

배전자동화 시스템에서 전력설비 부하균등화를 고려한 피더간 연계점 최적위치선정

論 文
56-5-1

A Method for Optimal Location of Feeder Tie Switches for Improving Equal Load of Electric Power Equipment in Distribution Automation System

林 一 亨* · 林 星 日** · 崔 勉 松† · 李 承 宰*** · 申 昌 勳§ · 河 福 男§§

(Il Hyung Lim · Seong-Il Lim · Myeon Song Choi · Seung Jae Lee · Chang Hoon Shin · Bok Nam Ha)

Abstract - This paper proposes a new algorithm to find optimal location of open switches connecting feeders in distribuion system. In order to enhance power system reliability by minimizing outage area in case of fault, the load balance among the facilities such as transformers and feeders is considered to optimize. The combination of optimal position of normal open switches can be found by moving tie along the direct path connecting two feeders related to the open switch while the whole optimization problem is separated into many small problems. The proposed algorithm is shown by case study results that, it is simple and takes short calculation time to apply to the DAS (Distribution Automation System) in KEPCO (Korea Electric Power Cooperation).

Key Words : 배전자동화, 부하균등화, 변압기 부하균등화, 상시연계점 최적화

1. 서 론

배전자동화 시스템은 배전선로에 산재되어 있는 자동화 개폐기(FRTU : Feeder Remote Terminal Unit)를 원격에서 감시, 제어함으로써 배전계통을 더욱 효율적으로 운영하기 위한 시스템이다[1]. 배전계통 운영에서 가장 중요한 요소 중에 하나는 보호와 복구라고 할 수 있다. 전력계통은 고유의 특성으로 고장이 발생되었을 때 이를 신속히 제거하지 않으면 건전한 설비로 고장이 파급되어 피해 범위가 급속히 확산되므로 보호가 중요하다. 수용가의 입장에서 전기와 관련하여 가장 기본적인 중요한 문제는 전력이 공급되지 않은 것이므로 정전구간을 최소화하고 건전한 정전구간에 전력공급을 재개하는 복구 또한 매우 중요하다. 배전선로에 고장이 발생하면 변전소에서 고장지점으로 큰 고장전류가 흐르게 되고 보호계전기는 이 고장전류를 검출하여 선로를 차단한다. 배전계통은 방사상 구조로 운영되기 때문에 선로가 차단되면 고장구간 뿐만 아니라 선로 전체가 정전을 경험하게 되며, 고장구간 이외의 건전한 정전구간을 이웃한 연계선로로 절체하여 신속히 전력공급을 재개하여야 한다[2]. 이때 고려해야할 제약조건은 부하를 절체받은 연계선로 및 해당 변전소의 주 변압기가 과부하를 경험하지 않아야 한다는 것이다.

그리고 전력설비의 사고는 배전계통의 임의의 구간에서 발생할 수가 있으므로 배전자동화시스템은 어떤 구간에서든 지 고장이 발생하더라도 고장구간을 제외한 나머지 정전구간이 복구 가능하거나 정전구간이 최소가 되도록 배전계통을 운영하여야 한다. 배전계통의 운영에 있어서 효율을 높이는 것은 어떻게 배전계통을 효율적으로 구성하여 운전하여야 배전계통에서 손실을 최소로 할 수 있는가, 전압분포를 최적으로 할 수 있는가, 그리고 설비고장 시 정전구간을 최소로 할 수 있는가에 대한 문제이다.

배전계통의 방사상 구성은 그물망 형태로 연결된 배전망의 피더와 피더사이를 연결하는 상시연계점의 위치에 따라 결정된다. 배전계통에서 최적 상시연계점들을 결정하는 문제는 매우 복잡한 조합의 해를 찾는 문제로써 그동안 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 지금까지의 많은 연구들은 조합적인 최적화 문제에 좋은 해를 제공하는 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing) 알고리즘, 전문가 시스템(expert system), 경험적 최적화 방법인 타부 탐색과 생물의 유전 방식을 이용한 전역적 최적화 방법인 유전자 알고리즘 등을 이용하여 배전 계통의 재구성 문제를 연구하였지만 각각 알고리즘의 한계로 인하여 적용에 많은 어려움을 겪어왔다[3-8]. 배전계통은 빠르게 변화하며 점점 커지는 특징을 가지고 있다. 이에 배전자동화 시스템에서의 최적화 문제는 현재 얻을 수 있는 정보를 통하여 빠르고 가장 현실적인 해를 가져 올 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구는 배전자동화 시스템에서 사고 시 정전구역 최소화할 수 있도록 최적 상시연계점의 목적함수를 설정하였으며, 국부해에 빠지는 단점이 있지만 현재 나와 있는 알고리즘 중 가장 빠르게 수렴하며 가장 현실적인 해를 찾아주는 상시연계점 교환방법을 이용하여 전력공급신뢰도를 높이는 방법을 제안하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 배전자동화 시스템의 구성과 기능을 설명한다. 3장에서는 배전설비 부

* 正 會 員 : 明 知 大 學 工 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
 ** 正 會 員 : 明 知 大 學 工 大 電 算 工 學 科 研 究 教 授 · 工 博
 † 교 신 자, 終 身 會 員 : 明 知 大 學 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 E-mail : mschoi@mju.ac.kr
 *** 優 待 會 員 : 明 知 大 學 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 § 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員
 §§ 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 首 席 研 究 員 · 工 博
 接 受 日 字 : 2006年 12月 18日
 最 終 完 了 : 2007年 3月 5日

하균등화를 고려한 상시개방점 최적화 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 사례연구를 통하여 본 논문에서 제시한 알고리즘이 실용적으로 유용성을 검증한다.

2. 배전자동화 시스템의 배전계통 구성

2.1 배전자동화 시스템의 구성

배전자동화 시스템의 목적은 원거리에 산재하는 배전선로용 개폐기들 간에 전압과 전류 등의 계통 운전 정보를 자동으로 수집하여 중앙에서 개폐기를 제어할 수 있도록 하며, 고장 구간을 자동으로 검출하여 자체적으로 이에 대응할 수 있는 시스템을 구축하는 것이다.

배전계통의 각 단위 그룹에는 중앙 제어실 내에 배전자동화 시스템(Distribution Automation System: DAS)이 존재하며 DAS는 각 그룹 내의 FRTU로부터 데이터를 수집하고 필요한 제어 정보를 FRTU에 전송한다.

FRTU로부터 얻을 수 있는 정보는 상전류, 일일 최대부하전류, 평균부하전류, 전원과 부하측 전압, 고장전류, 역률, 피상전력과 온도 등을 포함하고 있는 Analog 값들과 개폐상태, 가스압력 또는 축전지 상태, 전원과 부하측 단/결상, 자기진단 등의 계통의 상태 및 FRTU의 상태를 나타내주는 Binary 값들이 있다. 이 정보를 토대로 오퍼레이터의 판단에 의해 적절하게 배전계통을 운영하고 있다.

2.2 배전자동화 시스템의 상시연계점 설정

배전자동화 시스템에 포함되어 있는 기능들은 배전계통의 상시개방 스위치인 상시연계점의 최적 위치를 결정하기 위해 전압최적화, 손실최소화, 복구도 등을 고려하여 목적함수를 정하고 최적의 상시연계점 위치를 찾는다. 그리고 고장 발생 시에 정전구역을 복구하기 위하여 정전구역 최소화, 전압최적화, 스위칭 동작 최소화 등을 고려하여 정전구역을 복구하도록 배전계통을 재구성한다.

이와 같은 정전복구기능에 있어서 가장 중요한 개념은 정전구역을 최소화하는 것이다. 고장구간을 제외한 나머지 정전구간을 모두 복구해야 하며 가능한 한 정전구간을 최소로 하는 것이다. 이와 같이 정전구간을 최소로 하기위한 해가 여러 개가 존재할 경우 손실 및 전압 최적화 등의 효율을 고려하여 그 중 효율이 가장 좋은 해를 선택한다.

현 배전자동화 시스템에서 정전복구는 고장 상황에 대해 정전구간의 부하를 적절하게 분배하여 인근 피더로 부하를 절체하는 것이다. 적절한 부하 분배를 정할 때는 인근피더의 허용용량을 초과하지 않고 효율을 고려하여 정전구간을 최소화 시키는 복구해를 찾는다. 하지만 인근 피더의 용량 한계와 그 피더가 연결되어 있는 변압기의 용량한계로 인하여 불가피하게 정전구간이 생길 수도 있다.

수용가의 입장에서 배전자동화의 가장 중요한 기능은 전력공급의 신뢰도이므로 고장구간을 제외한 나머지 구간에 이와 같이 불가피한 정전을 방지하는 것이다. 이런 불가피한 정전이 발생하는 원인은 변압기나 선로의 용량한계 때문이다. 따라서 배전계통의 구성계획은 배전설비의 임의의 구간에서 고장이 발생하더라도 정전된 부하를 인근 피더로 절

체할 수 있도록 하기위하여 변압기나 피더에 일정량의 여유를 갖도록 설계하여야 한다.

이러한 문제로 한전에서는 배전계통의 모든 선로들이 평상시 전선의 허용전류만큼 부하를 담당하지 않고 이웃한 선로의 고장 시 정전부하를 절체받기 위한 일정량의 공급여유용량을 확보하도록 운전하고 있다. 한전의 배전선로 운전용량 운영기준은 전선이 ACSR160[mm]일 때 14,000[kVA]를 최대 공급용량으로 하고 고장이 발생되면 선로를 3분할하여 절체할 수 있도록 평상시 10,000[kVA] 이내로 공급을 규정하고 있다.

그러나 이와 같이 배전계통 설계 시에 변압기나 피더에 여유용량을 갖도록 설계하더라도 실제로 변압기나 피더에 부하가 불균등하게 운전되고 있고, 만약 부하 분담이 많은 설비가 고장이 일어난다면 많은 양의 부하를 인근피더에 절체하여야 하는데, 이때 인근 피더가 많은 부하를 담당하여 여유용량이 적을 때에는 불가피하게 정전구간의 부하를 모두 복구할 수 없는 경우가 생길 수 있다.

실제로 한전 사업소에서는 배전자동화 시스템에서 제공하는 복구해를 잘 신뢰하지 않고 오퍼레이터의 판단에 의해 모든 부하를 한꺼번에 수용할 수 있는 연계선로로 부하를 절체하고 있다. 이 또한 모든 부하를 절체받은 구간에서 연속적인 사고가 발생할 경우 큰 문제가 생길 수도 있다. 따라서 배전자동화 시스템의 공급신뢰도 향상을 통한 배전계통 운영의 효율 향상을 위해서는 피더간 상시연계점 최적위치 문제는 필수적으로 고려해야할 사항이다.

3. 배전계통 설비 부하 균등화를 고려한 피더간 상시연계점 최적 위치 선정 방법

3.1 전력공급 신뢰도를 고려한 배전계통 상시연계점 최적 위치 선정 문제

배전계통 재구성은 계통내의 연계 개폐기와 구분 개폐기의 위치 및 상태의 변화를 이용하여 배전계통의 구조를 변경하는 것이다. 이는 배전계통운전 중 운전조건 변화나 과부하 발생에 의한 것으로 계통의 전체 손실을 감소시키고 부하의 균형 공급 측면에서 매우 중요하다. 이와 같은 계통 재구성을 위한 상시연계점 최적화 문제는 변압기, 선로용량, 전압강하, 방사상 구성 등의 제약 조건을 만족하면서 선로 손실, 부하균등화 등을 고려하여 상시연계점 위치를 결정하는 조합 최적화의 문제이다.

배전계통의 상시연계점의 위치를 최적화하기 위하여 고려해야하는 것은 기본적으로 전체 배전계통에서 선로의 손실을 최소로 하여야 하며, 전압강하로 인한 배전선로의 말단의 전압이 정격전압범위 이내로 들어가는 것이다. 또한 배전계통 운영에 있어서 신뢰성 있게 전력을 공급하려면 배전계통의 임의의 위치에서 설비고장이 발생하였을 때 고장구간을 제외한 나머지 불필요한 정전구간의 부하를 연계선로로 절체하여 정전구간을 최소화 하여야 한다.

따라서 연계선로에서 복구대상 정전구간의 부하를 절체받으려면 절체 받은 선로나 이 선로가 연결된 변압기가 과부하가 되지 않도록 정상 시에 부담하는 부하가 적절하도록 상시연계점이 선정되어야 한다.

3.2 배전계통 전력공급 신뢰도를 높이기 위한 설비 부하 균등화의 필요성

배전계통의 구간 분할을 위한 상시연계점의 위치를 계획할 경우 한 선로의 최악의 상황(변압기 인출단 근처의 사고)을 고려하여 고장구간을 제외한 나머지 구간이 연계선로로 절체될 수 있도록 계획을 해야 한다.

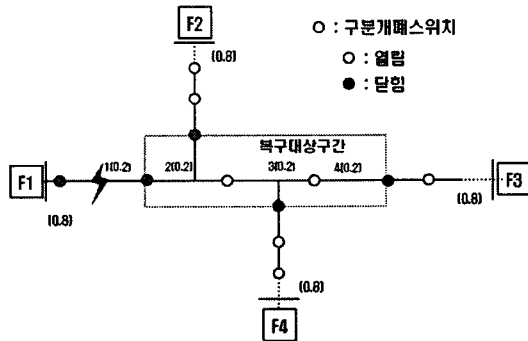


그림 1 4분할 3연계의 배전계통
Fig. 1 Distribution network of 4 partition and 3 connection

그림 1은 4분할 3연계의 배전계통 구조로서 한 피더를 4개로 분할할 수 있도록 이 피더 내에 구분개폐 스위치를 설치하고, 고장 시에 복구대상구간을 연계 피더로 절체가 가능하게 한 것이다. 각 설비 용량이 모두 같은 경우 복구대상구간을 모두 복구할 수 있는 조건하에 최대 부하수준은 배전계통의 구조에 따라 결정되며, 이와 같이 4분할 3연계구조의 경우 0.8[pu]이다. 그림에서 각 피더의 부하수준은 0.8[pu]이며, 부하가 일정하게 분포하였을 경우 각 구간의 부하는 0.2[pu]이다. 구간 1에 사고가 있을 경우 복구대상의 각 구간은 연계 피더로 절체되며, 이때 인근 피더는 총 부하용량이 1.0[pu]로 늘어나지만 과부하는 되지 않는다.

이와 같이 배전계통이 계획된 구조에 따라 피더나 변압기의 최대 부하수준 즉, 최대 설비 이용률이 결정되며, 사고시 복구 대상지역을 모두 복구하기 위해서는 각 설비의 부하가 균등하게 운전되어야 한다.

따라서 배전계통의 전력공급 신뢰도와 경제성을 높이기 위하여 설비의 이용률을 높이려면 배전계통의 분할 및 연계 설계 계획에 따른 정해진 정상 시 최대 부하량 이내로 모든 피더나 변압기의 부하가 균등하게 운용되어야 한다.

이렇게 배전계통이 운영될 때에는 배전계통의 임의의 위치에서 고장이 일어나더라도 고장구간을 제외한 나머지 구간의 부하를 연계선로로 절체하여 정전을 복구할 수 있다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 배전계통의 피더와 피더를 연결하는 상시개방점을 최적화된 위치로 이동시키는 배전계통의 변압기와 피더의 부하 균등화가 필요하다.

현재 우리나라 배전계통의 경우 한 피더의 상시공급용량을 10MVA 기준으로 할 때 비상시공급용량은 12.5MVA이며, 한 구간 당 2.5MVA를 공급한다. 정상시에 한 피더는 상시공급용량 한계치인 10MVA를 공급하고 있으며, 사고

시에도 한 구간 부하인 2.5MVA를 절체 받아 12.5MVA가 되어 비상시 공급용량 한도를 초과하지 않는다. 그리고 정상시의 주변압기 최대 부하수준을 정격용량의 0.8[pu]로 정하여 60MVA 주변압기의 경우, 배전계통에서 고장이 발생하더라도 한 피더 정도에 추가로 전력을 공급할 수 있도록 충분한 여유용량을 주고 운전하고 있다.

3.3 배전계통 설비부하 균등화를 고려한 목적함수 설정

배전계통 설비(변압기 또는 피더)부하 균등화를 통해 전력공급의 신뢰도를 높이기 위한 배전계통의 최적 연계점을 찾는 문제의 목적함수는 식 (1)과 같이 이전 목적함수와 부하균등화 추가 목적함수의 가중 합으로 정의할 수 있다.

$$J = w_0 J_0 + w_1 J_1 \tag{1}$$

J_0 : 기존의 목적함수 (손실과 전압강하 고려)

J_1 : 부하균등화 목적함수 (변압기/피더 부하균등화 고려)

w_0, w_1 : 가중계수

여기서 가중계수는 각 목적함수의 비중을 나타낸다. 손실이나 전압강하를 주목적으로 한 배전계통 운용에서는 w_0 를 상대적으로 크게 정하고, 전력공급신뢰도를 주목적으로 한 배전계통 운용에서는 w_1 를 상대적으로 크게 정하여 목적함수 계산을 통해 비중에 따른 최적화된 상시연계점의 위치를 결정한다.

또한 손실이나 전압강하로 인한 비용증가와 전력공급신뢰도가 낮아짐으로써 생기는 공급지장비용의 증가 등을 고려하여 가중계수를 비용으로 계산하는 방법이 있을 수 있다.

배전계통 설비의 부하균등화 목적은 배전계통 운영 중 각 설비 내에서 사고 발생 시 한 설비가 분담하던 부하를 다른 설비로 절체하기 위하여 모든 설비의 여유용량을 균등하게 부하를 분담하는 것이다. 어떤 설비가 여유용량이 없이 운전한다면 인근 설비가 사고가 나서 부하를 절체 받아야 할 경우에도 이 설비는 현재 여유용량이 없기 때문에 부하를 절체 받지 못한다. 그렇게 되면 절체 받지 못하는 설비에는 정전이 지속되기 때문이다.

또한 사고의 위치는 배전계통 임의의 설비에서 일어날 수 있으므로 모든 설비의 여유용량을 균등하게 운전하여 임의의 설비사고에 부하를 절체 받을 수 있도록 하고자 한다.

이러한 목적을 위한 부하균등화에 관련된 목적함수는 식 (2)(3)(4)와 같이 정하였다.

$$J_1 = w_{TR} J_{TR} + w_{FDR} J_{FDR} \tag{2}$$

$$J_{TR} = \frac{1}{N_{TR}} \sum_{TRI=1}^{N_{TR}} (M_{TRave} - M_{TRI})^2 \tag{3}$$

$$J_{FDR} = \frac{1}{N_{FDR}} \sum_{FDRi=1}^{N_{FDR}} (M_{FDRave} - M_{FDRi})^2 \tag{4}$$

- J_{TR} : 변압기 부하균등화 목적함수
- J_{FDR} : 피더 부하균등화 목적함수
- M_{TRave} : 변압기 평균 용량
- M_{TRi} : i번째 변압기의 현재 여유용량
- M_{FDRave} : 피더의 평균 용량
- M_{FDRi} : i번째 피더의 현재 여유용량

배전계통의 설비 부하 균등화를 고려한 상시연계점 재배치 문제에서 제약조건은 각 설비가 과부하 되지 않는 것으로 여유용량이 0보다 커야 한다는 조건이다.

3.4 상시연계점 이동에 의한 최적화 방법

배전계통에는 연계된 하나의 피더쌍(Feeder-pair)에 대하여 하나의 상시연계점이 존재하므로 많은 연계 피더쌍의 조합에 대하여 많은 수의 상시연계점이 존재하고 이 상시연계점의 위치후보가 매우 많기 때문에 이를 최적으로 결정하는 문제는 매우 복잡한 조합 최적화의 문제로 쉽지 않은 부분이다.

그러나 본 논문은 이러한 배전계통의 상시연계점 최적화 문제를 현재 운영되고 있는 상시연계점을 기준으로 부근의 최적 상시연계점을 찾는 문제로 축소하였다.

이 알고리즘은 계산시간도 적게 걸리고 내용도 간단하여 실제 배전자동화 시스템에 쉽게 적용될 수 있는 방법이다. 단, 현재의 상시연계점이 최적 운전점 근처에서 운전되고 있으며 국부적 최소점이 현재 상시연계점 근처에는 존재하지 않는다는 가정이 필요하다.

그림 2와 같은 배전계통에서 하나의 상시연계점에는 하나의 피더쌍과 이 피더간에 하나의 직선 경로를 가지고 있다. 이러한 직선 경로를 따라 연계점을 이동할 경우, 배전계통의 방사상 형태가 유지된다.

이 상시연계점 이동 알고리즘은 방사상 구성의 제약 조건을 만족하기 위하여 직선 경로에 있는 상시연계점을 차례로 이동해 가면서 목적 함수에 부합하는 최적 상시연계점의 위치를 찾는다.

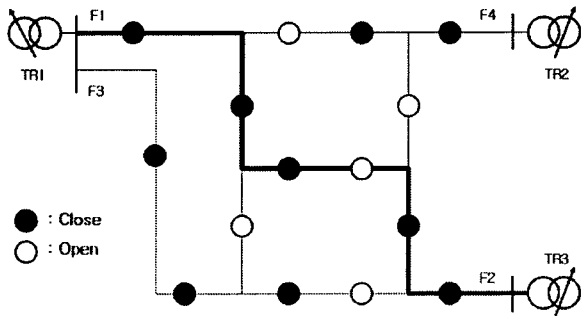


그림 2 F1과 F2의 피더쌍
Fig. 2 Feeder pare of F1 and F2

그림 3은 하나의 피더쌍에서 F1과 F2 사이의 직선 경로 상으로 상시연계점이 이동하였을 경우 각 피더의 전류 변화를 보여 주고 있다. 그림 3에서 굵은 직선은 상시연계점

S가 이동하기 전의 전류 곡선이며, 점선은 상시연계점 S가 이동한 다음의 전류 곡선이다. 그림 3에서의 전류 곡선을 보면 상시연계점 S가 이동하였을 경우 전류의 파형이 이동한 구간 사이의 전류만큼 커진 것을 볼 수 있다. 이렇게 상시연계점이 이동할 경우 이 피더쌍과 연결된 피더만이 이 전류와 관계된 부하변동을 경험한다.

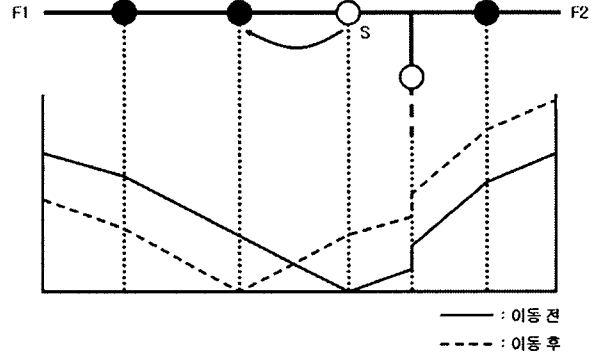


그림 3 상시연계점 이동에 따른 전류의 변화
Fig. 3 Change of current by moving tie switch

그러나 이 피더쌍과 연결되지 않은 다른 설비(변압기 또는 피더)의 전류량은 이 피더쌍의 상시연계점 위치와 관계가 없으므로 거의 변하지 않는다. 따라서 나머지 설비들의 목적함수 변화량은 일정하다.

그러므로 상시연계점의 직선경로로 찾아진 피더쌍과 연결된 설비의 목적함수 변화는 전체 목적함수에서 분리된다. 즉, 하나의 상시연계점을 선택하였을 경우 전체계통의 상시연계점 최적화 문제가 단지 이 상시연계점과 연결된 피더쌍의 최적화 문제로 분리되어 쉽게 풀릴 수 있다. 그림 4는 이와 같이 최적화 문제에서 계통 분리가 일어남을 보여주고 있으며 분리된 계통의 변화는 나머지 전체 계통에 영향을 주지 않는다.

그러므로 피더쌍과 연결된 설비의 목적함수 부분이 감소하면 전체의 목적함수가 감소한다고 볼 수 있다. 이는 배전계통의 많은 제약조건과 목적함수 계산 시 계산량을 줄일 수 있어 수렴 속도에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

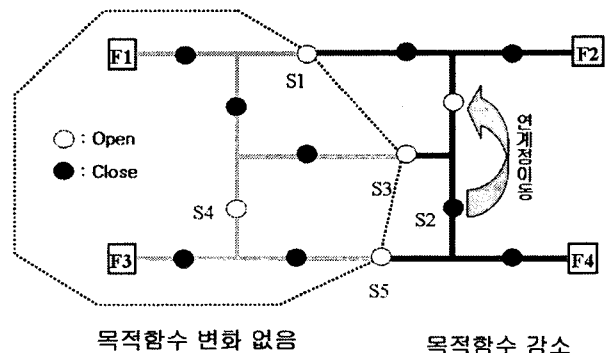


그림 4 계통변화에 따른 목적함수의 변화
Fig. 4 Change of object function by changing network structure

상시연계점 이동 알고리즘의 보다 쉽게 알아볼 수 있도록 하기 위하여 그림 5에서와 같이 flowchart를 통해서 그 과정을 설명하고 있다. 전체적인 흐름은 상시연계점을 한 구간 두 구간씩 이동해가며 목적함수를 구하여 더 이상 목적함수가 줄어들지 않을 때 까지 상, 하 구간의 이동을 통하여 최적의 상시연계점을 찾아내는 알고리즘이다.

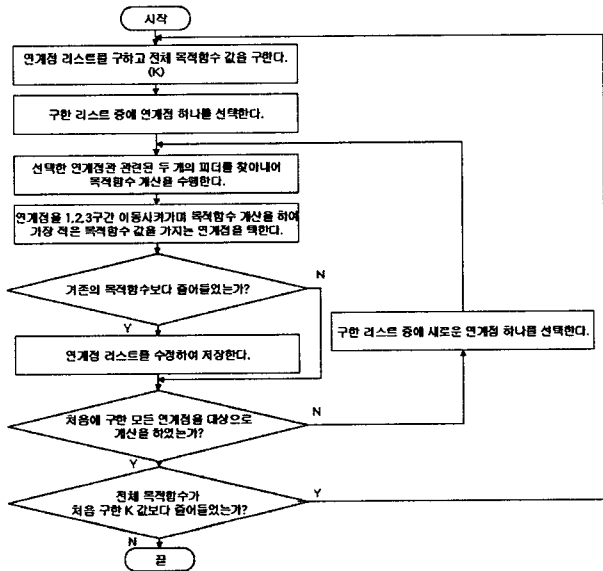


그림 5 상시연계점 이동 알고리즘 flowchart
Fig. 5 Flowchart of moving tie switch algorithm

3.5 상시연계점의 동시 이동에 의한 전역 최적화

3.4절과 같은 상시연계점 이동 방법에 의한 최종해는 상시연계점 하나의 이동에 의하여 더 이상 목적함수가 감소하지 않는 최적 상시연계점의 위치를 나타낸다. 그러나 복잡한 배전계통의 경우 현재의 상시연계점 근처에 국부 최소값이 존재할 때 상시연계점 이동에 의한 해가 이 국부 최소값일 경우가 있다.

최적 상시연계점의 위치 선정문제에서 해가 국부 최소값이 아닌 전역 최소값이 되기 위해서는 본질적으로 모든 상시연계점의 위치에 대한 조합 최적화 문제를 풀어야 한다. 그러나 이 방법은 계산시간의 과다로 인하여 현실적으로 배전자동화 시스템에서 사용하기가 곤란하다.

하지만 이러한 배전계통 최적 상시연계점 위치선정 문제에서 조합 최적화는 본 논문에서 제시한 상시연계점 이동 알고리즘을 확장한 방법을 사용하면 전역 최소값을 구할 수 있다. 상시연계점의 조합 쌍을 선택하여 이 조합쌍의 모든 상시연계점 이동방향에 의하여 목적함수가 최소가 되는 최적 위치를 선정하는 것이다.

2개의 상시연계점으로 이루어지는 상시연계점 쌍에 대하여 두 상시연계점과 연결된 두 피더쌍이 있으므로 두 직선경로가 존재한다. 두 직선경로에서 상시연계점이 이동할 수 있는 4가지 방향에 대하여 이 상시연계점들과 연결된 설비와 관련된 목적함수가 최소가 되는 방향으로 상시연계점 조합 쌍의 최적위치를 찾는 것이다.

3개의 상시연계점으로 이루어진 조합쌍의 경우 3개의 피더쌍에 대한 3개의 직선경로가 있으므로 상시연계점 이동의 8가지 방향에 목적함수가 감소하는 방향으로 최적 상시연계점 위치를 찾으면 된다. 상시연계점 조합쌍에서 연계점이

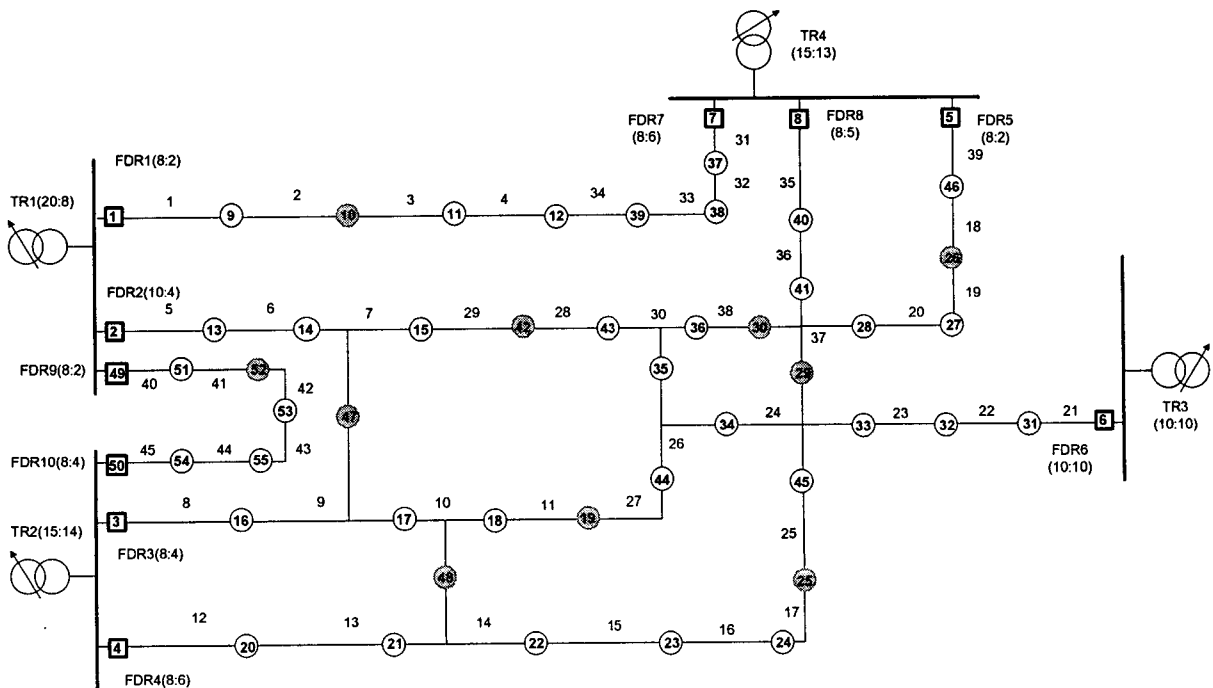


그림 6 최적화 이전 모의 배전계통(단위 : MVA)
Fig. 6 Example distribution network before optimization

많아지면 많아질수록 상시연계점 조합쌍이 많아지고 계산시간이 많이 걸리지만 전역 최소값을 찾을 가능성은 그만큼 높아진다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 상시연계점 이동에 의한 배전계통의 부하 균등화를 고려한 상시연계점 최적화 방법 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 그림 6과 같은 모의 배전계통에서 최적 상시연계점을 구하였다.

변압기(TR)1,2,4에는 피더(FDR)가 3개씩 연결되어 있으며 TR3은 피더가 1개만 연결되어 있다. 회색의 노드는 현재 구간 개폐 스위치의 open 상태를 말하며 상시연계점을 나타내고 있다. 각 구간의 부하용량을 모두 1[MVA]이며 괄호안의 숫자는 각 설비의 정격용량과 현재 부하량[MVA]을 나타내고 있다.

현재 모의 계통에서 각 변압기와 피더들은 부하가 불균등하게 운전되고 있다. TR3과 FDR6은 현재 정격용량의 한계 상태에서 운전하고 있어 여유용량이 없다. 그러므로 FDR2,3,4에서 사고가 일어난다면 고장구간 이하는 정전되며, 이때의 정전구간을 연계선으로 절제하는 방법을 통해서 복구될 수가 없다. 이 구간들을 복구하기 위해서는 고장구간을 제외한 전체 배전계통을 재구성하여야 하지만 이는 많은 시간을 필요로 하는 작업이기 때문에 현재 배전자동화 시스템에서 운영자가 수행하기는 적당하지 않다. 그러므로 모든 설비가 부하를 균등하게 부담하도록 상시연계점을 재배치시켜야 한다.

부하 균등화를 위한 배전계통의 설비는 변압기와 피더만을 고려하였으며, 목적함수에서 변압기와 피더간의 가중계수

는 각 설비의 중요성을 감안하여 운용자가 적절하게 선택하여야 하지만 사례연구에서는 방법의 타당성만을 검증하기 위하여 가중계수는 단순히 모두 1로 정하여 배전계통 내의 모든 변압기와 피더의 부하를 균등화시키는 상시연계점의 위치를 찾았다.

표 1 상시연계점이동 단계별 최적 상시연계점
 Table 1 Step-by-Step optimum tie switch by moving it

	현재 상태	연계점이동 최적화(1단계)	연계점쌍 이동 최적화(2단계)
연계점 위치	10	7	39
	19	19	44
	25	23	23
	26	28	28
	29	29	29
	30	34	34
	42	43	36
	47	47	47
	48	48	48
	52	53	53

사례연구에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 검토하기 위하여 단순히 부하 균등화만을 고려한 목적함수를 정하였다. 손실 최소화나, 전압 최적화 등의 다른 최적조건은 단순히 본 알고리즘에 적절한 목적함수만을 추가하면 되기 때문이다.

다음 표 1은 모의계통에 대하여 상시연계점 이동에 따라 최적 상시연계점을 찾은 후에 서로를 비교한 결과값이다. 먼저 1단계로 현재계통에서 한 번에 하나의 상시연계점만을 선택하여 최적위치로 이동하는 방법에 의하여 계통을 최적

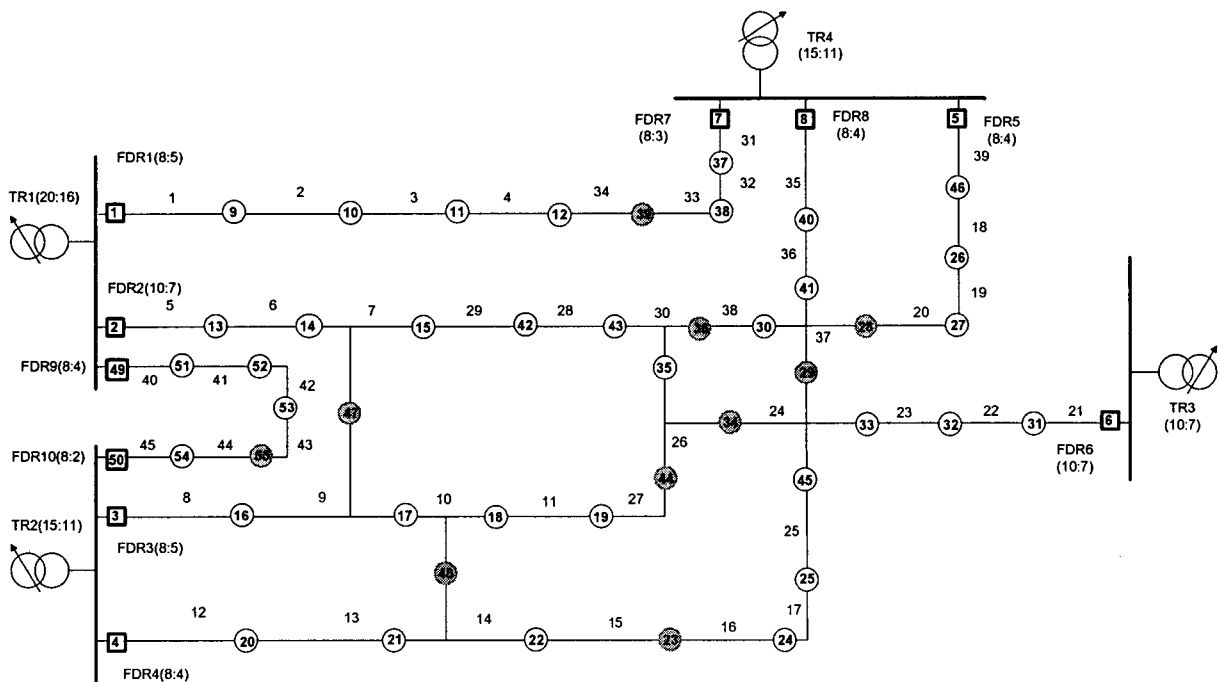


그림 7 최적화 이후 모의 배전계통(단위 MVA)
 Fig. 7 Example distribution network after optimization

화하였다. 그리고 이 해가 국부 최소해일 가능성이 있어 다시 두 상시연계점으로 이루어지는 상시연계점 쌍에 대하여 두 상시연계점을 동시에 이동하는 방법에 의하여 목적함수를 최소화하였다. 그리고 다시 3단계로 세 상시연계점으로 이루어지는 상시연계점 쌍에 대하여 상시연계점 이동 최적화를 수행하였다.

그러나 3단계의 경우 더 이상 목적함수 감소가 일어나지 않았다. 매 단계별 계산시간은 알고리즘이 간단하여 수 초 정도의 계산시간이 소요되었다. 이러한 계산시간은 배전자동화시스템에서 복구나 그 외에 수시로 계통을 재구성할 필요가 있을 경우 현실적으로 실시간 프로그램으로 사용이 가능하다.

표 2는 본 논문에서 제안한 알고리즘의 결과로 전체 목적함수는 최적화 이전에 272.725에서 1단계 최적화 이후에 46.775, 2단계 최적화 이후에 10.775로 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 각 설비의 여유용량이 거의 균등하게 변한 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 최적화 이후의 모의 계통이다.

표 2 최적화 단계별 부하 및 목적함수의 변화
Table 2 Step-by-step change of object function and load by Optimization

구분		현재상태	연계점 이동 최적화 (1단계)	연계점 쌍 이동 최적화(2단계)
변압기 여유 용량	TR1	12	4	4
	TR2	1	4	4
	TR3	0	3	3
	TR4	2	4	4
TRave		3.75	3.75	3.75
Jtr		231.875	1.875	1.875
피더 여유 용량	FDR1	6	0	3
	FDR2	6	5	3
	FDR3	4	4	3
	FDR4	2	4	4
	FDR5	6	4	4
	FDR6	0	3	3
	FDR7	2	8	5
	FDR8	3	1	4
	FDR9	6	5	4
	FDR10	4	5	6
Jfdr		3.9	3.9	3.9
J		40.9	44.9	8.9
J		272.775	46.775	10.775

5. 결 론

본 논문은 배전계통의 임의의 구간에서 사고발생 시 고장 구간을 제외한 건전구간의 정전복구를 통해 전력공급의 신뢰도를 향상시킬 수 있도록 배전설비 부하 균등화를 고려한 배전계통 재구성 방법을 제안하였다. 이 방법은 상시연계점을 연결된 피더쌍의 직선경로로 이동시키며 상시연계점의 최적 위치를 찾을 때 전체 계통에 대한 최적화 문제가 상시연계점의 피더쌍과 관련된 설비에 국한되어 간단한 최적화 문제로 분리된다는 것을 보였다. 또한 최적화 문제를 풀 때 국부 최소값의 문제를 해결하기 위하여 상시연계점

쌍을 이동하는 방법을 제안하여 전역 최소값을 구하였다. 사례연구에서 검증한 알고리즘의 결과는 짧은 계산시간과 타당한 결과를 내었으며, 이 결과를 토대로 방대하고 복잡하며 계속 변화하는 배전계통을 운용하는 배전자동화 시스템에서 이 알고리즘을 사용하기에 적합하다는 것을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업의 배전지능화 시스템 중앙제어장치 개발(R-2005-1-394)과제 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 임일형, 홍석원, 최면송, 이승재, 하복남, "배전지능화 시스템의 서비스 향상을 위한 P2P 기반의 분산형 통신망 구조", 대한전기학회 논문집, 56권 3호 pp. 443-450, 2007
- [2] 임일형, 최면송, 이승재, 하복남, 권성철, "Multi-Agent 기반의 분산형 정전복구 시스템", 대한전기학회 하계학술대회는문집, pp. 52-53, 2006
- [3] 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.
- [4] A. Augugliaro, L. Dusonchet, and E. R. Sanseverino, "Genetic, simulated annealing and tabu search algorithms: Three heuristic methods for optimal distribution network's reconfiguration and compensation," Europe. Trans. Elect. Power Eng., vol. 9, no. 1, pp. 35-41, Jan./Feb. 1999.
- [5] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, pp. 1217-1223, July 1988.
- [6] K. Aoki, T. Ichimori, and M. Kanazashi, "Normal state optimal load allocation in distribution systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-2, pp. 147-155, Jan. 1987.
- [7] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 4, pp. 1401-1407, Apr. 1989.

저 자 소 개



임 일 형 (林 一 亨)

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

Tel : 031-336-3290

Fax : 031-330-6816

E-mail : sojoo2jan@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(공학박).

1994년 Univ. of Washington 교환 교수. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 031-336-6362

E-mail : sjlee@mju.ac.kr



임 성 일 (林 星 日)

1967년 7월생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년-2001년 한전 전력연구원 연구원. 2004년-2005년 명지대학교 차세대 전력기술 연구센터 연구 교수. 현재 Iowa State University 방문 연구원.

Tel : 031-330-6815

E-mail : lim7610@mju.ac.kr



신 창 훈 (申 昌 勳)

1968년 1월 7일생. 1992년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년~현재 한국전력공사 전력연구원 배전연구소 선임연구원.

Tel. : 042-865-5934

E-mail : hoony@kepri.re.kr



최 면 승 (崔 勉 松)

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

Tel : 031-336-3290

E-mail : mschoi@mju.ac.kr



하 복 남 (河 福 男)

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

Tel : 042-865-5930

E-mail : bnha@kepri.re.kr