

# 배전선로 상시연계점 측정 전압 위상차를 이용한 변전소 모선 위상각 추정 방법

## Substation Bus Voltage Angle Calculation Method Using Voltage Angle Difference Measured at the Tie Switch in the Distribution Line

손 주 환\* · 임 성 일†  
(Ju-Hwan Son · Seong-Il Lim)

**Abstract** - Distribution networks are operated in radial fashion during the normal state. Loop configuration is also required temporally in case of live load transfer among the adjacent feeders. Voltage angles of each substation buses are very important data in order to calculate power flow of the loop structured distribution feeders. This paper proposes substation bus voltage angle calculation method using voltage angle difference measured at the normally open tie switches. Simulation case studies using Matlab simulink have been performed to establish feasibility of proposed method.

**Key Words** : Substation bus voltage angle, Loop structured distribution system, Power flow calculation

### 1. 서 론

배전계통은 평상시에 방사상으로 운전하지만 정전복구나 부하 균등화 등의 이유로 건전부하를 다른 선로로 절체 할 때는 일시적으로 루프구조로 운전된다. 그 이유는 부하 절체 시 정전이 발생하는 것을 막기 위해 루프구조로 변경한 후 다른 선로로 부하를 절체하기 때문이다. 배전계통이 루프구조가 되면 배전선로 인출 모선의 전압 위상각 차로 인해 순환전류가 흐르게 된다. 두 모선의 위상각차가 크면 매우 큰 순환전류가 흘러 보호기기가 동작하여 배전선로에 정전이 발생할 수 있다. 순환전류를 계산하기 위해서 루프운전 배전계통의 조류계산을 해야 되는데 슬랙이 여러개인 문제가 되기 때문에 해석이 매우 어렵다. 기존 배전계통 조류계산 방법으로는 해석이 불가능하다. 선행연구에서 루프배전계통 조류계산방법이 개발되어 있으나 이를 적용하기 위해서는 해석하고자 하는 범위내의 모든 변전소 모선에 대한 상대적인 위상각을 알아야 한다.

배전계통 루프운전 해석에 관한 연구는 활발히 진행 되었다. 분산전원을 고려한 조류계산에 관한 연구로는 FBS(Forward Backward Sweep) 알고리즘을 이용한 방법 [1], 적응형 조류계산 알고리즘을 사용한 연구 [2] 그리고 분산전원을 PV, PQ 모델로 모델링 한 후 배전계통을 해석하는 연구 [3]가 선행되었다. 위 연구들은 분산전원이 계통에 연계되면 전원공급 루트가 두 방향이

되어 루프구조가 되었다고 고려하여 배전계통을 해석 하고 있다. 따라서 실제 서로 다른 변전소의 모선에서 인출된 두 선로가 루프가 된 경우를 해석하기에는 어려움이 있다. 서로 다른 배전선로가 루프가 된 경우를 해석한 연구로는 다음과 같은 연구들이 선행 되었다. 루프계통에서의 부하균등화에 관한 연구 [4] 그리고 스마트그리드 환경에서의 배전계통 구성에 관한 연구 [5]가 선행 되었다. 위 연구들은 서로 다른 변전소에서 인출된 두 선로는 고려하지 않고, 동일뱅크에서 인출된 두 배전선로의 루프운전을 해석하고 있다. 서로 다른 뱅크에서 인출된 두 선로의 루프운전 여부 판단에 관한 연구로는 배전계통의 Closed-Loop 가능성 판단에 관한 연구 [6]가 선행되었다. 위 연구는 서로 다른 변전소에서 인출된 모선들의 루프운전 가능 여부를 판단하고 있으나, 이때 사용된 데이터가 현재 계통에서 측정되는 데이터를 이용하고 있지 않다. 그리고 루프가 되었을 때 두 모선의 전압의 위상차는 0도로 가정한 후 오프라인 해석 툴을 사용하여 루프운전 판단 여부를 확인하였다. 따라서 현재 배전계통의 상황을 반영한 해석이라고 보기 어렵다.

본 논문에서는 배전선로의 상시개방점 양단에서 측정된 전압 위상차를 기반으로 변전소 모선 위상각을 추정하는 방법을 제시한다. 변전소 모선 위상각을 알면 루프구조 배전계통의 조류계산이 가능하므로 건전부하절체 등 루프운전이 요구되는 배전계통 운영에 다양하게 활용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1장은 연구배경 및 제약조건에 대해서 설명한다. 2.2장에서는 상시연계점 양단에서 측정되는 전압의 위상각 차이를 이용하여 변전소 모선 전압 위상각을 추정하는 방법에 대해 설명한다. 2.3장에서는 사례연구를 통해 제안하고 있는 변전소 모선 전압 위상각 추정 알고리즘의 정확성을 검증한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering  
Kyungnam University, Korea

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr

\* Depart. of Electrical Engineering, Kyungnam Univ., Korea

Received : September 19, 2015; Accepted : December 17, 2015

## 2. 본 론

본 절에서는 변전소 전압 위상각 추정의 필요성과 어려움에 대해 설명하고, 주변압기와 선로에서 발생하는 전압강하로 인한 위상각 변화량을 계산하는 방법에 대해 설명한다. 다음으로 마지막으로 반복 추정법을 사용하여 모든 모선의 전압 위상각을 추정하는 방법에 대해 설명한다. 마지막으로 계산된 모선 위상각을 패턴으로 관리하는 방법에 대해 설명한다. 그림 1은 제안하고 있는 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다.

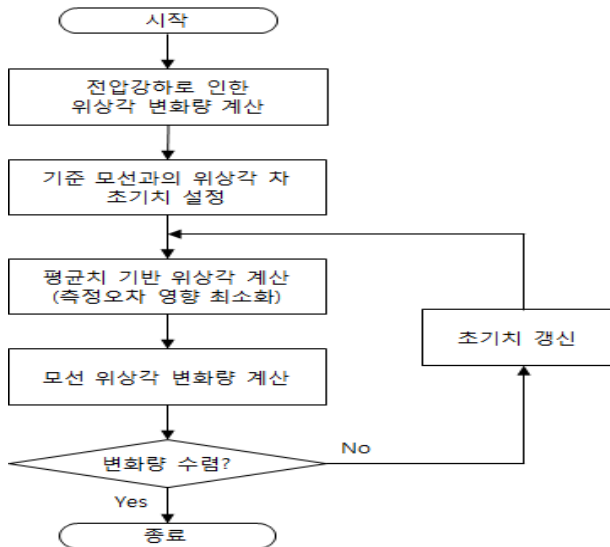


그림 1 알고리즘 흐름도  
Fig. 1 Flowchart of algorithm

### 2.1 연구배경 및 제약조건

#### 2.1.1 연구배경

일반적인 배전계통은 방사상으로 운전되고 있기 때문에 슬랙 모선이 하나인 계통으로 아주 손쉽게 해석할 수 있다. 하지만 배전계통의 상시연계점이 변경되는 경우 현재 연계점 개폐기를 투입하고 변경할 연계점 개폐기를 개방하기 때문에 일시적으로 루프운전을 하게 된다. 이때 모선의 전압 위상각 차이가 큰 두 선로가 루프가 되면 과전류가 흘러서 보호기기가 동작할 수 있다. 따라서 방사상 운전에서 루프운전으로 변경하기 전에 반드시 순환전류를 계산해서 보호기기가 동작하는 것을 막아야 된다. 그리고 상시연계점 변경은 배전계통 전체의 부하균등화나 손실최소화를 목적함수로 하는 상시연계점 최적화 알고리즘을 이용하기 때문에 모든 변전소의 전압 위상각을 알아야 된다. 만약 최적화 알고리즘의 해로 5개의 변동점이 도출되었는데 이 중에서 단 하나라도 변동 시 과전류가 발생하게 된다면 이 해는 의미가 없기 때문이다.

배전계통으로 공급되는 전력량은 송전계통의 운전상황에 의해

서 결정되는 값이기 때문에 알 수 있는 값이 아니다. 따라서 일반적으로 배전선로 인출단을 슬랙모선으로 모델링해서 조류계산을 수행한다. 방사상 계통에서는 아무런 문제가 없으나 루프 계통인 경우에는 슬랙모선이 두 개가 되어서 계통을 해석 할 수 없게 된다. 현재 배전계통의 멀티 슬랙 문제를 해결하기 위해서 두 개의 배전선로 인출단 중에서 하나는 슬랙모선으로 모델링 하고, 나머지는 P-Q 모선으로 모델링하여 계통을 해석하고 있다. 그리고 P-Q 모선의 유효전력과 무효전력은 방사상 구조일 때 측정된 데이터를 사용하여 계산하고 있다. 하지만 계통이 루프가 되면 방사상 구조일 때와 부하 중점이 틀러지기 때문에 루프가 되기 전과 후의 공급전력이 다르기 때문에 정확한 조류계산을 수행하기 힘들다. 그리고 루프가 된 두 선로의 모선 전압 위상각 차이를 모르기 때문에 루프구조가 되었을 때 과전류 발생 여부도 인지 할 수 없다. 따라서 실시간 배전계통 해석을 정확하게 수행하기 위해서는 배전선로 인출 단 중에서 하나의 선로를 슬랙모선으로 모델링 하고 나머지 한 선로를 V- $\theta$  모선으로 모델링해야 된다. 모선의 전압의 크기와 위상각을 알 수 있는 가장 쉬운 방법은 측정하는 것이다. 측정치를 사용하기 위해서는 시각동기가 일치해야 된다. 하지만 각각의 변전소에 설치되어 있는 서로 다른 계측장치에서 시각동기를 맞춘 데이터를 측정하는 것은 힘들다.

#### 2.1.2 제약조건

본 논문에서는 상시연계점 양단에서 측정되는 전압의 위상각 차이를 이용하여 배전선로가 인출되는 변전소의 전압 위상각을 추정하는 방법을 제안하고 있다. 그리고 특정 시점의 순환전류를 계산하기 위해 모선 전압의 위상각을 패턴으로 관리하는 방법을 제안하고 있다. 패턴을 사용하기 위해서 본 논문에서는 모선 전압 위상각은 특정한 패턴이 있다고 가정 하였고, 상시연계점의 위치는 변경되지 않는다고 가정하였다. 변전소 1차측 모선 전압의 위상각은 송전계통의 구성과 각 발전기의 발전량에 의해 결정되는 요소이다. 이러한 송전계통의 발전량은 부하패턴을 이용하여 산정하고 있기 때문에 특정한 패턴을 가지고 운전한다고 생각할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 모선의 전압 위상각도 특정한 패턴을 가지고 있다고 가정하였다. 일반적으로 상시연계점의 변동은 자주 일어나는 것이 아니라 1년에 한번에서 두 번 정도 발생하고 있다. 변동 시점은 배전계통의 신설 및 증설로 인해 배전계통의 운전상황이 변경되었을 경우로써, 변경된 계통을 효율적으로 운전하기 위해서 상시연계점을 변동한다. 특이한 경우로 부하가 급증하여 상시연계점을 변동하는 경우도 발생한다. 하지만 이 경우는 부하가 정상적으로 돌아오면 상시연계점 또한 원래의 위치로 돌아간다. 따라서 본 논문에서는 모선 위상각 추정에 사용되는 상시연계점은 변동되지 않는다고 가정하였다.

### 2.2 변전소 전압 위상각 추정 알고리즘

본 절에서는 상시연계점 양단에서 측정되는 전압 위상각 측정치를 이용하여 변전소 모선의 전압 위상각을 추정하는 방법을 설명한다. 상시연계점은 그림 2에서 보는 바와 같이 서로 다른 두

선로와 연결되어 있는 하나의 개폐기이기 때문에 시각동기가 맞는 두 선로의 전압 위상각을 측정할 수 있다. 그리고 상시연계점 양단에서 전압의 위상각 차이는 식 (1)에서 보는 것처럼 모선의 전압 위상각과 변압기에 의한 위상각 변화 그리고 선로에 의한 위상각 변화로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta_{SW1} = (\theta_{BUS1} - \Delta\theta_{MTR1} - \Delta\theta_{DL1}) - (\theta_{BUS2} - \Delta\theta_{MTR2} - \Delta\theta_{DL2}) \quad (1)$$

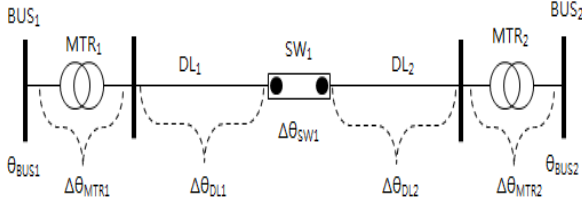


그림 2 상시연계점 양단 위상차 측정치  
Fig. 2 Measured data of angle difference at tie switch

### 2.2.1 전압강하로 인한 전압 위상각 변화량 계산 방법

전압강하로 인한 전압 위상각 변화는 주변압기에서 발생하는 전압강하와 선로에서 발생하는 전압강하로 구분할 수 있다. 주변압기에서 발생하는 전압강하는 변압기의 임피던스를 알고 있기 때문에 변압기로 흐르는 전류를 알면 계산할 수 있다. 그림 3에서 보는바와 같이 주변압기로 유입되는 전류는 변압기 2차측 모선에 연결되어 있는 배전선로 인출단 전류의 합과 동일하다. 따라서 주변압기 2차측에 n개의 배전선로가 연결되어 있다면 변압기 유입전류는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 배전선로 인출단 전류는 선로 인출단에 설치되어 있는 차단기에서 측정 가능한 값이다.

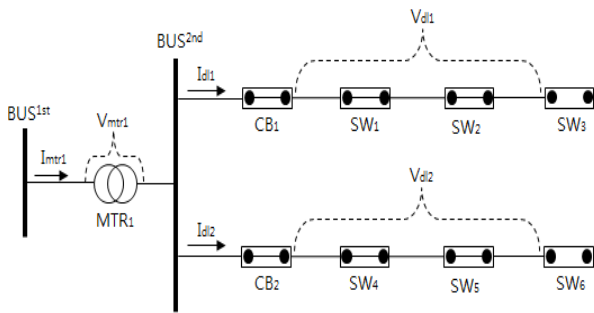


그림 3 전압강하로 인한 위상각 변화  
Fig. 3 Angle difference due to voltage drop

$$I_{mtrj} = \sum_{k=1}^n I_{dlk} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

배전선로에서 발생하는 전압강하는 구간부하 정보와 차단기에서 측정되는 전압, 전류 그리고 역률 정보를 이용하여 방사상 배

전계통 조류계산으로 알 수 있다. 현재 구간부하 데이터는 변전소 인출 차단기에서 측정되는 전압, 전류, 역률 데이터와 단말장치로부터 측정되는 전압, 전류, 역률데이터를 기반으로 생성된다. 차단기에서 측정되는 데이터는 변전소 내부에서 측정되는 값이기 때문에 신뢰도가 높다. 하지만 전주에 설치되어 있는 단말장치에서 측정되는 데이터는 신뢰도가 낮으며 특히 전압의 경우 오차가 매우 크다. 본 논문에서는 전압 측정오차의 영향을 최소화 하기 위해 모든 개폐기의 전압 초기값을 1[PU]로 설정한 후 방사상 계통 조류계산을 수행 한다. 각 구간의 부하는 양분하여 구간 양단에 연결되는 것으로 모델링하였으며, 배전선로 인출 차단기에서부터 순차적으로 전압강하 계산을 수행한다. 그림 4는 방사상 배전계통 조류계산 알고리즘을 나타내고 있다.

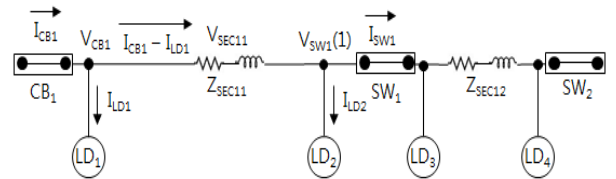


그림 4 방사상 배전계통 조류계산 방법  
Fig. 4 Power flow method for a radial distribution networks

가장먼저 부하가 연결되어 있는 지점의 전압과 부하량을 이용하여 부하로 빠져나가는 전류를 계산한다. 부하 LD1로 빠져나가는 전류  $I_{LD1}$ 은 식 (7)을 이용해서 계산할 수 있다.  $V_{CB1}$ 은 차단기 CB1에서 측정되는 전압이고,  $P_{LD1}$ 과  $Q_{LD1}$ 은 부하 LD1의 유효전력과 무효전력이다.

$$I_{LD1} = \frac{P_{LD1}}{V_{CB1} \cos(\text{ATAN}(\frac{Q_{LD1}}{P_{LD1}}))} \quad (7)$$

부하 LD1로 흐르는 전류  $I_{LD1}$ 을 알면 식 (8)을 이용하여 구간 SEC11에서 발생하는 전압강하를 계산 할 수 있고, 개폐기 SW1의 전압  $V_{SW1}(1)$ 은 식 (9)로 쉽게 계산할 수 있다.  $V_{SEC11}$ 은 구간 SEC11에서 발생하는 전압강하를 나타내고,  $I_{CB1}$ 은 차단기 CB1에서 측정된 전류를 나타내고 있다.

$$V_{SEC11} = V_{CB1} - (I_{CB1} - I_{LD1})Z_{SEC11} \quad (8)$$

$$V_{SW1}(1) = V_{CB1} - V_{SEC11} \quad (9)$$

위의 절차에 따라 순차적으로 단순 전압강하 계산을 수행하면 모든 개폐기들의 전압을 계산할 수 있다. 모든 개폐기들의 전압 초기치를 1[PU]로 설정하였기 때문에 개폐기들의 초기치  $V_{SWi}(0)$ 과 계산된 개폐기들의 전압  $V_{SWi}(1)$ 은 차이가 발생한다. 따라서 개폐기 전압의 변화량이 수렴하지 않는다면 초기치를 계산된 값으로 갱신한 후, 수렴할 때 까지 구간부하 계산과 방사상 계통 조류계산을 반복 수행한다.

### 2.2.2 반복 추정법 기반 각 모선 위상각 추정 알고리즘

그림 5는 모선 1을 기준모선으로 했을 때 각 모선의 위상각을 나타내고 있다. 모선2에 연결되어 있는 상시연계점은 개폐기 SW<sub>1</sub>, SW<sub>2</sub> 그리고 SW<sub>3</sub>이다. 각 개폐기별로 측정 오차가 다르기 때문에 개폐기별 측정오차의 영향을 최소화하기 위해서 측정된 위상각 차의 평균을 이용하여 모선의 위상각 차이를 추정한다. SW<sub>1</sub>의 경우 기준모선과 직접적으로 연결되어 있기 때문에 모선 Bus<sub>2</sub>와 모선 Bus<sub>1</sub>의 위상각 차 θ'<sub>2</sub>는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (10)에서 Δθ<sub>SW1</sub>은 상시연계점 SW1에서 측정된 위상각 차를 의미한다. Δθ<sub>21</sub>과 Δθ<sub>12</sub>는 각각 모선 Bus<sub>2</sub>에 연결되어 있는 주변압기와 선로에서 발생하는 위상각 변화량 Δθ<sub>MTR2</sub>와 Δθ<sub>DL1</sub>의 합, 모선 Bus<sub>1</sub>에 연결되어 있는 주변압기와 선로에서 발생하는 위상각 변화 Δθ<sub>MTR1</sub>과 Δθ<sub>DL4</sub>의 합을 나타내고 있다.

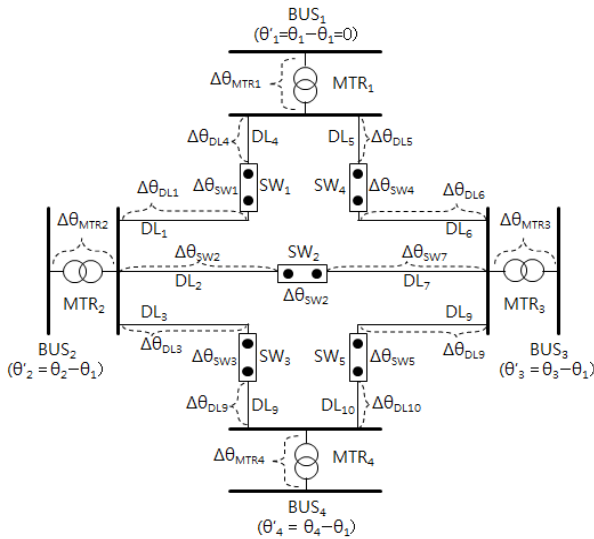


그림 5 변전소 위상각 추정 방법  
Fig. 5 Angle estimation method in a substation

$$\theta'_2 = \Delta\theta_{SW1} + \Delta\theta_{21} - \Delta\theta_{12} \quad (10)$$

SW<sub>2</sub>의 경우 모선 Bus<sub>1</sub>과 직접 연결되어 있는 것이 아니라 모선 Bus<sub>3</sub>을 경유하여 연결되어 있다. 따라서 모선 Bus<sub>2</sub>와 모선 Bus<sub>3</sub>의 위상각 차이를 기준모선과의 위상차 θ'로 표현하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 SW<sub>3</sub>도 기준모선과 직접 연결되어 있지 않기 때문에 SW<sub>2</sub>와 동일한 방법으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta'_2 - \theta'_3 &= \Delta\theta_{SW2} + \Delta\theta_{23} - \Delta\theta_{32} \\ \theta'_2 &= \Delta\theta_{SW2} + \Delta\theta_{23} - \Delta\theta_{32} + \theta'_3 \end{aligned} \quad (11)$$

다음으로 각각의 개폐기에서 계산된 θ'<sub>2</sub>의 평균값을 이용하여 모선의 위상각을 추정한다. 따라서 모선 Bus<sub>2</sub>와 모선 Bus<sub>1</sub>의 위상각 차는 최종적으로 다음과 같은 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\theta'_2 = (\Delta\theta_{SW1} + \Delta\theta_{21} - \Delta\theta_{12} + \Delta\theta_{SW2} + \Delta\theta_{23} - \Delta\theta_{32} + \theta'_3 + \Delta\theta_{SW3} + \Delta\theta_{24} - \Delta\theta_{42} + \theta'_4) / 3 \quad (12)$$

식 (12)에서 θ'<sub>3</sub>와 θ'<sub>4</sub>를 제외한 나머지 값들은 다 알고 있는 값이기 때문에 θ'<sub>3</sub>와 θ'<sub>4</sub>의 초기치를 0으로 한 후 θ'<sub>2</sub>의 위상각 계산을 수행한다. 이와 같은 방법으로 모선 Bus<sub>3</sub>과 모선 Bus<sub>4</sub>의 위상각을 계산한 후 초기치로 설정한 모선의 위상각과 계산된 모선의 위상각의 변화량을 확인해서 수렴여부를 판단한다. 만약 수렴하지 않았다면 초기치를 계산된 결과로 갱신한 후 수렴할 때까지 반복 수행 한다.

### 2.2.3 변전소 전압 위상각 패턴 생성 방법

일반적으로 상시연계점 변동은 최적화 알고리즘을 수행해서 변경할 위치를 미리 산정하고 있다. 만약 변전소 모선 위상각을 현재 측정치만 가지고 계산하면, 최적화 알고리즘을 수행했을 때 계산한 순환전류와 실제 상시연계점을 변경할 때 순환전류가 틀려진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 변전소 전압 위상각을 15분 간격의 패턴으로 관리하는 방법을 제안한다. 먼저 15분 간격 상시연계점 전압 위상각 패턴을 생성하고, 이 패턴의 모든 시점에 대해 전압 위상각을 추정하여 전압 위상각 패턴을 생성한다. 상시연계점 측정치 패턴은 CATMULL-ROM SPLINE보간법[7]을 이용하여 계산한다. 제안하고 있는 보간법은 두 점 사이에 있는 특정 지점의 값을 계산할 때 인접해 있는 4 개의 포인트만을 이용하여 구간 사이의 곡선을 부드럽게 연결해주는 특징이 있다. 기본적으로 큐빅 커브를 사용하고 있으며 그 식은 (2)와 같다.

$$P(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (2)$$

그림 6은 CATMULL-ROM 보간법을 이용해서 P<sub>2</sub>와 P<sub>3</sub> 사이의 값들을 계산하는 방법을 나타내고 있다. 제안하는 보간법의 특징은 미분항의 초기값을 특정 지점의 이전 값과 이후 값을 이용한다는 것이다. 곡선의 시작점을 0이라 하고 종료되는 점을 1 이라고 한다면, P(0)은 P<sub>2</sub>, P(1)은 P<sub>3</sub>이 된다. 시작지점의 미분항

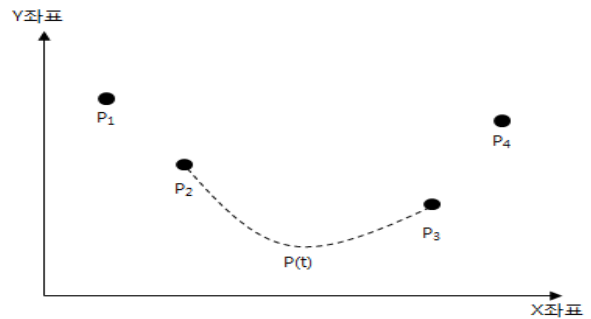


그림 6 CATMULL-ROM 보간법  
Fig. 6 CATMULL-ROM interpolation

은 시작 지점의 이후 값인  $P_3$ 과 이전 값인  $P_1$ 의 차를 사용하고, 종료 지점도 동일한 방식으로  $P_4$ 와  $P_2$ 의 차를 이용하고 있다. 따라서 식 (1)에 초기치를 대입하면 식 (3)으로 나타낼 수 있으며,  $\alpha$ 는 장력계수로 0에서 1사이의 값을 가지며 일반적으로 0.5로 설정한 후 사용하고 있다.

$$\begin{aligned} P(0) &= P_2 \\ P(1) &= P_3 \\ P'(0) &= \alpha(P_3 - P_1) \\ P'(1) &= \alpha(P_4 - P_2) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)에서  $t$ 의 초기값인 0과 1을 대입한 결과와  $t$ 에 대해서 미분한 후, 초기값인 0과 1을 적용 했을 때의 값은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P(0) &= d \\ P(1) &= a+b+c+d \\ P'(0) &= c \\ P'(1) &= 3a+2b+c \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용하여  $a, b, c, d$ 를  $P_1, P_2, P_3, P_4$ 로 표현하면 식 (5)와 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)를 이용해서  $a, b, c$  그리고  $d$ 의 값을 계산할 수 있기 때문에 식 (2)를 이용해서 두 점사이의 값을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 시간 축의 간격을 1분으로 설정한 후 매 15분의 데이터를 계산하였다.

### 2.3 사례 연구

본 논문의 유용성을 검증하기 위해 매트랩을 이용하여 상시연계점 전압 위상차 데이터와 선로 인출단 전류 데이터를 생성하였다. 그리고 이 데이터를 이용하여 제안하고 있는 위상각 추정 알고리즘의 정확성을 검증하였다. 그림 7은 사례연구에 사용된 예제 계통을 나타내고 있으며, 예제 계통은 그림 7에서 보는 바와 같이 6개의 모선, 14개의 배전선로 그리고 7개의 상시연계점으로 구성되어 있다.

시뮬레이션에 사용된 배전선로의 선종은 전력선은 ACSR 160mm<sup>2</sup>, 중성선은 ACSR 95mm<sup>2</sup>로 설정하였으며, 선로의 공장은 5[km]에서 10[km] 사이의 값을 사용하였고 부하량은 5[MVA]에서 10[MVA] 사이의 값을 사용하였다. 배전선로 세부구성은 표 1과 같다.

본 논문은 방사상 계통에서 측정되는 데이터를 이용하기 때문에 총 6개의 방사상 계통을 시뮬레이션을 하였고, 그림 8은 모선

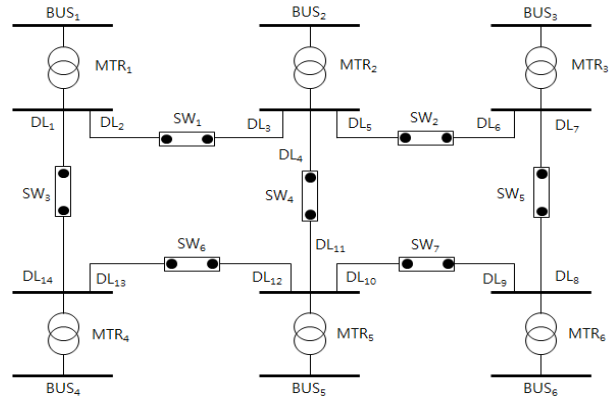


그림 7 예제 계통  
Fig. 7 Test system

표 1 배전선로 세부구성  
Table 1 Distribution lines detail structure

연결 모선	선로	공장 (5~10[km])	부하량 (5~10[MW])	km당 부하량
1	1	5 [km]	8 [MW]	1.6 [MW]
	2	6 [km]	7 [MW]	1.16 [MW]
2	3	7 [km]	10 [MW]	1.42 [MW]
	4	8 [km]	6 [MW]	0.75 [MW]
	5	9 [km]	8 [MW]	0.88 [MW]
3	6	10 [km]	7 [MW]	0.7 [MW]
	7	10 [km]	6 [MW]	0.6 [MW]
6	8	9 [km]	5 [MW]	0.55 [MW]
	9	8 [km]	9 [MW]	1.12 [MW]
5	10	7 [km]	8 [MW]	1.14 [MW]
	11	6 [km]	6 [MW]	1 [MW]
	12	5 [km]	7 [MW]	1.4 [MW]
4	13	8 [km]	5 [MW]	0.62 [MW]
	14	6 [km]	1 [MW]	0.16 [MW]

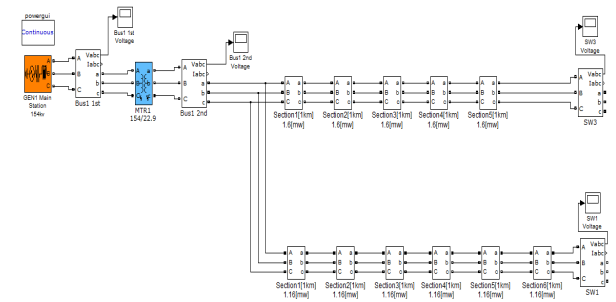


그림 8 방사상 배전계통 시뮬레이션  
Fig. 8 Simulation of radial distribution network

BUS<sub>1</sub>을 시뮬레이션 할 때 사용한 매트랩 계통을 나타내고 있다. 시뮬레이션의 입력으로 모선 1차측 전압의 위상각을 표 2와 같이 설정하였고, 시뮬레이션 결과는 표 3과 같다.

표 2 모선 위상각 입력 데이터

Table 2 Input data of bus angle

모선	위상각
BUS <sub>1</sub>	20
BUS <sub>2</sub>	50
BUS <sub>3</sub>	30
BUS <sub>4</sub>	10
BUS <sub>5</sub>	5
BUS <sub>6</sub>	20

표 3 개폐기 측정치 시뮬레이션 결과

Table 3 Simulation of switch measurement data

선로	인출단 전류	연계점 위상차
DL <sub>1</sub>	200	10.4
DL <sub>2</sub>	175	-28.6
DL <sub>3</sub>	248	28.6
DL <sub>4</sub>	149	44.5
DL <sub>5</sub>	198	18.8
DL <sub>6</sub>	174	-18.8
DL <sub>7</sub>	150	9.8
DL <sub>8</sub>	125	-9.8
DL <sub>9</sub>	250	15.5
DL <sub>10</sub>	198	-15.5
DL <sub>11</sub>	151	-44.5
DL <sub>12</sub>	175	-5.5
DL <sub>13</sub>	124	5.5
DL <sub>14</sub>	209	-10.4

표 3의 조류계산 입력데이터를 이용하여 주변압기와 선로에서 발생하는 전압강하로 인한 위상각 변화량을 계산하였으며 그 결과는 표 4, 표 5와 같다.

표 4 주변압기 위상각 변화 계산 결과

Table 4 Calculation result of angle difference due to MTR

변압기	위상 변화
MTR <sub>1</sub>	1.5
MTR <sub>2</sub>	2.4
MTR <sub>3</sub>	1.3
MTR <sub>4</sub>	1.5
MTR <sub>5</sub>	2.1
MTR <sub>6</sub>	1.4

표 5 선로 위상각 변화 계산 결과

Table 5 Calculation result of angle difference due to DL

선로	위상 변화
DL <sub>1</sub>	0.8
DL <sub>2</sub>	0.9
DL <sub>3</sub>	1.4
DL <sub>4</sub>	1
DL <sub>5</sub>	1.5
DL <sub>6</sub>	1.4
DL <sub>7</sub>	1.2
DL <sub>8</sub>	0.9
DL <sub>9</sub>	1.4
DL <sub>10</sub>	1.2
DL <sub>11</sub>	0.8
DL <sub>12</sub>	0.7
DL <sub>13</sub>	0.8
DL <sub>14</sub>	1.2

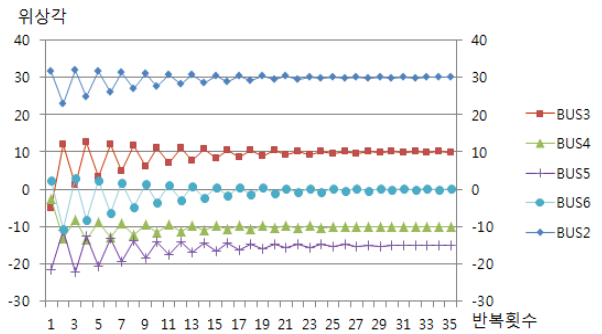


그림 9 측정오차가 없는 경우 위상각 추정 결과

Fig. 9 Angle estimation result of no measurement error

그림 9는 상시연계점에서 측정오차가 없는 경우 변전소 모선의 전압 위상각을 추정한 결과이다. 그림 9에서 보는 바와 같이

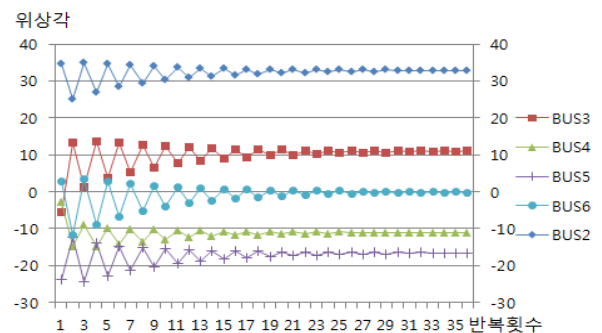


그림 10 측정오차가 10%인 경우 위상각 추정 결과

Fig. 10 Angle estimation result of 10% measurement error

정확하게 수립하는 것을 알 수 있다.

그림 10은 모든 상시연계점의 측정오차를 10%로 설정한 후 시뮬레이션 한 결과이고, 다소 위상각 계산의 차이가 있으나 비슷한 값으로 수립하는 것을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 상시연계점 양단에서 측정되는 전압의 위상차 정보를 이용해 모선의 위상각각 정보를 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 모선 위상각 정보를 CATMULL-ROM 보간법을 이용하여 패턴으로 관리하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 모선 위상각 추정 알고리즘을 사용하여 모선 위상각을 추정하고 그 결과를 패턴으로 관리한다면 현재의 시점뿐만 아니라 원하는 시점의 배전계통 해석을 원활하게 수행 할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 방사상구조에서 루프구조로 변경되는 경우 순환전류를 계산해서 보호기기가 동작하는 문제를 방지할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 수환전류를 계산해서 루프가 될 수없는 선로 계산하고 이 선로들을 상시연계점 최적화 알고리즘의 제약 조건으로 사용하면 보다 효율적으로 알고리즘을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] Y. Ju, W. Wu, B. Zhang, H. Sun "An Extension of FBS Three-Phase Power Flow for Handling PV Nodes in Active Distribution Networks," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, pp.1547-1555 July, 2014
- [2] Y. Zhu, K. Tomsovic, "Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems With Dispersed Generation," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 17, pp.822-827, July, 2002
- [3] Sarika Khushalani, Jignesh Solanki,M., Noel Schulz,M "Development of Three-Phase Unbalanced Power Flow Using PV and PQ Models for Distributed Generation and Study of the Impact of DG Models," IEEE Trans. Power syst.,2007,22,(3),pp.1019-1025
- [4] T. H. Chen, W. T. Huang, "Feasibility Study of Upgrading Primary Feeders From Radial and Open-Loop to Normally Closed-Loop Arrangement," IEEE Trans. Power Syst, vol. 19, pp.1308-1316, Aug. 2004
- [5] C. S. Chen, L. C. T. Tasi, C. H. Lin "Loading Balance of Distribution Feeders With Loop Power Controllers Considering Photovoltaic Generation," IEEE Trans. Power Syst, vol. 26, pp.1762-1768, Aug. 2011
- [6] J. C. Kim, S. M. Cho, H. S. Shin "Advanced Power Distribution System Configurationfor Smart Grid," Electric Power Comp and Sys, vol. 37, pp.91-110, May, 2009
- [7] Catmull, E., and Rom, R. A class of local interpolating splines. In Computer Aided Geometric Design, R. E. Barnhill and R. F. Reisenfeld, Eds. Academic Press, New York, 1974, pp. 317-326.

## 저 자 소 개



### 손 주 환 (Ju-Hwan Son)

1983년 1월 24일생. 2009년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 첨단공학과 석사과정 졸업(석사). 현재 동 대학원 첨단공학과 박사과정

Tel : (055) 298-9906

E-mail : juhwan.son@gmail.com



### 임 성 일 (Seong-II Lim)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수

Tel : (055) 249-2630

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr