

# 선로유효전력 Tracing과 민감도를 활용한 선로 과부하 해소 스위칭 및 모션분리 알고리즘에 관한 연구

논 문
60-11-3

## A Study on an Algorithm of Line Switching and Bus Separation for Alleviating Overloads by the Use of Line Power Tracing and Sensitivity

이 병 하<sup>†</sup> · 황 승 호<sup>\*</sup>  
(Byung Ha Lee · Sung-Ho Hwang)

**Abstract** - In this paper, a new algorithm for alleviating overloads in power networks by the use of line power tracing and sensitivity is proposed to perform line switching and bus separation effectively. Also, a new bus separation index based on line power tracing is presented to find the bus to be separated for relieving overloads effectively. By applying the sensitivity of the line flow with respect to the change of the line impedance, both switching-on and switching-off of the lines for alleviating overloads in power networks are performed systematically at once. The number of the considered cases for line switching and bus separation can be greatly reduced and the best combination of line switching and bus separation can be acquired efficiently by the use of the sensitivity and the bus separation index. In order to show the effects of this algorithm, it is applied to a small scale power system of IEEE 39-bus system and practical power systems of KEPCO.

**Key Words** : Alleviating overloads, Line power tracing, Sensitivity, Line switching, Bus separation index

### 1. 서 론

우리나라의 전력계통은 지역적으로 서해안지역, 호남지역, 영남지역 등의 원거리 발전기군 지역과 경인지역의 대규모 부하밀집지역으로 분류할 수 있으며 이들 지역 간의 원활한 전력수급을 위하여 장거리의 대규모 전력 전송이 이루어지는 특징이 있다. 현재도 우리나라는 전력부하의 성장이 꾸준한 성장을 계속하고 있어 전력을 원활히 공급하기 위하여 전원의 지속적인 건설과 송전선로 등의 확충이 병행되어야 한다. 하지만, 부하 중심지 인근에서의 발전소와 송전선로 건설이 어려운 상황이어서 장거리의 대규모 전력 전송과 관련된 여러 가지 안정도 문제와 과부하의 문제가 발생하게 될 소지가 더 많아지고 있으며, 사고 시에 선로 과부하가 발생하는 경우가 자주 일어날 수 있다.

설비 사고나 예기치 못한 부하 수요의 변화로 해서 송전선로 과부하가 발생하는 경우에 그 시스템의 부분적인 붕괴나 전체 붕괴를 피하기 위하여 일련의 제어동작들이 짧은 시간에 취해져야 한다. 그러나 대규모 시스템의 경우 전력 시스템이 망의 형태로 복잡하게 얽혀 있고 수많은 선로의 스위칭과 모션분리의 조합이 있어서 적절한 과부하 해소 대책으로서의 스위칭 방안을 찾기가 어렵고 어떤 개개 선로의 스위칭과 모션분리의 효과를 예측하기가 힘들다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 해외 선진국을 중심으로 송전선로 과부하 발생 시에 이를 해소하는 기법들에 대한 연구들이 지난 80년대부터 수행되어 왔다. Lachs는 선로 과부하를 해소하기 위하여 발전력을 조정하고 부하탈락을 전략적으로 추진하여 해결하는 연구를 수행하였다[1]. Makram, Thornton, Brown은 전력조류계산을 수행하지 않고 스위칭 선로를 선택하는 기법으로 Z-행렬 기법을 제안하는 연구를 수행하였다[2]. Muller와 Quintana는 선로의 과부하와 전압 위반 문제를 해소하기 위하여 선로 스위칭 시퀀스의 순위를 결정하는 연구를 수행하고 소규모 시스템에 적용하였다[3]. Bijwe, Nanda, Puttabuddhi의 연구 [4]에서 AC-DC 조류계산 자코비안 행렬을 활용하고 과부하와 전압의 성능 지수에 근거한 선로 탈락 순위 매김을 위한 방법이 제시되고, 소규모 시스템에 적용하였으나 과부하 해소보다 과부하를 일으키는 선로탈락의 순위 결정에 초점을 맞추고 있다. Wrubel, Rapienski, Lee, Gisin, Woodzell의 연구 [5]에서 선형화된 DC모델로서 과부하를 없애거나 줄이기 위한 스위칭 후보들을 선택하고 선택된 후보들을 다시 AC 조류계산을 사용하여 결정하는 수정 스위칭 알고리즘을 제안하고 실계통에 적용하는 연구를 수행하였으나, DC와 AC 조류계산을 중복하여 적용하여야 한다. Shao와 Vittal의 연구 [6], [7]에서 선로와 모션의 스위칭에 의한 어드미턴스 행렬의 변화를 구하고 이를 활용하여 과부하와 전압 위반 문제를 해소하기 위한 알고리즘이 제안되고, 소규모 시스템에 적용하였다. 그러나 수정된 어드미턴스 행렬을 구하기가 복잡하고 이의 역행렬을 구하는 등 실계통 적용이 쉽지 않다.

본 논문에서는 선로과부하 해소대책을 검토하기 위한 선로 및 모션의 대상을 효과적으로 추출하기 위하여 과부하선

<sup>†</sup> 교신저자, 시니어회원 : 인천대 공대 전기공학과 교수

E-mail : bhlee@incheon.ac.kr

<sup>\*</sup> 정 회 원 : 인천대 공대 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2011년 10월 12일

최종완료 : 2011년 10월 26일

로의 유효전력의 Tracing 기법을 적용한다. 과부하선로의 유효전력이 흘러가는 선로와 모선을 추적하여 활용하는 과부하선로 유효전력의 Tracing에 의하여 선로과부하 해소대책을 수립하기 위한 선로의 차단 및 투입과 모선의 분리 및 통합의 검토 대상의 수를 아주 효율적으로 크게 줄일 수 있다. 이들 대상에 대하여 선로차단과 선로투입을 위한 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 하기 위하여, 각 선로의 탈락이나 투입이 아니라 각 선로의 임피던스 변화에 대한 과부하 선로 조류의 민감도를 사용하여 과부하 선로를 해소하기 위한 선로의 차단과 여유 송전선로의 투입을 한꺼번에 체계적으로 수행하는 스위칭 알고리즘이 제시된다. 또, 과부하선로에 흐르는 유효전력의 Tracing에 근거한 새로운 모선분리 지수를 활용하여 분리모선을 효율적으로 선정하여 모선분리를 수행하는 기법을 제시한다. 이러한 선로 유효전력의 Tracing과 민감도를 활용한 선로 스위칭 및 모선분리 알고리즘을 적용하여 수많은 케이스의 스위칭과 모선분리의 경우의 수를 대폭적으로 줄이고 효율적으로 최선의 선로 스위칭과 모선분리의 조합을 구하여, 효과적인 과부하 해소 대책을 세울 수 있다. 이를 소규모 시스템과 실제통에 적용하고, 그 시뮬레이션 결과로서 제시된 알고리즘의 효과를 보여 준다.

## 2. 선로유효전력 Tracing과 민감도에 근거한 스위칭 및 모선분리 알고리즘

### 2.1 선로유효전력 Tracing과 민감도에 근거한 선로 스위칭 알고리즘

전력시스템의 전력방정식으로부터 모선  $i$ 와 모선  $j$  사이의 선로 조류를 유효전력과 무효전력으로 나타내 보면, 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{Lij} + jQ_{Lij} = \overline{V_i} \overline{I_{ij}^*} = \overline{V_i} [y_{ij}^* (\overline{V_i} - \overline{V_j})] \quad (1)$$

여기서,

$\overline{V_i}$  : 모선  $i$ 의 전압 페이지

$\overline{I_{ij}}$  : 모선  $i$ 에서 모선  $j$ 로 흐르는 전류페이지

$y_{ij}$  : 모선  $i$ 와 모선  $j$  사이의 선로 어드미턴스 페이지

\* : 공액복소수

$P_{Lij}, Q_{Lij}$ : 모선  $i$ 에서 모선  $j$ 로 흐르는 유효전력과 무효전력

위 식을 극좌표(polar form)로 변환하여,

$$\overline{y_{ij}} = y_{ij} e^{j\theta_{ij}}, \quad \overline{V_i} = V_i e^{j\delta_i}, \quad \overline{V_j} = V_j e^{j\delta_j} \quad (2)$$

라고 두고, 모선  $i$ 에서 모선  $j$ 로 흐르는 유효전력( $P_{Lij}$ )과 무효전력( $Q_{Lij}$ )으로 분리해서 나타내 보면, 아래와 같이 표현된다.

$$P_{Lij} = y_{ij} [V_i^2 \cos(\theta_{ij}) - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (3)$$

$$Q_{Lij} = -y_{ij} [V_i^2 \sin(\theta_{ij}) + V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (4)$$

위의 식 (3)이 유효 선로 조류 방정식, 식 (4)가 무효 선로 조류 방정식이다.

피상전력으로 과부하를 정하고 선로조류의 과부하를 계산하는 것이 더 정확하나 일반적인 역률 90%정도에서 유효전력은 피상전력과 거의 유사한 값이며 선로조류의 유효전력을 줄이는 대책을 적용하면 선로조류의 피상전력도 줄이게 되므로 여기서는 계산과 적용의 편의를 위하여 유효전력에 대하여 과부하 해소 알고리즘을 적용한다. 과부하 선로가 존재한다면 이 과부하선로들을 평가 선로로 정하고, 이 과부하 선로들에 흐르는 유효전력의 합 ( $P_{lover}$ )은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{lover} = \sum_{i,j \in lover} |y_{ij}| [V_i^2 \cos(\theta_{ij}) - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] = \sum_{i,j \in lover} P_{Lij} \quad (5)$$

여기서  $lover$ 는 해소해야 할 과부하선로의 집합을 나타낸다.

유효전력의 크기를 나타내는 위의 식 (3)을 체크하여 과부하 선로가 존재한다면 아래의 절차를 거쳐 민감도를 계산한다..

먼저 제어 설비를 적용하기 전인 초기의 각 과부하 선로 조류의 유효전력의 정격용량에 대한 비를  $LF^0$ 로 나타내면, 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$LF^0 = \sum_{i,j \in lover} \left( \frac{|P_{Lij}^0|}{P_{Lij}^R} \right) \quad (6)$$

여기서  $P_{Lij}^0$ 는 선로 스위칭을 수행하기 전에 과부하선로 집합  $lover$ 에 속하는 모선  $i$ 와 모선  $j$  사이의 과부하선로에 흐르는 유효전력을 나타내고  $P_{Lij}^R$ 은 이 과부하선로의 정격용량을 나타낸다.

선로 과부하를 해소하기 위한 대책을 수립하기 위하여 먼저 과부하 선로들의 선로 임피던스에 대한 선로 조류 민감도를 계산한다. 각 선로  $l$ 의 임피던스를 일정 비율로 변경시키고 모선  $i$ 와 모선  $j$  사이의 과부하선로의 새로운 전력조류의 정격용량에 대한 비의 크기의 합  $LF^{Ckl}$ 을 계산한다.

$$LF^{Ckl} = \sum_{i,j \in lover} \left( \frac{|P_{Lij}^{Ckl}|}{P_{Lij}^R} \right) \quad (7)$$

$P_{Lij}^{Ckl}$ 는 선로  $l$ 의 임피던스를 일정 비율로 변경시킨 후의 모선  $i$ 와 모선  $j$  사이의 과부하선로에 흐르는 유효전력을 나타낸다.

선로  $l$ 의 임피던스 변화에 따른 과부하 선로들의 선로 유효전력의 변화량, 즉 선로 임피던스에 대한 선로조류 민감도  $S_{FYkl}$ 을 아래와 같이 정의한다.

$$S_{FYkl} = \frac{LF^0 - LF^{Ckl}}{\Delta y_{kl}/y_{kl}} \quad (8)$$

이  $S_{FYkl}$ 을 각 선로  $l$ 에 대하여 계산하고 절대치를 계산하여 랭킹을 매기고 랭킹리스트를 작성한다. 그러나 선로차단과 선로투입을 적용하기 위한 대상선로를 선정할 시에 실계통을 다룰 때에는 수천에 달하는 선로들이 있으므로 이러한 선로들 모두에 대하여 민감도를 계산하는 것은 바람직하지 못하다. 선로차단은 과부하선로의 과부하의 원인이 되는 부하를 감소할 목적으로 수행되는 것이고, 선로투입은 과부하선로의 과부하의 원인이 되는 부하에 다른 전력공급 루트를 제공할 목적으로 수행되는 것이므로, 선로차단과 선로투입 모두 과부하선로의 수전단 측의 부하가 있는 모선과 연결되는 선로들이다. 따라서 민감도를 계산하는 선로차단과 선로투입을 위한 대상선로를 선택할 때에 선로차단과 모선분리를 적용하기 위한 대상을 효과적으로 유출하기 위하여 과부하선로의 유효전력의 Tracing 기법을 적용한다. 과부하선로 조류의 Tracing에 의하여 과부하선로의 유효전력이 흘러가는 선로들을 선로차단 대상 선로로 선정하고, 이 선로들이 지나가는 모선으로 다른 모선으로부터 전력공급을 받을 수 있는 선로투입이 가능한 선로가 있으면 선로투입 대상 선로로 선정한다. 이 기법을 적용하면 선로차단 및 선로투입을 위한 대규모의 대상 선로 집합에서 소규모의 대상 선로 집합으로 그 수를 대폭 줄이게 되어, 민감도를 체크할 선로의 대상 수를 크게 줄일 수 있다.

각 선로의 임피던스를 일정 비율로 변화시킬 때 일률적으로 증가시킬 수도 있고 감소시킬 수도 있다. 임피던스를 일정 비율로 증가시키는 경우를 고려하면, 선로 임피던스에 대한 선로조류 민감도  $S_{FYkl}$ 의 절대치의 순서대로 스위칭을 수행하되,  $S_{FYkl}$ 의 부호가 음이면 이 해당선로는 과부하 선로 조류를 줄이는 방향으로 작용하므로 이 선로는 차단시키고 조류계산을 수행하고 과부하 해소 효과를 계산한다. 반대로 양의 부호의 선로는 동일 조류의 통로에 투입시킬 추가 선로가 있는지를 체크하여, 그러한 선로가 있으면 그 선로에 투입시키고, 과부하 해소 효과를 계산한다. 투입시킬 선로가 없으면 대상 리스트에서 제외시키고, 다음 순위의 스위칭 대상선로로 넘어간다. 각 선로의 임피던스 변화에 대한 과부하 선로 조류의 민감도를 사용하여, 선로 과부하를 해소하는 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 선로의 차단과 여유 송전 선로의 투입의 조합을 한꺼번에 체계적으로 수행할 수 있다.

과부하 선로들 중의 어느 하나라도 정격에서 벗어나도록 하는 선로 스위칭은 버린다. 스위칭은 과부하가 해소되면 더 이상 수행하지 않는 것으로 하며, 가능한 스위칭의 횟수를 최소화하는 방향으로 스위칭을 수행한다.

## 2.2 선로유효전력 Tracing과 모선분리지수 적용에 의한 모선분리 알고리즘

선로 스위칭에 의하여 과부하를 해소하는 것이 충분하지 않으면 모선 분리가 요구된다. 모선 분리는 과부하선로의 과부하의 원인이 되는 부하를 감소할 목적으로 수행되는 것이므로, 과부하선로의 수전단 측의 부하가 있는 모선 중 모선 분리가 가능한 모선에서 모선 분리가 수행된다. 선로차단과

모선분리를 적용하기 위한 대상을 효과적으로 추출하기 위하여 과부하선로의 유효전력의 Tracing 기법을 적용한다.

과부하선로에 흐르는 유효전력의 흐름을 Tracing하여 과부하선로의 조류방향에 따른 각 모선에서 연결된 다른 모선들로부터 유입되는 전력량과 다른 모선으로 유출되는 전력량을 계산하고, Proportional sharing rule을 적용하여 각 선로에 대하여 이 모선으로부터 유효전력이 유출되는 비율을 산정한다. 선로의 유효전력 손실은 선로에 흐르는 유효전력에 비하여 아주 작으므로 간략한 계산을 위하여 이의 값은 무시한다.

유효전력유출비( $R_{j-k}$ )는 모선  $j$ 에 유입되는 유효전력량 중에서 모선  $j$ 에서 모선  $k$ 로 흐르는 유효전력의 비를 의미하며, 아래와 같이 표현된다.

$$R_{j-k} = \frac{P_{Ljk}}{P_{Lj}} \quad (9)$$

여기서,  $P_{Ljk}$ 는 모선  $j$ 에서 모선  $k$ 로 흐르는 유효전력,  $P_{Lj}$ 는 모선  $j$ 에 유입되는 유효전력을 나타낸다.

모선  $i$ 에서 모선  $j$ 로 흐르는 유효전력이 과부하선로의 조류이고 모선  $j$  다음에 모선  $k$ 로 연결되고 모선  $j$ 에서 모선  $k$ 로 유효전력이 흐른다고 하면, 모선  $k$ 로의 선로과부하전력의 전달량( $P_{Lijover-k}$ )은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{Lijover-k} = P_{Lijover} \cdot R_{j-k} \quad (10)$$

여기서  $P_{Lijover}$ 는 모선  $i$ 에서 모선  $j$ 로 흐르는 과부하선로의 유효전력을 의미한다.

유사하게, 모선  $k$  다음에 모선  $l$ 로 연결되고 모선  $k$ 에서 모선  $l$ 로 유효전력이 흐른다고 하면, 모선  $l$ 로의 선로과부하전력의 전달량은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{Lijover-l} = P_{Lijover} \cdot R_{j-k} \cdot R_{k-l} \quad (11)$$

여기서 표기를 통일하여 간결하게 표기하기 위하여 해소 대상인 과부하선로로부터 유효전력의 조류 방향에 따라 주어진 모선  $k$ 로 연결되는 선로들의 집합을  $Array-k$ 로 표기한다. 위의 식으로부터  $Array-k$ 는 모선  $j$ 와 모선  $k$  사이의 선로인  $L_{j,k}$ 의 하나의 선로로 구성된 집합이고,  $Array-l$ 은 두 개의 선로인 모선  $j$ 와 모선  $k$  사이의 선로  $L_{j,k}$ 와 모선  $k$ 와 모선  $l$ 사이의 선로  $L_{k,l}$ 의 집합을 나타내게 된다.

이렇게 표현하면 모선  $l$ 로의 선로과부하전력의 전달량은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Lijover-l} = P_{Lijover} \cdot \prod_{fi-tj \in Array-l} R_{fi-tj} \quad (12)$$

여기서,  $fi-tj$ 는  $Array-l$ 의 집합에 속해있는 선로들의 모선번호들을 나타내며, 앞의 모선번호  $fi$ 는 이 선로의 From bus 모선번호이고 뒤의 모선번호  $tj$ 는 이 선로의 To bus 모선번호이다.

또한 일반 모선  $m$ 에 대해서는 아래와 같이 표현될 수

있다.

$$P_{Lijover-m} = P_{Lijover} \cdot \prod_{fi-tj \in Array-m} R_{fi-tj} \quad (13)$$

모선 분리는 선로과부하전력의 전달량이 많으면 모선분리 시에 효과가 더 크게 되므로, 선로의 과부하를 줄이는 모선분리의 효과는 각 모선에서의 선로과부하전력의 전달량에 비례하는 특성이 있고, 연결되어 있는 모선의 수가 많은 모선일수록 부하분담이 쉬워져 모선분리에 유리하다. 단, 송전단 측에 있는 모선에서의 부하는 모선분리를 하더라도 부하가 전력을 공급받지 못하는 경우가 발생하지 않으나 수전단 측에 있는 모선에서의 부하는 모선분리를 할 때에 이 수전단 측에 있는 모선이 어떤 발전기와 연계되지 않으면 고립되어 전력을 공급받지 못하는 경우가 발생하게 되므로 이러한 유형의 모선분리는 할 수 없다. 그러므로 과부하선로의 조류방향에 따른 어떤 모선에서 연결되어 있는 송전단 측의 모선수가 많은 모선일수록 모선분리에 유리하고, 수전단 측에 있는 모선은 모선분리 시에 고립되지 않고 발전기와 연계되는 모선의 수가 많은 모선일수록 모선분리에 유리한 특성이 있다.

따라서 모선분리지수를 아래와 같이 제안한다.

$$BS_m = P_{Lijover-m} \cdot (N_{r-m} + N_{s-m}) \quad (14)$$

여기서,  $BS_m$ 은 모선  $m$ 에서의 모선분리지수,  $N_{s-m}$ 은 모선  $m$ 에서 연결되어 있는 송전단 측에 있는 모선의 수,  $N_{r-m}$ 은 모선  $m$ 에서 연결되어 있는 수전단 측에 있는 모선으로서 발전기와 연계되어 있는 모선의 수를 나타낸다.

식(14)를 사용하여 과부하선로의 유효전력이 흐르는 방향을 따라 진행하면서 연결된 각 모선에서의 모선분리지수를 구한다. 이 모선분리지수의 크기가 큰 순서로 배열하고, 순서가 높은 모선부터 모선분리를 수행하여 모선분리대책을 결정한다. 그리고 모선분리를 수행할 때에 과부하선로의 조류를 지나치게 줄이면, 다른 선로의 조류를 과부하로 만드는 등 전력계통 정상운용을 위한 제약조건을 위배할 가능성이 높아지므로 적정 수준의 조류는 흐르도록 모선분리를 수행하는 것이 바람직하다.

### 2.3 모선분리 적용 유형

모선분리되는 모선들이 송전측 모선과 수전측 모선에 연결되는 형태에 따라 모선분리를 4가지 유형으로 나누어 볼 수 있는데, (1) 분리 모선이 모두 송전측 모선이나 수전측 모선의 어느 한쪽에만 연결된 경우인 모선 분리 유형 1과 (2) 분리 모선의 하나는 송전측 모선이나 수전측 모선에 연결되지 않은 경우인 모선 분리 유형 2와 (3) 모선분리되는 모선들이 송전측 모선과 수전측 모선에 모두 연결된 경우인 모선 분리 유형 3과 (4) 모선분리되는 모선이 최말단 수전측 부하단으로 이 모선에서 연결된 수전측 모선은 없고, 모두 송전측 모선들만 연결되어 있는 경우인 모선 분리 유형 4의 4가지 유형으로 분류할 수 있다. 모선 분리는 과부하선로의 수전단 측의 부하가 있는 모선 중 모선분리가 가능한

모선에서 수행된다.

(1) 모선분리 유형 1 (분리 모선이 모두 송전측 모선이나 수전측 모선의 어느 한쪽에만 연결된 경우)

선로의 부하를 줄이고자 하는 선로가 있고 이 해당 선로의 수전측 모선에서 모선분리를 하는 것이 적합한 경우, 이 모선분리할 모선에 선로로 연결되어 있는 모선들을 선로조류의 방향에 따라 송전측 모선 그룹과 수전측 모선 그룹으로 나눈다.

모선분리 유형을 설명하기 위하여, 모선분리 전의 회로망의 한 예가 그림 1에 보여져 있다. 선로의 끝에 표시되어 있는 화살표는 선로조류의 방향을 나타낸다. 그림 1에서 모선  $e$ 는 분리될 모선이고, 모선  $a, b, c, d$ 는 모선  $e$ 를 기준으로 볼 때 송전측 모선들이고, 모선  $f, g, h, i$ 는 수전측 모선들이다. 모선 $a$ 와 모선 $e$  사이의 선로를  $I_{a,e}$ 라고 표기하며, 다른 선로들도 동일한 방식으로 표기한다. 모선 $a$ 와 모선 $e$  사이의 선로  $I_{a,e}$ 에 흐르는 조류의 유효전력 성분을  $P_{La,e}$ 라고 표기하고, 무효전력 성분을  $Q_{La,e}$ 라고 표기한다. 그림 1에서  $Load_e$ 는 모선  $e$ 에 있는 부하를 나타낸다.  $Load_e$ 는 유효전력 부하  $P_{load,e}$ 와 무효전력부하  $Q_{load,e}$ 의 합으로 표현될 수 있다. 그리고 과부하선로의 유효전력과 관련된 조류가 흐르고 있어서 이의 부하를 경감시켜 주고자하는 선로를 모선  $a$ 와 모선  $e$  사이의 선로인  $I_{a,e}$ 이라고 가정하고, 이를 구별하여 표현하기 위하여 선로의 굵기를 다른 선로보다 더 굵게 표시하였다.

모선분리유형1은 분리 모선이 모두 송전측 모선이나 수전측 모선의 어느 한쪽에만 연결된 경우이다. 이 경우에는 분리된 모선들은 다른 모선으로 송전하는 경로의 역할은 하지 않는다. 그림 1의 회로가 모선분리유형1로 분리된 하나의 예가 그림 2에 보여져 있다. 그림 1에서 분리될 모선은 모선  $e$ 이고, 그림 2에서와 같이 모선 $e$ 가 모선 $e1$ 과 모선 $e2$ 로 분리된다. 모선  $e1$ 과 모선  $e2$ 에서의 부하는 각각,  $Load_{e1}$ 과  $Load_{e2}$ 로 나타내었다.

모선분리 전후의 토폴로지가 바뀌어지지만 분리된 모선을 제외하고는 주변의 다른 설비들은 변화가 없으므로 모선분리 후에 송전측 모선들과 연결된 선로들에 흐르는 조류는 모선 분리되기 전에 송전측 모선들과 연결된 선로들에 흐르는 조류의 량과 근사적으로 비례하여 변할 것이므로, 과부하와 관련된 선로에 흐르는 조류를 근사적으로 아래와 같이 추정해 볼 수 있다.

$$P_{La,e1} \cong P_{load,e1} \cdot \frac{P_{La,e}}{P_{La,e} + P_{Lb,e} + P_{Lc,e} + P_{Ld,e}} \quad (15)$$

과부하선로의 조류를 지나치게 줄이면 다른 선로의 조류를 과부하로 만들 가능성이 높아지므로, 위의 근사식을 이용하여 모선 $e1$ 과 모선 $e2$ 에 배분할 적정한  $P_{load,e1}$ 과  $P_{load,e2}$ 를 정하는데 참고할 수 있고, 동일한 역률의 부하배분으로 가정하여 무효전력도 유효전력에 비례하여 배분할 수 있다. 단, 이 경우의 모선분리 시에 수전단 측에 연결되어 있는 모선  $f, g, h, i$ 와 분리된 모선  $e2$ 가 어떤 발전기와 연계되지 않

면 고립되어 전력을 공급받지 못하는 경우가 발생하게 되므로 이러한 상황이 발생되지 않는 때에만 이 유형의 모선분리를 할 수 있다. 이 모선분리의 유형은 고장전류의 크기를 제한하기 위하여 부득이 모선분리운전을 하고 있는 상황에서는 고장전류를 제한하는 개방회로의 운전에 더 부합하므로 이 유형의 모선분리가 바람직하다.

(2) 모선분리 유형 2 (분리 모선의 하나는 송전측 모선이나 수전측 모선에 연결되지 않은 경우)

모선분리유형2는 분리 모선의 하나는 송전측 모선이나 수전측 모선에 연결되지 않은 경우인 모선 분리 유형이다. 모선 분리 유형2의 회로가 그림 3에 보여져 있다. 좌측 그림인 (a) 경우에는 모선 h, i와 분리된 모선 e2가 어떤 발전기와 연계되지 않으면 고립되어 전력을 공급받지 못하는 경우가 발생하게 되므로 이러한 상황이 발생되지 않는 때에만 이 유형의 모선분리를 할 수 있다.

위의 경우와 유사하게, 과부하와 관련된 선로에 흐르는 조류를 근사적으로 아래와 같이 추정해 볼 수 있고, 적정 부하배분에 활용할 수 있다.

(a)의 경우:

$$P_{La,e1} \cong (P_{load,e1} + P_{\leq,j} + P_{\leq,g}) \cdot \frac{P_{La,e}}{P_{La,e} + P_{Lb,e} + P_{Lc,e} + P_{Ld,e}} \quad (16)$$

(b)의 경우:

$$P_{La,e1} \cong P_{load,e1} \cdot \frac{P_{La,e}}{P_{La,e} + P_{Lb,e}} \quad (17)$$

이 (a)의 경우의 모선분리 시에는 수전단 측에 연결되어 있는 모선 h, i가 어떤 발전기와 연계되지 않으면 고립되어 전력을 공급받지 못하는 경우가 발생하게 되므로 이러한 상황이 발생되지 않는 때에만 이 유형의 모선분리를 할 수 있다.

(3) 모선 분리 유형 3

모선 분리 유형 3은 모선분리되는 모선들이 송전측 모선과 수전측 모선에 모두 연결된 경우이다. 앞에서의 유형들과 마찬가지로, 각 선로의 조류는 중첩의 정리에 의하여 모선부하전력과 전달전력을 각각 모선 분리 전에 흐른 선로 조류의 크기에 비례하여 할당하여, 과부하와 관련된 선로에 흐르는 조류를 근사적으로 아래와 같이 추정해 볼 수 있고, 적정 부하배분에 활용할 수 있다.

$$P_{La,e1} \cong (P_{load,e1} + P_{\leq,h} + P_{\leq,i}) \cdot \frac{P_{La,e}}{P_{La,e} + P_{Lb,e}} \quad (18)$$

모선 분리 유형3의 회로가 그림 4에 보여져 있는데, 이 유형의 모선분리가 선로의 전력흐름의 관점에서 변화의 영향이 가장 약한 분리유형이다.

(4) 모선 분리 유형 4

모선분리유형4는 모선분리되는 모선이 최말단 수전측 부하단으로 이 모선에서 연결된 수전측 모선은 없고, 모두 송전측 모선들만 연결되어 있는 경우인 모선 분리 유형이다. 모선 분리 유형4의 회로가 그림 5에 보여져 있는데, 수전측 모선 f, g, h, i가 없다. 앞에서의 유형들과 마찬가지로 과부하와 관련된 선로에 흐르는 조류를 근사적으로 아래와 같이 추정해 볼 수 있고, 적정 부하배분에 활용할 수 있다.

$$P_{La,e1} \cong P_{load,e1} \cdot \frac{P_{La,e}}{P_{La,e} + P_{Lb,e}} \quad (19)$$

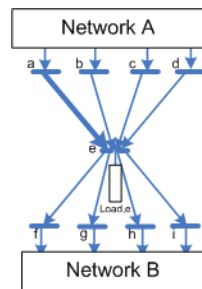


그림 1 모선분리전의 회로망  
Fig. 1 The original network

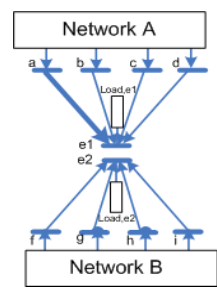


그림 2 모선분리 유형1  
Fig. 2 Type 1 of bus separation

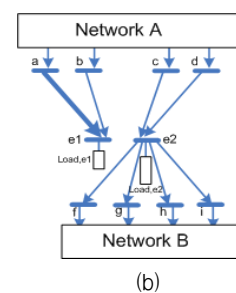
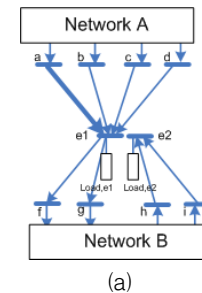


그림 3 모선분리 유형2  
Fig. 3 Type 2 of bus separation

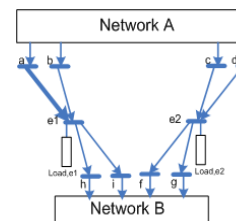


그림 4 모선분리 유형3  
Fig. 4 Type 3 of bus separation

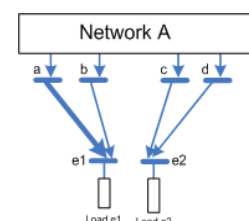


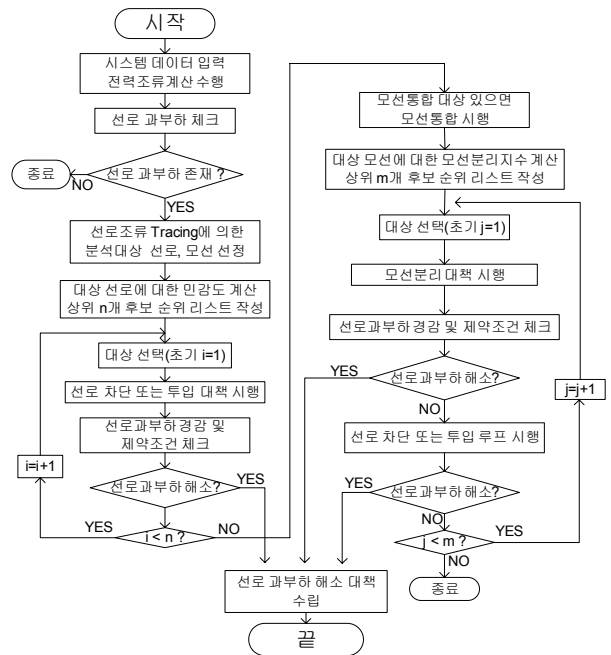
그림 5 모선분리 유형4  
Fig. 5 Type 4 of bus separation

**2.4 선로스위칭 및 모선분리 알고리즘을 적용한 선로과부하 해소 방안 수립 절차**

위에서 제안한 선로 스위칭 및 모선분리 알고리즘을 적용하여 선로과부하 해소대책을 효율적으로 수립하는 절차를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 시스템 데이터를 입력한다.
- 2) 전력조류계산을 수행한다.
- 3) 선로 과부하를 체크한다. 과부하가 존재하면 아래의 단계들을 시행한다.
- 4) 선로과부하 해소대책을 수립하기 위하여 과부하선로 조류의 Tracing에 의하여 차단 대상 선로 및 모선분리 대상 모선을 선정하고, 추가하여 선로투입이 가능한 여유 선로가 있으면 선로투입 대상 선로로 선정하고, 모선 통합이 가능한 모선이 있으면 모선 통합 대상 모선으로 선정한다.
- 5) 위의 4의 단계에서 선정한 차단 대상 선로와 투입 대상 선로에 대하여 선로 임피던스에 대한 선로조류의 민감도를 계산한다. 이 민감도를 사용하여 순위대로 상위 n개의 후보 순위 리스트를 작성한다.
- 6) 위의 민감도의 순위에 따라 선로를 차단 또는 투입하여 선로과부하가 해소되는지를 체크한다. 동시에 다른 선로의 과부하가 발생하지 않는지 등의 전력계통 제약조건들을 만족하는 지를 체크한다.
- 7) 이 조치에 의하여 선로과부하가 해소되고 전력계통 제약조건들이 만족되면 이것이 선로과부하해소 대책으로 결정된다.
- 8) 이 조치에 의하여 선로과부하가 해소되지 않으면 모선통합 가능 모선이 있는 경우 모선 통합을 수행하고, 모선 통합 가능 모선이 없으면 바로 다음 단계로 진행한다.
- 9) 위의 4의 단계에서 확보한 모선분리의 대상 모선에 대하여 모선분리지수를 계산한다. 이 모선분리지수를 사용하여 순위대로 상위 m개의 후보 순위 리스트를 작성한다.
- 10) 모선분리지수의 순위에 따라 모선분리를 수행하여 선로과부하가 해소되는지를 체크한다. 모선분리를 수행할 때에 과부하선로의 조류를 지나치게 줄여 다른 선로의 조류를 과부하로 만들 수가 있으므로 적정 수준의 조류는 흐르도록 모선분리를 수행한다.
- 11) 이 조치에 의하여 선로과부하가 해소되고 전력계통 제약조건들이 만족되면 이것이 선로과부하해소 대책으로 결정된다.
- 12) 위의 단계 11에서도 선로과부하가 해소되지 않으면 민감도를 사용하여 선로 차단 또는 선로 투입의 대책을 추가로 시행한다. 이 조치에 의하여 선로과부하가 해소되고 전력계통 제약조건들이 만족되면 이것이 선로과부하해소 대책으로 결정된다.
- 13) 이 조치의 결과가 만족되지 않으면, m개의 모선분리 후보 순위 리스트에 있는 모든 모선에 대하여 순서대로 만족될 때까지 위의 12단계를 반복 시행한다.
- 14) 위의 모든 과정으로도 선로과부하가 해소되지 않으면 부하조정, 발전력 재배분 또는 송전선로 건설 등의 다른 대책을 강구한다.

이의 과정을 흐름도로 나타내어 보면 그림 6과 같다.



**그림 6** 선로과부하 해소대책 수립 절차의 흐름도  
**Fig. 6** The flow-chart for alleviating overloads in power networks

**3. 사례 연구**

**3.1 IEEE 39 모선에의 적용**

본 논문에서 제시하는 과부하 해소대책 수립 알고리즘을 소규모 전력시스템에 적용하기 위해 IEEE 39 모선 테스트 시스템을 사용하였다(그림 7). 10기의 발전기와 39개의 모선과 46개의 선로가 있다.

여기서는 발전력과 부하를 조정하지 않고 선로 스위칭과 모선분리를 수행하여 선로 과부하를 해소하는 것을 보여준다. 고려 대상인 과부하 선로를 제외하고는 각 선로들에 필요시 투입할 여분의 선로가 존재하는 것을 가정하여 분석하는 것도 추가하여 본다. 이 시스템의 선로조류를 계산하여 방사상으로 연결되어 선로 스위칭에 의하여 조정할 수 없는 선로들을 제외하고, 상위 10개의 유효전력의 선로 조류를 나타내 보면 표 1과 같다.

표 1에 선로의 조류가 많은 순으로 선로의 조류와 관련된 데이터가 제시되어 있는데, 선로조류의 양의 부호는 From bus에서 To bus로 조류가 흐르고, 선로조류의 음의 부호는 이와 반대 방향이라는 것을 나타낸다. 가장 많은 조류가 흐르는 선로는 9번 선로이고, 이 선로 유효전력의 크기는 444.1[MW]이고, 부호가 음이므로 To bus인 6번 모선에서 From bus인 5번 모선으로 조류가 역방향으로 흐른다는 것을 나타낸다.

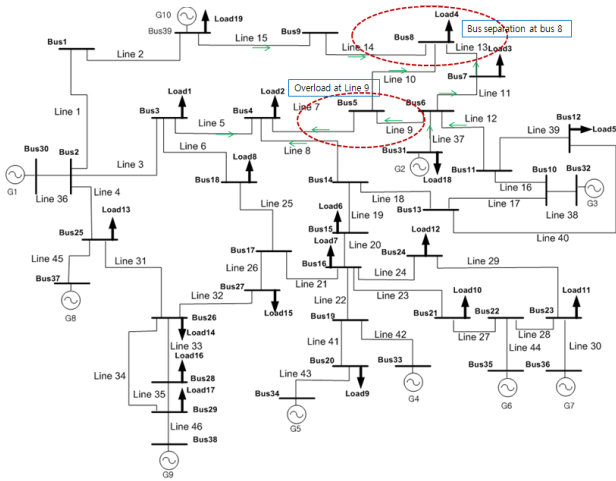


그림 7 IEEE 39 모션 테스트 시스템  
Fig. 7 IEEE 39 bus system for testing

표 1 선로의 조류

Table 1 Line flows

No	선로 번호	From bus	To bus	선로 조류 (유효전력[MW])
1	9	5	6	-444.1
2	3	2	3	416.5
3	27	21	22	-411.1
4	11	6	7	372.6
5	35	28	29	-347.4
6	17	10	13	331.2
7	18	13	14	327.5
8	16	10	11	318.8
9	12	6	11	-313.2
10	32	26	27	312.2

1) 과부하 선로인 9번 선로에 대한 선로조류 민감도에 근거한 선로 스위칭 적용

가) 투입할 여분의 선로가 존재하는 경우

제일 조류가 많은 9번 선로만을 과부하로 고려하여 평가 선로로 선정하는 경우를 고려한다. 이 경우 9번 선로의 정격 용량을 400[MW]라고 가정한다. 9번 선로에 대하여서 선로 유효전력의 Tracing을 활용한 알고리즘에 의하여 선로조류 민감도  $S_{FYM}$ 를 절대값의 순위대로 5순위 까지만 표로 제시해 보면 표 2와 같다. 표 2를 보면 첫 번째 스위칭 선로는 11번 선로이고 선로조류 민감도  $S_{FYM}$ 의 부호가 양이므로 여분의 선로를 투입하는 조치를 취하는 것이고, 두 번째 스위칭 선로는 10번 선로이고 선로조류 민감도  $S_{FYM}$ 의 부호가 음이므로 이 선로를 차단하는 조치를 취하는 것이다. 해당 조치를 취할 수 있는 경우에 순서대로 스위칭을 수행하여 나가되, 가능하면 스위칭 횟수를 최소화하는 방향으로 스위칭을 수행하는 것으로 하며, 스위칭 후에 적정 수준으로 과부하가 해소되었다고 판단되면 스위칭을 종료한다. 표 2의 순서에 맞추어 제시된 알고리즘을 따라서 스위칭을 수행하여 보면, 모션 6과 모션 7사이의 11번 선로에 추가로 투입할 동일한 여유 송전선이 있다고 가정하는 경우 모션 6과

모션 7사이의 추가 선로를 투입한다. 이 경우에 표 3에서와 같이 선로 9에서의 유효전력이 444.1[MW]에서 371.8[MW]로 줄어든다. 이어서 모션 4번과 모션 5번 사이의 10번 선로를 차단시키면 과부하 선로 9에서의 유효전력이 201.0[MW]로 더 줄어들게 되는 것을 표 3에서 알 수 있다. 이러한 선로 스위칭을 통하여 과부하 선로의 조류가 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 이 때 다른 선로의 조류를 체크하여 과부하를 일으키는 선로가 없는지 체크하고 없으면 과부하해소 대책으로 채택할 수 있다. 이 경우에는 다른 선로의 과부하를 일으키지 않으므로 과부하해소 대책으로 채택된다.

나) 투입할 여분의 선로가 없는 경우

11번 선로에 투입할 여유 송전선이 없는 경우에는 모션 6과 모션 7사이의 추가 선로를 투입할 수가 없으므로 이 조치는 고려대상에서 제외하고 다음 순위의 대책으로 넘어간다. 그러면 제일 먼저 모션 4번과 모션 5번 사이의 10번 선로를 차단시키는 조치를 검토하게 되며 이때의 결과는 표 4에 제시되어 있다. 이때 표 3에서와 같이 선로 9에서의 유효전력이 444.1[MW]에서 211.6[MW]로 줄어든다. 그러나 이 경우에는 다른 선로인 11번 선로의 조류를 609.9[MW]로 과부하를 일으키므로 전력계통의 제약조건을 만족하지 못하여 과부하해소 대책에서 제외된다. 이어서 18번 선로에서 투입할 여유 송전선이 없는 경우에는 7번 선로를 차단시키는 조치를 검토하게 되며 이때의 결과는 표 4의 다음 줄에 제시되어 있다. 이때 표 4에서와 같이 선로 9에서의 유효전력이 444.1[MW]에서 295.0[MW]로 줄어든다. 그러나, 이 경우에도 다른 선로인 18번 선로의 조류를 477.4[MW]로 과부하를 일으키므로 전력계통의 제약조건을 만족하지 못하여 과부하해소 대책에서 제외된다. 이어서 12번 선로를 차단시키는 조치를 검토하게 되며 이때의 결과는 표 4의 아래 줄에 제시되어 있다. 이때 표 4에서와 같이 선로 9에서의 유효전력이 444.1[MW]에서 175.0[MW]로 줄어든다. 그러나 이 경우에도 다른 선로인 18번 선로의 조류를 640.7[MW]로 과부하를 일으키므로 전력계통의 제약조건을 만족하지 못하여 과부하해소 대책에서 제외된다.

투입할 여유 송전선이 있는 경우에는 표 3에서의 선로 스위칭이 선로과부하를 해소하면서 전력계통의 제약조건을 만족하므로 과부하해소 대책으로 채택될 수 있다. 하지만, 투입할 여유 송전선로가 없다고 하면 선로 스위칭 만으로서는 더 이상 선로 과부하해소를 위한 대책을 수립할 수 없다.

2) 과부하 선로인 9번 선로의 과부하 해소를 위한 모션 8에서의 모션분리

선로 스위칭만으로 과부하해소를 위한 대책을 수립할 수 없는 경우에는 모션분리와 모션통합을 고려한다. 투입할 여유 송전선로가 없는 경우에 대해서 본 논문에서 제안한 모션분리지수를 활용하여 모션분리를 수행하여본다.

모션 분리는 과부하선로의 수전단 측의 부하가 있는 모션에서 수행되는데, 선로 유효전력의 Tracing을 활용하여 모션 분리지수의 값의 순위가 높은 2개 모션에 대하여 제시한 것이 표 5에 제시되어 있다. 모션 8이 과부하 선로 9번 선로의 과부하를 해소하기 위한 모션분리지수의 값이 가장 크게

나왔으므로, 부하가 있는 모선 8에서 모선 분리가 시행된다. 이 경우는 모선분리 유형 4에 속한다. 모선 8에서의 부하는 유효전력 522.0[MW], 무효전력 176.0[MVar]이다. 새로운 모선을 추가하여 기존 방법으로 모선분리를 하는 경우 새로운 모선 번호 40이 모선 분리에 의하여 추가된다. 이 새로운 모선은 선로 10에 의하여 모선 5에 연결된다. 모선 8에서의 부하는 모선 8에서 유효전력 422.0[MW], 무효전력 146.0[MVar]의 부하와 새로운 모선 40에서 유효전력 100.0[MW], 무효전력 30.0[MVar]의 부하로 나누어진다고 가정한다. 모선분리를 수행할 때에 과부하선로의 조류를 지나치게 줄여 다른 선로의 조류를 과부하로 만들 수가 있으므로 적정 수준의 조류는 흐르도록 모선분리를 수행하는 것이 바람직하다. 모선 분리 전후의 과부하선로의 선로조류의 유효전력은 표 6에 제시되어 있는데, 유효전력이 444.1[MW]에서 301.1[MW]로 줄어든다. 선로 과부하는 해소되었는데, 이 때 다른 선로의 조류를 체크하여 과부하를 일으키는 선로가 없는지 체크해야 하며, 이 경우에는 다른 선로의 과부하를 일으키지 않으므로 과부하해소 대책으로 채택된다.

**표 2** 과부하 선로인 9번 선로에 대한 선로조류 민감도  
**Table 2** The sensitivity of the line flow for the overload line 9

No	스위칭 선로	선로조류 민감도 $S_{FYH}$
1	11	0.72305
2	10	-0.63470
3	18	0.31154
4	7	-0.24124
5	12	-0.23963

**표 3** 선로 스위칭 후의 9번 선로의 유효전력(여유 투입 선로 있는 경우)  
**Table 3** The active power in the line 9 after line switching

스위칭 회수	스위칭 선로	스위칭 동작	스위칭 후의 9번 선로의 유효전력(MW)	제약조건 만족여부
1	11	선로 추가 투입	-371.8	만족
2	10	선로 차단	-201.0	만족

**표 4** 선로 스위칭 후의 9번 선로의 유효전력 (여유 투입 선로 없는 경우)  
**Table 4** The active power in the line 9 after line switching

스위칭 회수	스위칭 선로	스위칭 동작	스위칭 후의 9번 선로의 유효전력(MW)	제약조건 만족여부
1	10	선로 차단	-211.6	불만족
2	7	선로 차단	-295.0	불만족
3	12	선로 차단	-175.0	불만족

**표 5** 과부하 선로인 9번 선로에 대한 모선분리지수  
**Table 5** The bus separation index for the overload line 9

No	분리모선	모선분리지수 $BS_m$
1	8	5.221
2	4	3.660

**표 6** 모선 8에서의 모선분리 전후의 결과 비교

**Table 6** Comparison in case of bus separation at bus 8

선로 번호	From bus	To bus	모선분리 전 선로조류 [MW]	모선분리 후 선로조류 [MW]	제약조건 만족여부
9	5	6	-444.1	-301.1	만족
10	5	8	260.3	100.1	만족
13	7	8	137.9	282.9	만족
14	8	9	-124.5	-139.4	만족

**3.2 실계통에의 적용**

대규모 전력시스템 모델로서 2010년도 하계의 한전의 전력시스템을 사용하여 분석한다. 이 전력 시스템은 모선수 1308개, 송전선로 2031선로, 발전기 327기와 부하 71,076MW를 가지고 있다.

1) 한전 광주전남본부의 154kV 광계#1,2 T/L의 선로과부하 해소 대책 수립

그림 8은 한전 실계통의 광주전남본부의 신광주S/S 주변 계통도를 보여주고 있다. 그림 8에서 표시되어 있는 바와 같이 신광주S/S와 일곡S/S 간의 154kV 신광주일곡#1,2 T/L의 2회선 선로가 선로고장을 일으킨 경우에는 북광주S/S와 계림S/S 간의 154kV 광계#1,2 T/L에 선로과부하가 발생한다. 이 선로의 정격전력이 176.0[MW]인데, 294.90[MW]의 전력이 흘러서 167.6[%]의 선로과부하가 발생한다. 이 경우의 선로과부하를 해소하기 위하여 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한다. 먼저 과부하선로의 유효전력의 Tracing을 활용하여 검토대상 선로수를 줄이고, 이 선로들에 대하여 선로민감도를 계산한 것이 표 7에 제시되어 있다. 이 표에서 비아S/S와 일곡S/S 간의 154kV 비아#1,2 T/L이 가장 높게 나옴을 알 수 있다. 따라서 이 민감도 순위에 따라 비아S/S와 일곡S/S 간의 154kV 비아#1,2 T/L을 차단하는 조치를 취하고, 선로과부하의 경감 유무 및 전력계통 제약조건 만족 여부를 체크한다. 이 조치를 취하면 선로과부하가 해소되고 전력계통 제약조건도 만족하므로 더 이상 진행하지 않고 이 조치가 선로과부하 해소 대책으로 채택된다. 비아S/S와 일곡S/S 간의 154kV 비아#1,2 T/L을 차단하기 전과 후의 154kV 광계#1,2 T/L에 흐르는 선로조류의 비교치가 표 8에 제시되어 있다. 비아S/S와 일곡S/S 간의 154kV 비아#1,2 T/L을 차단하는 조치를 취한 후에는 정격선로전력이 176.0[MW]인 154kV 광계#1,2 T/L에 125.57[MW]의 전력이 흘러 71.3[%]의 전력이 흐르므로 선로과부하가 해소되었음을 알 수 있다.

2) 한전 인천본부의 154kV 신부평고강#1,2 T/L의 선로과부하 해소 대책 수립

그림 9는 한전 실계통의 인천본부의 신부평S/S 주변 계통도이다. 그림 9에서 표시되어 있는 바와 같이 신부평S/S와 중동S/S 간의 154kV 신부평중동#1 T/L의 1회선 선로가 선로고장을 일으킨 경우에는 신부평S/S와 고강S/S 간의 154kV 신부평고강#1,2 T/L에 선로과부하가 발생한다. 이 선로의 정격전력이 195.0[MW]인데, 272.4[MW]의 전력이 흘러서 139.7[%]의 선로과부하가 발생한다. 선로과부하가 발생한 선로의 부근에 중동S/S가 모선분리가 되어 운전되고



있음을 알 수 있다. 이 경우에도 본 논문에서 제안한 알고리즘을 선로과부하를 해소하기 위하여 적용한다. 이 경우에는 선로차단 만으로는 선로과부하가 해소 되지 않아 다음 단계인 모선통합을 할 수 있는 모선이 있는지 선로유효전력의 Tracing에 의하여 체크하면, 중동S/S가 모선분리가 되어 있어서, 모선통합대상 후보로 선정하고, 모선통합대상인 중동S/S를 모선통합 시킨다. 그리고 모선분리에 의하여 선로과부하를 해소하기 위하여 모선분리지수를 계산한다. 이의 결과가 표 9에 제시되어 있다. 이 표에서 화곡S/S의 모선이 가장 높게 나옴을 알 수 있다. 따라서 이 모선분리지수의 크기 순위에 따라 화곡S/S에서 모선분리의 조치를 취하며, 원래의 개방회로 운전의 취지를 살려서 모선 분리의 유형은 모선분리유형 1을 취한다. 그리고 선로과부하의 경감 유무 및 전력계통 제약조건의 만족 여부를 체크한다. 이 결과를 체크하면 선로과부하가 해소되고 전력계통 제약조건도 만족하므로 이 조치가 선로과부하 해소 대책으로 채택된다. 화곡S/S의 모선의 모선분리의 전과 후의 154kV 신부평고강#1,2 T/L에 흐르는 선로조류의 비교치가 표 10에 제시되어 있다. 중동S/S의 모선통합 및 화곡S/S의 모선분리의 조치를 취한 후에는 정격선로전력이 195.0[MW]인 154kV 신부평고강#1,2 T/L에 96.16[MW]의 전력이 흘러 49.3[%]의 전력이 흐르므로 선로과부하가 해소되었음을 알 수 있다.

이러한 선로 유효전력의 Tracing과 민감도를 활용한 선로 스위칭 및 모선분리 알고리즘을 적용하여 수많은 케이스의 스위칭과 모선분리의 경우의 수를 대폭적으로 줄이고 효율적으로 선로 스위칭과 모선분리의 조합을 구하여, 효과적인 과부하 해소 대책을 세울 수 있음을 알 수 있다. IEEE 39 모선 테스트 시스템의 시뮬레이션은 MATLAB 프로그램을 개발하여 수행하였고, 한전 실계통에 대한 시뮬레이션은 PSS/E 프로그램과 IPLAN 프로그램을 활용한 과부하해소대책 프로그램을 개발하여 수행하였다.

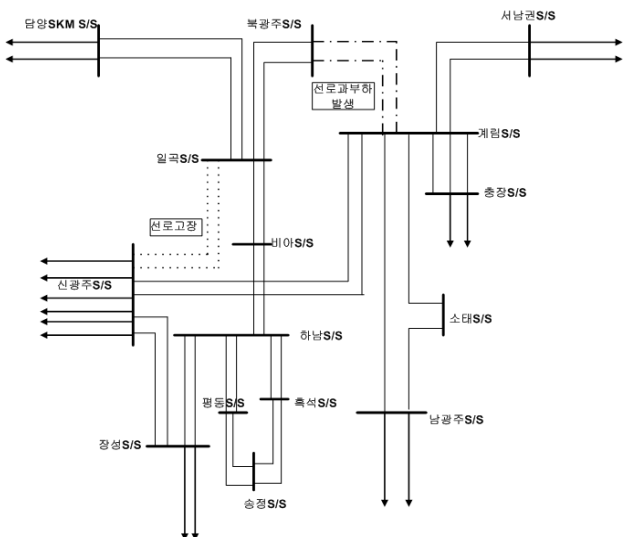


그림 8 한전 실계통 적용의 예(광주전남본부의 신광주S/S 주변 계통도)  
 Fig. 8 A practical KEPCO power system(around Sinkwangju S/S)

표 7 과부하 선로인 154kV 광계#1,2 T/L에 대한 선로조류 민감도

Table 7 The sensitivity of the line flow for the overload line 154kV Kwanggye #1,2 T/L

No	스위칭 선로 From bus	스위칭 선로 To bus 명	선로조류 민감도 $S_{Fyhl}$
1	일곡S/S	비아S/S	0.03621
2	북광주S/S	일곡S/S	0.02707
3	비아S/S	하남S/S	0.01856
4	비아S/S	고려TS/S	0.01573
5	일곡S/S	담양SKMS/S	0.01394

표 8 선로 스위칭 후의 154kV 광계#1,2 T/L의 유효전력

Table 8 The active power in the 154kV Kwanggye #1,2 T/L after line switching

스위칭 회수	스위칭 선로명	스위칭 전의 유효전력(MW)	스위칭 후의 유효전력(MW)	제약조건 만족여부
1	비아#1,2 T/L	294.90	125.57	만족

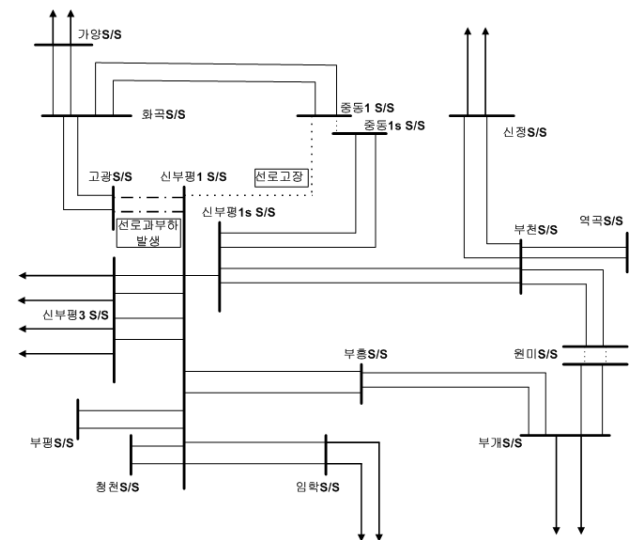


그림 9 한전 실계통 적용의 예(인천본부의 신부평S/S 주변 계통도)

Fig. 9 A practical KEPCO power system(around Sinbupyeong S/S)

표 9 과부하 선로인 154kV 신부평고강#1,2 T/L에 대한 모선분리지수

Table 9 The bus separation index for the overload line 54kV Sinbupyeong-Gogang #1,2 T/L

No	모선번호	모선명	모선분리지수 $BS_m$
1	3870	화곡S/S	173.4
2	3845	고강S/S	96.2
3	3880	가양S/S	47.3

**표 10** 선로 스위칭 후의 154kV 신부평고강#1,2 T/L의 유효전력

**Table 10** The active power in the 154kV Sinbupyeong-Gogang #1,2 T/L after line switching

조치 회수	통합 모션명	분리 모션명	조치 전의 유효전력(MW)	조치 후의 유효전력(MW)	계약조건 만족여부
1	중동S/S	화곡S/S	272.4	96.16	만족

**4. 결 론**

송전선로과부하를 해소하기 위하여 선로의 차단 및 투입과 모선의 분리 및 통합의 조치를 취할 대상들이 실계통에 서는 수천에 달하여 적절한 해의 조합을 구하기가 쉽지 않 으므로, 선로과부하 해소대책을 검토하기 위한 선로 및 모선의 대상을 효과적으로 추출하기 위하여 과부하선로의 유효 전력의 Tracing 기법을 적용하였다. 과부하선로의 유효전력이 흘러가는 선로들과 모선들을 추적하여 활용하는 과부하 선로 유효전력의 Tracing에 의하여 선로과부하 해소대책을 수립하기 위한 선로차단, 선로투입, 모선분리 및 모선통합의 검토 대상의 수를 아주 효율적으로 크게 줄일 수 있다. 이 들 대상에 대하여 선로차단과 선로투입을 위한 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 하기 위하여, 각 선로의 임피던스 변화에 대한 과부하 선로 조류의 민감도를 사용하여 과부하 선 로를 해소하기 위한 선로의 차단과 여유 송전선로의 투입을 한꺼번에 체계적으로 수행하는 선로 스위칭 알고리즘을 제 시하였다. 또, 과부하선로에 흐르는 유효전력의 Tracing에 근거한 새로운 모선분리지수를 활용하여 분리모선을 효율적 으로 선정하여 모선분리를 수행하는 기법을 제시하였다. 이 러한 선로 유효전력의 Tracing과 민감도를 활용한 선로 스 위칭 및 모선분리 알고리즘을 적용하여 수많은 케이스의 선 로 스위칭과 모선 분리의 경우의 수를 대폭적으로 줄이고, 효율적으로 최선의 선로 스위칭과 모선분리의 조합을 구하 여, 효과적인 과부하 해소 대책을 세울 수 있다. 이를 소규모 시스템과 실계통에 적용하고, 그 시뮬레이션 결과로서 제 시된 알고리즘의 효과를 보여 주었다.

제시된 알고리즘에 근거한 과부하 해소 기법이 프로그램 으로 자동화 되어 운용하게 된다면 전력설비의 운용자에게 큰 도움을 줄 수 있고, 선로 과부하로 인한 정전 사고 확대 를 방지할 수 있으므로 안정적 전력 공급에 기여할 수 있다.

**감사의 글**

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

**참 고 문 헌**

[1] W.R. Lachs, " Transmission-line overloads: real-time control," *IEE Proceedings*, vol. 134, Pt.C, No. 5, pp.342-347, September 1987.

[2] E. B. Makram, K. P. Thornton, and H. E. Brown, " Selection of lines to be switched to eliminate overload lines using a Z-matrix method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 653 - 661, May 1989.

[3] N. Muller and V.H. Quintana, " Line and shunt switching to alleviate overloads and voltage violations in power networks," *IEE Proceedings*, vol. 3, 136, Pt.C, No. 4, pp.246-253, July 1989.

[4] P.R. Bijwe, J. Nanda, K.L. Puttabuddhi, " Ranking of line outages in an AC-DC system causing overload and voltage problems," *IEEE Proceedings-C*, vol. 138, No. 3, pp. 207-212, 1991.

[5] J. N. Wrubel, P. S. Rapcienski, K.L. Lee, B.S. Gisin, and G. W. Woodzell, " Practical experience with corrective switching algorithm for on-line applications," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 11, No. 1, pp. 415-421,1996.

[6] W. Shao and V. Vittal, " A new algorithm for relieving overloads and voltage violations by transmission line and bus-bar switching," *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 322-327, 10-13 Oct. 2004.

[7] W. Shao and V. Vittal, "Corrective switching algorithm for relieving overloads and voltage violations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, No. 4, pp. 1877-1885. 2005.

**저 자 소 개**



**이 병 하 (李 丙 河)**

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~1994년 한전 기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수. 2007년~2008년 University of Illinois(Urbana-Champaign) 방문교수.  
Tel : 032-835-8437  
E-mail : bhlee@incheon.ac.kr



**황 승 호 (黃 勝 湖)**

1974년 4월 28일생. 2003년 인천대학교 졸업. 2006년 동대학원 전기공학과 졸업(공석). 2011년~ 현재 인천대학교 전기공학과 박사과정.  
Tel : 032-835-4607  
E-mail : sh7467@hanmail.net