

## 3상 불평형 정전류 부하 조건에서의 동 위상 판별에 대한 분석 및 한계에 관한 연구

(A Study on the Analysis and Limitations of the Same Phase Identification Under 3-Phase Unbalanced Constant Current Loads)

변희정\* · 손수국\*\*

(Hee-Jung Byun · Su-Goog Shon)

### Abstract

In this paper, the necessity for the identification of the absolute phase value is introduced and analyzed for a particular conductor line of a 3-phase type distribution network and the recent methods are also introduced. For the determination of the exact phase value for a specific point in the line, as compared with the phase reference point, the measured phase value must be within a range of  $\pm 60^\circ$ . However, the phase of a particular point can fluctuate depending on the line constant, transformer wiring method, line length, line amperage, etc. A theoretical formulation such as Simulink modeling and analysis for a distribution network are conducted for the identification of phase at a specific point in the line. In particular, through evaluating the effects of unbalanced current loads at the time of determination of the phase value, the limitations of the present method for the determination of phases is described.

Key Words : Phase Identification, MATLAB, Simulink, Unbalance Constant Current Load

### 1. 서 론

3상 4선식 다중 접지방식의 배전망에서 상을 판별하기 위한 필요성이 증대하고 있다. 하지만 3 또는 4개의 도체를 사용한 3상 배전선로 망은 거대화, 지중화,

연가 등으로 복잡해지고 있다. 발전소로부터 수용가까지 송압 또는 강압 변압기를 거치며, 또한 변압기 또는 모선에서 다수의 분기 회로로 배전선로가 매우 복잡한 형태로 구성된다[1].

배전망을 처음 구성할 때는 개별 상간에 부하 평형을 달성할 수 있도록 설계한다. 하지만, 시간이 경과함에 따라 수용가가 추가 또는 이전하게 된다. 지중구간과 가공선로가 혼재되어 있고, 공사 시마다 관리하는 시공업체가 일정하지 않으며, 또한 작업자가 단순하게 상순만을 확인하고 공사하는 일이 비일비재한 현실에서 필요시 절대 위상에 대한 판별이

\* 주저자 : 수원대학교 IT대학 정보통신공학과 교수  
\*\* 교신저자 : 수원대학교 정보통신공학과 교수  
Tel : 031-220-2615, Fax : 031-229-8281  
E-mail : sshon@suwon.ac.kr  
접수일자 : 2012년 3월 16일  
1차심사 : 2012년 3월 20일, 2차심사 : 2012년 4월 12일  
심사완료 : 2012년 5월 15일

어렵고, 정전용량 및 노이즈 방지를 위하여 연가·교차시공에 의한 선로변경이 다양하여 상에 대한 혼선이 발생하게 된다. 따라서 기술자는 현장에서 선로 도체가 A, B, C 위상 중의 어떤 위상에 속하는지를 판별할 수 있어야 한다. 부하 평형 관리 외에도, 보호 계전기 설치 및 운영에도 도체의 위상 정보를 알 수 있어야 한다.

보통 변전소의 인출입 장소에서는 전기신호에 대한 A, B, C 위상 값이 알려져 있으나, 배전선로 말단으로 이동함에 따라 그 절대적 위상 값에 대한 판별이 어렵다. 그래서 대부분의 위상 판별 방법들은 변전소의 알려진 기준 위상 값과 현지의 위상 값을 비교하여 절대 위상을 판별하는 방식을 사용한다[2-5].

기준점에서 제공된 기준 절대 위상 값과 현지에서 측정된 위상 값 측정시간을 비교하는 방식이 널리 사용되기 시작하였다. 동기화된 시간에 위상을 측정한다 하더라도 두 지점이 동위상 일수는 없다. 전력신호가 선로 길이, 배전선로의 특성, 부하전류 등의 영향으로 두 지점 간에 위상차에 영향을 준다. 3상 배전선로에서 동일 선로의 두 지점간 위상차가  $60[^\circ]$  이내면 동일 위상인 것으로 판별된다. 다음 평형부하 조건에서 동일선로 두 지점간의 위상차가 두 지점간의 거리와 부하전류에 따라 어떻게 변동하는지가 분석되었다. 이때는 3상 배전선로를 평형선로와 평형부하라는 가정을 사용하여 단상, 집중정수 모형으로 기술하였고, 키르히호프 전압법칙에 의한 위상차를 계산하는 해석 방법을 사용하였다. 전송지연, 부하 역률, 및 선로 정수에 따른 영향으로 50[km] 선로 전송에서 선로 양단간에 총  $10[^\circ]$  정도의 위상 차이가 발생하는 것으로 발표되었다[6].

3상 선로에서 부하의 불 평형에 따른 추가적인 위상차가 존재할 것으로 기대한다. 불 평형 정도에 따른 선로간의 위상차와 선로 전류 특성에 따른 위상차 등이 존재할 것이다.

본 논문에서는 선로 손실을 고려한 3상 불 평형 부하에 대한 위상 해석 방법을 제시하고자 한다. 2장에서 3상 불평형 부하를 해석하기 위한 위상 검출 이론을 기술하고, 3장에서는 불평형 부하를 고려한

Simulink 모델을 수립한다. 4장에서는 평형 부하시 선로의 길이, 부하전류 등에 따른 위상차를 분석한 후, 부하 불평형에 따른 추가적 위상차 발생에 대하여 설명한다.

## 2. 3상 배전선로 위상차 모델링

송배전망에서 동일 선로의 두 지점 간의 위상차를 분석할 수 있는 모델을 개발한다. 배전망은 3상 전원, 차단기, 배전선로, 변압기, 부하, 및 접지 등으로 구성된다. 배전계통은 특히 배전선로는 변전소를 중심으로 방사 형태로 분기되어 구성된다.

그림 1은 한 변전소에서 하부로 공급되는 3상 4선식 다중접지를 갖는 배전선로의 모델을 보여준다. 와이(Y) 결선의 평형 3상 전원과 부하에 대하여 회로의 전압, 전류, 전력 등에 대한 해석을 한다. 상 전원 전압( $v_a, v_b, v_c$ )과 부하 임피던스( $Z_a, Z_b, Z_c$ )를 갖는 회로에 대하여 변전소 측에 상전류( $i_a, i_b, i_c$ )가 흐른다고 가정한다. 그리고 선로에 인가되는 전원의 파형이 정현파라고 가정한다. 3상 전압 신호의 개별 상 전압은  $120[^\circ]$  위상차가 있으며,  $60[\text{Hz}]$ 이다. 3상의 개별 상을 구분하기 위하여 A, B, C 기호를 사용한다.

전력 에너지가 전송선로를 따라 송신에서 수신 측으로 흐르는 방사형태의 경우, 특히 배전선로 경우 원격 두 지점 간에 선로정수, 변압기 결선 방식, 선로 길이, 및 부하 종류 등에 따른 전압강하로 위상차가 발생하게 된다. 그리고 위상차는 전류의 흐름 변화에 따라 변한다.

배전선로는 키르히호프 회로 이론에 기반한 정적모델 대신에 전송과 이론이 적용되어 분포 정수 회로로 모델링된다. 3상의 배전선로가 충분히 연가되어 물리적으로 선로가 평형되어 있다. 선로를 통한 전력 신호는 전자파의 전송이론에 따라 이동한다. 전력 신호에 대한 전송 방정식이 (1)식과 같이 주어진다. 전송선로에서의 전압, 전류의 크기와 위상이 시간과 위치에 따라 변화한다. 추가로 전송선로 방정식에서 전압은 선로 종단의 부하 임피던스  $Z_L$  에 따른 반사계수 영향으로 변동한다.

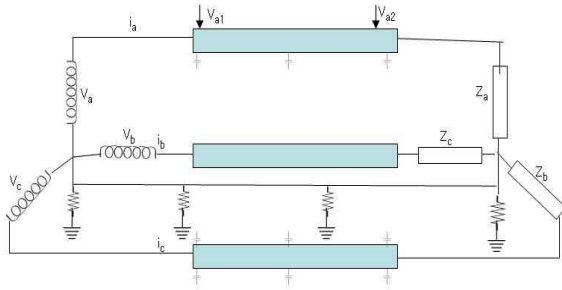


그림 1. 3상4선식 배전선로 모델  
Fig. 1. 3 phase-4 wire distribution line model

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial t} = -Ri(z,t) - L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial t} = -Gv(z,t) - C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t}$$

여기서 R, L, G, C는 각각 단위 길이 당 직렬 저항 [Ω/m], 직렬 인덕턴스[H/m], 병렬 컨덕턴스[S/m] 및 병렬 정전용량[F/m]이다.

동일 배전선로 상의 서로 다른 지점을 나타내기 위하여 1과 2의 아래첨자 기호를 사용한다. 예로서 배전선로 1 지점 A, B, C 상에서의 전압은 (2)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} v_{a1} &= v_{a1m} \sin(\omega t - \theta_{a1}) \\ v_{b1} &= v_{b1m} \sin(\omega t - 120^\circ - \theta_{b1}) \\ v_{c1} &= v_{c1m} \sin(\omega t + 120^\circ - \theta_{c1}) \end{aligned} \quad (2)$$

또 다른 2 지점에서의 A, B, C 상의 전압은 (3)과 같이 주어진다. 개별 상 전압의 크기와 위상차가 다르다.

$$\begin{aligned} v_{a2} &= v_{a2m} \sin(\omega t - \theta_{a2}) \\ v_{b2} &= v_{b2m} \sin(\omega t - 120^\circ - \theta_{b2}) \\ v_{c2} &= v_{c2m} \sin(\omega t + 120^\circ - \theta_{c2}) \end{aligned} \quad (3)$$

1, 2 지점에 대한 위상을 결정하기 위하여 시간축의 전압 파형을 주파수 영역의 신호로 변환한다. 60[Hz] 주파수 성분만을 포함하고 있다는 가정 하에서 전압

신호를 진폭과 위상 성분의 페이저(phasor)로 표현할 수 있다. 페이저는 원점을 기준으로 크기와 위상이라는 방향을 갖는 벡터와 같이 표현된다. 오일러 공식을 사용하여 전압 신호 파형을 페이저로 (4), (5)와 같이 변환한다.

$$v_{a1} = v_{a1m} \sin(\omega t - \theta_{a1}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= v_{a1m} \operatorname{Re}\{e^{j(\omega t - \theta_{a1})}\} \\ &= v_{a1m} \operatorname{Re}\{e^{j\omega t} e^{-j\theta_{a1}}\} \end{aligned}$$

$$v_{a2} = v_{a2m} \sin(\omega t - \theta_{a2}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &= v_{a2m} \operatorname{Re}\{e^{j(\omega t - \theta_{a2})}\} \\ &= v_{a2m} \operatorname{Re}\{e^{j\omega t} e^{-j\theta_{a2}}\} \end{aligned}$$

개별 지점의 위상 값이 시간에 따라 지속적으로 변동한다. 따라서 개별 지점에서 위상을 결정하기 위하여서는 측정 두 지점 간에 동기화가 이루어져야 한다. 동기화 조건에서 1과 2 지점의 위상을 구하고, 차이를 계산하면 (6)와 같이 된다.

$$\text{위상차 } \theta = \theta_{a1} - \theta_{a2} \quad (6)$$

일반 전기회로망 이론으로는 전송회로 방정식 (1)을 푸는 것이 쉽지 않다. 개별 지점에서의 위상을 계산하는데 디지털 컴퓨터를 사용하여 다양한 방법이 사용될 수 있다. 조류계산, 고장전류 계산, EMTP 해석 등의 방법 등이 있다. 실제적 전송선로에 대한 모델링 및 해석은 EMTP가 더 이상적이다. 하지만 3상 선로가 충분히 연가가 되었다고 가정할 때, MATLAB은 다선식 선로에 대하여 대칭성분 방법으로 해석이 가능하며, 복소수를 포함한 우수한 신호처리 기능을 갖고 있다. 그래서 본 논문에서는 MATLAB의 Simulink 소프트웨어를 사용한다[7]. 다른 프로그램 소프트웨어에 비하여 Simulink 소프트웨어의 장점은 소스코드에 대한 컴파일과정이 필요 없다. 그리고 시뮬레이션 모델이 기능적 블록들로 구성된다.

미분 방정식으로 표현되는 배전선로에 대하여,

Simulink를 사용하여 특정지점에서 위상 값을 계산하는 알고리즘은 그림 2와 같다. 계측 블록을 통한 전압 신호를 복소수 형태로 출력하고, 다시 크기와 위상의 패이서로 변환한다[8]. 이어서 라디언(radian) 위상 출력을 360[°] 형식으로 변환한다.

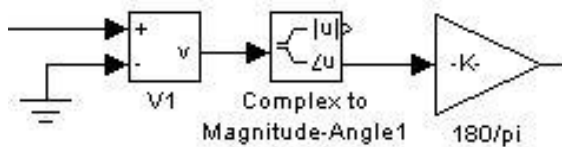


그림 2. Simulink 위상 값 계산 과정  
Fig. 2. Phase calculation process by Simulink

### 3. 불평형 부하 배전계통 Simulink 모델링

불평형 부하 조건에서 위상차 시뮬레이션을 위한 배전 전원, 선로모델, 불평형 부하, 변압기 모형, 접지저항, 및 위상차 계측 시스템에 대한 Simulink 모델에 대하여 설명한다.

#### • 배전 전원 공급 모델

시뮬레이션을 위하여 배전 계통의 입력 전원을 내부 저항과 인덕턴스를 갖는 무한 전원으로 표현한다. 부하에서 소요되는 전력을 충분히 공급해 줄 수 있는 전력용량을 갖는다. 전원이 3상 4선식 와이(Y) 결선되어 있으며 정현파 전압을 공급한다. 중성점에는 접지저항이 연결되어 있다. 전원의 출력은 변압기를 통하여 와이(Y) 또는 델타( $\Delta$ ) 결선되어 배전계통에 공급된다. 배전계통에 공급되는 A, B, C 상 전압의 실효치 13.8[kV]와 선간전압 22.9[kV]을 사용한다.

#### • 불평형 3상 부하모델

실제부하를 시뮬레이션 모델로 만드는 것은 매우 어려운 작업이다. 부하가 시간에 따라 변동하기도 하며 또한 인가전압에 따라 임피던스가 변동한다. 따라서 흐르는 전류의 크기와 위상차도 달라진다. 일반적인 배전 부하 모델로는 정 임피던스, 정 전력, 정 전류, 또

는 정 역률 등이 사용된다. 정 임피던스 부하 모델은 규정된 주파수에서 직렬로 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 값을 갖는 선형 부하이다. 부하에서 소모되는 유효 및 무효 전력은 인가된 전압의 제곱에 비례하는 특성을 갖는다. 본 논문에서 사용하는 정 전류 부하 모델은 선로별 임의의 전류를 할당하는데 유용하다. 특히 불평형 부하를 모델링 하는데 편리하다.

#### • 위상차 측정 시스템

그림 3은 동일 선로의 두 지점에 대한 위상차를 계산하는 계측시스템을 보여준다. 개별 상 전압에 대한 위상 값 측정 및 위상차를 연산하는 회로가 포함되어 있다.

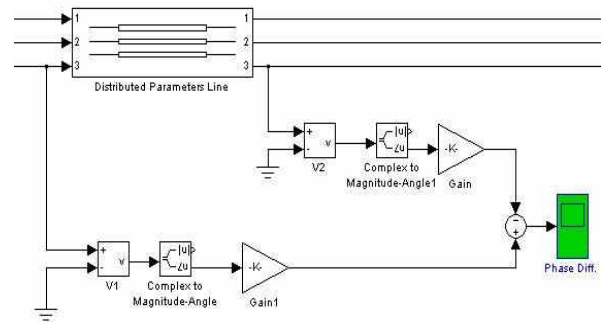


그림 3. 위상차 계측시스템  
Fig. 3. Phase difference measurement system

#### • 변압기 모델

변압기의 모델은 1, 2차 전압의 비와 결선 방식을 설정할 수 있다. 시뮬레이션에 사용한 변압기 사양은 단상 변압기 3개로 3상 변압기를 구성하며, 1차와 2차에는 와이와 델타 결선이 가능하다. 무손실 변압기 경우는 1, 2차 전압 간에 위상 변동이 발생하지 않지만, 논문에서는 내부 저항과 인덕턴스에 따른 내부 손실을 고려한 변압기 모델을 사용한다. 최근의 배전용 변압기는 저항과 유도성 전압강하가 매우 적어, 통상 변압기를 통한 전압 위상변동은  $\pm 5^\circ$  이하로 계산된다.

#### • 접지저항

부하 불평형으로 전압, 전류 및 위상분포가 영향을

받는다. 접지는 단지 저항성분을 갖는 것으로 모델링 된다. 22.9[kV] 다중접지 계통 접지공사 기준 값인 접지저항 5[Ω]을 갖는 것으로 가정한다[9].

• 배전선로 모델

배전선로가 충분히 연가가 되었다고 가정할 때, 중성선을 포함한 4선식 다도체 선로에 대하여도 Carson과 Kron의 선로 모델링 방식을 사용하여 3선식의 선로 분포정수 선로로 모델링된다. Simulink에서는 전송선로모형에 다양한 모델을 지원하고 있다. 분포정수 또는 집중정수 모델이 있고, 또 파이(PI) 또는 티(T) 형 모델이 있다. 이때 선로는 영상분, 정상분, 역상분의 대칭성분 방법으로 표현된다[10-12]. 충분한 연가조건으로 정상분과 역상분은 동일하다[7,12]. 시뮬레이션에 사용할 배전선로 분포정수 성분별 값은 다음과 같다[13].

영상분  $R_0=0.23[\Omega/\text{km}]$ ,  $L_0=5.478[\text{mH}/\text{km}]$ ,  
 $C_0=0.008[\mu\text{F}/\text{km}]$   
 정상분  $R_1=0.17[\Omega/\text{km}]$ ,  $L_1=1.21[\text{mH}/\text{km}]$ ,  
 $C_1=0.00969[\mu\text{F}/\text{km}]$

4. 시뮬레이션 결과 및 해석

두 지점의 위상차를 전송시간, 분포정수, 변압기 내부지연, 전류, 및 부하 종류에 따라 분석하기 위하여 그림 4의 배전선로 모델을 참고한다.

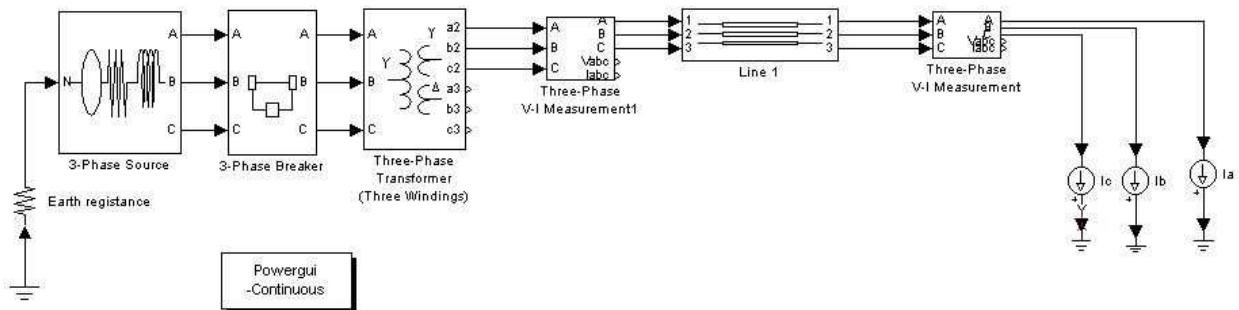


그림 4. Simulink 배전선로 모델 예  
 Fig. 4. Sample of Simulink distribution line model

먼저 전기 전송에 따른 위상차 분석을 위하여 전기 신호는 빛 속도로 이동한다고 가정한다. 공간적으로 전기 신호가 일정 거리를 전송하는데 시간이 요구되며, 이는 동일시간에 두 지점간 위상이 동일하지 않다는 것을 의미한다. 선로길이 14[km]는 1[°]의 위상차에 해당한다[6]. 선로길이에 비례하여 두 지점간의 위상차도 증가한다. 표 1은 10[km], 50[km], 100[km]의 선로 길이에 따른 위상차가 증가하는 것을 보여준다. 선로 길이가 100[km]인 경우 전파 전송 지연에 따른 7.14[°] 위상차가 된다.

표 1. 전송지연에 따른 위상차 예  
 Table 1. Phase difference by signal propagation delay

전송거리	10[km]	50[km]	100[km]	200[km]
위상차이	0.71[°]	3.57[°]	7.14[°]	14.28[°]

선로 손실 분포정수에 따른 전압강하로부터의 위상차에 대하여 기술한다. 그 차이는 분포정수에 따라 다르며, 또한 동일 분포정수 선로에 대하여서도 선로 길이에 따라 다르다. 전송선로의 길이 변화에 따른 두 지점간의 위상차가 그림 5과 같다. 배전 선로가 길어짐에 따라 비례하여 알려져 있다. 단지 선로길이에 따른 영향 분석을 위하여 3상 역률 1.0인 평형부하 200[A] 상전류가 사용되었다.

변압기 내부 임피던스에 따른 위상차를 분석하기 위하여 내부 저항 0.015[pu], 내부 인덕턴스 0.035[pu]를

갖는 변압기를 사용한다. Y-Y 결선에 1차 전압 345[kV]와 2차 전압 22.9[kV]이 사용된다. 10[MVA] 변압기 용량에 200[A] 3상평형 부하전류 흐른다고 가정한다. 변압기 1, 2차 양단 전압에 대하여 0.33[°] 위상 차이를 보인다.

부하 전류(I) 크기에 따른 위상차 분석 결과를 그림 6에 보여준다. 50[km], 100[km]의 선로길이 각각에 대하여 부하전류에 따른 위상차를 계산하였다. 해석을 위하여 역률 1.0의 정전류 부하가 사용되었다. 동일 전류 100[A] 조건에서 두 지점간의 선로길이 50[km]인 경우는 7.5[°], 100[km]에 대하여는 15.6[°]의 위상차를 나타낸다.

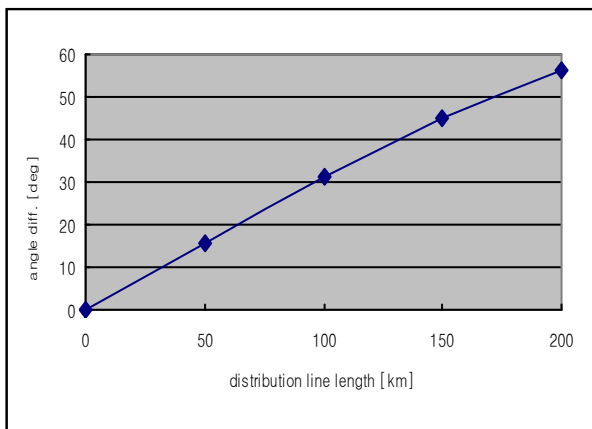


그림 5. 배전선로 길이에 따른 위상 차(200[A] 상전류)  
Fig. 5. Phase difference vs line length(200[A] phase current)

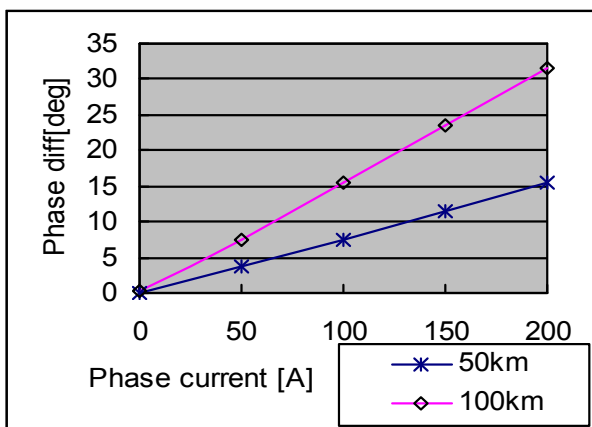


그림 6. 부하전류와 선로 길이에 따른 위상 차이  
Fig. 6. Phase difference vs load and line length

두 지점간의 위상차 주요 요인들에는 전송, 선로 분포정수, 변압기 내부 임피던스, 전류 크기 등으로 요약된다. 주요 요인에 의한 전체 위상차가 100[A], 50[km] 배전선로 경우는 3.57[°]+7.5[°]=11.1[°], 200[A], 100[km] 선로에 대해서는 7.14[°]+32[°]=39[°] 정도가 된다.

다음은 전류가 위상차에 영향을 주는 것으로 기술되었는데, 전류의 불평형에 따른 위상의 변화를 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 배전선로와 전원 전압이 평형을 유지한다 하더라도 부하 불평형 때문에 전압 불평형 및 추가 위상차를 유도한다. 전류 불평형을 기술하기 위하여 IEEE 등에서 사용하는 전압 불평형률 지수 계산법[14]을 인용하여 전류 불평형률(CUF)에 대한 정의를 식 (7) 또는 (8)과 같이 유도하여 사용한다.

실시간 전류를 사용한 경우는 다음과 같이 정의된다.

$$\%CUF = \frac{\text{max current deviation from the avg}}{\text{avg phase current}} \times 100 \quad (7)$$

$$= \frac{(\max(i_a, i_b, i_c) - (i_a + i_b + i_c)/3)}{(i_a + i_b + i_c)/3} \times 100$$

또는 페이서 개념을 사용하여

$$\%CUF = \frac{\text{max current deviation from the avg}}{\text{avg phase current}} \times 100 \quad (8)$$

$$= \frac{(\max(I_a, I_b, I_c) - (I_a + I_b + I_c)/3)}{(I_a + I_b + I_c)/3} \times 100$$

예로서 역률 1.0인 3상 부하전류의 페이서 크기가 각각  $I_a=100[A]$ ,  $I_b=200[A]$ ,  $I_c=300[A]$ 인 경우 부하 전류 불평형률은 50[%]가 된다.

전류 불균형 시뮬레이션 시나리오에서 전체 전류 부하는 일정하다고 가정한다. B 상의 부하 전류는 일정하도록 유지하고, A상 전류가 증가하면, C 상의 전류가 동일한 양 만큼 감소하도록 하여 전체 전류량은 일정하게 한다. 그림 7은 전류 불평형률(CUF)에 대한 A, B, C 상의 전류 값을 보여준다.

두 지점간 100[km] 길이 선로에서 전류 불평형률에 따라 전원측근 지점의 개별 위상 값 시뮬레이션 결과를 그림 8에 보여준다. A, B, C 상 전압 신호에

대한 위상각이 각각  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$ ,  $+120^\circ$  에서 약간 변동한 결과를 볼 수 있다. 개별 상에 대한 전압 신호의 위상 값의 변화가 매우 적은데, 이는 전원 측에서 부하 전류 불평형의 영향을 적게 받는다는 것을 의미한다.

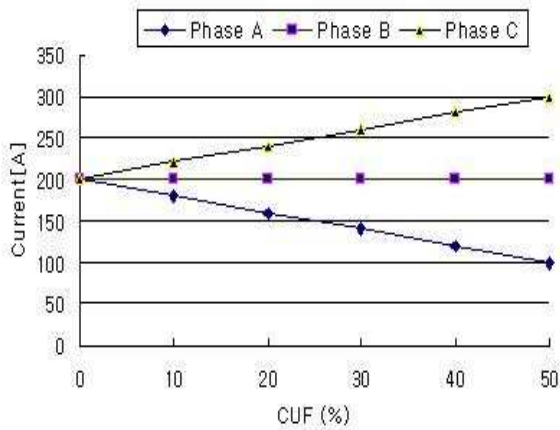


그림 7. 부하 전류 불평형율과 개별 상 부하전류 크기  
Fig. 7. Magnitude of load current vs CUF

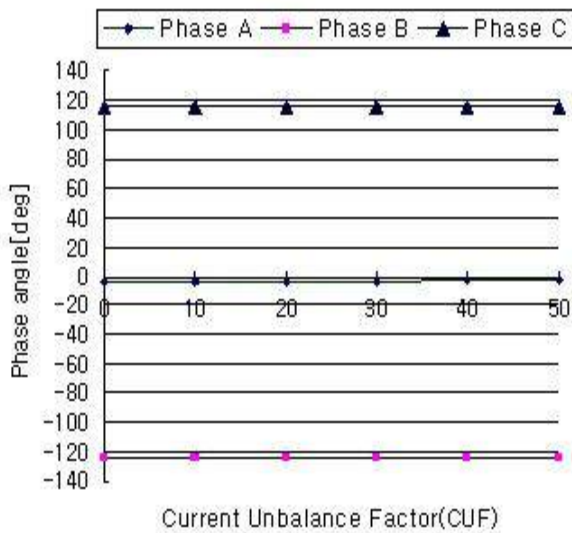


그림 8. CUF에 따른 위상 값 (전원측)  
Fig. 8. Phase difference vs CUF (source side)

시뮬레이션에서 부하 지점의 개별 위상이 그림 9와 같다. 전압신호에 대한 개별상의 위상값이 전류 부하 불평형율에 비례하여 변화가 증가한다.

이전의 평형 전류 부하시 두 지점간의 위상차 분석 결과가  $32^\circ$ 였으나, 불평형의 영향으로 그림 10처럼 위상차가 변동하는 것을 알 수 있다. A 상 선로에서는 전류 값이 감소함에 따라 위상각 차가 감소하고, B와 C상 선로에서는 최대  $56^\circ$ 과  $49^\circ$ 까지 위상각이 증가하는 것을 알 수 있다.

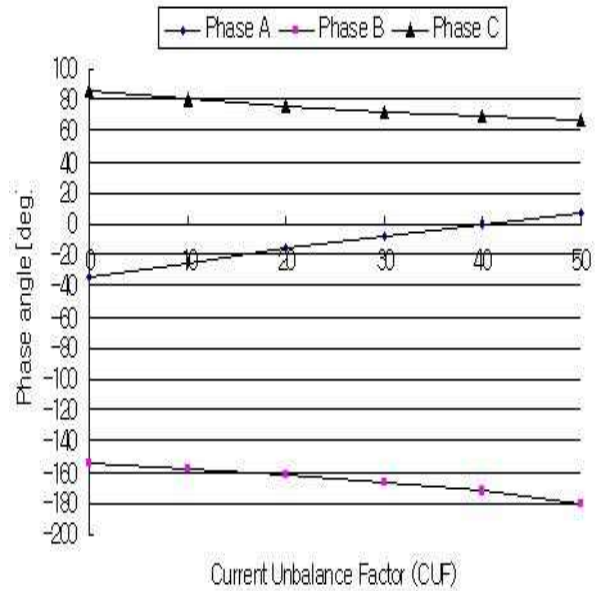


그림 9. CUF에 따른 위상 값 (부하측)  
Fig. 9. Phase difference vs CUF (load side)

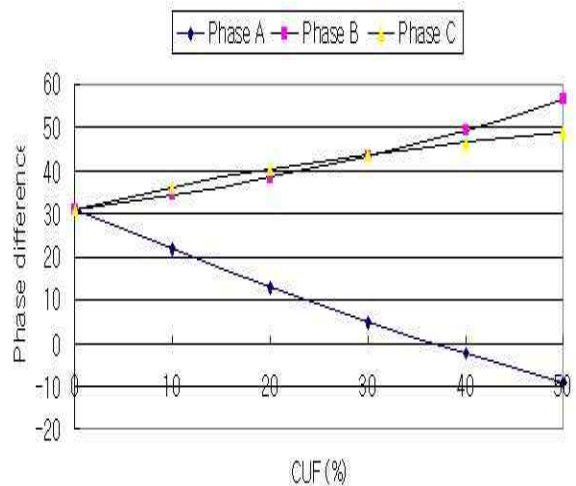


그림 10. 개별 선로 양단간 위상각 차이  
Fig. 10. Phase difference between both ends

불평형율이 30[%]인 경우 C상 경우 위상차가 32[°]에서 43.7[°]로 증가하는 것으로 시뮬레이션 되었다. 그리고 이때의 C상 선로 양단간 전압파형은 그림 11과 같다. 위상차의 증가는 현지에서의 위상판별 오류 가능성을 증가시키게 된다.

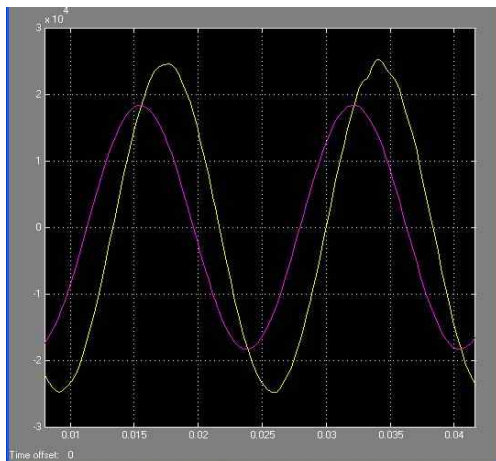


그림 11. C상 선로 양단 전압 파형 (100[km], 부하 불평형율 30[%])  
 Fig. 11. Phase C Voltage waveform at both ends(100[km], CUF of 30[%])

배전계통에서는 실시간으로 부하가 변동한다. 현지에서의 위상 판별 작업이 평형부하 조건보다 불평형 부하로 위상 판별에 더욱 제약을 준다. 측정 선로별로 다른 위상판별 오류 가능성을 야기하기도 한다. 위상 판별의 신뢰성을 위하여서 광역 배전계통에 다수의 기준점이 있어야 하는 이유가 된다. 특히 배전선로의 특정부위에서 역률조정용 장치, 변압기 결선 방식의 변동, 선로 분포정수의 변동, 또는 고장 같은 극심한 부하 불평형 발생 경우 위상 판별 오류 가능성이 증가한다. 그러한 특수 상황을 위하여서는 기준장치에 별도의 정보가 저장되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

배전선로의 원격 현장에서 절대 위상을 판별하기 위해서 기준점 위상과 현지의 위상을 비교하는 방

식을 사용한다. 3상 선로에서는 그 비교 위상차가 60[°] 범위내에 들어야 오류없이 절대상 판별이 가능하다.

Simulink를 사용하여 부하 전류 불평형에 따른 선로에서의 위상차를 분석하기 위하여, 배전선로 모델링과 위상차 측정법에 대한 이론적 및 실제적 방법을 제시하였다.

평형 조건보다 불평형에 따른 선로별 위상차가 다르게 나타나는 것을 시뮬레이션 하였다. 전송에 따른 지연, 선로 분포정수에 의한 지연, 부하 전류 크기에 의한 지연 등의 영향 등으로 11~39[°]의 위상 차가 계산되었다. 여기에 부하전류 불평 조건에 의해 추가적인 위상차가 발생하였다. 30[%] 불평형 조건에서, 선로 분포정수에 의한 위상차가 평형조건에서의 30.8[°]보다 증가하여 43.7[°]의 위상차를 갖는 것으로 시뮬레이션 되었다. C상 선로에 추가적인 위상차 12.9[°]가 나타났다.

이러한 연구결과들은 기준점과 현지 지점 간에 위상차가 특정 범위에 들도록, 배전계통에 적정규모로 기준점을 설치 및 운영하여야 한다는 것을 제시한다. 수천 [km]의 송배전 선로 경우에는 기준점과 측정 지점 간의 위상 차이가 많이 존재하여 다수의 기준점 제공이 반드시 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. (주)에디테크 최상준 대표로부터의 받은 지도에 매우 깊은 감사를 드립니다. ((GRRC SUWON 2011-B5), 상황대응 기술 및 시스템 개발)

### References

- [1] John McDonald, Electric Power Substations Engineering, 2nd, CRC Press, 2007.
- [2] Bouvrette, Michel, "Telephasing method and system for remotely identifying unknown phases of transmission or distribution lines within an electrical network," US Patent 4626622, 1986.
- [3] Pomatto, Lawrence A. "Apparatus and method for identifying the phase of a three phase power line at a remote location," US Patent 5510700, 1996.
- [4] K.E. Martin, et al., "IEEE Standard for Synchrophasers for



Power Systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13, No.1, pp73-77, Jan.1998.

[5] Gregory H. Piesinger, “Apparatus and method for identifying cable phase in a three-phase power distribution network”, US Patent 7,031,859, 2006.

[6] Jae-Jo Lee and Sugoog Shon, “Analysis and Implementation for Phase Identifications of Power Lines”, Information, an International Interdisciplinary Journal, Vol. 13, No. 2, pp 507-5515, March, 2010.

[7] MATLAB Simulink manuals.

[8] Fabio Luiz Bertotti, Marcos Santos Hara, and Paulo Jose Abatti, “A simple method to measure phase difference between sinusoidal signals”, Rev. Sci. Instrum. 81, 115106, 2010.

[9] IEEE Std-142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, 1992.

[10] Carson, J.R., “Wave propagation in overhead wires with ground return”, Bell System Technical Journal, 5, 1926.

[11] Kron, G., “Tensorial analysis of integrated transmission systems”, AIEE Transactions, 71, 1952.

[12] William H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis”, CRC Press, 2002.

[13] W. G. Zhang, etc, “Application of Wavelet Packet Analysis in Phase-to-Ground Fault Detection of Distribution Power System”, The International Conference on Electrical Engineering, 2009.

[14] Kim, J.G, “A New Analysis for Load Unbalance Factor”, The Transactions of Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.55, No.2, pp67-72, 2006.

◆ 저자소개 ◆



**변희정 (卞嬉貞)**

1976년 12월 10일생. 1999년 숭실대학교 정보통신공학과 졸업. 2001년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(석사). 2005년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(박사). 2010년 삼성종합기술원, 삼성전자. 2010년 ~ 현재 수원대학교 IT대학 정보통신공학과 교수.



**손수국 (孫守國)**

1959년 7월 15일생. 1982년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984년 서울대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 미국 University of Texas at Austin 졸업(박사). 현재 수원대학교 정보통신공학과 교수.