

혼합송전계통에서 웨이브렛 변환을 이용한 고장점 탐색 알고리즘에 관한 연구

論 文

51A-5-6

A Study on a Fault Location Algorithm Using Wavelet Transform in Combined Transmission Systems

鄭彩均* · 李鍾範** · 尹良雄**

(Chae-Kyun Jung · Jong-Beom Lee · Yang-Woung Yoon)

Abstract - This paper describes a fault location algorithm in real combined transmission systems with underground power cable. The algorithm to calculate the fault location was developed using DWT wavelet transform and travelling wave occurred at fault point. And the proposed algorithm is also used the transient signal of one end instead of the signal information of two ends. On the other hand, in this paper, the method to discriminate fault point between overhead line and cable section is also proposed. Variety simulations were carried out to verify the accuracy and effectiveness of the proposed algorithm using EMTP/ATPDraw and Matlab. Simulation results show that the proposed method has the excellent ability for discrimination of fault section and fault location in combined transmission systems with power cables.

Key Words : Fault Location, Travelling Wave, Wavelet Transform, Combined Transmission Line, EMTP/ATPDraw

1. 서 론

최근 전력수요는 해마다 증가하고 있으며 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아지고 여러 가지 환경적 요인에 의해 지중 송전선로의 건설이 확대됨에 따라 변전소 구간의 송전선로가 가공 및 지중으로 혼합되어 건설되는 경우가 증가하고 있다. 지중 송전선로와 결합된 혼합 송전선로는 가공송전선로에 비해 유지보수가 곤란하며 고장 발생 시 고장점 탐색이나 복구가 어려워 정전 지속시간이 길다는 단점을 가지고 있다. 또한 혼합송전선로에서의 고장점 탐색은 지중 송전계통의 복잡화와 선로의 충전용량으로 인하여 영상임피던스가 변화하여 선로 임피던스 측정에 의한 기존의 고장점 탐색 방법은 문제가 있을 수 있다.

고장점 탐색을 위해 진행파를 이용하는 방법은 Dommel과 Michels에 의해 처음 제안되었으나 신뢰성과 유지보수 등의 기술력 부족과 확신의 결여 등 문제점이 야기되어 없어진 듯 했다[1]-[2]. 그러나 최근 Data Acquisition과 통신 시스템의 발달로 인해 진행파이론을 이용한 고장점 탐색 방식은 새롭게 부각되고 있다. 전력계통의 고장은 과도신호에 의한 진행파를 발생시키고, 이 진행파는 선로를 따라 진행하여 선로전체에 과도현상을 유발시킨다. 이 때 발생한 과도성

분은 수 kHz에서 수 MHz까지에 이르기까지 급격한 파도와 파미를 갖는 복합주파수이며, 선로의 전파속도와 특성임피던스에 좌우되는 진행파는 모선과 고장점에서 계통이 정적인 상태에 이를 때까지 반사와 투과를 반복하게 된다. 이러한 진행파의 특성을 이용한 고장점 탐색의 연구는 Magnago와 Abur에 의해 처음 소개된 이후 계속적으로 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이것은 주로 가공선로에 국한되어 있고 지중송전계통이나 혼합송전계통을 대상으로 한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다[1]-[6].

본 논문에서는 진행파이론을 적용하여 혼합송전계통에서 고장발생시 정확한 고장점 탐색을 위한 알고리즘을 제시하였다. 가공선로와 지중케이블이 혼합된 송전계통에서는 상이한 특성임피던스로 인해 접속점이 변이점으로 작용하여 과도신호의 반사와 투과가 나타나고 서로 다른 전파속도로 인해 모선에서 반사되는 진행파의 도착시간에 지연이 발생하게 된다. 이처럼 혼합송전계통의 과도특성은 양단 모선 외에 다른 변이점이 없는 가공선로와 매우 다른 특성을 나타내고 있다. 본 논문에서는 혼합송전계통에서 고장발생시 나타나는 과도신호를 웨이브렛 변환 후 이 신호에 포함되어 있는 고주파성분을 추출하여 진행파의 흐름을 상세히 분석하였다. 또한 웨이브렛 계수를 이용해 고장구간을 판별하는 알고리즘을 제시하였으며, 진행파의 도달시간의 간격과 극성을 분석하여 고장거리를 계산하는 알고리즘을 제시하였다. 특히 지중 송전선로 구간의 고장 경우에는 서로 다른 선로특성으로 인해 나타나는 지연시간을 보상할 수 있는 알고리즘을 제시하여 고장점 탐색의 정확도와 신뢰도를 향상시킴으로써 High-Speed 혼합송전계통 보호를 위한 새로운 방안을 제안하였다.

* 正 會 員 : 圓 光 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 圓 光 大 電 氣 電 子 및 情 報 工 學 部 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002年 3月 12日

最 終 完 了 : 2002年 4月 8日

2. 진행파 및 웨이브렛 변환

2.1 진행파 이론

3상 송전선로에서 발생한 진행파의 진행은 특성임피던스 Z_0 와 전파속도 v 에 의해 좌우된다. 길이가 x 인 송전선로에서 과도신호의 진행파전압 V 와 전류 I 의 전파방정식은 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta V / \delta x = -L \cdot \delta I / \delta t \quad (1)$$

$$\delta I / \delta x = -C \cdot \delta V / \delta t \quad (2)$$

여기서 C 와 L 은 송전선로의 전기적 특성을 나타내는 단 위길이 당 캐패시턴스와 인덕턴스로 케이블에서의 캐패시턴스는 가공선로에 비해 약 10배에 달하는데, 구조에 따라 약간의 차이는 있지만 일반적으로 20[OC]에서 0.3~0.7[μ F/km]의 값을 가지며, 인덕턴스는 0.2~0.4[mH/km]의 값을 가진다. 이와 같은 선로정수는 선로의 특성임피던스와 전파속도에 영향을 미쳐 가공선로와 지중선로는 서로 다른 특성임피던스와 전파속도를 가지게 되어 접속이 이루어지는 중단점 속함은 변이점으로 작용하게 된다.

위의 식 (1)과 (2)의 무손실 송전선로에서의 전압과 전류의 일반해는 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V(x, t) = k_1(t - x/v) + k_2(t + x/v) \quad (3)$$

$$I(x, t) = \frac{1}{Z_0} \cdot k_1(t - x/v) - \frac{1}{Z_0} \cdot k_2(t + x/v) \quad (4)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 서로 반대방향으로 진행하는 두가지 파를 나타낸다. k_1 은 Positive x 방향으로 진행하는 파이고, k_2 는 Negative x 방향으로 진행하는 파이다. 전파속도 v 는 $1/\sqrt{LC}$ 이고, 특성임피던스 Z_0 는 $\sqrt{L/C}$ 이다. 특성임피던스는 진행파에 의해 보여지는 임피던스이며, 또한 진행파는 전파속도에서 선로를 따라 진행된다[6].

혼합송전선로에서 고장이 발생하면 고장점에서 발생한 과도신호는 양방향 선로를 따라 서지처럼 진행하게 된다. 그리고 양 모선과 가공선로와 지중선로가 접속되어지는 접속점과 고장점에서 반사와 투과가 이루어진다. 이처럼 양모선 사이의 진행파는 과도신호가 완전히 소멸할 때까지 투과와 반사를 계속하게 된다. 진행파를 이용한 고장점 탐색 방법으로 GPS를 이용한 양단 모선 데이터 링크를 통해 양단에서 측정된 진행파 도달시간의 시간지연을 측정된 방법이 있다[1]. 하지만 선로길이가 미국이나 유럽에 비해 짧은 국내의 혼합송전계통이나 지중송전계통에서는 경제성과 현실성을 고려할 때 현장 적용 가능성이 희박하다고 사료된다.

따라서 본 논문에서는 한쪽 모선에 설치한 Fault Locator의 판단 정보만을 이용해 고장점까지의 거리 계산을 수행하였다. 판단 정보를 이용하는 방법은 고장점에서 발생한 과도신호가 투과와 반사를 반복하면서 진행하여 모선에서 첫 번째 반사되는 시간과 두 번째 반사되는 지연시간을 측정함으로써 정확하고 신속하게 고장점을 탐지하게 된다. 또한 3상 송전선로에서 고장시 발생하는 과도신호의 진행파들은

공간에 서로 상호 결합하여 진행한다. 따라서 여기에서는 신호의 원활한 분석과 다른 형태의 고장에도 유용하게 대처하도록 하기 위해 Clarke 변환의 Mode B의 형태로 3상의 전압신호를 결합하여 Modal Signal 성분을 추출하였다.

$$\begin{pmatrix} V_{\text{mode}(A)} \\ V_{\text{mode}(B)} \\ V_{\text{mode}(C)} \end{pmatrix} = [T] \cdot \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$V_{\text{mode}(A), (B), (C)}$: Voltage Mode Signal Vector

$V_{a, b, c}$: Voltage Phase Signal Vector

T : Clarke's Transformation Matrix

또한, 선로모선에서 기록된 과도신호를 Modal Signal로 변환하여 DWT 변환을 수행하였고, DWT 변환에서 과도신호가 포함하고 있는 High Frequency성분을 추출하여 모선에서 반사되는 시간의 간격을 해석함으로써 고장점까지의 거리를 계산하였다.

2.2 웨이브렛 변환

전력계통에서 발생하는 대부분의 고장은 진행파를 발생시키고, 기본파와 그의 고조파가 결합된 성분을 포함하는 비주기적인 과도특성을 나타낸다. 웨이브렛 변환은 스케일이 주파수에 따라 변화한다. 즉, 시간-스케일 영역을 사용함으로써 가변윈도우의 특성을 나타내므로 Low Scale에서는 High Frequency 성분을 나타내고, High Scale에서는 Low Frequency 성분을 나타내게 된다. 이처럼 웨이브렛 변환은 웨이브렛 모 함수를 정의하고 이 모 함수를 시간에 따른 크기 변형(Scaling)과 이동(Translation)을 통해 분석영역이 가변 되는 윈도우를 사용하여 스케일이 낮을 수록 High Frequency 성분을 조밀한 Time Resolution에서 분석하며 스케일이 높아질수록 Low Frequency 성분을 포함한다 [8]-[10].

본 논문에서는 이산시간 웨이브렛 함수(ψ)를 이용하여 Scale(a_0^m)과 Translation(na_0^m) 요소를 이산화시켜 효율적으로 웨이브렛 분석을 수행할 수 있는 이산웨이브렛 변환(DWT)을 사용하였다. 이산웨이브렛 함수와 원신호 $S(t)$ 에 대한 이산웨이브렛 변환식은 식 (6)과 같다.

$$DWT(s, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n S(t) \cdot \psi\left(\frac{t - na_0^m}{a_0^m}\right) \quad (6)$$

이산웨이브렛 분석방법은 여러 개의 고역필터(Highpass-filter)와 저역필터(Lowpass filter)로 구성된 필터뱅크를 가지고 웨이브렛 변환을 반복한다. 그림 1은 웨이브렛 변환을 이용하여 원신호 $S(t)$ 를 1단계 분해하는 과정을 나타내었다. 본 논문에서는 저역(low-pass)과 고역(high-pass) 분해 및 합성필터를 얻기 위해 Matlab의 Orthfilt 함수를 이용하였으며, db2 마더웨이브렛 함수에 의한 Modal Signal의 1단계 분석을 통해 추출된 고주파 성분을 포함하고 있는 신호의 Detail 성분인 D1계수를 이용하여 고장구간판별과 고장점까지의 거리를 계산하였다.

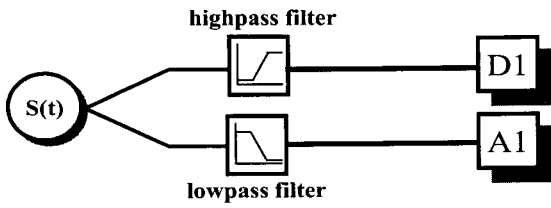


그림 1 웨이블릿 변환의 1단계 분해 과정
 Fig. 1 One step decomposition process of wavelet transform

3. 고장점 탐색 알고리즘

3.1 가공선로에서 고장시 진행파의 특성

그림 2와 그림 3은 전체 선로길이가 L인 혼합송전선로에서 가공선로에 고장 발생시 고장점에서 발생한 과도신호가 양 모선으로 진행하여 양 모선과 가공선로와 지중선로의 접속점, 그리고 고장점에서 반사와 투과되는 진행파의 특성을 나타낸 Bewley's Lattice Diagram이다. 여기서 그림 2는 가공선로의 중간지점 이전 고장의 경우이며, 그림 3은 중간지점 이후 고장에 대한 진행파의 흐름이다. 그림에서 처럼 중간지점 이전 고장의 경우는 A모선에서 첫 번째 반사가 일어난 후 접속점에서 반사되는 신호보다 고장점에서 반사되는 신호가 모선에 먼저 도달하게 된다. 한편 중간지점 이후의 고장의 경우에는 모선에서 첫 번째 신호의 반사 후 고장점 보다 접속점에서 반사되는 신호가 먼저 A모선에 도달하게 되는 특성을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 발생한 고장이 선로의 중간점 이전인지 혹은 이후인지를 먼저 판별하고 A모선에 도달하는 진행파의 첫 번째 와 두 번째 사이의 시간간격을 측정하여 각각 고장거리계산 알고리즘에 적용하였다.

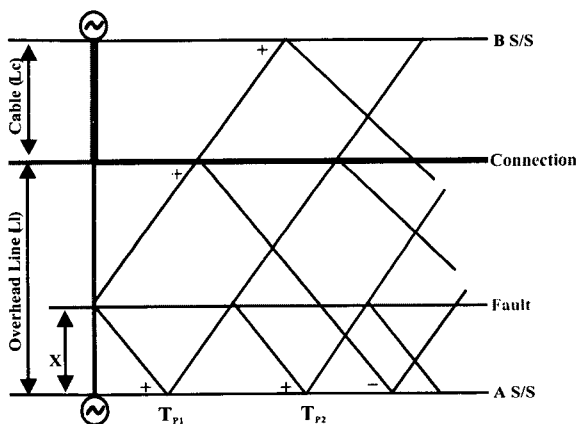


그림 2 가공선로 고장시 격자 다이어그램(중간이전)
 Fig. 2 Lattice diagram in case of overhead line fault (near half)

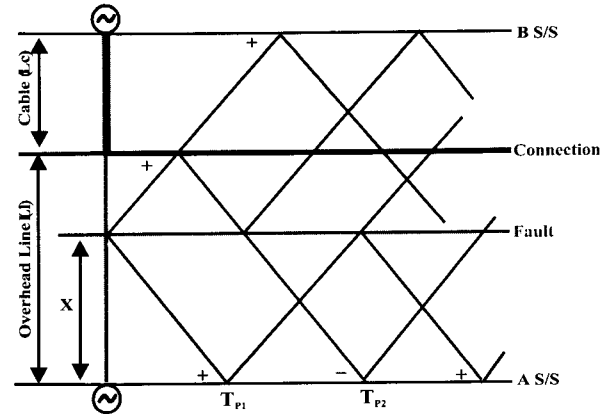


그림 3 가공선로 고장시 격자 다이어그램(중간이후)
 Fig. 3 Lattice diagram in case of overhead line fault (second half)

3.2 지중선로에서 고장시 진행파의 특성

그림 4는 지중송전선로 지점에서 고장발생시 나타나는 격자 다이어그램이다. 지중 송전선로에서 고장발생시 진행파는 접속점에서 가공선로로 투과되어 A 모선에서 반사되는 지연시간을 측정하게 되므로 진행파는 서로 다른 특성임피던스와 전파속도의 특성을 가진 선로를 따라 진행하게 된다. 따라서 A모선에 도달하는 시간은 지중선로에 비해 전파속도가 높은 가공선로의 특성으로 ΔT_1 과 ΔT_2 의 지연시간이 발생하게 된다. 본 논문에서는 지연시간특성을 식 (7)과 식 (8)에서 제시하였다. 그림 4의 다이어그램에서 실선은 실제 측정되는 시간이고 점선은 고장점까지의 거리계산이 이루어지는 시간이다. 따라서 정확한 거리 계산을 위해서는 ΔT_1 과 ΔT_2 만큼의 시간 보상이 되어야 한다. 식 (9)에서는 시간지연을 고려한 보상분 ΔT 를 나타내었다. 또한 혼합송전계통 중 지중선로 구간에서 고장발생시 중간지점 이전과 이후의 고장에 따라 A모선에 도달하는 진행파의 특성은 가공선로와 같은 특성을 보인다.

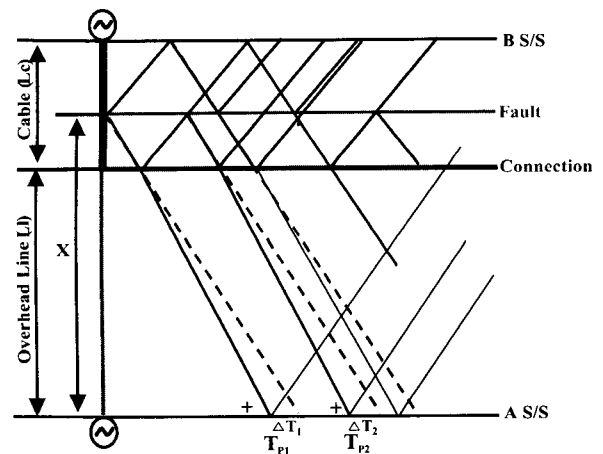


그림 4 지중송전선로 고장시 격자 다이어그램(중간이전)
 Fig. 4 Lattice diagram in case of cable fault(near half)

따라서 지중선로에서 발생한 고장이 선로의 중간점 이전인지 혹은 이후인지를 먼저 판별하고 A모선에 도달하는 진행과의 첫 번째와 두 번째 사이의 시간간격과 지연시간 보상분(ΔT)을 측정하여 각각 고장거리계산 알고리즘에 적용하였다.

3.3 고장점 탐색 계산 알고리즘

본 논문에서는 고장발생 위치 및 고장구간에 따라 적용할 수 있는 고장점까지의 거리계산식을 제시하였다. 식 (7)과 식 (8)은 지중선로 고장시 발생하는 지연시간을 수식으로 나타내었으며, 식 (9)에서는 지연시간을 고려한 보상분을 제시하였다.

$$\Delta T_1 = \left(\frac{v_l}{v_c} - 1\right) \cdot T_{P1} = \left(\frac{v_l - v_c}{v_c}\right) \cdot T_{P1} \quad (7)$$

$$\Delta T_2 = \left(\frac{v_l}{v_c} - 1\right) \cdot T_{P2} = \left(\frac{v_l - v_c}{v_c}\right) \cdot T_{P2} \quad (8)$$

여기서, v_l : 가공송전선로 전파속도[km/sec]

v_c : 지중송전선로 전파속도[km/sec]

T_{P1}, T_{P2} : A 모선에서 초기 피크 값과 연속되는 피크 값의 도달 시간[sec]

$$\Delta T = \Delta T_2 - \Delta T_1 = \left(\frac{v_l - v_c}{v_c}\right) \cdot (T_{P2} - T_{P1}) \quad (9)$$

따라서 지중송전선로에서 고장발생시 고장점까지의 거리는 고장위치에 따라 지연시간 보상분을 고려한 식 (10)과 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 지중송전선로의 중간점 이전에 고장이 발생한 경우에는 그림 4와 같은 진행과의 특성을 보인다. 따라서 A모선에서 측정된 웨이브렛 계수의 첫 번째 피크 값과 두 번째 피크값은 고장발생 앞단의 고장거리 정보를 포함한다. 그러므로 A모선에서 고장점까지의 거리 X 는 식 (10)과 같이 된다. 한편 중간점 이후의 고장은 두 번째 피크값이 고장점에서 보다 B모선에 반사되는 신호가 먼저 도달하므로 피크값을 나타내는 도달시간의 간격은 고장점에서 B모선사이의 고장거리 정보를 포함하게 된다. 따라서 중간점 이후에 고장이 발생한 경우 A모선에서 고장점까지의 거리 X 는 식 (11)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} X &= L_l + \frac{v_c \cdot [(T_{P2} - T_{P1}) + (\Delta T_2 - \Delta T_1)]}{2} \\ &= L_l + \frac{v_c \cdot [(T_{P2} - T_{P1}) + \Delta T]}{2} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X &= L_l + \left[L_c - \frac{v_c \cdot [(T_{P2} - T_{P1}) + (\Delta T_2 - \Delta T_1)]}{2} \right] \\ &= L_l + \left[L_c - \frac{v_c \cdot [(T_{P2} - T_{P1}) + \Delta T]}{2} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

여기서, X : 고장점까지의 거리[km]

L_l : 가공선로 구간의 총길이[km]

L_c : 지중선로 구간의 총길이[km]

ΔT : 지연시간을 고려한 보상분[sec]

혼합송전계통에서 가공선로에 고장이 발생할 경우에는 고장점과 접속점에서 반사되는 신호가 B모선에서 반사되는 신

호와는 많은 시간차이가 발생한다. 따라서 가공선로에 고장이 발생하면 A모선에서 감지되는 첫 번째와 두 번째 반사되는 진행과는 지중선로의 영향이 전혀 없음을 알 수 있다. 그러므로 가공선로 고장의 경우에는 지연시간이 발생하지 않기 때문에 지연시간을 고려한 보상분은 적용하지 않아도 된다. 다만 3.1절에 나타난 것처럼 가공선로 구간에서 발생한 고장이 중간점 이전과 이후에 따라 진행과의 흐름은 달라진다. 중간점 이전의 경우에 나타난 시간간격은 고장점 앞단의 정보를 포함하며 A모선에서 고장점까지의 거리 X 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 중간점 이후에서 고장이 발생할 경우는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = \frac{v_l \cdot (T_{P2} - T_{P1})}{2} \quad (12)$$

$$X = L_l - \frac{v_l \cdot (T_{P2} - T_{P1})}{2} \quad (13)$$

또한 고장거리 계산결과와 오차를 판정하기 위해 식 (14)의 오차계산식을 사용하였다.

$$\text{오차(\%)} = \frac{|\text{실제거리} - \text{계산거리}|}{\text{총선로길이}} \times 100 \quad (14)$$

3.4 고장구간 판별 알고리즘

3.3절에서 제시한 고장점 탐색 알고리즘 적용을 위해서는 먼저 발생한 고장이 가공선로 구간인지 지중선로 구간인지를 판별하여야 한다. 다음으로 각 고장구간에서 중심점 이전과 이후의 고장위치를 판별하여 식 (10)~식 (13)의 계산식을 적용해야 한다.

본 논문에서는 고장구간 판별을 위해 웨이브렛 변환결과 추출한 D1 계수의 크기를 이용하였다. 그림 8~그림 11에서처럼 진행과가 A모선에서 반사되는 순간에 웨이브렛의 D1 계수는 최대 정점에 이르게 되고 이 때의 시간은 T_{P1} 이다. 그리고 다음에 반사되는 순간에 계수는 다시 정점에 이르게 되는데 이때의 시간은 T_{P2} 이다. 이는 고주파를 포함한 파도신호가 A모선에서 반사되는 시간을 의미한다. 이처럼 D1 계수가 정점에 이르는 순간의 시간차를 분석하여 고장계산이 이루어지고 고장계산 이전에 두 정점 사이의 D1 계수들을 추출하여 고장구간을 판별하게 된다. 지중선로 구간이 고장인 경우에는 서로 다른 선로특성을 지나 변이점에서 투과되는 신호를 A모선에서 추출하게 되므로 고조파 함유량이 많으며, D1계수의 크기는 가공선로 구간의 고장에 비해 높은 값을 나타낸다. 그러나 D1 계수는 고장이 발생하는 위상에 의해서도 큰 차이를 보인다. 예를 들어, 같은 지점에서 고장이 발생하여도 고주파가 가장 많이 발생하는 90도 고장의 경우는 0도 고장에 비해 매우 큰 D1계수가 추출된다. 그러므로 고장위상에 의해 변화하는 D1계수의 단순한 크기 및 최대 값의 비교는 고장구간 판별에 적절하지 못하다.

따라서 본 논문에서는 고장위상에 의해 영향을 받지 않고 동일 지점에서 발생한 고장은 고장발생 위상에 관계없이 같은 계수의 크기를 보이는 식 (15)와 같은 판별식을 제시하였다. 식 (15)는 웨이브렛 변환결과 나타나는 D1계수가 최

대 정점에 이르는 첫 번째와 두 번째 사이에서 추출한 계수값을 이용하였다.

$$Average \left[\sum_{k=1}^m abs \left(D1_{(n+2k-2)} / D1_{(n+2k-1)} \right) \right] \quad (15)$$

여기서, $D1_{(n+2k-1)}$: 첫 번째 피크 값(n번째 계수)에서 2k-1번째의 D1계수

$D1_{(m)}$: 두 번째 피크 값의 D1계수(m번째 계수)

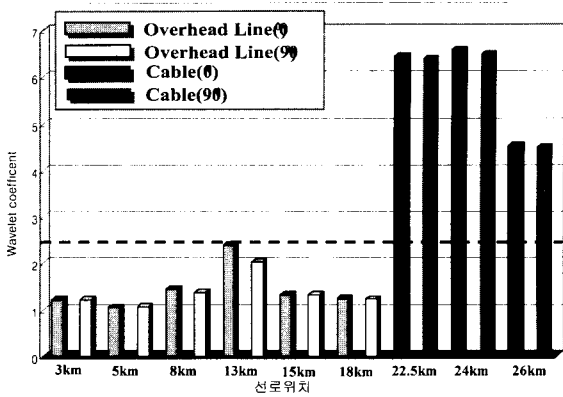


그림 5 고장구간 판별 결과
Fig. 5 Result of fault section

그림 5는 식 (15)를 이용한 고장구간 판별결과 이다. 그림에서처럼 고장위상에 관계없이 동일지점에서 같은 계수값을 보이고 있으며 지중선로의 고장은 가공선로 고장에 비해 매우 높은 계수 값을 나타내어 혼합송전계통에서 고장발생시 발생한 고장의 구간을 명확히 판별할 수 있음을 보였다.

또한 고장계산 알고리즘 적용을 위해서는 각 고장구간에서 고장위치가 중간점 이전인지 혹은 이후인지의 여부를 판별해야 한다. 본 논문에서는 고장위치 판별을 위해 극성을 포함한 계수값을 이용하였다. 그림 2~그림 4의 격자 다이어그램에서 알 수 있듯이 고장점에서 반사되는 신호(+)와 접속점이나 B모선에서 반사되는 신호(-)는 서로 다른 극성을 나타낸다. 다만 극성은 고장위상에 따라 변화하게 된다. 예를들어, 0도의 고장은 첫 번째 반사되는 신호가 플러스(+)이면, 90도의 고장에서는 마이너스(-)가 된다. 따라서 첫 번째 극성에 관계없이 동일극성인지의 여부를 판정하면 된다. 그러므로 본 논문에서는 첫 번째와 두 번째 반사되는 극성을 포함한 계수를 검출하여 식 (16)을 이용해 고장 위치를 판별하였다.

$$|D_{peak1} + D_{peak2}| > |D_{peak1} - D_{peak2}| \quad (16)$$

여기서, D_{peak1} : 첫 번째 피크값의 D1계수

D_{peak2} : 두 번째 피크값의 D1계수

식 (16)을 만족하면 고장은 중간점 이전의 고장이 되고, 만족하지 못하면 중간점 이후의 고장으로 판정하게 된다.

3.5 고장점 탐색 흐름도

본 논문에서 제시한 Fault Location 알고리즘은 고장위상

에 관계없이 적용이 가능하며, 또한 진행파를 이용한 고장점 탐색 방법은 고장저항 및 고장형태에 관계없이 적용이 가능하고 빠른 시간 내에 고장탐지 및 고장점 위치 판별이 가능하다. 그림 6에서는 본 논문에서 제시한 고장점 탐색 알고리즘의 흐름도이다. 여기서 보이는 바와 같이 고장데이터를 샘플링하고 이에 대한 Modal Signal을 웨이브렛 변환하여 A모선에서 추출된 첫 번째 피크 값과 두 번째 피크 값의 계수와 시간에 대한 정보를 이용하였다. 식 (15)를 이용해 고장구간을 판별하고 식 (16)을 이용해 각 고장구간의 중간점 이전과 이후의 고장위치를 선정한 후 계수값의 노이즈를 최소화하기 위해 제공한 다음 각각 식 (10)~식 (13)의 계산식을 적용하여 고장거리를 계산하게 된다.

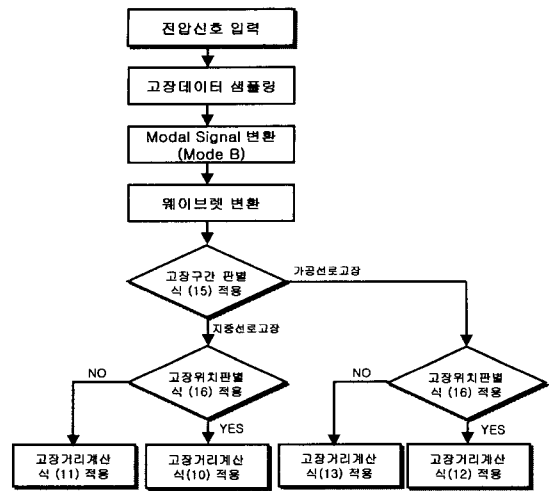


그림 6 고장점탐색 흐름도
Fig. 6 Flow chart of fault location algorithm

4. 모델계통 및 시뮬레이션

4.1 모델계통

본 논문에서는 가공송전선로와 지중송전케이블이 혼합된 송전계통에서 1선 지락고장이 발생했을 때의 고장점탐색 알고리즘 개발을 수행하였다.

모델계통은 154kV 양단전원으로 가공송전선로 20km와 지중송전선로 8.17km가 연계된 실선로이며 가공선로는 ACSR 410[mm]×2B이고, 지중송전선로 XLPE 2,000[mm] 케이블이 전력구 방식으로 포설 되어있다. 또한 포설형태는 선로를 3 구간으로 나누어 두 개의 구간은 크로스분당 하였고, 세 번째 구간은 직접접지된 형태이며, 혼합송전계통 모델 및 케이블 구간별 선로길이 및 접지상태는 그림 7에 나타내었다.

선로 모델링 및 시뮬레이션을 위해 EMTP/ATPDraw를 사용하였으며 고장데이터 샘플링 주파수는 1MHz이다. 전파 속도는 가공선로에서는 2.93119×10^5 [km/sec]이고, 지중선로에선 1.67619×10^5 [km/sec]이다. 또한 고장을 0도(12.326 msec)와 90도(16.484 msec)로 각각 분리하여 가공선로에서는 A모선에서 3km, 5km, 8km, 13km, 15km, 18km 지점에서 1선지락고장을 시뮬레이션 하였으며, 지중선로에서는 A모선에서 22.5km, 24km, 26km 지점에서 1선지락 고장을 모의하여 각각 고장점까지의 거리를 계산하였다.

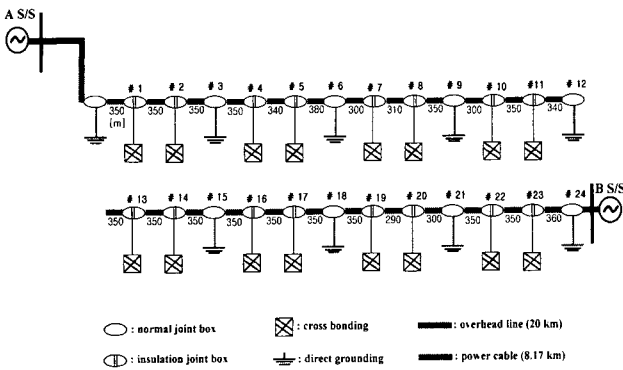


그림 7 혼합송전계통 모델 및 케이블 접속형태
Fig. 7 Model of combined transmission system and cable connection type

4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 8은 3km 지점에서 1선지락고장시 웨이브렛 1단계 분석을 통한 D1계수의 분석결과이다. 그림에서처럼 첫 번째 피크값 두 번째 피크값의 극성이 모두 플러스(+)로 동일극성이므로 계수의 크기를 비교한 식 (16)을 만족하게 된다. 따라서 고장이 중간점 이전임을 알 수 있다. 또한 노이즈를 최소화하기 위해 D1계수를 제공하여 이의 피크값의 도달시간을 확인한 결과 첫 번째 피크는 12.3375[ms]이며, 두 번째 피크는 12.3675[ms]이다. 이를 식 (12)에 적용하여 고장거리를 계산하면 식 (17)과 같다.

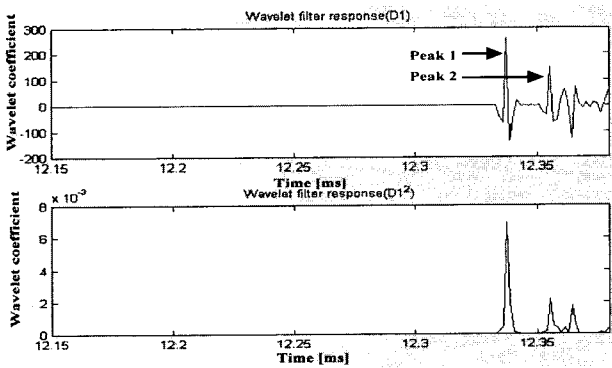


그림 8 3km 고장시 웨이브렛 D1계수 분석 결과(00)
Fig. 8 Analysis result of wavelet D1 coefficient at the fault of 3km(00)

$$X = \frac{2.93119 \times 10^5 \times [(12.3555 - 12.3375) \times 10^{-3}]^2}{2} = 2.63[km] \quad (17)$$

또한 식 (14)를 이용하여 오차[%]를 계산하면 다음과 같다.
$$e = \frac{|3 - 2.63|}{28.17} \times 100 = 1.31[\%] \quad (18)$$

그림 9는 5km 90도 고장시 D1계수를 분석한 결과이다. 그림에서처럼 첫 번째 피크값 두 번째 피크값의 극성이 모두 마이너스(-)지만 동일극성이므로 계수의 크기를 비교한

식 (16)을 만족하게 된다. 따라서 D1계수를 제공하여 식 (12)에 적용하여 고장거리를 계산하면 식 (19)와 같다.

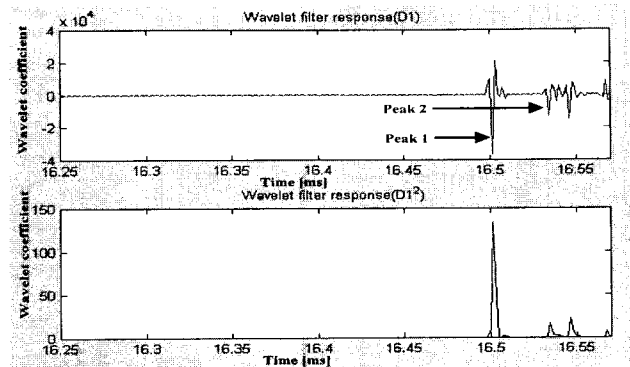


그림 9 5km 고장시 웨이브렛 D1계수 분석 결과(900)
Fig. 9 Analysis result of wavelet D1 coefficient at the fault of 5km(900)

$$X = \frac{2.93119 \times 10^5 \times [(16.5345 - 16.5015) \times 10^{-3}]^2}{2} = 4.84[km] \quad (19)$$

또한 식 (14)를 이용하여 오차[%]를 계산하면 다음과 같다.

$$e = \frac{|5 - 4.84|}{28.17} \times 100 = 0.567[\%] \quad (20)$$

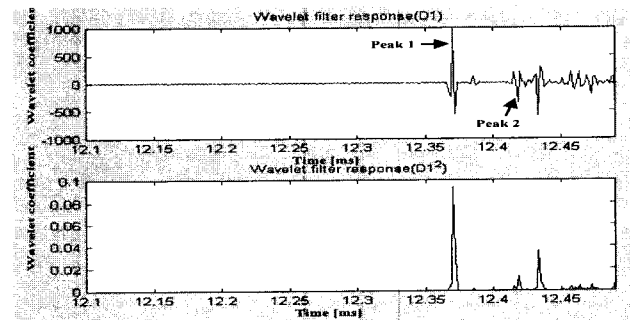


그림 10 13km 고장시 웨이브렛 D1계수 분석 결과(00)
Fig. 10 Analysis result of wavelet D1 coefficient at the fault of 13km(00)

그림 10은 13km 0도 고장시 D1계수를 분석한 결과이다. 그림에서처럼 두 피크값의 극성이 서로 다른 특성을 보이고 있으며, 이의 계수값들을 식 (16)에 적용하면 수식은 만족하지 않는다. 따라서 이 고장은 중간점 이후의 고장임을 알 수 있다. 그러므로 식 (13)을 이용하여 고장거리를 계산하게 되며, 계산결과는 식 (21)과 같다.

$$X = 20 - \frac{2.93119 \times 10^5 \times [(12.4185 - 12.3705) \times 10^{-3}]^2}{2} = 12.97[km] \quad (21)$$

또한 식 (14)를 이용하여 오차[%]를 계산하면 다음과 같다.

$$e = \frac{|13 - 12.97|}{28.17} \times 100 = 0.1[\%] \quad (22)$$

그림 11은 지중선로 구간인 24km 지점에서 케이블 도체와 시스의 접촉으로 인해 1선 지락고장 발생시 웨이브렛 변환에 의한 D1계수 분석결과이다. 그림에서처럼 첫 번째 피크값과 두 번째 피크값의 극성이 동일극성으로 계수의 크기를 비교한 식 (16)을 만족하게 된다. 따라서 고장이 중간점 이전임을 알 수 있다. 또한 노이즈를 최소화하기 위해 D1계수를 제공한 결과, 피크값의 도달시간은 더욱 명확히 확인할 수 있다. 확인결과 첫 번째 피크는 12.4245[ms]이며, 두 번째 피크는 12.4545[ms]이다. 이를 식 (9)에 적용하여 지연시간 보상분을 설정하고, 식 (10)을 이용해 고장거리를 계산하게 된다.

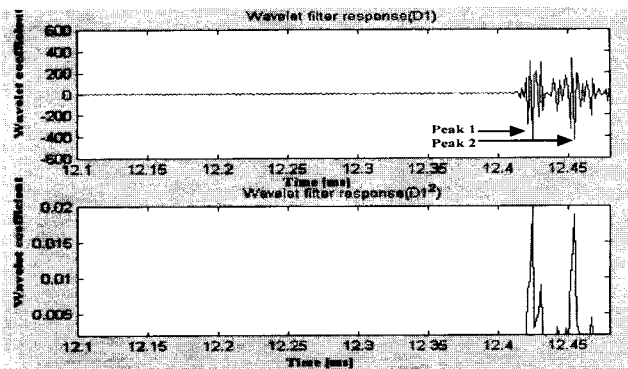


그림 11 24km 고장시 웨이브렛 D1계수 분석 결과(00)
Fig. 11 Analysis result of wavelet D1 coefficient at the fault of 24km(00)

식 (23)은 지연시간 보상분의 계산결과이며, 식 (24)는 지연시간 보상분을 고려한 고장거리 계산 결과이다.

$$\Delta T = \frac{(2.93119 - 1.67619) \times 10^{-5}}{1.67619 \times 10^{-5}} \cdot (12.4545 - 12.4245) = 0.022462[ms] \quad (23)$$

$$X = 20 + \frac{1.67619 \times 10^{-5} \times [(12.4545 - 12.4245) + (0.022462) \times 10^{-3}]}{2} = 24.4[km] \quad (24)$$

또한 식 (14)를 이용하여 오차[%]를 계산하면 다음과 같다.

$$e = \frac{|24 - 24.4|}{28.17} \times 100 = 1.4[\%] \quad (25)$$

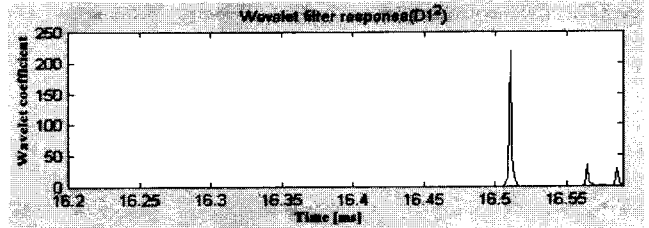


그림 12 8km 고장시 웨이브렛 D1계수 분석 결과(900)
Fig. 12 Analysis result of wavlet D1 coefficient at the fault of 8km(900)

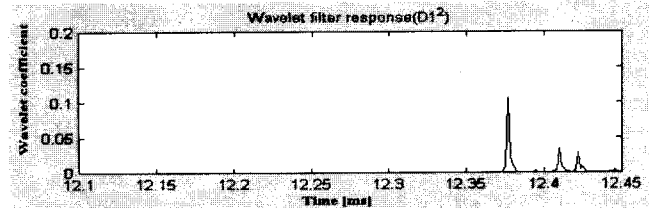


그림 13 15km 고장시 웨이브렛 D1계수 분석 결과(00)
Fig. 13 Analysis result of wavlet D1 coefficient in 15km(00)

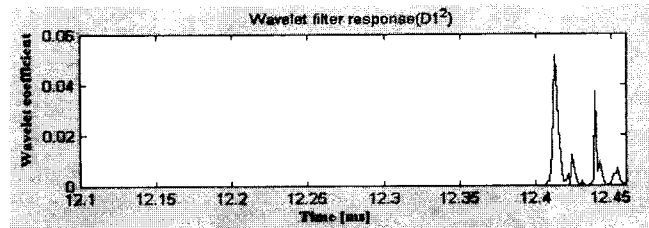


그림 14 22.5km 고장시 웨이브렛 D1계수 분석 결과(00)
Fig. 14 Analysis result of wavelet D1 coefficient at the fault of 22.5km(00)

본 논문에서는 웨이브렛 변환의 1단계 분석을 통해 추출된 Detail 성분의 계수를 이용해 진행파의 흐름을 분석하였고, A모션에서 반사되는 첫 번째와 두 번째 피크점의 계수 및 시간의 정보를 이용해 고장구간 및 위치를 판별하여 정확한 고장점을 계산하였다. 그림 12~그림 14는 혼합송전계통에서 고장발생시 웨이브렛 변환결과 나타난 D1계수를 고장거리계산을 위해 제공한 결과를 나타내었다. 그림에서처럼 A모션에 반사되는 시간의 정보를 포함한 피크점이 명확히 나타남을 알 수 있다. 그리고 표 1에서는 0도와 90도의 고장위상을 가지고 가공선로 및 지중선로에서 발생한 고장현상을 분석해 본 논문에서 제시한 고장계산 알고리즘을 적

표 1 고장점까지의 거리계산 결과

Table 1 Result of distance calculation for each fault point

선로구간	가공송전선로										지중송전선로					
	3		8		13		15		18		22.5		24		26	
고장 위상각	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90
Peak1[ms]	12.3375	16.4955	12.3525	16.5105	12.3705	16.5285	12.3765	16.5345	12.3855	16.5435	12.4125	16.5675	12.4245	16.5765	12.4365	16.5915
Peak2[ms]	12.3555	16.5135	12.4065	16.5645	12.4335	16.5765	12.4095	16.5675	12.4065	16.5645	12.4245	16.5795	12.4545	16.6065	12.4545	16.6095
적용수식	식12	식12	식12	식12	식13	식13	식13	식13	식13	식13	식10	식10	식10	식10	식11	식11
거리계산[km]	2.63	2.63	7.92	7.92	12.97	12.97	15.16	15.16	16.92	16.92	23.9	23.9	24.4	24.4	25.53	25.53
오차[%]	1.31	1.31	0.28	0.28	0.1	0.1	0.56	0.56	3.76	3.76	4.9	4.9	1.4	1.4	1.8	1.8

용하여 고장점까지의 거리를 계산한 결과를 나타내었다.

표 1에서처럼 계산결과는 고장위상에 관계없이 매우 낮은 오차율을 보여 고장점을 정확하게 탐색 할 수 있음을 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 진행파와 웨이브렛 변환을 이용하여 혼합 송전선로에서 고장발생시 고장점 탐색 알고리즘을 개발하였으며 이를 분석하여 제시한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 고장위상에 관계없이 동일 고장발생 지점에서 나타나는 계수값이 같게 나타나는 판별식을 제시하였고, 이를 통해 가공선로와 지중선로의 고장 구간을 정확히 판별하였다.
- (2) 각 고장 구간에서 고장위치가 중간점 이전인지 혹은 이후인지의 여부를 판별하기 위해 극성을 포함한 D1계수를 이용해 계산식을 제시하였고, 고장발생 위치 및 고장구간에 따라 적용할 수 있는 고장점까지의 거리계산식을 제시하였다.
- (3) 가공선로 고장의 경우 지중선로에 의한 영향이 나타나지 않았다.
- (4) 지중선로 고장의 경우는 접속점에서 가공선로로 투과되어 모선에서 반사되는 진행파를 이용하되 진행파 지연시간이 발생하므로 이를 보상할 수 있는 계산식을 제시하였다.
- (5) 본 논문에서 제시한 고장점 탐색 알고리즘은 고장구간 및 위치에 상관없이 쉽게 적용되며 고장위상에 관계없이 정확하게 고장점이 탐색되었다.

본 논문에서 제시한 알고리즘은 진행파의 특성을 이용함으로써 고장위상, 저항 및 형태에 영향이 없으며, 기존의 거리계산 방식에 비해 오차가 적고 신속한 계산이 가능하므로 혼합송전계통의 고장점 탐색과 보호방안에 많은 기여를 할 것으로 사료된다. 또한 양단정보를 이용하여 GPS와 데이터링크 시스템을 이용하는 고장점 탐색방법과는 달리 판단정보만을 이용하여 수행하게 되므로 현실성과 경제성면에서도 우수하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 원광대학교의 교비지원에 의하여 연구됨

참 고 문 헌

- [1] F. H. Magnago, A. Abur, "Fault Location Using Wavelet", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998, pp. 1475-1480
- [2] A. Abur, F. H. Magnago, "Use of Time Delays between Modal Components in Wavelet based Fault Location", Electrical Power and Energy Systems, No. 22, 2000
- [3] Z. Q. Bo, "A New Non-communication Protection Technique for Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998, pp.

1073-1078

- [4] Z. Q. Bo, M. A. Redfern, G. C. Weller, "Positional Protection of Transmission Line Using Fault Generated High Frequency Transient Signals", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No.3, July 2000, pp.888-894
- [5] L.Shang, G.Herold, J.Jaeger, "A New Approach to High-Speed Protection for Transmission Line base on Transient Signal Analysis Using Wavelets", IEE 2001 Conference Publication, No. 479, pp 173-176
- [6] M Aurangzeb, P.A.Crossley, P.Gale, "Fault Location on a Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves Measured at a Single Line End", IEEE, pp. 2437-2442, 2000
- [7] Surya Santoso, "Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 1996, pp 924~930
- [8] W. A. Wilkinson, M. D. Cox, "Discrete Wavelet Analysis of Power System Transients", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996
- [9] Martin, "Wavelet and Filter Banks: Theory and Design", IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 40, No. 9, pp. 2207~2232, 1992
- [10] Wavelet Toolbox For Use with MATLAB

저 자 소 개



정 체 균 (鄭 彩 均)

1973년 7월 14일 생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2002년~현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (063)850-6735

E-mail : chekyun@wonkwang.ac.kr



이 중 범 (李 鍾 範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987~1990년 한국전기연구소 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수

Tel : (063)850-6735, E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr



윤 양 응 (尹 良 雄)

1941년 9월 25일 생. 1967년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~현재 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수

Tel : (063)850-6733

E-mail : ywoon@wonkwang.ac.kr