

광대역 낙뢰탐지 및 신호저장 시스템 구현

이성호\*, 성태경\*\*, 우정욱\*\*\*, 곽주식\*\*\*

\*충남대학교 정보통신공학과, \*\*충남대학교 전기정보통신공학부, \*\*\*한전 전력연구원

Implementation of Broadband Lightning Signal Detection and Signal Saving System

Sung-Ho Lee\*, Tae-Kyung Sung\*\*, Jung-Wook Woo\*\*\*, Ju-Sik Kwak\*\*\*

\*Department of Information and Communication Engineering, Chungnam National University

\*\* Faculty of Electric and Computer Engineering, Chungnam National University

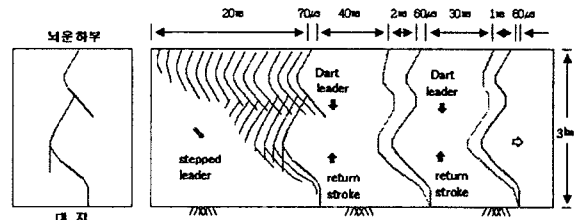
\*\*\* Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 현재 운용되고 있는 낙뢰탐지 시스템들과는 다른 측위방식인 TDOA(Time Difference of Arrival)방법을 사용한 3차원 낙뢰 탐지 및 추적 시스템을 제안한다. TDOA방식은 낙뢰와 수신국사이의 도달시간을 측정하여 두 수신국간의 시간차가 일정한 쌍곡선을 얻고 이들 쌍곡선의 교점을 이용해 낙뢰의 위치를 결정하는 방법이다. 이 시스템을 이용하여 위치정확도가 수 미터인 3차원 낙뢰 방전 궤적을 얻을 수 있다. 시스템의 구현을 위해서 먼저 낙뢰의 신호를 저장해야 하는데, 광대역의 낙뢰신호를 저장하기 위해서는 고속의 디지털타이저가 필요하다. 그러나 디지털타이저와 프로세서간의 인터페이스의 한계로 연속적으로 이를 저장하는 것은 어렵고, 이러한 신호 저장의 문제점을 해결하기 위해서 낙뢰 신호 저장 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 낙뢰의 메커니즘과 광대역 낙뢰신호 검출 기법을 설명하고, 구현한 낙뢰 신호 저장 시스템을 소개한다.

뇌운 안의 선행방전으로부터 시작된다. 이에 기인하여 약 수십ms에서 수십 ms 후에 스텝리더가 간헐적으로 발생하여 땅을 향하여 내려오게 되고, 전하가 이동하는 경로를 만들게 된다. 다시 약 수십ms 후에 스텝리더의 끝이 대기로부터 수십 미터까지 도달하게 되면 대지와 스텝리더의 높은 전위차로 인하여 땅으로부터 전하가 올라오게 되고 리턴스트로크를 발생시킨다. 리턴스트로크는 스텝리더가 만든 경로를 통해 뇌운을 향해 올라가며, 수십 ms후에 다트리더가 발생하여 다시 대지로 향하게 된다. 그리고 수십ms후에 두 번째 리턴스트로크가 발생한다. 이와 같은 과정이 그림 1에 나타나 있다.[4][5]

1. 서 론

낙뢰의 과정, 발생위치 및 시간, 진로 등을 추적하고 분석 하는 시스템을 낙뢰탐지시스템이라고 한다. 낙뢰탐지시스템은 안정적인 전력계통 운영과 송, 변전 설비를 낙뢰에 견딜 수 있도록 설계하는데 필요한 자료를 얻기 위한 목적으로 설치, 활용되고 있다. 이러한 낙뢰감지시스템 중에서 실용적으로 운용되고 있는 시스템은 2종류로 대별된다. 한 가지는 낙뢰 시에 흐르는 대전류에 의한 자계를 지향성을 가진 4개의 안테나에서 수신하여 그것의 수신신호 강도로 낙뢰의 위치를 추정하는 LLP(Lightning Location Positioning)시스템과 또 하나는 낙뢰 시 발생하는 전자기파가 여러 개소의 수신국에 도달하는 시간차(TOA : Time of Arrival)를 이용한 낙뢰위치를 추정하는 LPATS 시스템(Lightning Position and Tracking System)이다.[1] TOA 방식은 도달 시간에 빛의 속도를 곱하여 수신국과 낙뢰의 거리를 구하는 방식이다. TOA를 위해서는 기지국간의 정확한 시각 동기화가 필요하다. 그러나 이 시스템들의 위치정확도는 약 수백 미터이며 낙뢰의 이차원 위치만이 표기 되는 단점이 있다.



〈그림 1〉 낙뢰 진행과정

낙뢰방전 과정의 3차원 궤적을 추적하기 위해서는 반복적으로 나타나는 스텝리더펄스들을 저장해야 한다. 스텝리더의 특징은 다음과 같다. 스텝리더는 보통 30미터의 길이를 가지며 약  $2.5 \times 10^5 m/s$ 의 속도로 약 20ms 동안 땅을 향하여 내려온다. 스텝리더펄스의 파두길이(rising time)는 약 0.2~0.3us정도이며 반과고장(half-peak width)은 약 1us 정도이다. 이러한 스텝리더펄스가 약 60us의 간격으로 약 20m동안 반복되어 나타난다.

TDOA측정치를 얻기 위하여 각 스텝리더펄스의 데이터를 모두 저장해야 한다. 스텝리더펄스는 연속적으로 나타나지 않기 때문에 모든 데이터를 연속적으로 저장하는 것은 디지털타이저의 메모리의 한계로 인해 구현하는 것은 불가능하다. 따라서 어떤 임계값을 넘는 스텝리더펄스를 검출하는 기법과 이에 맞추어 데이터를 저장하는 기법이 요구된다.

2.2 시스템 장비 구성

낙뢰 탐지 및 신호 저장 시스템은 먼저 4개소 이상의 수신국에서의 광대역 안테나, 낙뢰검출기, 신호처리컴퓨터, GPS를 이용한 고정밀 시각동기모듈 그리고 중앙 처리국에서의 신호처리 서버로 구성된다. 각 수신국에서 TDOA 측정치를 저장하고 이를 중앙처리국으로 전송하여 낙뢰의 위치를 계산하는 방식이다.

이 외에도 일본의 오사카대학에서 개발한 광역 전파 간섭계(Broadband Radio Interferometer)가 있는데 이는 낙뢰의 신호를 수신국의 방향성 안테나(array antenna)를 사용하여 낙뢰신호의 도래각(AOA : Angle of Arrival)을 측정하고 이를 이용하여 낙뢰의 위치를 추정하는 시스템이다.[2] 이 시스템은 30km 내외의 비교적 짧은 측정반경을 갖지만 수 미터에서 수십 미터의 위치정확도를 가지며 3차원의 낙뢰 방전 궤적을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 각도를 이용하여 위치를 계산하므로 수신국 간에 정확한 시각동기가 필요하지 않다는 장점이 있다. 하지만 위치를 구하기 위해 측정치에 대해 FFT과정을 거쳐야 하고 위상모호성(phase ambiguity)의 문제를 풀어야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 위 방법들 중 기존의 시스템과는 다른 측위방식인 TDOA (Time Difference of Arrival)방법을 사용한 낙뢰 탐지 및 추적 시스템을 제안한다. TDOA의 경우 TOA와 같이 낙뢰와 수신국사이의 도달시간을 측정하여 두 수신국간의 시간차가 일정한 쌍곡선을 얻는다. 이들 쌍곡선의 교점이 낙뢰의 위치가 되는 방법이다.[3] 이는 수신기의 시각 바이어스를 제거할 수 있는 장점이 있으나 TDOA방법 역시 기지국간의 시각 동기화가 필요하다. 이 시스템은 수 미터의 정확도를 가지며 낙뢰의 3차원궤적을 추적할 수 있다. 그리고 AOA방식과 달리 낙뢰의 정확한 도달 시간만 측정하면 별도의 처리과정 없이 위치를 구할 수 있는 장점이 있다.

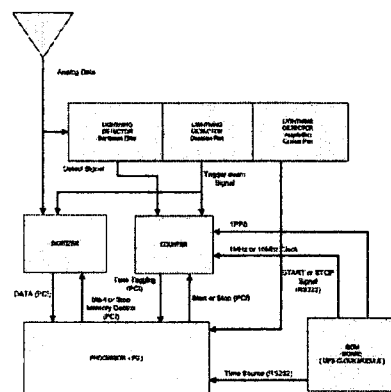
시스템의 구현을 위해서는 먼저 낙뢰의 신호를 저장해야 하는데, 20MHz에서 250MHz 대역의 광대역 낙뢰신호를 저장하기위해선 500MS/s 이상의 디지털타이저가 필요하다. 8bit의 분해능을 가진 500MS/s 디지털타이저를 가졌다면 초당 500Mbyte의 데이터가 저장되는데, 디지털타이저의 메모리의 한계로 연속적으로 이를 저장하는 것은 불가능하며, 이러한 신호 저장의 문제점을 해결하기 위해서 낙뢰신호 저장 시스템이 필요하다.

본문에서는 낙뢰의 메커니즘과 광대역 낙뢰신호 검출기법, 낙뢰 신호 저장 시스템을 소개한다.

2. 낙뢰추적시스템

2.1 낙뢰 메커니즘

대부분의 운-대지간 뇌방전(Cloud To Ground Lightning Discharge)은



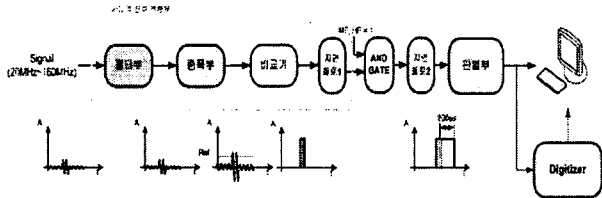
〈그림 2〉 시스템 구성도

그림 1은 하나의 수신국에서의 낙뢰추적장치 시스템 구성도이다. 먼저 광대역안테나는 20~160MHz의 광대역신호를 낙뢰검출기와 디지털타이저로 출력한다. 낙뢰검출기에서는 3개의 대역필터를 이용하여 낙뢰신호를 검출하

고, 판별하여 디지털이저, 카운터, 컴퓨터로 각각 출력한다. 디지털이저에서는 낙뢰검출기의 신호를 트리거로 사용하여 광대역 안테나의 출력을 500M S/s로 샘플링하게 되며 컴퓨터로 이를 전송한다. 카운터에서는 GPS클럭모듈과 낙뢰 검출기에서의 신호를 받아 카운트하여 컴퓨터로 전송하며 컴퓨터에서는 샘플링된 데이터에 카운터의 출력을 이용하여 시간정보를 기록한다. 여기서 시간정보가 기록된 데이터가 TDOA의 측정치가 된다.

### 2.2.1 낙뢰 검출기법

낙뢰 검출 장치는 필터부, 증폭부, 비교기, 지연회로1, AND게이트, 지연회로2, 판별부로 나뉜다.



〈그림 3〉 낙뢰검출 장치의 블록도

필터부에서는 광대역 안테나로부터의 입력 20MHz에서 250MHz까지의 신호를 3부분으로 나누어 통과 대역폭이 약 5MHz인 3개의 대역통과필터(저대역, 중대역, 고대역)로 구성한다. 광대역의 낙뢰신호가 인가될 경우 3개의 대역통과필터에서 모두 통과되어 출력될 것이다. 증폭부는 낙뢰 신호가 인가 되었을시 필터부의 손실 보완하고, 비교기에서 필요로 하는 기준선보다 낙뢰 신호를 크게 하기 위해 3개의 증폭기(저대역, 중대역, 고대역)를 사용하였으며, 비교기는 각각의 대역에 대해 기준선보다 작은 신호는 '0'으로 큰 신호는 '1'로 만들어 준다. 이제 낙뢰펄스는 증폭기와 비교기를 거쳐 '0'과 '1'의 신호로 변환될 것이다. 지연회로1에서는 비교기를 거친 디지털 신호를 입력받아 일정 시간 동안 신호를 지연 시킨다. 입력된 디지털 신호는 지연회로1을 통해 상승 에지의 순간부터 2us의 지연을 갖는 신호로 된다. 지연회로1에서 2us로 제한을 둔 이유는 낙뢰 신호가 인가되었을 시 (한 스텝리더 펄스의 신호 지속 시간은 1us정도이다.) 저대역, 중대역, 고대역의 신호가 모두 각각의 신호 지연에 영향을 받지 않고 AND 게이트에서 중첩될 수 있도록 하기 위해서이다.

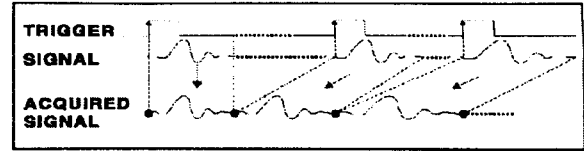
AND 게이트는 각각의 대역(저대역, 중대역, 고대역) 신호가 모두 인가되었을 시 낙뢰가 검출되었음을 알리는 낙뢰 검출신호를 출력을 하게 되고 이 신호는 디지털이저와 카운터에 연결된다. 디지털이저에서는 이 신호를 받아 트리거신호로서 사용하게 되며 동시에 카운터에서 이 신호를 기준 신호와의 사이를 카운팅하여 시간정보를 기록하게 된다.

판별부에서는 MCU(Micro Controller Unit)를 사용하여 검출된 낙뢰신호가 연속하여 인가 될 때 낙뢰 신호로 판별을 하며, 디지털이저와 카운터의 시작과 종료를 제어하는 신호를 내보내게 된다. 만약, 저대역과 중대역, 고대역 신호가 모두 신호가 인가되어 '1'을 유지 하게 된다면 AND 게이트는 '1'을 출력하게 되며, 이는 다시 지연회로2를 거쳐 상승 에지의 순간부터 200us의 신호를 유지 하게 된다. 지연회로2에서 200us의 지연은 낙뢰 신호의 스텝리더펄스와 스텝리더펄스사이의 평균 간격 60us동안에 신호를 유지하도록 하는 것이다. 만약 스텝리더펄스가 지연 시간 200us 안에 다시 발생한다면 지연회로는 다시 200us만큼 신호를 지연시킬 것이고 스텝리더의 펄스가 더 이상 나타나지 않을 때까지 지연이 유지될 것이다. 지연회로2의 출력은 낙뢰의 판별을 위해 사용 되며 낙뢰 유사 신호로 인한 낙뢰의 검출 오류를 피하기 위해서 스텝리더펄스의 약 3배의 시간동안 지연하도록 하였다. 지연회로 2를 통해 판별부로 입력된 신호는 신호의 지속 시간을 측정 받게 된다. 지연회로2의 출력이 약 1ms 동안 지속된다면 이 때 낙뢰 유사 신호가 아닌 낙뢰신호로 판별하게 되며 낙뢰판별신호를 출력하게 된다. 낙뢰판별신호는 컴퓨터에 연결되며 컴퓨터에서는 이 신호를 판독하여 디지털이저와 카운터의 시작을 제어하게 된다. 그리고 낙뢰판별신호가 출력되고 1ms 후에 카운터의 채널간 동기(카운터는 2개의 채널을 사용한다.)를 맞추어주는 카운터 동기 신호를 출력하고 이는 카운터에 바로 연결이 되어 카운터 2개의 채널의 동기 시작점이 된다.

낙뢰 검출 장치의 외부 출력은 3가지가 있다. 3개의 대역통과필터를 통과하여 검출된 낙뢰검출신호, 그리고 판별부에서의 낙뢰판별신호와 카운터동기신호이다.

### 2.2.2 낙뢰 신호 저장기법

디지털이저는 낙뢰검출기의 낙뢰판별신호에 의해 시작되며 낙뢰검출신호에 맞추어 샘플링을 수행하게 된다. 250MHz의 광대역 낙뢰신호를 샘플링하여 저장하기 위해서 먼저 샘플링속도를 500MS/s(2ns 당 1샘플)로 설정한다. 8비트 분해능(1샘플 당 1Byte)인 디지털이저를 생각한다면 초당 500 MByte의 데이터가 쌓이므로 연속적인 데이터를 저장할 수 있는 메모리 용량이 한계가 생기게 된다. 실제로 실험에 사용된 디지털이저의 메모리는 16 MByte이고 메모리를 가득 채우는 데에 걸리는 시간은 32ms로 계산된다. 그림 1에서 보듯이 낙뢰발생지속시간은 약 1초이고 500MByte의 데이터가 저장될 메모리가 필요하므로 연속적인 데이터의 저장은 불가능하다. 다행히도 낙뢰펄스는 연속적으로 발생하지 않기 때문에 낙뢰탐지기에서 낙뢰펄스가 검출되는 순간에 맞추어 이를 저장하면 된다. 이 방법이 멀티레코드방법이다.



〈그림 4〉 멀티레코드 방법

낙뢰신호처럼 매우 빠르게 반복되는 트리거를 사용해야하는 경우 다음 트리거가 발생하기 전에 컴퓨터의 메모리로 데이터를 전송하고 데이터를 샘플링할 준비를 하는데 충분한 시간이 주어지지 않는다. 이는 윈도우즈 환경에서 약 200us 정도로 계산되며 스텝리더펄스의 평균 간격 60us보다도 훨씬 크다. 그림 3은 멀티레코드의 특징을 나타내주고 있다. 멀티레코드 방법에서는 트리거 이벤트 즉 낙뢰검출신호가 발생하여 이에 맞추어 정해진 길이만큼 샘플링을 하고 이 데이터를 컴퓨터로 전송하지 않고 메모리에 쌓아둔 후 다시 트리거 이벤트를 기다린다. 그리고 더 이상의 트리거 이벤트가 발생하지 않을 때 메모리에서 컴퓨터로 전송이 이루어진다. 멀티 레코드를 위해서 디지털이저가 다음 트리거 이벤트로써 데이터를 얻기 위해 준비는 시간은 보통 1us이내이고 이는 스텝리더의 간격 60us 보다 작은 시간이며 디지털이저는 충분히 샘플링 할 준비를 할 수 있다. 1024개의 샘플포인트를 하나의 세그먼트로 정의한다면 디지털이저의 메모리가 16MByte 이므로 최대 16000 세그먼트까지 저장이 가능하다. 따라서 주어진 약 1초의 시간동안에도 모든 펄스를 샘플링하여 저장할 수 있게 된다.

### 2.2.3 시간정보 기록

TDOA 측정치를 얻기 위하여 각 수신국은 획득한 데이터에 동기를 맞추어 시간정보를 기록해야 한다. 시간정보기록을 위해 카운터에는 낙뢰 검출기에서의 낙뢰검출신호, 카운터동기신호, GCM(GPS Clock Module)의 1PPS(Pulse Per Second), 10MHz 클럭소스 총 4가지의 입력이 들어간다. GCM은 GPS를 이용한 고정밀 클럭 모듈이며 1PPS와 TOD(Time of Date), 10MHz의 클럭소스를 출력한다. 1PPS는 매 초마다의 정밀한 펄스를 말하고 TOD는 매 초마다의 정밀한 시간정보를 말한다. TOD는 컴퓨터에 전송되어 1PPS를 시간정보에 매칭 시키는 역할을 한다. 마지막으로 10MHz의 정밀한 클럭소스를 출력하여 카운터의 클럭소스로서 사용된다.

카운터에서는 카운터동기신호를 시점으로 각 낙뢰검출신호까지를 10MHz의 클럭소스를 카운팅하여 저장한다. 또 카운터동기신호를 시점으로 1PPS까지를 10MHz의 클럭소스를 카운팅하여 저장한다. 1PPS의 정확한 시간정보를 GCM으로부터 알 수 있고, 카운터의 두 채널간은 시작점이 카운터동기신호에 의해 동기가 되어있으므로 1PPS를 기준으로 각 낙뢰검출신호들의 시간정보를 모두 기록할 수 있게 된다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 기존 측위방식과 다른 TDOA방법을 사용한 낙뢰 탐지 및 추적시스템을 제안하였다. 시스템의 구현을 위해서는 낙뢰신호를 저장해야 하고 광대역의 낙뢰신호를 저장하기 위해서는 고속의 디지털이저가 필요하고, 메모리와 인터페이스의 한계로 인하여 낙뢰 신호를 저장하는 기법이 필요하다. 제안한 낙뢰 탐지 및 신호 저장 시스템은 먼저 4개소 이상의 수신국에서의 광대역 안테나, 낙뢰검출기, 신호처리컴퓨터, GPS를 이용한 고정밀 시간정보 모듈 그리고 중앙 처리국에서의 신호처리 서버로 구성된다. 이 시스템을 이용하여 우리는 특정영역에서의 정밀한 낙뢰정보를 획득하여 낙뢰 사고의 원인을 분석할 수 있을 것이다. 또한 설비운용 시 사고 대처 방안 제시하여 전력 설비의 최적 절연설계의 기본 자료로 사용할 수 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] LPATS를 이용한 뇌격누적 분포곡선 작성에 관한 연구[최종보고서], 한전 전력연구원 (98. 5)
- [2] Redy Mardiana and Zen Kawasaki, " Broadband Radio Interferometer Utilizing a Sequential Triggering Technique for Locating Fast-Moving Electromagnetic Sources Emitted from Lightning " IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, vol. 49. no. 2, April. 2000.
- [3] Y. T. Chan and K. C. Ho "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location" IEEE Trans. Signal Processing, vol 42, pp. 1905-1915, August. 1994.
- [4] Martin A. Uman, Fellow " Natural Lightning " IEEE Transaction on Industry Application, vol. 30, No. 30, May/June 1994
- [5] Vladimir A. Rakov and Martin A. Uman "Lightning Physics and Effects" Cambridge University press, 2003