정하는 방법이다. FNN비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 개수를 구하고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로써 계산된다.

시간지연은 Lidbert와 Schuster가 제안한 상관적분 방법[14]을 이용하여 결정하였으며, 이는 시간지연의 변화에 따라 계산된 상관적분 값에서 첫 번째 국부최소점(local minima)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간지연으로 결정하는 방법이다.

따라서, 임베이딩차원 및 시간지연을 계산함으로써 어트랙터를 재구성할 수 있다. 어트랙터를 재구성함으로써 상관차원 및 리아프노프지수를 추출할 수 있게 된다.

3.1 상관적분과 상관차원

상관차원은 시계열 신호에 대한 재구성된 어트랙터의 기하학적 특징을 표현한다. 상관차원은 정수값이 아닌 실수로 표현되며 신호의 카오스적인 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성을 이용하여 상관차원을 사용할 수 있다. 재구성된 어트랙터로부터 상관차원을 계산하는 방법은 Gressberger 와 Proccassia가 제안한 방법[15]을 사용한다. 이 방법은 어트랙터 상의 각 점에서 상관적분을 계산함으로써 상관차원을 결정하게 된다. 어트렉터의 한 점을 중심으로 반지름이 r인 구를 도시하고 구내부 점의 수를 계산할 수 있다. 위와 같은 과정을 어트랙터 상의 각 점에서 반복하였을 때, 계산된 값들의 평균값을 상관적분이라 한다. 상관차원을 구하는 방법은 우선 상관적분 C(r)을 식 (1)과 같이 정의한다.

$$C(r)=\frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\Theta(r-|X(i)-X(j)|) \tag{1}$$

여기서 Θ는 step function이며, X(i)와 X(j)는 i와 j번째 어트랙터를 구성하는 점이다. 또한, N은 데이터의 수를, r은 반지름을, 그리고 $|X(i)-X(j)|$는 두 점 사이의 유클리디안 거리를 나타낸다. 식 (2)의 그래프를 그리면, 선형 구간의 기울기 값 및 y절편을 구할 수 있으며 이때 기울기 값이 바로 상관차원을 나타낸다.

$$v=\frac{d\log_2 C(r)}{d\log_2 r} \tag{2}$$

3.2 리아프노프 지수

리아프노프 지수는 재구성된 어트랙터의 발산 또는 수렴에 대한 평균 지수율로서 0보다 큰 양수일 경우에는 신호가 카오적이며, 0보다 작을 경우에는 신호가 주기적임을 알려준다. 리아프노프 지수를 구하는 방법은 Wolf의 방법[16]을 사용하였고, 식 (3)과 같다.

$$\lambda=\frac{1}{M\Delta t}\sum_{k=1}^{M}\log_2\frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})} \tag{3}$$

여기서, M은 반복횟수, $\Delta t=t_{k-1}-t_k$이다. 이렇게 구해진 리아프노프 지수는 M이 커짐에 따라 하나의 값으로 수렴하게 된다.

4. GIS 상태감시에 대한 카오스이론의 적용

GIS 내부는 도체와 접지된 외부도체로 구성되어 있는 동축원통형 전극으로, 전극간은 준평등 전계를 형성하고 있어 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도로 설계되어 있다. 그러나 GIS의 금속가공, 연마작업, 운반, 현장조립 및 가스 주입시 도체에서의 돌기, 스페이서의 크랙 및 파티클 등이 발생할 수 있으며, 이러한 결함으로 전계가 균일화된 GIS내에 국부적인 전계 집중현상이 발생하면 그곳에서 부분방전이 일어나서 절연파괴에 도달할 가능성을 우려된다. GIS는 내부사고 발생시 대형사고로 진전될 뿐만 아니라 사고부분의 추정이나 복구작업이 어려우므로 사고를 미리 예방하여야하고, 또한 변전소 무인화를 뒷받침하기 위해서는 GIS에서 발생하는 이상의 징후를 항상 상태감시하여 초기단계에 찾아내는 것이 중요하다.

GIS는 차단기(CB), 단로기(DS), 접지개폐기(ES), 피뢰기(LA) 등 많은 기기들로 구성이 되어있어서 부분방전이 발생하였을 때 주위의 잡음(noise)이 부분방전 신호와 섞이게 된다. 따라서, 부분방전 신호와 잡음을 구별하려면 고성능의 초음파 센서를 이용해야 한다.

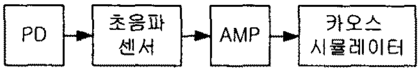

그림 2 부분방전 검출의 카오스이론 적용

그림 2에서처럼 부분방전 신호를 초음파 센서로 측정한 뒤 증폭을 시킨 다음 카오스 시뮬레이터를 통과 시켜서 카오스적인 특징을 분명히 가지고 있는 부분방전 신호를 검출 할 수 있다. 부분방전에서 카오스적인 특성을 판별하기 위해서는 표 2와 같은 판정 기준을 적용할 수 있다.

표 2 카오스의 특징과 판정 기준

특 징	내 용	판정 지표	판정 기준
궤도 불안정성	조금만 초기값이 변하면 역학계의 해의 궤도는 전혀 다른 것이 된다.	리아푸노프 지수	리아푸노프 지수가 적어도 하나는 양의 값이다.
장기 예측 불가능성	카오스의 역학계에서는 장기적인 예측은 불가능하다.	자기 상관 함수	자기 상관 함수는 지연시간의 증대와 더불어 0에 수렴한다.
해의 비주기성	명확한 주기성은 없다.	스펙트럼 해석	피크가 특정 주파수 영역에 있지 않다

그림 3은 카오스 시뮬레이터에서 나타내는 여러 스트레인져 어트랙터중 로렌쯔(Lorenz) 방정식을 통해서 구한 어트랙터를 나타냈다.

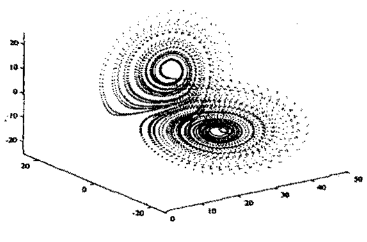

그림 3 로랜쯔 어트랙터

5. 결 론

본 연구에서는 먼저 불규칙하면서도 어떤 일정한 규칙을 가지고 있는 카오스 이론에 대해서 간략하게 기술하였고 카오스를 이해하기 위한 용어 및 개념을 설명하였다. 비선형계 해석에서 출발한 카오스 이론은 최근 사회과학분야에서부터 공학분야에 이르기까지 넓게 적용이 되고 있고, 특히 공학분야에서는 시계열 데이터를 이용한 카오스의 적용이 많이 수행되고 있다.

시계열 데이터 분석시 어트렉터 재구성을 위하여 필요한 임베이딩 차원과 시간지연에는 각각 FNN 방법과 상관적분 방법이 선택되었다. 선택된 방법은 시계열 데이터 분석시에 현재까지 가장 널리 유용하게 적용이 되고 있으며 향후 GIS의 부분방전데이터 분석시에도 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, GIS 상태감시에 카오스 이론을 적용할 경우 GIS의 부분방전신호를 초음파 센서로 측정한 후에, 카오스 시뮬레이터로 분석이 가능한데 이때 판정지표로는 리아푸노프 지수, 자기 상관변수, 스펙트럼 함수가 사용될 수 있다.

향후 실제 카오스 시뮬레이터 구성시에는 이러한 카오스의 특징에 따른 판정기준의 결과가 부분방전 현상과 어떠한 연관성이 있는지 도출해 내는 것이 가장 큰 과제일 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 국제공동연구(과제번호:2000-6-302-03-2)지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] M.A. van Wyk, W.H. Steeb, "Chaos in Electronics", Kluwer Academic Publishers, 1997.
[2] Jong Hyun Kim, John Stringer, "Applied Chaos", A Wiley-Interscience Publication, 1992.
[3] Francis C. Moon, "Chaotic and Fractal Dynamics", John Wiley & Sons, 1992.
[4] Henry D. I. Abarbanel, "Analysis of Observed Chaotic Data", Springer-Verlag New York, 1995.
[5] Daniel Kaplan Leon Glass, "Understanding Nonlinear Dynamics", Springer-Verlag New York, 1994.
[6] Holger Kantz, Thomas Schreiber, "Nonliner Time Series Analysis", Cambridge Univ. Press, 1997.
[7] Cees Diks, "Nonliner Time Series Analysis", World Scientific, 1999.
[8] 정호선, 여진경 공역, "뇌와 카오스", Ohm, 1994.
[9] 정호선, 여진경 공역, "뉴로·퍼지·카오스", 대광, 1995.
[10] 아히하라 가즈유키, "카오스 응용전략", 성안당, 1995.
[11] 이호섭, 공성곤, "카오스 특징 추출에 의한 시계열 신호의 패턴인식", 한국퍼지 및 지능시스템학회 추계학술대회 학술발표논문집, pp. 294-297. 1997.
[12] 임윤석, 장진강, 김성홍, 구자윤, 김재환, "부분방전 신호의 비선형적 해석", 전기학회 논문지 제49권, 제3호, pp. 169-176. 2000.
[13] M.B kennel, "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical Construction", Physical Reviews A, Vol. 45, pp. 2403-3411. 1992.
[14] W. Liebert, H.G. Schuster, "Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaostic Time Series", Physics Letters A, Vol. 142, pp. 107-111, 1989.
[15] P. Grassberger, I. Procaccia, "Characterization of Attractors", Physics Reviews. Letters, Vol. 50, No. 5, pp. 346-349, 1983.
[16] Alan Wolf, "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series", Pysica 16D, pp. 285-317, 1985.