

# 배전계통 운영의 중요요소들을 고려한 상시연계점 선정 종합 최적화 알고리즘

논문

58-11-1

## Synthetically Optimal Tie Switches Selection Algorithm Considering Important Elements in Distribution Power System

김준호\* · 임희택\*\* · 유남철\*\*\* · 임일형§ · 최면송† · 이승재§§ · 하복남§§§  
(June Ho Kim · Hee Taek Lim · Nam Cheol Yu · Il Hyung Lim · Myeon Song Choi ·  
Seung Jae Lee · Bok Nam Ha)

**Abstract** - The optimal operation in distribution system is to select tie switches considering important elements(Load balance, Loss minimization, Voltage drop, Restoration index..) in distribution system. Optimal Tie Switches Selection is very important in operation of distribution system because that is closely related with efficiency and reliability. In this paper, a new algorithm considering important elements is proposed to find optimal location of tie switches. In the case study, the proposed algorithm has been testified using real distribution network of KEPCO for verifying algorithm and complex network for applying future distribution network.

**Key Words** : Optimal Reconfiguration, Load Balancing, Loss Minimization, Distribution Power System

### 1. 서론

배전계통 정상상태의 운용은 공급과 부하의 관점에서 나누어 생각해 볼 수 있다. 공급의 관점에서는 부하전류가 배전선로의 전선 허용전류용량이나 주변압기 허용용량을 초과하지 않아서 전력설비에 손상 없이 지속적으로 전력을 공급할 수 있음을 의미한다. 부하의 관점에서는 공급 되는 전압의 크기나 품질이 허용된 범위를 유지하여 부하가 정상적으로 동작할 수 있음을 의미한다.

배전계통을 효율적이고 안정적이며 경제적으로 운용하기 위해서는 배전계통 운영의 중요한 요소들인 부하의 균등분배, 손실의 최소화, 전압강하, 복구도 등을 모두 고려하여 최적의 상태에서 운영해야 한다. 최적의 상태는 위 중요요소 중 어느 하나가 최적인 상태가 아니라 종합적으로 최적인 상태가 되어야 한다. 배전계통은 여러 종류의 부하가 산재되어 있고 부하 변동이 심하다. 또한 산업발달과 가정 수요 증가 등으로 인하여 배전계통이 점점 확대되고 복잡해짐으로써 최적의 상시연계점 위치선정을 통한 최적의 상태에서의 배전계통 운영은 그 중요도가 점점 더 높아지고 있다. 본 논문에서는 배전계통 운영의 효율성, 경제성을 고려하여

가장 적절한 상시연계점들의 위치를 선정하는 것을 상시연계점 위치선정(Tie Switch Location Selection)이라 하겠다.

최적의 상시연계점 위치선정에 관한 연구는 계속해서 진행되었으나 대부분은 그 평가요소를 손실 최소화 혹은 부하 균등화 하나로 하여 상시연계점 위치선정을 하였으며[1][2] 최적의 상시연계점들을 선정하는 방법으로 현재 한전계통에 적용하고 있는 타부 서치 알고리즘[3], 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing) 알고리즘, 전문가 시스템(expert system), 생물의 유전방식을 이용한 유전자 알고리즘, 분지한계법(Branch and Bound), 분기 교환법(Branch Exchange) 등의 방법들이 연구되어 왔다[3][4][5][6][7].

그러나 이 연구들은 상시연계점 위치선정을 위해 배전계통 운영의 중요요소 중 한가지만을 고려하여 해를 구함으로써 최적화한 상태가 종합적으로 배전계통이 최적화된 상태로 보기 어렵다. 또한 연계점을 선정하기 위한 방법들은 계산시간이 많이 걸리거나 국부해를 도출하거나 실제 배전자동화 시스템에 적용이 쉽지 않아 어려움을 겪어 왔다.

본 논문에서는 배전계통 운영의 중요요소인 부하균등화, 손실최소화, 전압강하, 복구도를 상시연계점 위치선정을 위한 평가요소로 고려하고, 연계점 이동 알고리즘[8]을 적용하여 종합적인 최적의 상시연계점 위치선정 알고리즘을 제안한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 검증은 위해 실계통 데이터에 의한 검증을 수행하였으며 배전계통은 점점 확대되고 그 구조가 복잡해지는 특성을 가지고 있다. 미래의 배전계통에 대한 검증을 수행하기 위해 현 배전계통보다 복잡한 계통에 대한 검증을 수행하였다. 또한 향후 제어가 가능하게 될 2중모선까지 고려한 알고리즘이 추가 되어 향후 배전계통이 복잡한 구조로 확장되더라도 본 논문에서 제시한 최적의 상시연계점 선정 알고리즘의 신뢰도를 높였다.

\* 정회원 : 한전KDN 전력IT연구원, 배전IT연구그룹  
\*\* 정회원 : 한전KDN 전력IT연구원, 배전IT연구그룹  
\*\*\* 정회원 : 한전KDN 전력IT연구원, 배전IT연구그룹장  
§ 정회원 : 명지대 공대 전기공학과 박사과정  
§§ 펠로우회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수  
§§§ 정회원 : 한전 전력연구원 수석연구원  
† 교신저자, 정회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수

E-mail : mschoi@mju.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 6일

최종완료 : 2009년 8월 19일

2. 최적의 상시 연계점 선정을 위한 평가방법

2.1 부하 균등화

배전계통의 구간 분할 및 연계점을 계획할 경우, 한 선로의 최악의 고장(주변압기 인출단 근처의 사고)이라도 고장구간을 제외한 나머지 구간은 연계선로로 절체할 수 있도록 하여야 한다. 하나의 복구대상 구간을 인접한 연계선로로 절체하여 복구할 경우, 연계선로와 이 선로에 연결된 주변압기는 적어도 절체받는 부하량 이상의 여유용량을 가지고 있어야 한다. 이와 같이 4분할 3연계의 배전계통의 경우, 모든 설비의 부하가 균등하게 운전되고 있을 경우, 임의의 사고에 대하여 전체계통이 과부하 되지 않고, 모든 복구대상구간을 복구할 수 있는 최대 부하량은 각 정격부하의 80%이다[8]. 이때가 복구를 고려한 최대의 설비 이용률을 나타낸다.

배전계통의 전력공급 신뢰도를 높이고, 경제성을 높이기 위하여 설비의 이용률을 높이려면, 배전계통의 분할 및 연계설계 계획에 따른 정해진 정상 시 최대 부하량 이내로 모든 선로나 주변압기의 부하가 균등하게 운용되어야 한다.

이와 같이 전력공급의 신뢰도와 설비의 이용률을 높이기 위하여 배전계통의 부하균등화를 고려하여 배전계통의 최적 연계점 위치를 찾는 문제의 목적함수는 피더와, 주변압기의 부하균등화로 나타낼 수 있다. 타부서치 알고리즘의 경우 원활한 적용을 위해 전체 시스템을 다수개의 구역을 나누어 각각의 최적 경우 하고, 그 경우실 계통에 적용하여 구역별 최적 경우통하여 전체시스템을 운전하는데 이는 각 구역들의 상호 영향%때문에 전체시스템에 대한 최적점에서 운전하는 것과는 차이가 있다. 각 설비의 여유용량을 일실게 하는 것은 각 설비 여유용량의 분산을 줄이는 것으로 볼 수 있으므로 부하균등화에 관련된 목적함수는 변압기 부하균등화와 피더부하균등화의 중요도를 고려하여 가중계수를 적용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$J_{Load} = w_{TR}J_{TR} + w_{FDR}J_{FDR} \tag{1}$$

$$J_{TR} = \frac{1}{N_{TR}} \sum_{TRi=1}^{N_{TR}} (M_{TRave} - M_{TRi})^2 \tag{2}$$

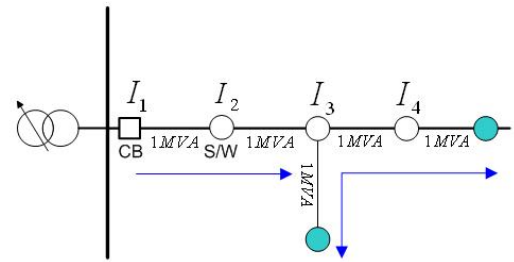
$$J_{FDR} = \frac{1}{N_{FDR}} \sum_{FDRi=1}^{N_{FDR}} (M_{FDRave} - M_{FDRi})^2 \tag{3}$$

- $J_{Load}$  - 부하균등화 목적함수
- $J_{TR}$  - 변압기 부하균등화 목적함수
- $J_{FDR}$  - 피더 부하균등화 목적함수
- $w_{TR}$  - 변압기 부하균등화 가중계수
- $w_{FDR}$  - 피더 부하균등화 가중계수
- $N_{TR}$  - 변압기의 총 개수
- $N_{FDR}$  - 피더의 총 개수
- $M_{TRave}$  - 변압기의 평균 여유용량
- $M_{FDRave}$  - 피더의 평균 여유용량
- $M_{TRi}$  - 각 변압기의 여유용량
- $M_{FDRi}$  - 각 피더의 여유용량

2.2 손실 최소화

배전계통 최적운영의 목적 중 그 중요도가 높은 것은 경제성이다. 손실과 경제성은 매우 밀접한 관계를 가지고 있고 손실은 부하전류의 제곱에 비례하므로 배전계통의 부하를 적절히 분배하여 손실을 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 선로의 손실과 주변압기의 부하전류에 의한 저항손을 고려하여 손실을 최소화 할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

배전계통에서 부하전류의 크기는 부하용량에 의해서 결정된다. 따라서 배전 계통의 각 노드에 흐르는 전류의 크기를 모두 구할 수 있다(그림 1). 여기서 사용되는 부하용량은 평균부하용량을 사용하였다.



$$I_1 = 5MVA / \sqrt{3} \cdot V \tag{4}$$

$$I_2 = 4MVA / \sqrt{3} \cdot V \tag{5}$$

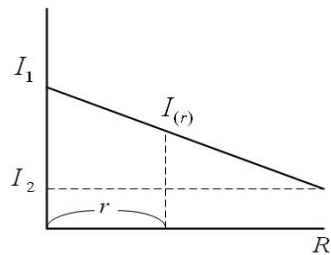
$$I_3 = 3MVA / \sqrt{3} \cdot V \tag{6}$$

$$I_4 = 1MVA / \sqrt{3} \cdot V \tag{7}$$

$I_i$  - 각 노드에 흐르는 전류

그림 1 부하전류 계산  
Fig. 1 Calculation of load current

부하가 균등히 분포되어있다고 가정하면 각 노드의 전류들은 전원에서 멀어질수록 작아진다. 따라서 보다 정확한 전류의 계산을 위하여 섹션을 미세구간으로 나누어 전류를 계산하고 이를 이용하여 섹션 양단의 전류와 선로의 저항으로 구간의 손실을 그림 2에서와 같이 구할 수 있다.



$$I(r) = I_1 - \frac{I_1 - I_2}{R} r \tag{8}$$

$$P_{Loss} = \int_0^R (I_1 - \frac{I_1 - I_2}{R} r)^2 dr \tag{9}$$

$R$  - 섹션의 총 저항  
 $r$  - 적분 변수

그림 2 섹션의 손실 계산  
Fig. 2 Calculation of section loss

모든 섹션의 손실을 계산하면 해당 배전계통의 총 선로 손실을 구할 수 있다. 따라서 선로 손실최소화에 대한 목적 함수를 아래와 같이 설정하였다.

$$J_{LiLoss} = \min \sum_i^N \int_0^R (I_i - \frac{I_i - I_{i+1}}{R} r)^2 dr \quad (10)$$

주변압기의 부하전류에 의한 저항손은 주변압기가 담당하는 부하용량으로 2차측 전류를 구하고 주변압기의 2차측 저항으로 구할 수 있다. 따라서 배전계통 손실최소화의 목적 함수는 아래와 같이 설정하였다.

$$J_{Loss} = J_{LiLoss} + J_{TrLoss} \quad (11)$$

- $J_{Loss}$  - 손실최소화 목적함수
- $J_{LiLoss}$  - 선로 손실최소화 목적함수
- $J_{TrLoss}$  - 변압기 손실최소화 목적함수

### 2.3 전압강하

전력회사의 운영 목표중 하나는 고품질 전력을 수용가에게 보내는 것이다. 고품질 전기는 전압과 주파수를 일정하게 유지하면서 정전이 없이 수용가에게 안정적인 전력을 공급하는 것이다.

1차 배전계통인 22.9KV 배전선로에서 기기를 이용한 전압 관리 방법은 2가지가 대표적이다. 첫째는 상시 배전용 변전소의 주변압기에 설치된 부하시 탭절환장치(OLTC : On Load Tap Changer)를 사용하여 변전소 송출전압을 조정하는 것이다. 변전소의 송출전압은 배전선로 전압강하에 따라 전기사업법에서 규정한 공급전압이 유지될 수 있도록 조정되며, 표 1은 배전선로 전압강하에 따른 변전소 송출전압 유지기준이다.

표 1 변전소 송출전압 유지기준

Table 1 Quality Standard of Substation Emission Voltage

|   |
|---|
| -변전소 단위 공급선로 전제가 전압강하 5% 미만 시<br>→ 22.9KV ± 2.5%      |
| -변전소 단위 공급선로가 전압강하 5% 이상선로와 혼재 시<br>→ 22.9KV +4% ~ 1% |

탭절환장치의 운전방식 중, 자동 운전 시에는 상시 규정 전압 범위내로 자동으로 유지되도록 한다. 또한 변전소의 OLTC에 부가된 부속장치로서 부하 크기에 따라 정전전압을 자동으로 조정 공급하는 AVR(Automatic Voltage Regulator)이 고장 난 경우, 과거 자동운전시의 시간대별 전압 실적에 준하여 변전소 송출전압을 수동으로 조정한다.

둘째, 22.9KV 배전 선로에서 신규 부하 또는 기존 부하의 자연 증가로 전압 강하가 10%를 초과하거나, 초과가 예상되는 경우 가공 배전 선로에 직접 배전 선로 자동전압조정장치(SVR : Step Voltage Regulator 또는 PVR : Pole-mounted Automatic Voltage Regulator)를 설치하여 전압 관리를 하는 것이다. 선로 전압조정장치는 변전소 주

변압기의 OLTC 동작기능과 유사하며, 선로전압조정장치의 운전방식은 표 2와 같다[9].

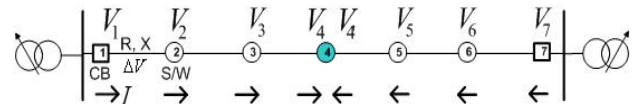
표 2 선로 자동 전압 조정 장치 운전 방식

Table 2 Operation method of Automatic Voltage Regulator

| 방식            | 내용                                       |
|---------------|--|
| -선로 전압강하 보상방식 | -SVR 부하단의 부하중심점 전압을 상시 일정하게 유지하는 자동운전방식  |
| -프로그램 방식      | -운전 시간대별 부하기록을 프로그램화하여 SVR 송출전압을 조정하는 방식 |
| -고정 방식        | -SVR 송출전압을 고정하여 운전하는 방식                  |

위와 같이 배전계통 최적운영의 중요한 요소 중 하나인 전압강하는 이미 자동 전압 조정 장치들에 의해 엄격히 관리되고 있으며, 전압강하를 최소화 하는 것은 배전계통 운영의 여러 요소들과 조합해 보았을 때 큰 이점을 기대하기 어렵다. 따라서 배전계통을 최적 운영하기 위하여 상시 연계점의 최적위치를 찾아낼 때 위의 전압조정장치들의 전압조정 범위를 벗어나지 않도록 각 노드의 전압이 유지될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 따라서 전압강하라는 평가 요소는 최적화를 수행할 때 전압조정 범위를 벗어나지 않도록 하는 제약조건이 되어야 한다.

배전계통에서 피더인출단의 전압을 알고 있기 때문에 피더 인출단 노드를 제외한 각 노드의 전압은 그림 3과 같이 전원측 섹션의 전압강하를 이용하여 구할 수 있다.



$$\Delta V = \sqrt{3}I(R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (12)$$

$$|V_2| = |V_1| - \Delta V \quad (13)$$

- $V_i$  - 각 노드의 전압
- $I$  - 섹션의 부하전류
- $\Delta V$  - 섹션의 전압 강하
- $\cos \theta$  - 부하역률
- $R$  - 섹션의 저항
- $X$  - 섹션의 리액턴스

그림 3 전압강하 계산

Fig. 3 Calculation of voltage drop

계산된 모든 노드의 전압이 전압조정의 범위 안으로 들어오는 조건이 최적화 수행 시 제약조건이 된다. SVR없이 OLTC만 사용되어지고 있는 계통에서는 표 1에 의하여 각 노드의 전압이  $0.92pu \leq |V_i| \leq 1.05pu$ 의 범위를 벗어나지 말아야한다. SVR이 설치된 경우에는 SVR하단의 경우에  $0.84pu \leq |V_i| \leq 1.10pu$ 의 범위를 벗어나지 않아야 전압조정이 가능하다. 그러나 주상 변압기의 탭을 통한 전압조정도 가능하므로 주상변압기의 탭도 고려하여 설정할 수 있다. 본 논문에서는 주상변압기의 탭은 고려하지 않고 전압조정범위를 설정하여 모의하였다.

## 2.4 복구도

배전계통을 운영하는데 있어 중요한 요소를 크게 세 가지로 나누어본다면 보호협조, 복구, 설비운영이다. 배전계통은 수용가와 직접 연결되어 전력의 공급신뢰도가 배전계통 운영의 가장 중요한 개념중의 하나이다. 즉 설비고장에 대한 빠른 복구는 수용가의 정전시간을 줄여 전력공급신뢰도를 높이는데 있어서 매우 중요하다. 즉 수용가의 입장에서 배전자동화 시스템의 성능은 빠른 복구기능이라고 할 수 있다.

배전계통에서 전력설비에 고장이 생겼을 경우, 전원으로 부터 고장지점으로 큰 고장전류가 흐른다. 배전계통은 방사상으로 연결되어 있으므로 고장난 설비의 상단에서 보호기가 고장전류를 검출하고 차단기에 지령을 내려 고장을 제거한다. 이러한 고장제거 동작이후에는 동작한 차단기 이후의 배전계통에 광역정전이 발생하는데, 배전자동화 시스템은 가능한 빨리 고장구간을 제외한 나머지 정전구간을 복구하여야 한다.

고장구간을 제외한 나머지 정전구간의 부하는 다른 건전한 피더로 절체하여 정전구간을 복구하여야 하는데, 부하가 절체된 건전한 피더나 이 피더가 연결된 주변압기가 과부하가 되지 않도록 정전구간의 부하를 적절하게 배분하여 인접 피더로 정전구간의 부하를 절체하여야 한다. 그리고 전력설비의 사고는 배전계통의 임의의 구간에서 발생할 수가 있으므로 배전자동화시스템은 임의의 구간에서 고장이 발생하더라도 고장구간을 제외한 나머지 정전구간이 복구 가능하거나 정전구간이 최소가 되도록 배전계통을 운영하여야 한다. 향후 어떤 고장에 대한 복구가능 여부의 평가와 적용에 대한 연구는 논문[10]에서 깊이 있게 다루고 있다.

따라서 배전계통을 최적의 상태로 운영하기 위해서는 계통이 임의의 고장에 대해서 복구가 가능한지 여부는 매우 중요한 요소가 된다. 이를 바탕으로 계통이 임의의 고장에 대해서 복구 가능하거나 정전구간이 최소가 되도록 배전계통을 최적화 할 수 있다. 하지만 임의의 고장에 대해서 복구가 가능하도록 계통을 구성하여도 그 계통이 종합적으로 최적의 상태는 아니다. 예를 들어 임의의 고장이 발생했을 경우 모든 고장이 복구 가능하더라도 정상 운영 시에 손실이 최소화되어 있거나 전압분포가 최적으로 되어 있는 것은 아니기 때문이다.

본 논문에서는 복구도의 여부를 제약조건으로 설정하였다. 즉 위에서 언급한 배전계통운영 시 중요한 요소들로 최적의 상태를 만들어 낸 후 그 상태의 계통 선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 부하측의 모든 건전한 정전구간이 복구가 가능한지 여부를 평가하여 만약 복구가 가능하지 않은 구간이 있다면 그 상태는 최적의 상태가 아니라 할 수 있다.

본 연구에서 개발된 최적화 프로그램은 모든 구간에 대해서 복구해를 구하고 복구여부를 평가할 수 있는 알고리즘이 포함되어 있다.

## 3. 최적의 상시 연계점 선정방법

### 3.1 상시 연계점 이동 알고리즘

배전계통에는 연계된 하나의 피더쌍에 대하여 하나의 연

계점이 존재하므로 많은 연계피더쌍의 조합에 대하여 많은 수의 연계점이 존재하고, 이 연계점의 위치후보가 매우 많기 때문에 이를 최적으로 결정하는 문제는 매우 복잡한 조합 최적화의 문제로 최적해를 구하는 것은 매우 어렵다. 그러나, 본 논문은 계산시간도 적게 걸리고, 알고리즘이 간단하여, 실제 배전자동화 시스템에 쉽게 적용될 수 있는 연계점 이동 알고리즘을 적용하였다[8]. 하나의 상시연계점은 하나의 피더쌍을 가지기 때문에 피더간의 직선경로로 상시연계점을 이동할 경우 배전계통의 방사상구조를 유지할 수 있고 목적함수가 줄어드는 방향으로 상시연계점들을 차례로 이동하여 최적상태를 탐색할 수 있다.

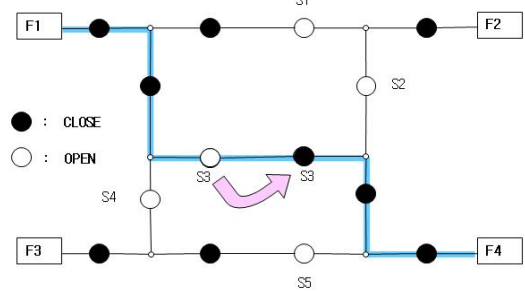


그림 4 연계점 이동 알고리즘

Fig. 4 Tie switch Moving Algorithm

### 3.2 사례연구를 통한 부하균등화와 손실최소화의 분석

배전계통의 운영에 있어서 효율을 높이는 것은 어떻게 배전계통을 방사상으로 구성하여 운전하여야 배전계통에서 손실을 최소로 할 수 있는가, 혹은 전압분포를 최적으로 할 수 있는가, 또는 설비고장 시 정전구간을 최소로 할 수 있는가에 대한 문제이다. 본 연구에서는 이러한 요건들을 충족시키기 위하여 배전계통운영의 중요한 요소인 부하균등화, 손실최소화, 전압강하, 복구도에 대한 평가방법을 앞에서 제시하였고 부하균등화와, 손실최소화에 대한 최적화 알고리즘과 모의 결과를 소개하고 전압강하와 복구도에 대한 알고리즘과 제약조건이 되어야 하는 이유를 설명하였다. 이들 요소들을 통합하여 종합적인 최적화 알고리즘을 제시하기 전에 부하균등화와 손실최소화에 대한 비교를 먼저 수행하였다.

#### 3.2.1 피더 부하균등화와 선로 손실최소화의 관계

배전계통 피더의 부하가 균등화 된다는 것은 각 피더가 담당하는 부하 용량이 균등히 분포되어 있음을 의미한다. 그런데 선로의 손실은 전류의 제곱에 비례하고 전류의 크기는 부하용량에 의해 결정되므로 손실이 작아지려면 피더가 부담하는 부하용량이 균등히 분포되어 각 피더에 흐르는 전류의 크기가 크지 않아야 하므로 거의 비슷한 결과가 나올 것임을 예상할 수 있다. 그림 5와 같은 계통에서 피더 부하균등화와 선로 손실최소화 알고리즘을 각각 수행한 결과는 표 3과 같다. 부하균등화 지수와 손실최소화 지수는 부하균등화 목적함수와 손실최소화 목적함수를 통해 계통을 평가한 결과수치이다. 표 3을 보면 피더부하균등화의 결과와 선로 손실최소화의 결과가 약간 차이를 확인 할 수 있는데, 선로 손실최소화를 수행하였을 경우에 손실이 더 줄어드는 이유는 배전계통의 구성상 전류가 분기가 많이 될수록 전류의 크기가 줄어들어 손실이 줄기 때문이다(그림 6).

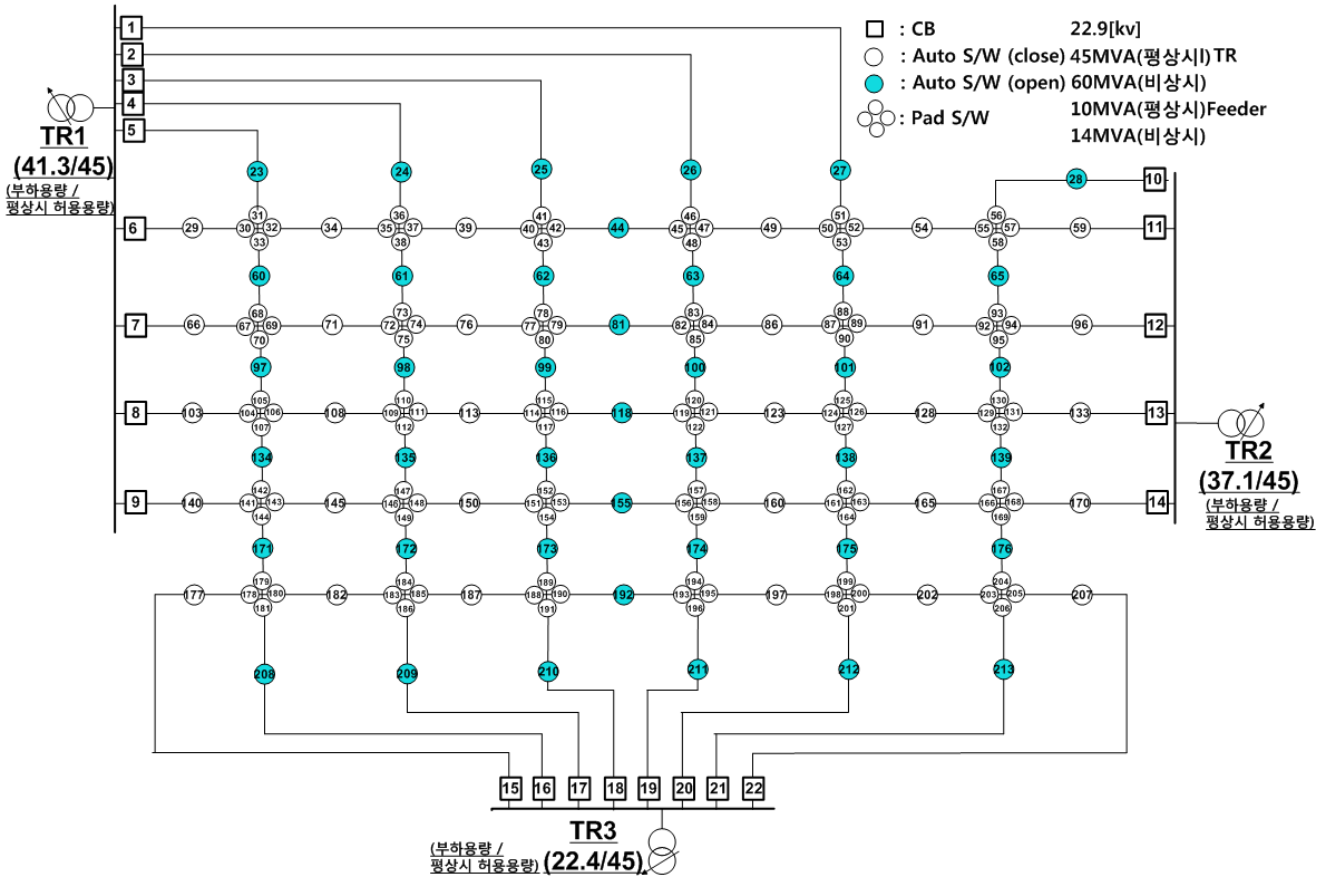


그림 5 모의 계통도  
Fig. 5 Simulation Network

표 3 피더를 고려한 최적화 수행 결과  
Table 3 Results of Optimization considering Feeder

|             | 부하균등화 지수         | 손실최소화 지수             |
|-------------|------------------|----------------------|
| 초기상태        | 17.5             | 133947.4             |
| 피더 부하균등화 수행 | 2.9<br>(-83.43%) | 62359.4<br>(-53.44%) |
| 선로 손실최소화 수행 | 2.9<br>(-83.43%) | 61751.1<br>(-53.9%)  |

피더부하균등화의 최적화 수행 결과와 선로 손실최소화의 최적화 수행결과를 살펴보면 손실최소화의 경우 전류가 분기되는 부분이 많은 것을 확인 할 수 있다.

3.2.2 변압기 부하균등화와 변압기 손실최소화의 관계

변압기의 부하가 균등화 된다는 것은 각 변압기가 담당하는 부하의 용량이 균일하게 분포됨을 의미한다. 변압기의 손실 또한 변압기가 담당하는 부하의 용량에 의해 결정되므로 각 변압기의 용량이 균등하게 분포될수록 그 손실이 작다고 할 수 있다. 그림 5의 모의계통에서 변압기 부하균등화와 변압기 손실최소화 알고리즘을 통해 최적화를 수행한 결과는 표 4와 같다.

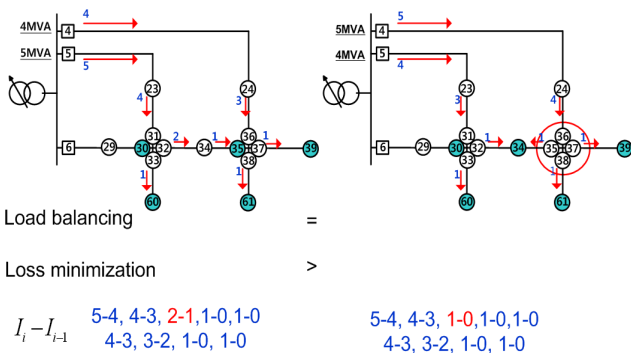


그림 6 전류의 분기에 따른 부하균등화와 손실최소화의 차이점  
Fig. 6 Difference between Load Balancing and Loss Minimization

표 4 변압기를 고려한 최적화 수행 결과  
Table 4 Results of Optimization considering TR

|              | 부하균등화 지수         | 손실최소화 지수             |
|--------------|------------------|----------------------|
| 초기상태         | 58.9             | 311032.2             |
| 변압기 부하균등화 수행 | 0.1<br>(-99.83%) | 295221.3<br>(-5.08%) |
| 변압기 손실최소화 수행 | 0.1<br>(-99.83%) | 295221.3<br>(-5.08%) |



3.2.3 부하균등화와 손실최소화의 관계

본 연구에서는 부하균등화의 목적함수를 설정하기 위해서 변압기 부하균등화와 피더 부하균등화의 목적함수에 가중계수를 설정하여 아래의 식과 같이 부하균등화의 목적함수를 설정하였다.

$$J_1 = w_{TR}J_{TR} + w_{FDR}J_{FDR} \quad (14)$$

변압기와 피더의 가중계수는 변압기 부하균등화의 중요도, 피더 부하균등화의 중요도를 고려하여 설정한다. 본 연구에서 설정한 손실최소화의 목적함수는 아래의 식과 같이 설정하였다.

$$J_{Loss} = J_{LiLoss} + J_{TrLoss} \quad (15)$$

위의 식을 살펴보면 손실최소화의 목적함수는 변압기 손실최소화의 목적함수와 선로손실최소화의 목적함수의 합이지만 변압기 손실최소화는 기지값인 변압기 2차측 저항의 크기에 따라 그 중요도가 달라지며 선로 손실최소화도 기지값인 선로의 저항의 크기에 따라 그 중요도가 달라진다. 따라서 부하균등화의 가중계수인  $w_{TR}$ ,  $w_{FDR}$  과 손실최소화의 변압기 저항, 선로 저항의 관계를 분석해 볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 배전계통에서 사용되고 있는 변압기 2차측 저항과 선로의 저항값을 사용하여 부하균등화와 손실최소화의 결과를 비교 분석해 본 결과는 표 5, 6과 같다. 각 변압기의 2차측 저항의 크기가  $w_{TR}$ 과 같이 작용하여 변압기의 2차측 저항의 크기가 클수록 손실최소화를 수행하였을 때 변압기의 부하가 더 균등히 분포됨을 알 수 있다. 즉 손실최소화시에는 변압기 2차측 저항의 크기와 선로 저

항의 크기가 부하균등화의 가중계수( $w_{TR}$ ,  $w_{FDR}$ )와 같이 작용함을 알 수 있다.

표 5 변압기 2차측 저항(0.06[ohm])에서의 모의결과  
Table 5 Results of Optimization (0.06[ohm])

|          | 부하균등화<br>지수       | 손실최소화<br>지수           | 변압기<br>부하용량[MVA]                       |
|----------|-------------------|-----------------------|--|
| 초기상태     | 76.4              | 266301.5              | TR1 - 41.3<br>TR2 - 37.1<br>TR3 - 22.4 |
| 부하균등화 수행 | 5.3<br>(-93.06%)  | 202229.5<br>(-24.06%) | TR1 - 33.6<br>TR2 - 32.9<br>TR3 - 32.9 |
| 손실최소화 수행 | 35.9<br>(-53.01%) | 192416.5<br>(-27.74%) | TR1 - 39.9<br>TR2 - 25.9<br>TR3 - 33.6 |

표 6 변압기 2차측 저항(0.141[ohm])에서의 모의결과  
Table 6 Results of Optimization (0.141[ohm])

|          | 부하균등화<br>지수       | 손실최소화<br>지수           | 변압기<br>부하용량[MVA]                       |
|----------|-------------------|-----------------------|--|
| 초기상태     | 76.4              | 444979.6              | TR1 - 41.3<br>TR2 - 37.1<br>TR3 - 22.4 |
| 부하균등화 수행 | 5.3<br>(-93.06%)  | 371824.7<br>(-16.44%) | TR1 - 33.6<br>TR2 - 32.9<br>TR3 - 32.9 |
| 손실최소화 수행 | 15.7<br>(-79.45%) | 364612.4<br>(-18.06%) | TR1 - 37.1<br>TR2 - 28.7<br>TR3 - 33.6 |

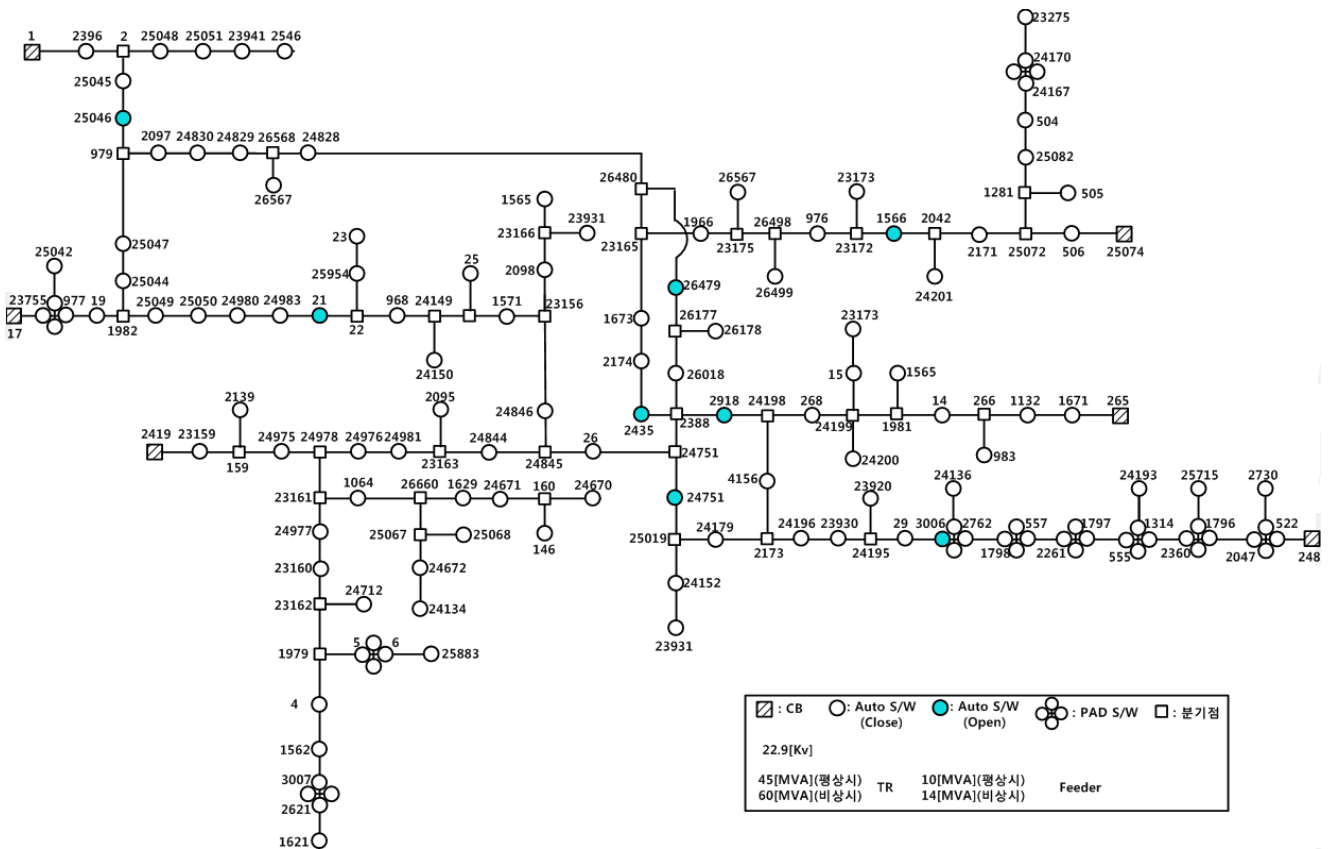


그림 7 서울 강동 지점 배전 계통도

Fig. 7 Distribution Power System Network on Gang-Dong branch office in Seoul

모의결과들을 바탕으로 부하균등화와 손실최소화의 관계를 살펴보면 부하균등화로 계통을 최적화 할 경우에 계통이 균등화되면서 손실도 크게 감소함을 확인할 수 있었고 손실최소화로 최적화를 수행한 것과 비교해 보아도 손실최소화로 최적화를 수행하여 손실이 최소화된 상태와 3%정도의 오차를 갖는 것을 확인하였다. 이 오차는 위에서 설명하였듯이 전류의 분기에 의해서 생기는 것으로 위에서 모의한 계통이 아닌 실제 배전에서 운영되는 계통에서 모의가 필요하다.

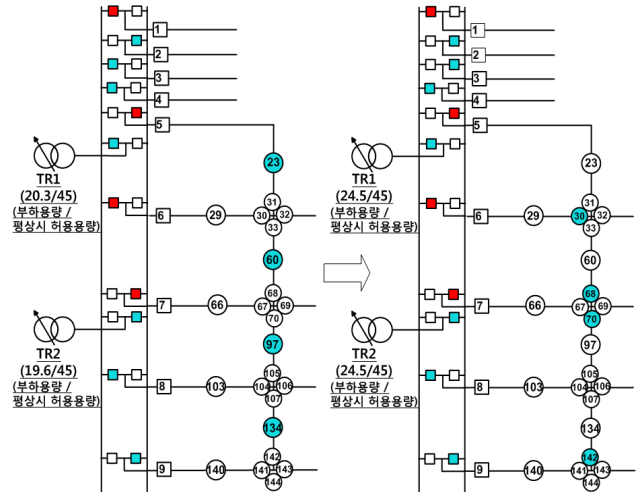
그림 7의 서울 강동지점의 일부 배전계통에 대한 모의 결과는 표 7과 같다. 실제 배전계통에서 최적화를 수행한 결과 부하균등화로 인한 결과와 손실최소화로 최적화를 수행하여 손실이 최소화된 상태는 0.35%의 오차를 가짐을 확인할 수 있다. 따라서 손실이 최소화 되는 상태와 부하가 균등히 되는 상태는 차이가 있으며 계통이 복잡할수록 그 오차가 커질 것임을 알 수 있으며 현재의 배전계통에서는 그 오차가 작음을 알 수 있다.

**표 7** 서울 강동 지점 계통에서의 최적화 수행 결과  
**Table 7** Results of Optimization on Gang-Dong Branch Network in Seoul

|          | 부하균등화 지수         | 손실최소화 지수             |
|----------|------------------|----------------------|
| 초기상태     | 7.2              | 96038.9              |
| 부하균등화 수행 | 2.1<br>(-70.83%) | 70923.8<br>(-26.15%) |
| 손실최소화 수행 | 2.1<br>(-70.83%) | 70582.0<br>(-26.5%)  |

**3.3 2중모선 최적화 알고리즘**

현재의 배전 계통은 부하의 용량을 고려하여 2중모선을 통하여 각 피더에 전력을 공급함으로써 변압기 간의 부하용량이 균등히 분배되도록 설계되어있지만 신규 부하 또는 기존 부하의 자연 증가로 부하용량의 불균형이 생길 수 있다. 향후에 2중모선 사이에 line S/W를 설치하여 자동제어가 가능하도록 할 계획이기 때문에 line S/W의 개폐상태 또한 최적화 하여 각 변압기가 담당하는 피더의 용량을 최적화 시킬 수 있다. 그러나 현실적으로 배전계통 운영에서 어떤 변압기에 소속되어 있는 피더의 부하를 다른 변압기가 담당하게 하는 것은 많은 제약조건이 따른다. 예를 들어 어떤 피더의 부하용량은 꼭 어떤 변압기가 담당해야 한다는 조건이 있을 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 조건들을 고려하여 피더의 부하용량을 다른 변압기로 옮길 수 있는 피더와 옮길 수 없는 피더로 나누어 옮길 수 있는 피더만 최적화하여 2중 모선까지 고려한 최적화 알고리즘을 개발하였다. 그림 8은 이중모선을 고려한 모의 계통과 수행 후 결과를 나타내며 최적화 전 변압기1(TR1)은 1,3,4,6,8번 피더의 부하를 담당하고 있으며 변압기2(TR2)는 2,5,7,9번 피더의 부하를 담당하고 있다. 피더의 부하를 다른 변압기로 옮길 수 있는 피더는 2,3,4,8,9번 피더이고 옮길 수 없는 피더는 1,5,6,7번 피더이다. 최적화 수행 후의 결과는 표 8과 같다. 변압기1(TR1)은 1,4,6,8,9번 피더의 부하를 담당하고 있으며 변압기2(TR2)는 2,3,5,7번 피더의 부하를 담당하고 있고 변압기1과 변압기2의 부하용량은 24.5[MVA]로 서로 같음을 알 수 있다.



**그림 8** 2중 모선을 고려한 최적화 수행결과  
**Fig. 8** Results of Optimization considering Double Bus

**표 8** 2중 모선을 고려한 최적화 수행 결과  
**Table 8** Results of Optimization considering Double Bus

|                      | 부하균등화 지수         | TR-1 소속피더     | TR-2 소속피더  |
|----------------------|------------------|---------------|------------|
| 초기상태                 | 68.6             | 1, 3, 4, 6, 8 | 2, 5, 7, 9 |
| 연계점 최적화              | 4.2<br>(-93.88%) | 1, 3, 4, 6, 8 | 2, 5, 7, 9 |
| 2중모선 최적화<br>+연계점 최적화 | 4.1<br>(-94.02%) | 1, 4, 6, 8, 9 | 2, 3, 5, 7 |

2중 모선까지 고려한 최적화 알고리즘은 현재의 배전자동화시스템에서는 2중모선의 개폐기들이 자동화되어 있지 않으므로 적용하기 어려우나 연계점 스위치의 최적화로 최적화되지 않는 변압기사이의 피더 분배문제를 해결 할 수 있어 차후에는 꼭 고려되어야 하는 사항이다.

**3.4 종합 최적화 알고리즘**

본 연구에서는 최적의 상시연계점 위치선정을 위한 중요요소로써 부하균등화, 손실최소화, 전압강하, 복구도를 고려하였다. 전압강하와 복구도는 분석과 모의 결과 전압강하는 각 노드의 전압이 OLTC만 사용되어지고 있는 계통에서는  $0.92pu \leq |V_i| \leq 1.05pu$ , SVR이 설치된 경우에는 SVR하단의 경우에  $0.84pu \leq |V_i| \leq 1.10pu$ 의 범위를 벗어나지 않도록 제약조건으로 설정하였고 복구도는 복구도 평가를 통하여 선로상의 어느구간에서 고장이 발생하더라도 부하측의 모든 건전한 정전구간이 100%복구될 수 있도록 제약조건으로 설정하였다 FRI(Feeder Restoration Index) > 0.[10] 부하균등화와 손실최소화는 비교분석을 통하여 그 유사성과 차이점을 확인하였다.

따라서 부하균등화가 최적으로 되는 지점이 손실이 최소가 되는 지점과 거의 비슷하며 설비의 이용률과 향후 복구 문제에 더 유리하므로 부하균등화를 통해 최적화를 수행하는 것이 현재의 배전계통에 매우 적합함을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전압강하와 복구도를 제약조건으로 하고 부하균등화를 목적함수로 설정하여 상시연계점의 최적

위치를 선정하는 알고리즘을 제안한다. 그러나 배전계통은 더욱더 복잡한 계통구성에 관한 연구가 진행되고 있으며 부하의 증가 등으로 그 구조가 매우 복잡해 질 것이다. 계통의 구조가 복잡해질수록 전류의 분기 등으로 인한 부하균등화와 손실최소화의 차이가 작지만 점점 증가할 수 있다.

상시연계점을 최적화 하여 운영하는 것은 결국 효율적인 운영을 통해 운영비용을 절감하는 것이기 때문에 최적의 상시연계점의 위치는 운영비용이 가장 적은 상태라고 볼 수 있다. 따라서 현재의 계통에서는 부하균등화를 목적으로 하여 최적화를 수행하는 것이 합리적이거나 미래에 배전계통의 복잡도가 증가하게 되면 경제성을 고려하여 목적함수를 설정해야 한다. 손실당, 부하균등화당 얼마라는 것에 대한 정의를 통해 평가요소들의 경제성을 판단하여 가중치 계수로써 반영하여 최적의 상시연계점 위치를 선정할 수 있다.

부하균등화와 손실최소화의 두 목적함수의 결과 값의 범위와 크기가 큰 차이를 보이기 때문에 가중치 계수를 반영하기 위해서는 목적함수를 정규화(normalize)시키는 과정이 필요하다. 정규화된 목적함수  $\bar{J}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{J} = \frac{J - J^U}{J^N - J^U} \quad (16)$$

여기서  $J^U$ 는 이상 최적해(utopia point)로써 정의 되고,  $J^N$ 은 최하 최적점(nadir point)으로써 정의된다. 이상 최적해는 각각 부하균등화와 손실최소화의 최적화 수행 결과로 얻을 수 있으며 본 논문에서 적용한 연계점 이동 알고리즘은 목적함수가 줄어드는 방향으로 이동하는 알고리즘이므로 초기의 계통 상태를 최하 최적점으로 정의할 수 있다. 이를 부하균등화와 손실최소화의 목적함수에 적용하면 부하균등화와 손실최소화의 목적함수  $J$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$J = w_{Load} \frac{J_{Load} - J^{U_{Load}}}{J^{N_{Load}} - J^{U_{Load}}} + w_{Loss} \frac{J_{Loss} - J^{U_{Loss}}}{J^{N_{Loss}} - J^{U_{Loss}}} \quad (17)$$

- $w_{Load}$  - 부하균등화 경제성 가중계수
- $w_{Loss}$  - 손실 경제성 가중계수
- $J^{N_{Load}}$  - 초기의 계통 상태의 부하균등화지수
- $J^{U_{Load}}$  - 부하균등화의 최적해
- $J^{N_{Loss}}$  - 초기의 계통 상태의 손실최소화지수
- $J^{U_{Loss}}$  - 손실최소화의 최적해

#### 4. 사례연구를 통한 연계점 이동 알고리즘의 검증

연계점 이동 알고리즘의 검증을 위해 그림 7의 모의 계통도에서 연계점의 초기 위치를 변화시켜 모의 하였다. 초기 연계점의 위치가 이중전원이나 정전구간을 발생하지 않는 임의의 30가지의 연계점 위치에서 모의한 결과 표 9과 같이 하나의 최적 상태로 수렴함을 확인할 수 있었다.

그림 5의 모의계통도에서 연계점의 초기 위치를 변화시켜

모의한 결과는 표 10과 같다. 다양한 초기 상태에서 최적화를 수행한 결과 최적화 수행후의 연계점의 위치가 하나로 수렴하지 않으나 목적함수의 수행결과 값이 같으므로 그림 5의 모의 계통은 최적해가 여러 개 존재하는 계통이라 할 수 있다. 또한 국부해가 존재한다 하더라도 현재 배전계통이 최적해와 가까운 위치에서 운전하고 있다는 점을 고려하면 국부해의 문제는 본 논문에서 적용한 연계점 이동 알고리즘을 적용했을 때 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

표 9 서울 강동 지점 계통에서의 모의 결과  
Table 9 Results of Optimization on Gang-Dong Branch Network in Seoul

| 초기의 상시연계점 위치          | 최적화 수행 후 상시연계점 위치 |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| 임의의 30가지 초기 상시 연계점 위치 | 부하 균등화            | 25047, 24846, 1966, 1673, 26479, 2918, 268, 24179 |
|                       | 손실 최소화            | 25047, 24846, 1966, 1673, 26479, 2918, 14, 24179  |

표 10 그림 4의 모의 계통도에서의 모의 결과  
Table 10 Results of Optimization on Simulation network in Fig. 4

| 초기의 상시연계점 위치          | 최적화 수행 후 결과 값 |                                |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|
| 임의의 30가지 초기 상시 연계점 위치 | 부하 균등화        | 5.3 (부하균등화 지수)<br>[3가지 상태로 수렴] |
|                       | 손실 최소화        | 192416.5 (손실최소화 지수)            |

#### 5. 결 론

배전계통 운영은 배전계통 운영 시 중요한 요소들을 고려하여 최적의 상태에서 운영되어야 한다. 본 연구에서는 배전계통 운영의 중요한 요소인 부하균등화, 손실최소화, 전압강하, 복구도를 모두 고려하였고 부하균등화와, 손실최소화의 비교분석을 통하여 차이점과 유사성을 고려하여 부하균등화와 손실최소화를 목적으로 하고 전압강하, 복구도, 방사상 구조 유지, 선로의 열용량등을 제약조건으로 하는 종합 최적화 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서 개발한 최적화 시스템은 배전계통의 중요요소들을 평가할 수 있으며 연계점 이동 알고리즘을 적용하여 속도가 빠르고 정확하다는 장점이 있다. 최적화 시스템을 통한 시뮬레이션으로 알고리즘의 타당성을 증명하였다. 또한 서울 강동지점의 배전계통을 통해 알고리즘을 검증하였으며 미래의 더 복잡한 계통에 대한 검증을 수행하여 알고리즘의 신뢰성을 높였다.

배전계통은 점점 그 구조가 복잡해지고 있으며 설비의 자동화가 확산되고 있다. 배전계통의 구조가 복잡해질수록 최적의 연계점 상태에서 운영하는 것은 더욱 더 중요해질 것이다. 따라서 본 연구에서는 향후 제어가 가능하게 될 2중모선 까지 고려한 최적화 알고리즘 또한 제안하였으며 향후 복잡도가 높아질 미래의 배전계통도 고려한 종합적인 연계점 최적화 알고리즘을 제안한다.



**감사의 글**

본 연구는 산업자원부의 전력IT IDMS(Intelligent Distribution Management System) 과제와 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

**참 고 문 헌**

[1] Augugliaro, A., Dusonchet, L., Ippolito, M.G., Sanseverino, E.,R., "Minimum losses reconfiguration of MV distribution networks through local control of tie-switches", Power Delivery, IEEE Transactions, Vol 18, No 3, pp 762 - 771, Jul 2003.

[2] K. Aoki, T. Ichimori, and M. Kanezashi, "Normal state optimal load allocation in distribution systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-2, pp. 147-155, Jan. 1987.

[3] Augugliaro, A., Dusonchet, L., and Sanseverino E.,R., "Genetic, simulated annealing and tabu search algorithms: Three heuristic methods for optimal distribution networks's reconfiguration and compensation," Europe. Trans. Elect. Power Eng., vol. 9, no. 1, pp. 35-41, Jan/Feb. 1999.

[4] Gunther Brauner, Manfred Zabel, "Knowledge based Planning of Distribution Networks", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 2, PP. 942-948, May., 1994

[5] K. Nara, et. al, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimization Reconfiguration", IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, No. 3, August 1992.

[6] D. Shirmohammadi, H. Wayne Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive losses reduction," IEEE Transactions on Power Delivery. April 1989, pp. 1402-1498.

[7] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, No. 2, pp.1401-1407, April 1989.

[8] 임일형, 최면승, 이승재, 신창훈, 하복남 "배전자동화 시스템에서 전력설비 부하균등화를 고려한 피더간 연계점 최적위치선정" 전기학회논문지 V. 56, no. 5, pp.821-828, 2007년 5월

[9] 박상만, 박창호, 정영호, 최정환, 김충환, "배전 시스템의 전압 강하 분담률에 관한 연구" 대한전기학회 학술회 논문집 pp.2597-2599, 2004

[10] S. L. Lim, S. H. Kang, "Restoration Index in Distribution Systems and its Application to System Operation", IEEE Transactions on Power Delivery, 21 (4), Nov, 2006

[11] Kashem, M.A., Ganapathy, V., Jasmon, G.B.,

"Network reconfiguration for load balancing in distribution networks", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 146, Issue 6, pp. 563-567, Nov, 1999

[12] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jurneau. "Optimal Network Reconfiguration Distribution System: Part 1: A New Formulation and A Solution methodology", IEEE Transactions on Power Delivery." Vol.5, No. 4, November 1990.

[13] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jurneau. "Optimal Network Reconfiguration Distribution System: Part 2: A Solution Algorithm and Numerical Results", IEEE Transactions on Power Delivery." Vol.5, No. 3, November 1990.

**저 자 소 개**



**김 준 호 (金 俊 浩)**

1970년 8월 26일생, 1996년 조선대학교 전자계산학과 졸업(학사), 1996년 ~ 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 재직  
Tel : 031-420-0761  
Fax : 031-420-0799  
E-mail : xlindow@kdn.com



**임 희 택 (林 熙 澤)**

1981년 3월 15일생, 2007년 명지대학교 전기공학과 졸업(학사), 2009년 동대학 전기공학과 졸업(석사), 2009년 ~ 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 재직  
Tel : 031-420-0768  
Fax : 031-420-0799  
E-mail : swish41@kdn.com



**유 남 철 (劉 南 哲)**

1966년 3월 6일생, 1987년 목포해양대학교 정보통신과 졸업, 2009년 한국산업기술대학교 전자공학과 졸업(석사), 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 재직 2007년 송변전IT연구그룹장, 2008년 배전IT연구그룹장  
Tel : 031-420-0760  
Fax : 031-420-0799  
E-mail : ync@kdn.com



**임 일 형 (林 一 亨)**

1979년 4월 13일생. 2005년 명지대학교 전기공학과 졸업.(학사) 2007년 동대학 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 031-336-3290

Fax : 031-330-6816

E-mail : sojoo2jan@mju.ac.kr



**최 면 송 (崔 勉 松)**

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 031-330-6367

E-mail : mschoi@mju.ac.kr



**이 승 재 (李 承 宰)**

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학박사).

1994년 Univ. of Washington 교환 교수.

현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 031-336-6362

E-mail : sjlee@mju.ac.kr



**하 복 남 (河 福 男)**

1958년 1월 10일생. 1994년 충남대 대학원 전기공학과(석사). 2004년 충남대 대학원 전기공학과(공학박사), 1978년 한국전력공사 입사 이후 대전전력관리처, 광주전력관리처, 전력연구원 근무, 1988년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 배전IT 그룹 장.

Tel : 042-865-5930

E-mail : bnha@kepri.re.kr