

배전운영 시스템에서 상시개방 연계 스위치 투입에 의한 루프 운전 중 구간전압 계산 방법

Section Voltage Calculation while a Loop Operation by Tie-Switch Close in a Distribution Management System

서 정 수* · 임 일 형† · 박 종 호* · 신 용 학* · 최 면 송**

(Jeong-Soo Seo · Il-Hyung Lim · Jong-Ho Park · Yonh-Hak Shin · Myeon-Song Choi)

Abstract - Generally, an electrical distribution configuration is a radial system with one-way current in a distribution management system (DMS). All feeders in a DMS have tie-switches to make radial system. Sometimes, DMS should change a tie-switch for operation. In that case, the tie-switch has to be closed first; then a switch is opened as another tie-switch in order to prevent blackout for customers. At the moment when the tie-switch is closed, distribution system is operated in a loop state, not radial. Before the loop operation, DMS operator has to check any expected events for stable distribution system operation; and the most important event is a mis-operation of a protection relay. In addition, DMS operator should check voltage profile violation but a calculation method of section voltages had not been used. Thus, this paper proposes a calculation method of section voltages at a loop operation in a DMS. The proposed calculation algorithm is verified by Matlab Simulink.

Key Words : Load flow, Power flow, Phase difference, Distribution system, Loop

1. 서 론

배전계통 운영에서 선로상 구간의 전압/전류를 계산하는 것은 매우 중요하다. 배전계통을 운영하는데 있어 필요한 기능들은 대부분 배전계통의 조류계산 결과를 바탕으로 상황을 파악 및 예측하고 문제해결 방안을 도출 해주기 때문이다.

일반적으로 배전계통은 단방향 전류만 허용하는 방사상(radial) 구조로 운영되어 왔다. 따라서 배전계통에 운영되는 보호기기 및 기타 설비들이 모드 단방향 전류를 기준으로 제작되었고, 관련된 연구와 조류계산 방법 또한 radial 구조를 기본으로 수행되어 왔다.

이럼에도 불구하고 배전계통의 운영상 타 변전소로부터 시작되는 feeder들 간의 상시개방 개폐기 close를 통하여 loop형태로 운전되는 경우가 있다. 상시개방 개폐기를 변경해야 할 때 수용가에 정전을 발생시키지 않고 이동하기 위해서 일시적으로 상시개방 개폐기를 닫아 loop 상태에서 운전을 하게 된다. 이 때 계산을 잘못하면 선로에 과부하가 발생하고 보호기기가 동작하며 경우에 따라 전압이 허용 기준을 벗어나서 전압강하 또는 전압상

승이 일어날 수 있다. 이를 방지하기 위하여 상시개방 연계 개폐기를 투입하기 전 조류계산을 수행한다.

송전계통에서 주로 사용하는 일반적인 전력방정식을 이용하여 상시개방 개폐기 close후의 상태를 계산하는 것은 서로 다른 변전소에서 인출된 배전선로가 loop 운전되는 경우이기 때문에 전력방정식에서 식의 개수보다 변수의 개수가 많아져 방정식을 풀 수 없다. 변수를 줄이기 위해 PSS/E해석으로 계산된 변전소 모선전압 크기와 위상차각과 방사상 운전 상태에서 측정된 선로의 공급전력을 추가 데이터로 사용할 수 있지만 복잡성과 정확성면에서 문제가 있을 수 있다.

상시개방 개폐기 투입에 따른 loop상태의 조류계산 방법 및 loop 상태에서의 배전계통 운영에 관한 기존 연구는 loop 해석 기반의 연속 조류계산 알고리즘[1], loop 배전계통의 설계[2]와 최적 재구성[3], loop 해석 simulation[4], dynamic 모델링과 parameter[5], loop 배전계통에서의 voltage sag 해석[6], 선로 손실 및 전압 관리[7, 8], 태양광 연계를 고려한 부하균등화[9], 정전복구[10], 다중 loop 계통에서의 최적화[11], loop 배전 지중선로 지락사고에 대한 분석[12, 13] 연구들이 있었다. 기존 연구들은 loop에 대한 해석을 송전계통 해석방식을 적용하였거나, loop 해석 결과에 대한 신뢰성을 가정하고 결과를 가지고 동작하기 때문에 제안된 기존연구들의 성능은 조류계산 결과에 많은 영향을 받는다. 따라서 loop 배전계통의 운영에 있어서 보다 정확한 조류계산 결과가 요구되며, 가능하다면 계측된 정보를 기반으로 조류계산을 수행하여 현재 상태에 보다 정확한 조류계산 방법이 필요하다.

† Corresponding Author : System S/W R&D Group, LSIS Co., Korea

E-mail : ihlim@lsis.com

* System S/W R&D Group, LSIS Co., Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea

Received : May 28, 2015; Accepted : January 15, 2016

따라서 본 논문에서는 배전운영 시스템에서 상시개방 연계 스위치 투입에 의한 루프 운전 중 구간전압 계산 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 알고리즘은 변전소 인출단의 정보는 신뢰할 수 있고, 배전선로에서 계측되는 전류와 위상의 정보는 신뢰할 수 있다는 가정을 가지고 있다. 두 가정을 기반으로 변전소 인출단 정보를 통하여 말단 전압을 구하고, 말단전압 정보로 상시개방 연계개폐기 투입 시 전류의 변동을 구하고, 변동 전류 정보를 가지고 각 구간의 전압을 구하는 방법이다.

2장에서는 배전계통의 조류계산에 대한 일반적인 방법들에 대하여 제시하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 상시개방개폐기 양단 전압 위상차를 이용한 loop 시 배전계통 조류계산 방법을 제안하고, 4장에서는 Matlab simulink를 이용하여 제안한 방법을 검증하고 결과를 제시하고자 한다.

2. 배전계통에서의 조류계산

배전계통에서의 조류계산은 다양한 방법이 있다. 일반적으로 부하를 가정하고 전력방정식을 이용하는 송전계통에서의 조류계산 방식이 있고, 변전소 인출단을 슬랙모선으로 하는 방사상 배전계통 조류계산 방식이 있다. 최근에는 loop 운전에 대한 관심이 높아지면서 배전계통의 loop운전 시 송전계통의 방식을 활용하여 계산하지만 실시간으로 변하는 배전계통의 부하 변동 때문에 정확도에서 개선을 요하고 있다.

2.1 송전계통에서의 일반적인 조류계산

송전선로 조류계산에서는 전압 크기(V)와 전압 위상(θ)을 아는 slack 모선, 발전기가 연결되어 있는 모선은 유효전력(P)과 전압크기를 기지수로 하고 무효전력(Q)과 전압 위상을 미지수로 하는 발전기 모선 (또는 PV 모선), 유효전력과 무효전력을 기지수로 하고 전압 크기와 전압 위상을 미지수로 하는 부하모선으로 모델링 할 수 있다.

송전계통에서 소비되는 총 유효전력량을 알 수는 없으므로 1개의 발전기는 유효전력(P)를 변수로 처리하고, 대신 이 모선을 전압위상의 기준으로 삼아 θ를 0으로 지정하는 Vθ 모선 즉 slack모선으로 하여 모델링한다. PV 모선의 경우 기계적 입력을 제어하여 유효전력(P)를 조절할 수 있고 여자전류 제어하여 단자전압의 크기(V)를 제어할 수 있어서 발전기 모선으로 모델링한

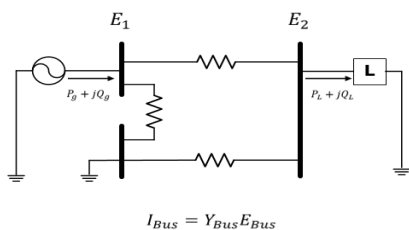


그림 1 일반 송전계통 조류계산 방식

Fig 1 The calculation method of load flow in transmission system

다. 부하모선은 변전소 단위로 사용량이 계측되기 때문에 유효전력과 무효전력을 알 수 있어 PQ 모선(부하모선)으로 모델링한다. 각 모선을 모델링하여 전력방정식에 적용하면 유효전력과 무효전력을 나타내는 2개의 식으로 구성되므로 4가지 변수 P, Q, V, θ 중에서 2가지를 알면 다른 2가지를 계산할 수 있다는 것을 기본으로 한다.

2.2 방사상 배전계통 조류계산 방법

배전계통은 일반적으로 방사상으로 운전되기 때문에 발전기가 1개인 계통으로 볼 수 있다. 변전소 인출단을 slack 모선으로 지정하고 나머지 구간과 말단을 부하모선으로 모델링하면 쉽게 방사상 배전선로를 해석할 수 있다. 같은 변전소의 동일 모선에서 인출된 두 개의 선로를 loop 운전하는 경우도 발전기가 1개인 계통으로 볼 수 있으며 용이하게 조류계산을 통하여 해석할 수 있다.

표 1 송전 조류계산과 배전 조류계산의 비교

Table 1 Comparing the calculation method of load flow in distribution system with the calculation method of load flow in transmission system

송전계통 조류계산	배전계통 조류계산
모선의 부하와 발전량 정보가 주어짐	모선이 없으며 부하가 분포형태이고 부하정보가 부정확
모선과 모선 사이에 선로가 존재	부하가 선로에 분포
3상 평형 => 단상 해석	부하 불평형 => 3상 해석
slack 모선이 하나	선로별 slack이 존재
망형(mesh 형태) 해석	방사상(radial) 및 loop 해석

표 1에서는 송전계통의 조류계산과 배전계통의 조류계산 방식을 비교한 것을 나타내었다. 송전계통은 부하모선의 정보가 기지량으로 주어지고 이를 기반으로 결과를 내지만, 배전 조류계산의 경우 부하모선이 별도로 없고 사실상 부하가 선로에 분산형태로 분포하기 때문에 부하 정보가 정확하지 못하다. 또한 송전은 3상 평형에 가까운 상태로 운전되는 반면에 배전선로의 경우 단상 형태로 부하에 공급되는 경우가 많아 항상 부하가 불평형 상태이어서 불평형 3상 해석을 해야 한다. 송전의 경우 전체적으로 slack

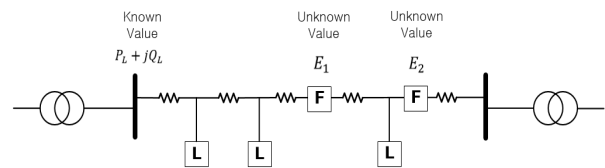


그림 2 일반 배전계통 조류계산 방식

Fig 2 The calculation method of load flow in distribution system

이 하나인 반면에 배전의 경우 각 배전선로에 slack이 각각 하나씩 존재하며, 송전의 경우 복잡한 망 형태로 구성된 상태에서의 해석이지만 배전의 경우 방사상 또는 loop 둘 다 함께 고려해야 하는 어려움이 있다.

또한 분산전원이 포함된 배전계통의 경우는 유효전력의 크기가 마이너스(-)값을 가지고 무효전력이 0 혹은 지정된 값을 가지는 negative 부하로 모델링 하면 배전선로 해석의 목적에 부합하는 정밀도의 조류계산을 수행할 수 있어야 하는 어려움도 존재한다.

2.3 Loop 배전계통 조류계산의 문제점

Loop 배전계통에서의 조류계산은 일반적인 방사상 배전계통의 조류계산 방식을 적용하는데 일부 문제점이 있다. 서로 다른 변전소에서 인출된 배전선로가 loop 운전되는 경우에는 전력방정식에서 식의 개수보다 변수의 개수가 많은 문제가 되어 해석할 수 없는 문제가 있다.

Loop 구성 배전계통 조류계산을 위해서는 전력방정식의 개수보다 변수의 개수를 적게 하기 위하여 추가적인 데이터가 필요하며 다음과 같은 방식으로 해결하고 있다.

첫 번째 방법으로는 송전계통의 PSS/E 해석으로 계산된 변전소 모선전압의 크기와 위상차를 추가 데이터로 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 변전소 전압의 크기와 위상이 발전량과 부하량에 따라 시시각각으로 변하므로 정확한 배전계통 loop 해석에 어려움이 따른다.

두 번째 방법은 방사상 운전 상태에서 측정된 선로의 공급전력을 추가 데이터로 사용하는 방법이다. 이는 loop 운전상태에서 전류가 흐르지 않는 가상의 부하중심점이 방사상운전에서 인위적인 부하 분할점과 다르므로 정확한 loop 배전선로 해석이 어렵다.

3. 상시개방 연계개폐기 양단 전압위상차를 이용한 loop 시 배전계통 조류계산 방법

3.1 Loop 배전계통의 모델링

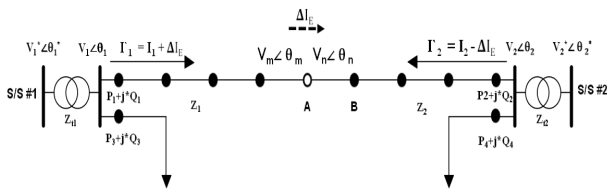


그림 3 Loop 배전계통 모델링
Fig 3 Modeling of loop distribution system

그림 2는 loop구조로 운전이 필요한 배전계통을 나타내고 있다. A 위치에 있는 상시개방 연계개폐기를 B 위치로 이동시키기 위하여 일시적으로 루프상태로 배전계통이 운전 될 것이다. 변전소 1과 2가 있으며 주변압기 1차 측 전압과 위상($V_1 \angle \theta_1^*$, $V_2 \angle \theta_2^*$), 주변압기 임피던스 (Z_{11} , Z_{12}), 주변압기 2차 측 전압과 위상($V_1 \angle \theta_1$, $V_2 \angle \theta_2$), 변전소 1에서 흐르는 전류는 I_1 , 변전소 2에

서 흐르는 전류는 I_2 , loop 상태에서의 전류의 변화는 ΔI_E , 선로 임피던스는 변전소 1 측은 Z_1 , 변전소 2 측은 Z_2 라고 하고 각 feeder의 전체 부하는 P_n+j*Q_n 이라고 한다.

3.2 상시개방 연계개폐기 양단 전압 위상차를 이용한 loop 상태에서의 전류 계산

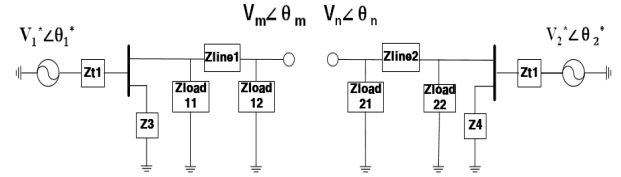


그림 4 Loop 배전계통의 파이 등가회로
Fig 4 A equivalent circuit diagram of loop distribution system

그림 2와 3으로부터 상시개방 연계스위치 close 시 루프전류를 계산하는 식은 다음과 같이 전개 된다.

$$\begin{aligned}
 V_1^* \angle \theta_1^* - \Delta V_{nm} - V_2^* \angle \theta_2^* &= I_1' Z_{11} + I_1' Z_1 - I_2' Z_{12} + I_2' Z_2 \\
 V_1^* \angle \theta_1^* - \Delta V_{nm} - V_2^* \angle \theta_2^* &= \\
 (I_1 - \Delta I_E) Z_1 + (I_1 - \Delta I_E) Z_1 - (I_2 + \Delta I_E) Z_{12} - (I_2 + \Delta I_E) Z_2 \\
 V_1^* \angle \theta_1^* - \Delta V_{nm} - V_2^* \angle \theta_2^* &= \\
 I_1 Z_{11} + I_1 Z_{11} - I_2 Z_{12} - I_2 Z_2 - \Delta I_E (Z_{11} + Z_1 + Z_{12} + Z_2) \\
 (V_1^* \angle \theta_1^* - I_1 Z_{11}) - \Delta V_{nm} - (V_2^* \angle \theta_2^* - I_2 Z_{12}) &= \\
 I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - \Delta I_E (Z_{11} + Z_1 + Z_{12} + Z_2) \\
 V_1 \angle \theta_1 - \Delta V_{nm} - V_2 \angle \theta_2 &= \\
 I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - \Delta I_E (Z_{11} + Z_1 + Z_{12} + Z_2) \\
 (V_1 \angle \theta_1 - I_1 Z_1) - \Delta V_{nm} - (V_2 \angle \theta_2 - I_2 Z_2) &= \\
 - \Delta I_E (Z_{11} + Z_1 + Z_{12} + Z_2) \\
 V_n \angle \theta_n - \Delta V_{nm} - V_m \angle \theta_m + \Delta I_E (Z_{11} + Z_1 + Z_{12} + Z_2) &= 0 \\
 \Delta I_E &= \frac{V_m \angle \theta_m - V_n \angle \theta_n + \Delta V_{nm}}{(Z_{11} + Z_1 + Z_{12} + Z_2)}
 \end{aligned}$$

위의 수식 전개와 같이 상시개방 연계개폐기 전압위와 같은 수식을 통하여 ΔI_E 를 구하면 loop 상태에서의 전류 값을 계산할 수 있다[13, 14]. 이렇게 얻은 정보를 통하여 상시개방 연계개폐기가 close 되었을 때 상시개방 연계개폐기를 기준으로 전원 측 선로에 과부하가 발생하는지에 대한 해석을 하여 배전계통 운영 신뢰성을 확보할 수 있다.

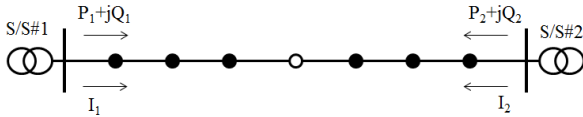
3.3 Loop 상태 배전계통 조류계산

Loop 상태에서의 전류 변화에 따라 각 구간 node의 전압이 변하게 된다. 한 쪽으로 크게 loop 전류가 치우치는 경우 전압강하가 발생할 수도 있으며, loop 전류의 계산 목적처럼 상시개방 연계 개폐기의 close 전에 상황을 예측할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 loop 상태 배전계통 조류계산은 두 가

지 가정을 가지고 시작한다. 양 변전소 인출단의 계측 정보는 계측데이터의 시간동기화와 관련하여 상시개방 연계개폐기 close를 시킬 때의 값과 동일하며, 계측값은 신뢰할 수 있다. 그리고 조류계산 절차 설명이 용이하도록 loop 전류가 변전소 1측에서 2측으로 흐른다고 가정한다 할 때,

- i) 상시개방 연계개폐기 개방 상태에서 변전소 1측과 2측의 P_1+jQ_1, P_2+jQ_2 를 각각 구한다. 그리고 두 D/L 간의 총 부하전력을 구한다. ($P_s+jQ_s = P_1+P_2+j(Q_1+Q_2), I_s=I_1+I_2$)



- ii) 각 구간의 전류계측 정보를 가지고 구간별 부하 비율을 구한다.

$$R_i = \frac{I_{mi}}{I_s} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

- iii) Loop 전류의 방향과 크기에 따라서 상시개방 연계개폐기 close 전 변전소 2번 측으로 부하중심점을 구한다.

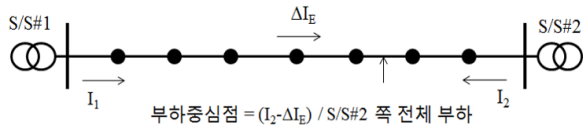


그림 5 상시개방점 투입시 단선도
Fig 5 A single line diagram when cloing the tie-switch

- iv) 부하중심점의 전류를 0으로 하여 변전소 1번 측과 2번 측의 예상되는 전류 변화 크기(I_{c1}, I_{c2})를 loop시 상시개방 연계개폐기에 흐르는 ΔI_E 를 통하여 구한다.

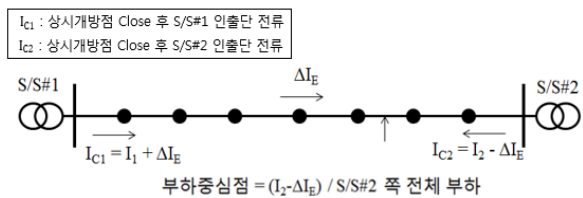


그림 6 상시개방점 투입 후 단선도 및 전류변화
Fig 6 Changes of current and single line diagram after cloing the tie-switch

- v) 상시개방점이 투입되었을 때 변전소 1번 측과 2번 측의 전압의 변화를 ΔI_E 를 통하여 구하고 이를 이용하여 부하중

심점의 전압 V_c 를 구한다.

- vi) 앞의 i)에서 구한 각 구간의 부하 분포 비율을 통하여 P_s+jQ_s 를 분배하여 v)에서 구한 인출단 전압정보를 기준으로 조류계산 하여 loop운전 시의 구간별 전압을 구한다. ($P_i+jQ_i = (P_s+jQ_s) / R_i$)
- vii) 각 구간의 부하를 파이 등가 Y-matrix로 모델링하여 변전소 1번 측과 2번 측에서 각각 부하중심점을 향해 동일한 전압을 기준으로 전압강하를 고려하여 구한다. 그리고 부하중심점의 전압은 아래의 그림과 같이 부하중심점 양단의 구간전압과 전류를 가지고 부하중심점을 기준으로 양단을 각각 Y matrix로 모델링하여 구할 수 있다.

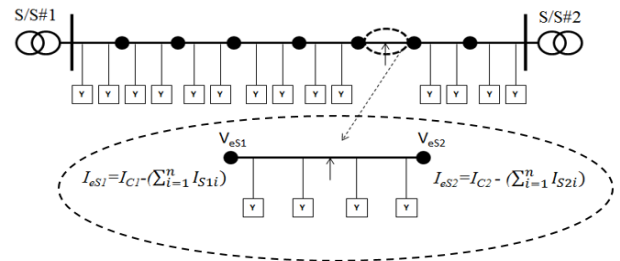


그림 7 부하중심점 전압을 구하기 위한 계통 모델링
Fig 7 Power system modeling for calculating voltage of the load center point

4. 사례 연구

4.1 예제 계통의 구성

본 논문에서 제안한 상시개방 연계개폐기 close 상태에서의 loop 전류 및 계측정보를 활용한 조류계산 방법의 검증을 위하여 MATLAB Simulink를 이용해 그림 8과 같이 테스트계통을 구성하였다.

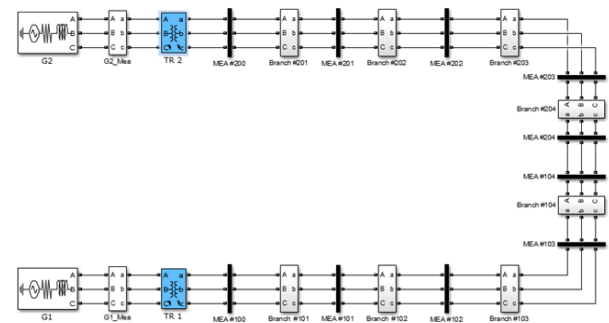


그림 8 MATLAB Simulink 테스트계통
Fig 8 A test power system in MATLAB

예제 계통의 구성요소별 각 임피던스 및 기본정보는 다음과 같다.

1) 전원

구분	전압 [kV]	R[ohm]	X[ohm]
G1	154	0.01	0.07
G2	154	0.01	0.07

2) 변압기

구분	용량 [MVA]	R[ohm]	X[H]
Tr#1	100	0.05	0.0025
Tr#2	100	0.05	0.0025

3) 선로

구분	R1[ohm]	X1[H]	R0[ohm]	X0[H]
Brnach	0.18	0.0011	0.48	0.0032

구간 선로의 길이는 2 [km] 로 모든 구간에 동일하게 적용하였다.

4.2 사례 연구

그림 8과 같은 예제계통에서 4.1의 입력 정보를 기준으로 상시개방 연계개폐기 close 시 전류를 제안한 알고리즘을 통하여 계산한 값과 각 node의 전압 값을 변전소의 위상각 변화를 주어 시뮬레이션 결과와 비교한 것을 표 2에 나타내었다.

표 2의 비교 결과에서처럼 본 논문에서 제안한 방법과 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 오차가 전류값에서 최대 13% 만큼 차이가 나지만 전압 계산 결과는 최대 2%를 넘지 않는 결과를 볼

표 2 변전소 위상각 차에 따른 구간별 전압/전류 비교

Table 2 Magnitude of voltage and current corresponding to a substation's phase in each section

Substaion Angle Information : [Gen1 : 0° Gen2 : 2°]						
측정 Point	Volatage [pu]			Current [pu]		
	MATALB	결과값	Error [%]	MATLAB	결과값	Error [%]
MEA#100	0.998 ∠ -0.21	0.998 ∠ -0.21	0	0.234 ∠ -27.64	0.239 ∠ -28.34	6.86
MEA#101	0.995 ∠ -0.31	0.995 ∠ -0.31	0	0.146 ∠ -42.48	0.151 ∠ -43.00	3.42
MEA#102	0.993 ∠ -0.31	0.993 ∠ -0.32	0.02	0.089 ∠ -84.63	0.093 ∠ -83.66	4.60
MEA#103	0.992 ∠ -0.26	0.991 ∠ -0.26	0.10	0.120 ∠ -139.11	0.122 ∠ -137.76	2.85
MEA#200	0.999 ∠ 1.39	0.999 ∠ 1.37	0.04	0.589 ∠ 3.39	0.593 ∠ 3.39	0.68
MEA#201	0.996 ∠ 0.89	0.996 ∠ 0.88	0.02	0.490 ∠ 4.97	0.494 ∠ 5.00	0.81
MEA#202	0.994 ∠ 0.46	0.993 ∠ 0.47	0.10	0.392 ∠ 7.43	0.395 ∠ 7.55	0.76
MEA#203	0.993 ∠ 0.14	0.992 ∠ 0.14	0.10	0.295 ∠ 11.64	0.298 ∠ 11.92	1.12
MEA#204	0.992 ∠ -0.10	0.992 ∠ -0.10	0	0.202 ∠ 19.95	0.204 ∠ 20.55	1.43

Substaion Angle Information : [Gen1 : 0° Gen2 : 10°]						
측정 Point	Volatage [pu]			Current [pu]		
	MATALB	결과값	Error [%]	MATLAB	결과값	Error [%]
MEA#100	0.993 ∠ 0.57	0.992 ∠ -0.191	1.33	0.681 ∠ -140.56	0.786 ∠ -142.29	13.65
MEA#101	0.990 ∠ 1.26	0.990 ∠ 0.61	1.13	0.756 ∠ -145.81	0.865 ∠ -146.83	12.71
MEA#102	0.988 ∠ 2.05	0.988 ∠ 1.49	0.98	0.837 ∠ -150.00	0.946 ∠ -150.55	11.55
MEA#103	0.988 ∠ 2.94	0.988 ∠ 2.47	0.82	0.922 ∠ 26.64	1.032 ∠ 26.40	10.66
MEA#200	1.002 ∠ 8.58	1.004 ∠ 8.56	0.20	1.386 ∠ 17.42	1.499 ∠ 17.70	7.55
MEA#201	0.997 ∠ 7.29	0.998 ∠ 7.19	0.20	1.289 ∠ 18.57	1.402 ∠ 18.80	8.07
MEA#202	0.993 ∠ 6.08	0.994 ∠ 5.89	0.35	1.194 ∠ 20.00	1.306 ∠ 20.17	8.58
MEA#203	0.990 ∠ 4.95	0.990 ∠ 4.67	0.48	1.101 ∠ 21.76	1.213 ∠ 21.84	9.23
MEA#204	0.988 ∠ 3.90	0.988 ∠ 3.52	0.66	1.010 ∠ 23.94	1.121 ∠ 23.89	9.09

Substaion Angle Information : [Gen1 : 0° Gen2 : 5°]						
측정 Point	Volatage [pu]			Current [pu]		
	MATALB	결과값	Error [%]	MATLAB	결과값	Error [%]
MEA#100	0.996 ∠ 0.09	0.996 ∠ 0.09	0	0.230 ∠ -108.00	0.238 ∠ -107.22	3.77
MEA#101	0.994 ∠ 0.28	0.993 ∠ 0.29	0.10	0.271 ∠ -129.54	0.278 ∠ -128.00	3.05
MEA#102	0.992 ∠ 0.57	0.992 ∠ 0.57	0	0.338 ∠ -143.62	0.342 ∠ -142.34	2.51
MEA#103	0.991 ∠ 0.94	0.991 ∠ 0.94	0	0.418 ∠ 27.35	0.421 ∠ 28.34	1.86
MEA#200	1.001 ∠ 4.09	1.000 ∠ 4.06	0.11	0.885 ∠ 10.76	0.890 ∠ 11.03	0.73
MEA#201	0.997 ∠ 3.29	0.997 ∠ 3.27	0.03	0.788 ∠ 12.35	0.793 ∠ 12.68	0.85
MEA#202	0.994 ∠ 2.57	0.994 ∠ 2.57	0	0.691 ∠ 14.47	0.696 ∠ 14.89	1.02
MEA#203	0.992 ∠ 1.94	0.992 ∠ 1.94	0	0.597 ∠ 17.37	0.601 ∠ 17.92	1.15
MEA#204	0.991 ∠ 1.40	0.991 ∠ 1.40	0	0.505 ∠ 21.45	0.509 ∠ 22.17	1.48

수 있다. 이는 측정 오차 기준안에 들기 때문에 정확도가 높다고 할 수 있다.

특히, 기존의 배전계통 조류계산에서는 배전계통의 특성 때문에 부하를 가정한 조류계산 방식의 단점을 보완하여 계측 전류정보를 가지고 부하를 분배하여 조류계산을 하기 때문에, 기존 조류계산 방식에서 예측한 부하와 실제 부하의 오차로 인한 조류계산 오차보다 계측 값을 사용한 조류계산 방식이기 때문에 실제 값과 오차가 더 줄어든다.

본 논문에서 제안한 계측 전류정보를 활용한 조류계산 방식은 상시개방 연계개폐기 close 시 loop 전류를 계산하여 무정전 상시개방 연계개폐기 이동 시 선로 과부하 및 보호기기 동작에 대한 대응이 가능하며, 각 node의 전압을 계산할 수 있기 때문에 전압강하 여부에 대한 판단도 가능하다.

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통을 운영하는데 있어 일반적으로 상시 개방 연계개폐기를 open 하여 radial로 운영하는 시스템에 대하여, 무정전 상시개방 연계개폐기의 이동 등과 같은 loop 상태의 배전계통 운영 시 변전소의 위상차이로 인한 loop 전류의 변화와 각 node의 전압을 계산하여 보호기기

오동작 및 전압강하를 방지할 수 있는 조류계산 방법을 제안하였다. 제안한 상시개방 연계개폐기 close시 조류계산 방법은 계측한 전류 정보를 기준으로 구간 부하를 정하였으며, 정해진 구간 부하는 파이 등가 회로 Y-matrix로 모델링되어 구간 전압을 구하는데 활용된다.

제안된 방법은 MATLAB Simulink를 활용하여 계산 결과와의 비교를 통하여 전압오차가 2% 이내로 나타나는 것으로 타당성을 검증하였다. 오차 2%는 통상적인 계측값의 오차 2~3%를 기준으로 이내 또는 별로 차이가 나지 않으며, 기존의 부하를 가정한 조류계산 방식과 비교하여 가정한 부하와 실제 부하와의 오차 비율을 고려해봤을 때 보다 더 정확도가 높다는 것을 확인하였다.

References

[1] Yuntao Ju, Wenchuan Wu, Boming Zhang, Hongbin Sun, "Loop-analysis-based continuation power flow algorithm for distribution networks," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol 8, pp. 1284-1292, 2014.
 [2] V. Glamocanin, V. Filipovic, "Open loop distribution system design." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, pp. 1900-1906, 1993.
 [3] Ji-Yuan Fan, Lan Zhang, J.D. McDonald, "Distribution network reconfiguration: single loop optimization,"

IEEE Transactions on Power Systems, Vol 11. pp. 1643-1647, 1996.
 [4] W.H. Kersting, "The Simulation of Loop Flow in Radial Distribution Analysis Programs," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, pp. 1928-1932, 2015.
 [5] Jun Qiu, H. Chen, A.A. Girgis, "Dynamic modeling and parameter estimation of a radial and loop type distribution system network," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, pp. 483-490, 1993.
 [6] Jong-Fil Moon, Jin-Seok Kim, "Voltage Sag Analysis in Loop Power Distribution System With SFCL," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, part 2, 2013.
 [7] M.A., Sayed, T. Takeshita, "Line Loss Minimization in Isolated Substations and Multiple Loop Distribution Systems Using the UPFC," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, pp. 5813-5822, 2014.
 [8] M. A. Sayed, T. Takeshita, "All Nodes Voltage Regulation and Line Loss Minimization in Loop Distribution Systems Using UPFC," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, pp. 1694-1703, 2011.
 [9] Chao-Shun Chen, Cheng-Ta Tsai, Chia-Hung Lin, Wei-Lin Hsieh, Te-Tien Ku, "Loading Balance of Distribution Feeders With Loop Power Controllers Considering Photovoltaic Generation," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, pp. 1762-1768, 2011.
 [10] S. Kazemi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Sanaye-Pasand, M. Lehtonen, "Impacts of automatic control systems of loop restoration scheme on the distribution system reliability," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 3, pp. 891-902, 2009.
 [11] J. Brozek, "Hybrid algorithm for optimisation of m-loop electric power distribution networks," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 151, pp. 246-251, 2004.
 [12] C.-J. Chou, C.-W. Liu, "Assessment of Risks From Ground Fault Transfer on Closed-Loop HV Underground Distribution Systems With Cables Running in a Common Route," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, pp. 1015-1023, 2013.
 [13] Jong Kwan Lee, "A New Method Calculating the Loop Current at Normal-Open-Point for Uninterruptible Load Transfer in Electrical Distribution System," Master thesis of Chungbuk National University, 2015.

저 자 소 개



서 정 수 (Jeong-Soo Seo)

2013년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LS산전 시스템 S/W 연구단 시스템 solution 연구팀 연구원.

E-mail : jsseob@lsis.com



임 일 형 (Il-Hyung Lim)

2005, 2007, 2010년 명지대학교 전기공학과 학사, 석사, 박사 졸업. 2010-2012년 The University of Western Ontario 전기공학과 post-doctoral fellow. 2012-2014년 University of Ontario Institute of Technology 전기공학과 post-doctoral fellow. 현재 LS산전 시스템 S/W 연구단, 시스템 solution 연구팀 책임연구원.

E-mail : ihlim@lsis.com



박 종 호 (Jong-Ho Park)

1991년 고려대학교 전산학 학사, 1993년 동 대학원 전산학 석사 졸업. 현재 LS산전 시스템 S/W 연구단, 시스템 solution 연구팀 팀장.

E-mail : jonghop@lsis.com



신 용 학 (Yonh-Hak Shin)

1984년 한양대학교 전자계산학 학사, 1986년 동 대학원 전자계산학 석사 졸업. 현재 LS산전 시스템 S/W 연구단 단장.

E-mail : yhshin@lsis.com



최 면 송 (Myeon-Song Choi)

1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공박). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

E-mail : mschoi@mju.ac.kr