

# 방사상 전력계통의 전압안정도 향상을 위한 최적 라우팅 기법에 관한 연구

論 文

51A-11-5

## A Study on the Optimal Routing Technique for the Improvement of Voltage Stability in Radial Power System

金炳燮\* · 愼重麟\*\* · 朴宗培\*\*

(Byung-Seop Kim · Joong-Rin Shin · Jong-Bae Park)

**Abstract** - This paper presents a new algorithm for the enhancement of voltage stability by optimal routing (OR) technique. A new voltage stability index (VSI) for optimal routing is also proposed by using theories of critical transmission path based on voltage phasor approach and equivalent impedance method. Furthermore, the proposed algorithm automatically detect the critical transmission path to critical load which are faced to voltage collapse due to additional real or reactive loading. We also adopt a improved branch exchange (IBE) algorithm based on a tie branch power (TBP) flow equation to apply the OR technique. The proposed IBE algorithm for the VSI maximizing can effectively search the optimal topological structures of distribution feeders by changing the open/closed states of the sectionalizing and tie switches. The proposed algorithm has been evaluated with the practical IEEE 32, 69 bus test systems and KEPCO 148 bus test system to show favorable performance.

**Key Words** : Voltage stability index, Improved branch exchange, Optimal routing, Tie branch power equation

### 1. 서 론

최근 전력계통 자동화의 실현과 더불어 방사상 전력계통의 최적 운영에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적으로 배전계통은 대표적인 방사상 전력계통으로 간주할 수 있으며, 배전계통에 설비되어 있는 구간개폐기(sectionalizing switch)와 연계개폐기(tie switch)의 적절한 개폐상태(on/off state)를 조작하여 급전선의 계통구성(topology)을 변화할 수 있다. 그러므로 급전선의 부하 이동을 결정하는 연계개폐기의 최적 선정은 전체 배전계통의 운전효율 향상에 현저하게 기여할 수 있다. 일반적으로 배전계통은 산업용, 상업용, 가정용 수용가 등으로 다양하게 구성되어 있으며, 수용가의 다양한 구성 형태로 인하여 변전소의 변압기와 주 급전선에서는 일간에도 첨두부하, 중부하, 경부하의 다양한 부하변화를 경험하게 된다. 만일 배전계통의 부하들을 적절한 최적 라우팅(Optimal Routing : OR) 알고리즘에 의하여 효과적으로 운영할 수 있다면, 계통의 전압안정도를 향상시킬 수 있으며, 부하 재분배를 통한 첨두부하를 개선하여, 급전선의 전압분포(voltage profile)와 계통의 신뢰도 향상에 기여할 수 있다.

최근에는 이러한 목적으로 배전계통의 전압 안정도에 관한 연구가 활발하게 논의되고 있다[1,2]. 전압 불안정 현상은 특정 모선의 전압 붕괴(voltage collapse)를 유발할 수 있으며, 지속적인 손실 증가와 전압 붕괴의 파급으로 계통 전체를 광역정전(black out)에 이르게 할 수 있기 때문에, 전력계통의 운영과 계획 분야에서 중요한 문제로 인식되고 있다. 일반적

으로 전력 계통의 전압 불안정 현상은 전송선로의 전송능력을 초과하는 과중한 부하 조건에서 발생하며, 지역적으로 불충분한 무효전력의 공급[5,6] 등의 원인으로 발생한다.

기존의 전압안정도 연구의 범위는 비록 전압 불안정 현상은 본질적으로 동적 특성이 강하지만, 문제의 복잡성으로 인하여 정적 모델에 관한 연구가 주로 수행되었다. 연구된 모델의 대부분은 계통의 자코비안 행렬을 이용하여 민감도를 해석하거나 특이행렬의 조건을 결정하는 연구에 집중되어있다[3]. 또한 적절한 부하 절체를 통하여 계통의 불안정 상태와 전압 불안정 문제를 개선할 수 있음을 보였다[5]. Sterling et al[5]은 테브낭 등가회로 이론을 이용하여 부하모선의 전압 붕괴 현상을 연구하였다. 전압 안정도와 전력손실과의 관계는 문헌[4]에서 제시되었으며, 전력손실의 감소와 더불어 전압안정도가 향상되었음을 제시하였다.

본 논문에서는 급전선의 최적 라우팅 알고리즘을 이용하여 방사상 배전계통의 전압안정도를 향상시킬 수 있는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 새롭게 유도된 전압안정도 지수(Voltage Stability Index : VSI)를 최대화시키는 최적화 문제의 형태로 정식화하였다. 계통의 빈번한 구성 상태의 변경에 따른 전압안정도를 신뢰성있는 기법으로 평가하기 위하여 임계전송경로[7]와 임피던스 축약기법[9]에 바탕을 두는 전압안정도 지수를 유도하였다. 또한 전압안정도의 최대 향상을 도모할 수 있는 급전선 최적 라우팅 알고리즘은 대표적인 휴리스틱 탐색전략으로 인정되고 있는 선로교환 기법을 이용하여 지역탐색 알고리즘으로 사용하였으며, 탐색시간의 효율과 실시간 적용에 가능성을 모색하고자 하였다. 특히 본 논문에서 제안된 개선된 선로교환기법(Improved Branch Exchange : MBE)은 방사상 계통 구성의 초기치 선정문제를 극복하기 위하여 선행 연구되었던 적용 유전알고리즘 기반의 전역탐색 알고리즘[14]과 적절한 결합을 시도하였다. 따라서 기존의 연구문헌[11]의 선로교환 기법이 보였던

\* 正 會 員 : 建 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 講 師 · 工 博

\*\* 正 會 員 : 建 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002年 2月 26日

最 終 完 了 : 2002年 10月 11日

지역해 수렴문제를 상당부분 개선할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 제안된 IBE 기법은 연계선로의 부하이동에 따른 손실변화량을 효과적으로 평가하기 위하여 연계선로 전력방정식 (Tie Branch Power : TBP)을 새롭게 제안하였으며, 선로교환 기법의 적용에 있어서 전력조류계산으로 인한 과도한 계산시간의 비효율성을 극복할 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘의 신뢰성 검토를 위하여 IEEE 32, 69 모선에 적용하였으며, 실계통의 적용가능성을 모색하기 위하여 KEPCO 148 모선 계통에 적용하여 알고리즘의 효율성을 검증하였다.

### 2. 문제의 정식화

본 논문에서 고려되는 OR 문제는 공급모선에서 부하모선에 이르는 최적 전력전송 경로를 탐색하기 위하여 선로의 개폐기를 최적으로 제어하는 전송선로 재구성 문제로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Maximize}_{X \in \Omega} \text{VSI}(X) \quad (1)$$

s.t.

$$G_E(X) = 0$$

$$G_R(X) = 0$$

$$\bar{S}_{i,i+1} - \bar{S}_{i,i+1}^{\max} \leq 0, i=1, \dots, N$$

여기서,

$$\Omega = \{X^* | P_L(X^*) \leq P_L(X), X \in \Lambda\}$$

$$G_R = \{h_1(z) + h_2(z) + h_3(z) | z \in \Lambda\}$$

$$X = \{\bar{S}_i, \bar{V}_i | i=1, \dots, N\}$$

$P_L(\cdot)$  : 계통의 유효전력 손실 방정식

$G_E(\cdot)$  : 전력평형 방정식에 대한 등호제약 조건

$G_R(\cdot)$  : 방사상 계통 구성에 대한 등호제약 조건

$\text{VSI}(\cdot)$  : 계통의 전압안정도 평가 방정식

$\bar{S}_i = P_i + jQ_i$ : 모선 (i)에서 유출되는 전력 조류 페이저

$\bar{V}_i$  : 모선 (i)의 전압 페이저

$\bar{S}_{i,i+1}$  : 연계모선 (i, i+1)에서 사이의 선로 조류 페이저

$\bar{S}_{i,i+1}^{\max}$  : 연계모선 (i, i+1)에서 허용 가능한 선로 조류 페이저

$$h_1(z) = N - \frac{1}{2} \sum_i \sum_j n_{ij}, \quad h_2(z) = \sum_i (1 - B_i),$$

$$h_3(z) = \sum_i \sum_{j \neq i} n_{ij} n_{ip}$$

그리고,  $\Lambda$ 는 전체 선로교환기법에 의한 최적화 진행과정에서 구성 가능한 계통상태의 전체 집합이며,  $N$ 은 공급모선을 제외한 부하모선 집합이고,  $TN$ 은 공급모선을 포함하는 전체 모선의 집합이다. 또한  $B_i$ 는  $\sum_j n_{ij} \neq 0$ 이면  $B_i = 1$ 이고, 그렇지 않으면  $B_i = 0$ 으로 결정되며,  $n_{ij}$ 는 연계모선 (i, i+1)에서 급전선 개폐기가 폐로 되면  $n_{ij} = 1$ 이고, 그렇지 않으면  $n_{ij} = 0$ 이 된다. 그리고,  $p = \text{path}(i, j)$ 은 연계모선 (i, i+1)에서 급전선 개폐기가 폐로 되어있는 상태에서 모선 (i)와 모

선 (j)에 동시에 연계되어 있는 임의의 모선 집합을 의미한다.

### 3. 전압안정도 평가지표의 정식화

#### B3.1 임계전송경로의 개념

임의의 n 모선으로 구성되는 방사상 전력계통은 전송경로를 구성하는 부하들의 영향으로 선로의 손실이 발생하며, 결과적으로 각 모선에서 순차적인 전압강하를 나타낸다. 기존 연구 [7]에서는 n 번째 모선의 전압강하 페이저를 발전모선의 전압 페이저에 투영하여 임계전송경로의 개념을 도입하였다. 이러한 개념은 4모선 계통의 페이저도에서 일반화 할 수 있다.

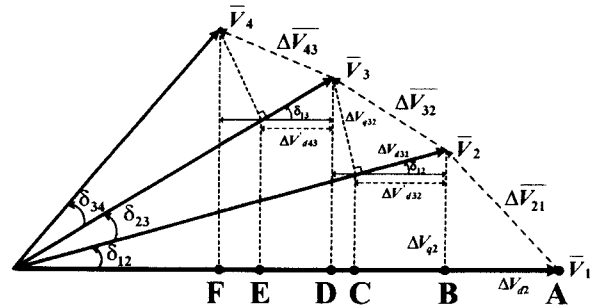


그림 1 전압강하 페이저의 투영도

Fig. 1 Projection diagram of voltage drop phasor

페이저도에서  $\overline{CD}$ ,  $\overline{EF}$  성분은 위상각의 영향으로 생성된 횡축성분의 전압강하조각 선분으로 주로 유효전력의 영향으로 발생하게 된다. 반대로  $\overline{AB}$ ,  $\overline{BC}$ ,  $\overline{DE}$  성분은 무효전력의 불균형으로 발생하는 전압강하 성분으로 간주하여 전압강하조각(Voltage Drop Segments : VDS)로 정의할 수 있다. 전압 페이저도에서 개별적인 전압강하 페이저를 공급모선의 전압 페이저상에 투영하는 성분으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} VDS = & (V_1 - V_2 \cos \delta_{12}) \cos \delta_{11} \\ & + (V_2 - V_3 \cos \delta_{23}) \cos \delta_{12} + (V_3 - V_4 \cos \delta_{34}) \cos \delta_{13} \end{aligned} \quad (2)$$

상기 식을 이용하면 임의의 모선 i가 전압강하에 기여하는 성분을 발전모선의 전압 페이저에 투영되는 성분  $\Delta \bar{V}_{di}'$ 로 표현할 수 있으며, 이는 확장하여 개별 전압강하 성분의 전체 총합의 형태로 다음과 같이 일반화하여 표현할 수 있다.

$$\Delta \bar{V}_d' = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \bar{V}_{di} = \sum_{i=1}^{n-1} (V_i - V_{i+1} \cos \delta_{i,i+1}) \cos \delta_{1,i} \quad (3)$$

전압강하 페이저의 직축 성분의 최종식을 이용하면 n 모선 방사상 전력계통의 임계 전송경로를 정의할 수 있다. 임계 전송경로는 전압페이저가 지속적으로 감소하는 전송경로를 따라서 형성될 수 있으며, 전송경로의 공급능력을 상회하는 부하증가에 따라 임계전송 경로의 말단 부하모선에서 전압붕

피가 일어나게 된다. 그러므로 본 논문에서는 임계전송 경로의 이론을 일반적인 n 모선 방사상 계통의 전압안정도 평가에 적용하였다.

3.2 전압안정도 평가지표의 유도

방사상 계통의 전압 안정도 지표의 수학적인 정식화 과정은 단일선로 계통의 특성을 이용하여 유도할 수 있다. 제안된 지표의 개념은 자코비안 행렬의 특이성 조건을 이용하는 것이다. 전압안정도 지수의 유도를 위하여 2모선 전력계통도를 도시하였다.

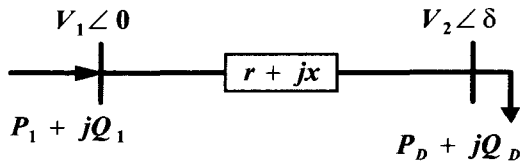


그림 2 2모선 전력계통도  
Fig. 2 Diagram of two bus power system

공급모선을 기준모선(reference bus)으로 간주하여 2모선 계통의 전력수정 방정식을 정의할 수 있으며, 그에 따른 자코비안 행렬의 행렬식을 정의할 수 있다.

$$\det J = \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} - \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \quad (4)$$

수정방정식의 자코비안 행렬은 계통의 상태정보를 담고 있기 때문에 자코비안의 특이행렬(singula matrix)은 대상 계통의 임계 운전점을 의미하며, 전압붕괴 운전점으로 표현할 수 있다[17]. 전압 불안정 조건식을 유도하기 위하여 일반화된 i 모선의 전력방정식(power equation)을 이용하면 자코비안 행렬의 편미분 항은 각각 다음과 같이 전개할 수 있다. 식에서 G, B는 각각 모선 어드미턴스 행렬의 컨덕턴스와 서셉턴스를 의미한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} &= V_1^2 V_2 (B_{21}^2 \cos^2 \delta - G_{21}^2 \sin^2 \delta) \\ &\quad + 2 V_1 V_2^2 B_{22} (G_{21} \sin \delta + B_{21} \cos \delta) \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} &= V_1^2 V_2 (G_{21}^2 \cos^2 \delta - B_{21}^2 \sin^2 \delta) \\ &\quad + 2 V_1 V_2^2 G_{22} (G_{21} \cos \delta + B_{21} \sin \delta) \end{aligned} \quad (5)$$

최종적으로 정리된 자코비안의 행렬식으로부터 특이행렬의 조건식은 다음과 같이 모선전압과 위상각의 함수 형태로 유도된다.

$$2V_2 \cos \delta = V_1 \quad (6)$$

본 논문에서는 계통 운전상태를 반영하는 자코비안 행렬의 특이성에 관한 전압 불안정 조건식을 이용하여 새로운 형태의 전압안정도 평가기법을 모색하였다. 제안된 평가기법은

전압강하 페이저로 구성되는 임계전송경로와 임피던스 축약 기법[9]을 이용하여 새로운 전압안정도 지표(Voltage Stability Index : VSI)를 제안하였다. 제안된 지표는 방사상 전력계통의 최적 라우팅 알고리즘의 탐색과정에서 빈번하게 변경되는 대상 계통의 전압안정도를 효과적으로 평가할 수 있다.

앞서 유도된 2모선 계통의 전압불안정 조건식은 전압강하 페이저도의 직축 투영성분을 이용하여 다음과 같이 재정의 할 수 있다.

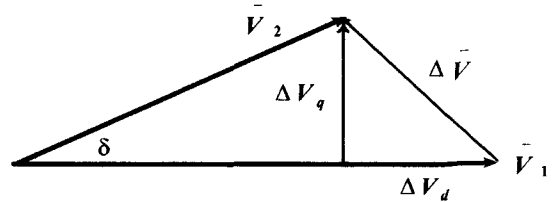


그림 3 2모선 전력계통의 페이저도  
Fig. 3 Phasor diagram of 2 bus power system

$$0.5 V_1 = \Delta V_d \quad (7)$$

전압 페이저도에서 정의된 전압불안정 조건식은 기준모선의 전압페이저의 크기가 일정하게 유지되어야 하므로 전압강하 페이저의 직축투영성분의 함수로 정의할 수 있다. 전압강하 페이저의 직축 성분은 OR 알고리즘에 적용하기 위하여 동일한 물리량의 임피던스와 전력의 관계식으로 변형되어야 한다. 전압 페이저도에서 전압 강하 페이저를 직각 좌표 형태의 복소수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \bar{V} = \Delta V_d + j\Delta V_q \quad (8)$$

한편, 전압 강하 페이저와 각 모선의 전압 페이저 사이의 관계식은 2 모선 계통의 전류와 임피던스 관계로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2 = \bar{I} Z \quad (9)$$

또한 등가 2모선 계통에서 공급 모선의 주입 전력의 관계로부터 전류 페이저는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\bar{I} = (P_1 - jQ_1) / \bar{V}_1^* \quad (10)$$

전압 강하 페이저 수식에 전류와 임피던스 페이저의 수식을 대입하여 정리하면 전압강하 페이저의 직축과 횡축 성분을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V_d &= (Pr + Qx) / V_1 \\ \Delta V_q &= (Px - Qr) / V_1 \end{aligned} \quad (11)$$

상기 수식의 직축 성분을 이용하면 2 모선 계통의 전압안정도를 효과적으로 평가할 수 있다. 상기 유도된 직축 성분은 임의의 다모선 방사상 계통에 적용할 수 있는 형태로 확장하기 위하여 임피던스 축약기법 확장하여 다음과 같은 형태로 적용

하였다. 본 논문에서는 다모선 방사상 전력계통의 전압강하 직 축투영 성분과 전압안정도 지표를 다음과 같이 제안하였다.

$$VSI = 0.5 V_1 - \Delta V_d^{CTP} \quad (12)$$

단,

$$\begin{cases} P_{eq} = \sum P_{Li}^{CTP} + \sum P_{Di}^{CTP}, & Q_{eq} = \sum Q_{Li}^{CTP} + \sum Q_{Di}^{CTP} \\ r_{eq} = \sum P_{Li}^{CTP} / (P_{eq}^2 + Q_{eq}^2), & x_{eq} = \sum Q_{Li}^{CTP} / (P_{eq}^2 + Q_{eq}^2) \end{cases}$$

여기서,

$$\Delta V_d^{CTP} = (P_{eq} r_{eq} + Q_{eq} x_{eq}) / V_1$$

$P_{Li}^{CTP}$ : 임계전송경로의 선로 i의 유효전력 손실

$Q_{Li}^{CTP}$ : 임계전송경로의 선로 i의 무효전력 손실

$P_{Di}^{CTP}$ : 임계전송경로의 모선 i의 유효전력 부하

$Q_{Di}^{CTP}$ : 임계전송경로의 모선 i의 무효전력 부하

#### 4. 개선된 선로교환 기법을 이용한 최적라우팅

##### 4.1 선로교환기법과 루프계통의 손실식

임의의 방사상 계통은 연계개폐기를 기준으로 루프계통(loop network)을 형성하게 되며 이러한 다수의 루프계통은 방사상 배전계통 전체를 구성하게 된다. 선로교환 기법에서는 개폐 동작에 참여하는 급전선의 방사상 구조를 유지하기 위하여 한 개의 구분개폐기와 그에 대응하는 연계개폐기의 개방과 투입을 동시에 수행해야 한다. 이렇게 한 쌍(pair)의 형태로 개폐동작을 수행하는 것을 선로 교환이라고 하며, 이러한 선로 교환 동작을 경험적으로 수행하여 최적해를 도출하는 기법을 선로교환 알고리즘(branch exchange algorithm)이라고 한다. 본 논문에서 제안된, IBE 기법에서는 선행연구[15]에서 수행되었던 최대손실감소 루프계통의 개념과 표준선로의 개념을 적용하였다.

##### 4.2 선로교환에 의한 연계선로의 전력조류 추정

임의의 루프계통의 선로교환에 따라 부하가 증가되는 측 계통에서는 투입된 연계선로를 통하여 새로운 전력조류가 발생한다. 본 논문에서는 연계선로의 개방에 따른 새로운 선로 전력조류를 계산하기 위하여 연계선로의 전력(Tie Branch Power : TBP) 방정식을 유도하였으며, 이를 기반으로 연계선로의 새로운 전력조류를 추정할 수 있는 기법을 제안하였다. 선로교환 이후 부하이동에 따라 R측에서는 새로운 선로 조류  $P_t + jQ_t$ 가 생성된다. 이러한 과정에서 선로교환으로 새롭게 생성되는 연계선로 조류를 조류계산을 수행하지 않는 방법으로 추정할 수 있다면, 선로교환에 따른 보다 정확한 손실변화량을 평가할 수 있으며, 전체 계산시간을 절감할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 루프계통의 예시는 선행연구[15]를 참고하였다.

제안된 TBP 방정식을 유도하기 위하여 임의의 연계선로의 상태변화에 따른 전력조류와, 그에 따른 전력평형 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

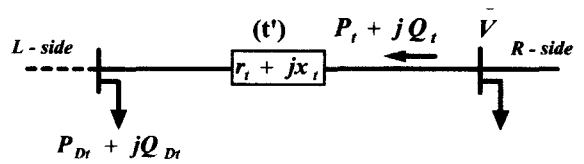


그림 4 연계선로 t와 연계된 2모선계통도  
Fig. 4 Two bus diagram connected with tie branch t

$$P_t + jQ_t = \bar{Z}_t \frac{|P_t + jQ_t|^2}{V^2} + P_{Dr} + jQ_{Dr} \quad (13)$$

제시된 2모선 계통도에서는 선로교환 이후 L측으로 이동되는 말단 부하를 기준으로 표현하였다. 연계선로의 전력평형 방정식으로부터 전력조류의 실수부분과 허수부분을 정의하고, 간단한 수식정리 과정을 통하여 유효전력 조류와 무효전력 조류를 다음과 같이 결정할 수 있다. 상세한 수식유도 과정은 참고문헌 [12]에 수록되어 있다.

$$\begin{aligned} \hat{P}_t &= P(r_t, x_t, P_{Dr}, Q_{Dr}, V^2) \\ \hat{Q}_t &= Q(r_t, x_t, P_{Dr}, Q_{Dr}, V^2) \end{aligned} \quad (14)$$

본 논문에서는 순차적으로 일어나는 선로교환의 탐색과정에서 조류계산을 수행하지 않기 위하여 유도된 TBP 방정식을 수정하여 추정된 TBP 방정식의 형태로 사용하였다. 추정된 방정식에서는 부하이동 이전에 조류계산을 통하여 계산된 전압 페이저를 선로교환에 따른 근사 전압 페이저( $\bar{V}$ )로 간주하여 특정 연계선로의 추정된 전력조류를 계산하도록 하였다. 추정된 연계선로의 전력 방정식을 근사 전압 페이저를 이용하여 표현하면 다음과 같은 간략한 형태의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{P}_t &= P(r_t, x_t, P_{Dr}, Q_{Dr}, \bar{V}^2) \\ \hat{Q}_t &= Q(r_t, x_t, P_{Dr}, Q_{Dr}, \bar{V}^2) \end{aligned} \quad (15)$$

##### 4.3 TBP 방정식을 이용한 최적 선로교환 선로의 결정

본 논문에서는 최대의 손실감소 확률이 높은 루프계통을 선정 한 후, 해당 루프계통 내에서 최대 손실감소의 선로교환 후보를 결정하기 위하여 새로운 손실지표( $\Delta IOL_{t,con}$ : Index Of Loss)를 제안하였다. 제안된 손실지표는 손실 항을 무시하고 유도된 기존의 손실변화 추정식에 비하여 교환된 후보선로의 부하이동에 대하여 비교적 정밀한 손실변화 정보를 줄 수 있다. 또한 제안된 손실지표는 선로교환에 따른 손실변화가 고전압 측에서도 나타날 수 있다는 사실[11]을 반영하기 위하여 연계선로의 저전압 측과 더불어 고전압 측, 양측의 선로교환을 모두 고려할 수 있도록 하였다. 제안된 손실지표는 앞서 저전압 측(lower voltage side)과 고전압 측(higher voltage side)으로 구분했던 루프계통을 단지 부하가 감소하는 L(left)측과 부하가 증가하는 R(right)측의 방향성 구분으로 대체하여 적용할 수 있다. 임의의 루프계통 k에서 선로 t와 선로 (t,con)의 선로교환에 따른 전력손실의 변화량

( $\Delta IOL^k_{t,con}$ )은 다음과 같은 형태로 유도된다. 상세한 유도 과정은 제안된 TBP 방정식을 적용하여 선행연구[12]의 부록에 설명하였다.

$$\Delta IOL^k_{t,con} = \Delta P_{loss}(S) + \Delta Q_{loss}(T) \quad (16)$$

$$\text{단, } \begin{cases} S = [\gamma_i^k, P_i^k, \hat{P}_t^k, P^k_{t,con}, P^k_{Di}]^T \\ T = [\gamma_i^k, Q_i^k, \hat{Q}_t^k, Q^k_{t,con}, Q^k_{Di}]^T \end{cases}$$

여기서,

- ( $\cdot$ )<sup>k</sup> : k 번째 루프계통의 전력조류에 관한 물리량
- ( $\cdot$ )<sub>t,con</sub> : 선로교환 이전에 연계선로와 직접 연결되어 있는 인접선로의 번호
- $\Delta P_{loss}$  : 유효분 손실의 변화량 방정식
- $\Delta Q_{loss}$  : 무효분 손실의 변화량 방정식
- $P_i$  : 선로교환 이전에 선로 i 의 유효전력 조류
- $Q_i$  : 선로교환 이전에 선로 i 의 무효전력 조류
- $P_{t,con}$  : 선로교환 이전에 선로 (t, con)의 유효전력 조류
- $Q_{t,con}$  : 선로교환 이전에 선로 (t, con)의 무효전력 조류

#### 4.4 제안된 알고리즘의 진행절차

본 논문에서 제안된 최종 알고리즘의 수행절차는 그림 5의 흐름도로 나타내었으며, IOL 모듈의 흐름은 참고문헌 [12]에 상술되어 있다.

### 5. 사례 연구

제안한 알고리즘은 IEEE 32, 69모선의 배전계통 예제모델과 KEPCO 148모선에 적용하여 그 효용성을 확인하였다. 제안한 알고리즘의 수행은 Pentium 400MHz PC에 의해 수행되었다. 예제모델의 초기구성에 대한 요약은 표 1에 나타내었다.

표 1 시험계통의 요약

Table 1 Summary of test systems

| Test systems | Original data | Number of buses | Number of branches | Number of loop system | Power demand                  |
|--------------|---------------|-----------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 32 Bus       | Ref. [11]     | 33              | 37                 | 5                     | 3715 [kW]<br>2300 [kVar]      |
| 69 Bus       | Ref. [13]     | 70              | 74                 | 5                     | 3802.19 [kW]<br>2694.60[kVar] |
| 148 Bus      | Ref. [16]     | 149             | 167                | 19                    | 44.2928 [MW]<br>21.5107[MVar] |

제안된 TBP 방정식의 타당성에 대한 검토결과는 참고문헌 [12]에서 충분히 확인할 수 있으며, 제안된 최적 라우팅 알고리즘의 적용에 적절하게 사용되었음을 확인할 수 있다.

표 2는 라우팅 알고리즘으로 수행된 최종 결과에 대한 CTP를 나타낸 것이다. 탐색된 경로의 모선들은 선로교환으로 구성된 계통에서 연속적으로 연계되어 있으며, 순차적으로 전압강하를 나타내는 임계경로를 구성한다.

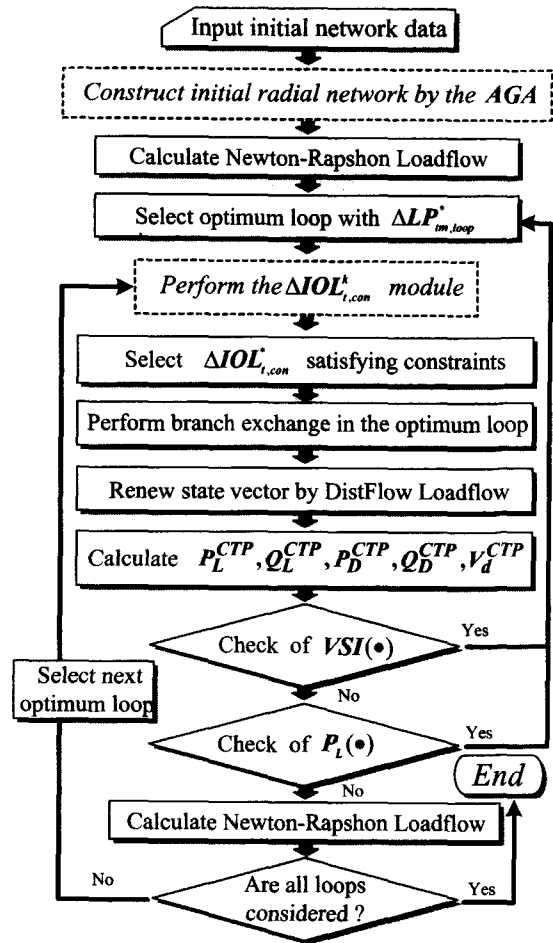


그림 5 제안된 알고리즘의 순서도

Fig. 5 Flowchart of proposed algorithm

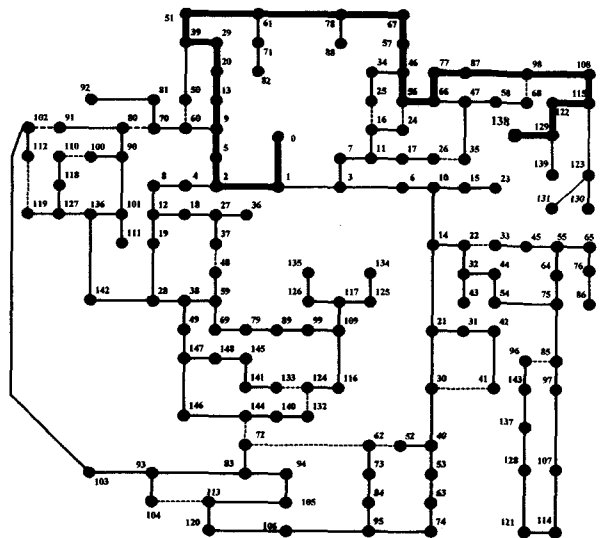


그림 6 148모선 최적화 초기 단계의 임계전송경로

Fig. 6 The initial CTP of the optimization of 148 bus system

CTP의 말단 모선의 전압페이저의 크기를 임계전압(critical voltage :  $V^{Cri}$ )으로 표현하였으며, 전체 모선중에서 가장 저전압을 나타내는 모선에 이르는 경로를 효과적으로 탐색하였음을 확인할 수 있다.

그림 6, 7은 제안된 전압안정도 평가 기법의 실효성을 확인하기 위하여 대규모 계통의 CTP 탐색과정을 도시한 것이다. 제안된 VSI는 지역적으로 야기되는 전압불안정 현상에 대한 정확한 위치를 파악할 수 있으며, 임계모선의 전압안정여유에 대한 실시간 평가를 수행할 수 있다.

표 2 임계전송경로에 대한 결과(148모선)  
Table 2 Result of critical transmission path (148 bus)

| Bus No.   | V   | Bus No.          | V        | Bus No. | V                | Bus No. | V     | Bus No. | V     |
|-----------|---|------------------|----------|---------|------------------|---------|-------|---------|-------|
| 0         | 1.000   | 34               | 0.970    | 68      | 0.963            | 102     | 0.974 | 136     | 0.975 |
| 1         | 1.000   | 35               | 0.966    | 69      | 0.973            | 103     | 0.974 | 137     | 0.968 |
| 2         | 1.000   | 36               | 0.976    | 70      | 0.974            | 104     | 0.973 | 138     | 0.952 |
| 3         | 1.000   | 37               | 0.975    | 71      | 0.970            | 105     | 0.973 | 139     | 0.954 |
| 4         | 1.000   | 38               | 0.975    | 72      | 0.972            | 106     | 0.971 | 140     | 0.973 |
| 5         | 1.000   | 39               | 0.972    | 73      | 0.972            | 107     | 0.968 | 141     | 0.973 |
| 6         | 1.000   | 40               | 0.972    | 74      | 0.971            | 108     | 0.961 | 142     | 0.975 |
| 7         | 1.000   | 41               | 0.972    | 75      | 0.969            | 109     | 0.970 | 143     | 0.968 |
| 8         | 0.989   | 42               | 0.972    | 76      | 0.970            | 110     | 0.975 | 144     | 0.973 |
| 9         | 0.977   | 43               | 0.971    | 77      | 0.970            | 111     | 0.975 | 145     | 0.973 |
| 10        | 0.976   | 44               | 0.970    | 78      | 0.970            | 112     | 0.975 | 146     | 0.973 |
| 11        | 0.971   | 45               | 0.970    | 79      | 0.973            | 113     | 0.971 | 147     | 0.974 |
| 12        | 0.979   | 46               | 0.970    | 80      | 0.974            | 114     | 0.968 | 148     | 0.973 |
| 13        | 0.976   | 47               | 0.966    | 81      | 0.974            | 115     | 0.960 |         |       |
| 14        | 0.973   | 48               | 0.975    | 82      | 0.970            | 116     | 0.972 |         |       |
| 15        | 0.976   | 49               | 0.974    | 83      | 0.973            | 117     | 0.970 |         |       |
| 16        | 0.971   | 50               | 0.973    | 84      | 0.972            | 118     | 0.975 |         |       |
| 17        | 0.970   | 51               | 0.971    | 85      | 0.968            | 119     | 0.975 |         |       |
| 18        | 0.978   | 52               | 0.972    | 86      | 0.970            | 120     | 0.971 |         |       |
| 19        | 0.977   | 53               | 0.972    | 87      | 0.970            | 121     | 0.968 |         |       |
| 20        | 0.976   | 54               | 0.969    | 88      | 0.970            | 122     | 0.955 |         |       |
| 21        | 0.972   | 55               | 0.970    | 89      | 0.972            | 123     | 0.960 |         |       |
| 22        | 0.971   | 56               | 0.971    | 90      | 0.975            | 124     | 0.972 |         |       |
| 23        | 0.976   | 57               | 0.970    | 91      | 0.974            | 125     | 0.970 |         |       |
| 24        | 0.971   | 58               | 0.964    | 92      | 0.974            | 126     | 0.970 |         |       |
| 25        | 0.971   | 59               | 0.974    | 93      | 0.973            | 127     | 0.975 |         |       |
| 26        | 0.968   | 60               | 0.975    | 94      | 0.973            | 128     | 0.968 |         |       |
| 27        | 0.976   | 61               | 0.971    | 95      | 0.971            | 129     | 0.954 |         |       |
| 28        | 0.976   | 62               | 0.972    | 96      | 0.968            | 130     | 0.960 |         |       |
| 29        | 0.976   | 63               | 0.972    | 97      | 0.968            | 131     | 0.960 |         |       |
| 30        | 0.972   | 64               | 0.970    | 98      | 0.962            | 132     | 0.972 |         |       |
| 31        | 0.972   | 65               | 0.970    | 99      | 0.971            | 133     | 0.973 |         |       |
| 32        | 0.971   | 66               | 0.970    | 100     | 0.975            | 134     | 0.970 |         |       |
| 33        | 0.971   | 67               | 0.970    | 101     | 0.975            | 135     | 0.970 |         |       |
| CTP       | 0, 1, 3, 7, 11, 17, 26, 35, 47, 58, 68, 98, 108, 115, 122, 129, 138 |                  |          |         |                  |         |       |         |       |
| VSI       | 0.45796   | $\sum P_D^{CTP}$ | 8271.850 |         | $\sum P_L^{CTP}$ | 301.763 |       |         |       |
| $V^{Cri}$ | 0.95220   | $\sum Q_D^{CTP}$ | 4003.476 |         | $\sum Q_L^{CTP}$ | 40.238  |       |         |       |

표 3과 4는 제안된 알고리즘과 기존의 기법[11]을 비교하기 위하여 동일한 시스템 조건에서 100회를 실시하여 평균값을 기록한 것이다. 특히 기존의 선로교환 기법은 초기 계통구성 상태를 임의로 선정하는 방법으로 수행하였으며, 제안된 방법

은 적응유전알고리즘(Adaptive Genetic Algorithm : AGA) 기법 기반의 선형연구[14]를 전역탐색 알고리즘으로 사용하여 적절한 초기 계통을 구성하도록 하였다. 표의 결과로부터 기존의 선로교환 기법에 비하여 하이브리드 형태의 IBE 기법의 최적해 수렴확률이 우수함을 확인할 수 있다. 또한 TBP 방정식을 적용하는 IBE 방법의 계산시간이 기존의 기법에 비하여 계통의 규모가 증가하고, 루프계통의 수가 증가할수록 더욱 감소하게 된다는 것을 확인할 수 있다.

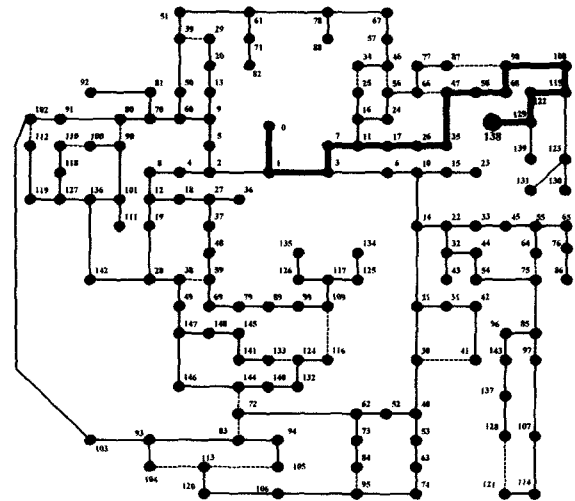


그림 7 148모선의 최종 임계전송경로  
Fig. 7 The final CTP of 148 bus system

표 3 최적해에 대한 수렴확률의 비교  
Table 3 Comparison with convergence probabilities of optimal solution

| Optimization method  | 32 bus   | 69 bus   | 148 bus  |
|--|----------|----------|----------|
| BE method[11] with initial random network by random function | 91.32[%] | 87.23[%] | 75.09[%] |
| Proposed MBE method with AGA                                 | 100 [%]  | 99.51[%] | 90.52[%] |

표 4 선로교환 기법의 평균 계산시간 비교  
Table 4 Comparison with average computation time of branch exchange

| Test systems | Iteration number of search iteration | Number of load flow solution | Computation time in sec |
|--------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 32 Bus       | Con.                                 | 5                            | 26                      |
|              | Proposed                             | 8                            | 9                       |
| 69 Bus       | Con.                                 | 5                            | 26                      |
|              | Proposed                             | 9                            | 10                      |
| 148 Bus      | Con.                                 | 16                           | 457                     |
|              | Proposed                             | 29                           | 30                      |

다음 표 5는 VSI 향상을 위한 IBE 수행과정을 확인하기 위하여 69모선의 BE 수행 결과를 정리한 것이며, 그림 8은 148모선의 BE결과를 도시한 것이다. 양측 계통의 선로교환의 진행과 더불어 VSI가 향상되고 계통손실의 감소가 지속적으로 이루어짐을 확인할 수 있다. 특히 그림 8에서는 VSI와 전력손실을 동일한 크기 영역에 도시하기 위하여 VSI의 결과

를 전력손실의 크기영역으로 적당하게 사상한 것이다. 69모선의 경우 VSI가 0.38409에서 0.46349로 상승하였으며, 이는 초기 계통에 비하여 20.41[%]의 전압안정도 여유가 개선되었다. 148 모선의 경우는 VSI가 0.3316(임계전압: 0.8833)에서 0.4580(임계전압: 0.9522)으로 상승하였으며, 이는 38.11[%]의 증가된 전압안정도 여유를 나타낸다.

표 5 69모선의 최종결과  
Table 5 Final result of 69 bus system

| Ite.  | Branch - exchange |       |      | VSI                | Critical Voltage in p.u | Power loss in kw |
|---|-------------------|-------|------|--------------------|-------------------------|------------------|
|   | Selected loop     | close | open |                    |                         |                  |
| 1   | -                 | -     | -    | 0.384              | 0.909                   | 225.003          |
| 2   | 2                 | 73    | 53   | 0.449              | 0.924                   | 138.947          |
| 3   | 4                 | 72    | 14   | 0.449              | 0.924                   | 128.273          |
| 4   | 2                 | 53    | 59   | 0.451              | 0.926                   | 123.039          |
| 5   | 3                 | 74    | 64   | 0.462              | 0.941                   | 100.764          |
| 6   | 4                 | 14    | 15   | 0.462              | 0.941                   | 100.684          |
| 7   | 3                 | 64    | 63   | 0.462              | 0.941                   | 100.684          |
| 8   | 2                 | 59    | 58   | 0.462              | 0.941                   | 100.684          |
| 9   | 3                 | 63    | 62   | 0.463              | 0.942                   | 99.620           |
| Initial tie branch sets obtained from AGA   |                   |       |      | 70, 71, 72, 73, 74 |                         |                  |
| Final tie branch sets after branch exchange |                   |       |      | 15, 18, 62, 70, 71 |                         |                  |

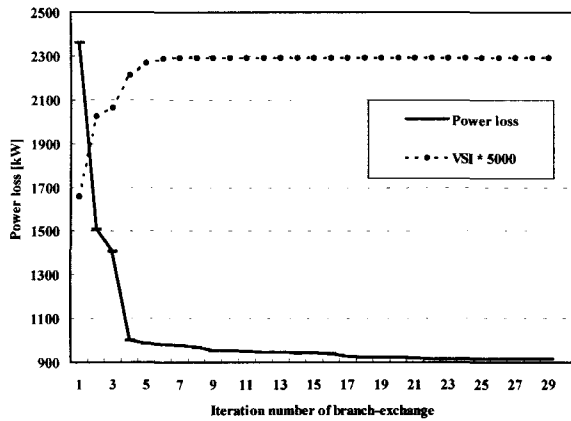


그림 8 선로교환에 따른 전력손실과 VSI 곡선 (148 모선)  
Fig. 8 Power loss and VSI curve followed by BE (148 bus)

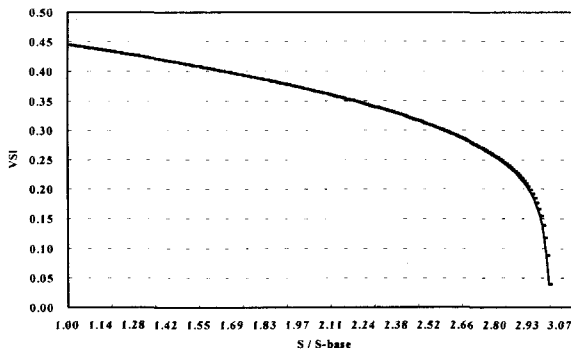


그림 9 69모선의 PV curve (전체부하 증가)  
Fig. 9 PV curve of 69 bus system (all buses increased)

그림 9은 제안된 VSI에 대한 P-V 곡선을 도시한 것이다. P-V 곡선의 사례연구에서는 초기 계통의 연계선로의 on/off 상태를 그대로 유지하면서 전체 계통의 부하량만을 비율적으로 증가하였다. 그림에서 S-base는 초기 부하 전력량이고, S는 증가된 부하 전력량을 나타낸다. 모선별 부하 증가비율 (loading late)은 모든 모선에서 동일한 비율로 증가되었다.

부하량 증가의 비율이 3.07배에서 54모선의 전압이 임계전압(0.6014)으로 검색되었으며, CTP는 0, 1, 2, 2e, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54번 모선의 구성 경로에서 확인되었다. 이때 VSI의 값은 0.0401에 이르러 CTP의 말단모선이 전압붕괴에 거의 도달하였음을 평가할 수 있다. 제안된 알고리즘에 사용된 조류계산 기법을 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 조류계산 기법에서 수행하는 경우는 자코비안 행렬의 특이성으로 인하여 약 2.5배의 부하증가량에서 발산하게 된다. 이때 발산과 수렴판단은 뉴턴-랩슨 알고리즘의 수렴특성을 감안하여 반복수행의 회수가 100회를 초과하는 경우를 발산하는 것으로 간주하였다. 이때 임계전압은 0.719[p.u]이고, VSI는 0.32236을 나타내었다.

표 6 69모선 계통의 전압안정도 지수 비교  
Table 6 Comparison with voltage stability index of 69 bus system

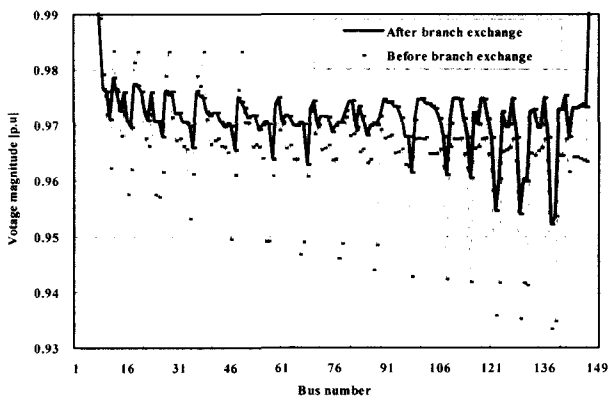
| Loading late (1 time) |                  |       |       | Loading late (3 times) |                  |       |       |
|-----------------------|------------------|-------|-------|------------------------|------------------|-------|-------|
| Power loss in kw      | Critical voltage | VSI   | JVSI  | Power loss in kw       | Critical voltage | VSI   | JVSI  |
| 225.004               | 0.909            | 0.384 | 0.188 | 4165.4                 | 0.599            | 0.011 | 0.737 |
| 138.947               | 0.925            | 0.449 | 0.160 | 1824.9                 | 0.723            | 0.309 | 0.538 |
| 128.273               | 0.925            | 0.449 | 0.153 | 1716.2                 | 0.741            | 0.322 | 0.512 |
| 123.040               | 0.926            | 0.452 | 0.147 | 1664.6                 | 0.741            | 0.322 | 0.507 |
| 100.765               | 0.941            | 0.462 | 0.121 | 1645.1                 | 0.741            | 0.322 | 0.503 |
| 100.685               | 0.941            | 0.462 | 0.121 | 1363.4                 | 0.794            | 0.362 | 0.424 |
| 100.685               | 0.941            | 0.462 | 0.121 | 1278.0                 | 0.794            | 0.363 | 0.426 |
| 100.685               | 0.941            | 0.462 | 0.121 | 1251.8                 | 0.794            | 0.362 | 0.405 |
| 99.621                | 0.943            | 0.463 | 0.119 | 1251.3                 | 0.794            | 0.362 | 0.405 |
|                       |                  |       |       | 1217.6                 | 0.794            | 0.362 | 0.407 |
|                       |                  |       |       | 1191.7                 | 0.794            | 0.362 | 0.401 |
|                       |                  |       |       | 1191.7                 | 0.794            | 0.362 | 0.401 |
|                       |                  |       |       | 1190.3                 | 0.794            | 0.362 | 0.401 |
|                       |                  |       |       | 1165.2                 | 0.800            | 0.367 | 0.393 |
|                       |                  |       |       | 1162.4                 | 0.800            | 0.367 | 0.392 |

표 6은 제안된 VSI와 기존의 지표를 비교한 것이다. 기존의 전압안정도 지수[9]는 JVSI로 표현하였다. 제안된 VSI의 평가결과는 기존의 JVSI에 비교하여 유사한 평가결과를 나타내며, VSI의 실효성을 확인할 수 있다. 더군다나 3배의 부하량 증가의 사례에서는 VSI는 0.011(임계전압 : 0.599), JVSI의 0.737(임계전압 : 0.599)의 값을 각각 나타내었다. 이는 CTP를 기반으로 하는 VSI가 국지적인 전압붕괴의 평가를 효과적으로 수행한다는 것을 확인할 수 있다.

다음 표 7은 제안된 IBE알고리즘과 기존연구의 결과를 비교한 것이다. 기존 알고리즘에 비하여 계산시간을 단축함과 아울러 계산결과의 신뢰성을 확인할 수 있다. 특히 148모선의 탐색에서는 개선된 최적상태를 탐색하였음을 확인할 수 있다.

**표 7 계통손실 최적화에 대한 결과비교**  
**Table 7 Comparison with optimization results of system power loss**

| Test systems |      | Tie branch number<br>(sending bus, receiving bus)  | Total power loss [kW] |
|--------------|------|--|-----------------------|
| 32 Bus       | [11] | 7(6,7), 9(8,9), 14(13, 14), 32(31,32), 37(24,28)   | 139.549               |
|              | Pro. | 7(6,7), 9(8,9), 14(13, 14), 32(31,32), 37(24,28)   | 139.549               |
| 69 Bus       | [13] | 15(13,14), 59(47,48), 62(50, 51), 70(10, 70), 71(12,20)  | 99.66                 |
|              | Pro. | 15(13,14), 58(47,48), 62(50, 51), 70(10, 70), 71(12,20)  | 99.62                 |
| 148 Bus      | [18] | 39(29,39), 41(30,41), 46(34,46), 56(46,56), 75(64,75), 83(72,83), 90(80,90), 95(84,95), 98(87,98), 105(94,105), 110(100,110), 112(102,112), 116(109,116), 120(113,120), 128(121,128), 133(124,133), 151(38,59), 153(47,66), 165(72,144)  | 920.447               |
|              | Pro. | 34(25,34), 39(29,39), 41(30,41), 56(46,56), 75(64,75), 83(72,83), 90(80,90), 95(84,95), 98(87,98), 110(100,110), 112(102,112), 113(104,113), 116(109,116), 128(121,128), 133(124,133), 151(38,59), 153(47,66), 159(105,113), 165(72,144) | 916.937               |



**그림 10 최적구성에 대한 전압곡선(148 모선)**  
**Fig. 10 Voltage profile of optimal configuration(148 bus)**

**6. 결 론**

본 논문에서는 방사상 배전계통의 전압안정도를 향상시키기 위하여 새로운 최적 라우팅 알고리즘 제시하였다. 제안된 알고리즘은 계통의 빈번한 구성 상태의 변경에 따른 전압안정도를 신뢰성 있는 기법으로 평가하기 위하여 임계전송경로와 임피던스 축약기법에 바탕을 두는 전압안정도 지수를 새롭게 유도하였다. 제안된 전압안정도 지수는 기존의 평가기법과 비교하여 우수한 평가특성을 확인하였으며, 대상계통의 전압안정도의 지역적인 특성을 비교적 정확하게 평가할 수 있다. 또한 전압안정도의 최대 향상을 도모할 수 있는 최적 라우팅 알고리즘은 대표적인 휴리스틱 탐색전략으로 인정되고 있는 선로교환 기법을 이용하여 지역탐색 알고리즘으로 사용함으로써 탐색시간의 효율증진과 상대적으로 신속한 계

산 성능을 확인하였다. 특히 본 논문에서 제안된 개선된 선로교환기법은 적응 유전알고리즘 기반의 전역탐색 알고리즘과 적절한 결합을 시도하여 수렴특성이 개선되었음을 확인하였다. 따라서 기존의 선로교환 기법이 보였던 지역해 수렴문제를 상당부분 개선할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 제안된 기법은 연계선로의 부하이동에 따른 손실변화량을 효과적으로 평가하기 위하여 연계선로 전력방정식을 새롭게 제안하였으며 계산결과와 신뢰성을 확인하였다. 선로교환 기법의 적용에 있어서 전력조류계산으로 인한 과도한 계산시간의 비효율성을 극복할 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘은 다양한 모의 계통에서 신뢰성을 평가함으로써 그 효율성을 확인하였다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부 대학전력연구센터 일부 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

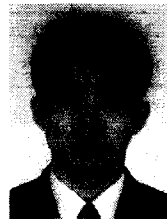
- [1] Ju, P., Zhou, X.Y., "Dynamic equivalents of distribution systems for voltage stability studies", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No.1, pp.49-53, Jan. 2001
- [2] Lind, R., Karlsson, D., "Distribution system modelling for voltage stability studies", IEEE Transactions on Power Systems, 11 No. 4, pp. 1677-1682, Nov. 1996
- [3] Lof, P. A., Andersson, G., Hill, D.J., "Voltage stability indices for stressed power systems", IEEE Trans. on Power Systems, 8 No. 1, pp. 326-335, Feb. 1993
- [4] Venkatesh, B.; Sadasivam, G.; Khan, M.A., "A new optimal reactive power scheduling method for loss minimization and voltage stability margin maximization using successive multi-objective fuzzy LP technique", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp.844-851, May, 2000
- [5] Lachs, W.R.; Sutanto, D., "Different types of voltage instability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 1126-1134, May, 1994
- [6] Pal, M.K., "Voltage stability conditions considering load characteristics", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp.243-249, Feb, 1992
- [7] F. Gubina, B. Strmcnik, "Voltage collapse proximity index determination using voltage phasors approach", IEEE Transactions on Power System, Vol. 10, No. 2, May 1995.
- [8] A. M. Chebbo, M. R. Irving, M. J. H. Sterling, "Voltage collapse proximity indicator : behaviour and implications", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No.3, pp.



241-251, May, 1992

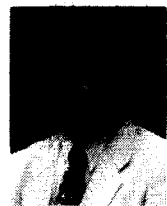
- [9] G. B. Jasmon, L. H. C. C. Lee, "Stability of loadflow techniques for distribution system voltage stability analysis", IEE Proceedings-C, Vol. 138, No.6, pp. 479-484, November, 1991
- [10] S. Civanlar, J. J. Grainger, and S. H. Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 1217-1223
- [11] Mesut E. Baran, and Felix F. Wu, "Network Reconfiguration In Distribution Systems for Loss Reduction And Load Balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [12] 김병섭, 신중린, 박종배 "개선된 선로교환 기법을 이용한 방사상 전력계통의 최적 라우팅 알고리즘의 적용", 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No. 6, pp. 302-310, 2002. 6.
- [13] Mesut E. Baran, and Felix F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on A Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 735-743, January 1989.
- [14] 김병섭, 김민수, 신중린, "적용 유전알고리즘을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적경로 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 2, pp. 58-66, 2001. 2.
- [15] 최남진, 김병섭, 신중린, "휴리스틱 탐색전략을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적 경로 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 11, pp. 566-574, 2000. 11.
- [16] 김재철, 김진오, 신중린, "AI 기법을 이용한 배전계통의 최적라우팅 기법 개발에 관한 연구", EESRI, Final report, 2000.9.
- [17] P. Kundur., "Power system stability and control", McGraw-Hill, pp. 959-1024, 1993.
- [18] 전영제, 김재철, "배전계통의 손실 최소화를 위한 개미 군집 알고리즘의 적용", 대한전기학회 논문지 Vol 50A, No. 4, pp188-196, 2001. 4.

## 저 자 소 개



### 김 병 섭 (金炳燮)

1968년 8월 18일생. 1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 건국대학교 강사  
 Tel : 02-458-4778  
 E-mail : powerkim@konkuk.ac.kr



### 신 중 린 (愼重麟)

1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.  
 Tel : 02-450-3487  
 E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr



### 박 종 배 (朴宗培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.  
 Tel : 02-450-3483  
 E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr