

# 개선된 선로교환 기법을 이용한 방사상 전력계통의 최적 라우팅 알고리즘의 적용

論 文
51A-6-8

## An Application of the Optimal Routing Algorithm for Radial Power System using Improved Branch Exchange Technique

金炳燮\* · 愼重麟\*\* · 朴宗培\*\*  
(Byung-Seop Kim · Joong-Rin Shin · Jong-Bae Park)

**Abstract** - This paper presents an application of a improved branch exchange (IBE) algorithm with a tie branch power (TBP) flow equation to solve the Optimal Routing problem for operation of a radial power system including power distribution system. The main objective of the Optimal Routing problem usually is to minimize the network real power loss and to improve the voltage profile in the network. The new BE algorithm adopts newly designed methods which are composed by decision method of maximum loss reduction and new index of loss exchange in loop network. Thus, the proposed algorithm in this paper can 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 gained.

**Key Words** : Modified branch exchange, Distribution automation system, Optimal routing, tie branch power equation

### 1. 서 론

고소비형 전력부하의 증가와 더불어, 국내외 적으로 배전 자동화(distribution automation system)시스템 구축과 더불어 방사상 전력계통의 효과적인 운용을 위한 하드웨어와 소프트웨어 에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 이러한 자동화 시스템의 구축은 무엇보다도 경쟁적 전력시장(competitive electricity market)의 운영과 밀접한 관련이 있으며, 광역운전 시스템의 구축, 최적 계통 운전, 전기품질 관리 등의 관점에서 그 중요성이 증대되고 있다. 일반적으로 방사상 계통의 자동화 시스템은 원거리 전송선로의 전력조류를 원격검침하며, 다양한 개폐기의 원격제어를 수행할 수 있기 때문에 정전 손실과 정전구간을 최소화하며, 부하 불평형과 전력손실을 개선시킴으로써 방사상 계통의 신뢰도 증진과 경제적 이점을 극대화 할 수 있다. 자동화 시스템의 상당부분을 차지하고 있는 방사상 배전계통의 원격 개폐기제어에 관한 연구는 일반적으로 전송선로의 최적라우팅(Optimal Routing) 문제로 고려될 수 있으며, 방사상 전력계통의 운용과 계획단계에서 가장 중요한 비중을 차지하고 있다[1].

일반적으로 방사상 전력계통은 부하지점과 근접해있는 특성으로 다양한 조합의 상업용 부하, 가정용 부하, 산업용 부하 등이 구성되어있으며, 일간 부하변동의 형태도 다양하게

나타난다. 이는 결과적으로 공급모선의 다양한 침투 부하를 유발하게 되므로 효율적인 최적 라우팅 알고리즘을 이용하여 과부하 선로로부터 상대적으로 경부하 상태인 선로로 부하를 이동하여야 한다. 이러한 부하이동은 전송선로의 과부하 부담을 경감시키는 이점뿐만 아니라 방사상 계통을 구성하는 각 모선의 전압 분포를 개선하여 전체 계통의 전력손실을 감소와 더불어 전압안정성을 향상시킬 수 있다[5,6].

전력손실 경감을 위한 급전선 경로선정 문제는 대표적인 조합최적화 문제(combinatorial optimization problem)의 형태이기 때문에 최근 연구동향으로는 기존의 분기 한정법(branch and bound)이나 선형계획법 기반의 이진 정수계획법(binary integer programming)등의 적용보다는 과다한 계산 시간을 배제할 수 있는 확률론적 접근 기법의 연구[2-9]가 주종을 이루고 있다. 이들은 주로 근사 최적해를 탐색하는 인공지능 기법 기반의 알고리즘과 선로교환(Branch Exchange : BE)기법 기반의 휴리스틱 알고리즘으로 분류할 수 있다. 특히 뛰어난 수렴성과 상대적으로 신속한 계산 능력을 갖는 BE 기법은 Civanlar et al[1]에 의해 최초로 연구되어진 이후 다양한 연구가 수행되어 왔다.

선로교환 알고리즘을 기반으로 하는 급전선 경로선정 문제는 방사상 계통을 구성하는 구분개폐기(sectionalizing switch)와 연계개폐기(tie switch)의 적절한 개폐상태(on/off state)를 결정하는 휴리스틱 조합문제의 형태이기 때문에 대상 계통의 빈번한 구성상태(topology)의 변경에 따른 전력 조류계산의 반복수행이 필연적으로 수반된다. 하지만 실용적인 측면에서 소규모 계통일지라도 조합 가능한 개폐동작에 대하여 전력조류계산을 모두 수행하는 것은 계산적인 측면에서 비효율적일 뿐만 아니라 실시간 경로선정 전략을 구현하기에 부적당하다. 그러므로 이러한 비효율성을 극복하기 위해서

\* 正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 博士課程  
\*\* 正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 教授 · 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 4月 3日

최근에 Baran et al[5]은 선로교환 기법에 대하여 조류계산의 반복수행을 배제할 수 있는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 대표적인 휴리스틱 탐색전략으로 인정되고 있는 선로교환 기법을 OR문제의 지역탐색 알고리즘으로 사용하여 탐색시간의 효율과 실시간 적용에 가능성을 모색하고자 하였다. 특히 본 논문에서 제안된 개선된 선로교환기법(Improved Branch Exchange : IBE)은 방사상 계통 구성의 초기치 선정문제를 극복하기 위하여 선행 연구되었던 전역탐색 알고리즘[10]과 적절한 결합을 시도하였다. 따라서 기존의 연구문헌[5]의 선로교환 기법이 보였던 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 알고리즘은 신뢰성 검토를 위하여 IEEE 32, 69 모선에 적용하였으며, 실제시스템의 적용가능성을 모색하기 위하여 KEPCO 148 모선 계통에 적용하여 알고리즘의 효율성을 검증하였다.

2. 조류계산과 손실방정식

방사상 계통의 상태해석을 위한 조류계산 알고리즘은 대상 계통의 운전상황에 따른 빈번한 계통구성의 경우에도 효과적으로 적용할 수 있어야 하며, 반복계산을 통하여 계통의 상태값을 도출하기 때문에 과도한 계산시간을 배제할 수 있는 기법이 요구된다. 본 논문에 적용된 방사상 조류계산을 위한 Distflow 조류계산 알고리즘[6]은 과도한 계산시간의 문제를 극복할 수 있으며, 비교적 우수한 계산결과를 얻을 수 있다. 방사상 전력계통의 선로 조류 방정식(branch flow equation)은 다음과 같은 단일선로 형태의 방사상 전력계통도에서 유도된다.

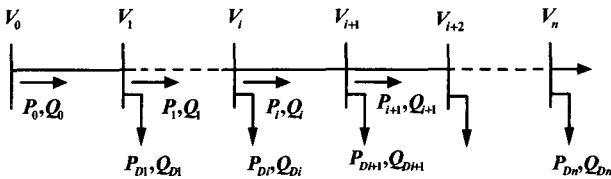


그림 1 방사상 전력계통의 단일선로 계통도  
Fig. 1 One line diagram of a radial network

그림에서  $V_0$ 는 공급모선(suppling bus)의 전압의 크기를 나타내며, 단일선로 계통도에서 공급모선은 1기의 발전기이거나, 변전소의 변압기로 간주할 수 있기 때문에, 일반적으로 상수로 가정할 수 있다. 또한 선로는  $r+jx$  형태의 정 임피던스로 모델링 하였으며, 부하는 각 모선에 집중되어진 정전력 부하(constant power load)로 표현하였다. 그림과 같은 방사상 전력계통에서 임의의 (i+1) 모선에서 유출되는 전력조류 페이지와 전압 페이지 방정식은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_{i+1} &= \bar{S}_i - \bar{S}_{Li} - \bar{S}_{Di+1} = \bar{S}_i - \bar{Z}_i \frac{|S_i|^2}{V_i^2} - \bar{S}_{Di+1} \\ \bar{V}_{i+1} &= \bar{V}_i - \bar{Z}_i \bar{I}_i = \bar{V}_i - \bar{Z}_i \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{V}_i} \end{aligned} \quad (1)$$

상기 식을 (i+1) 모선에서 유출되는 정전력 조류로 간주하여 전개하면 다음과 같이 유효전력, 무효전력, 전압에 관한 3n 개의 선로 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Di+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Di+1} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \end{aligned} \quad (2)$$

방사상 전력계통의 조류계산을 통하여 계통의 모든 상태값이 결정되면 전력평형 방정식에 의하여 계통 전체의 전력 손실이 결정되며, 이는 선로의 유효·무효전력조류와 임피던스에 의하여 계산된다. 임피던스에 의하여 방사상 전력계통 전체에서 발생하는 유효전력손실은 다음과 같다.

$$P_L = \sum_{i=0}^{n-1} P_{Li} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{r_i (P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \quad (3)$$

3. 문제의 정식화

본 논문에서는 최적라우팅 문제를 선로교환기법 기반의 알고리즘에 효과적으로 적용하기 위하여 다음과 같은 목적함수와 제약조건을 갖는 최적화 문제로 정식화하였다.

$$\min P_L(Y) \quad (4)$$

s.t.

$$\begin{aligned} G_E(Y) &= 0, G_R(Y) = 0, \\ S_{i,i+1} - S_{i,i+1}^{\max} &\leq 0, \quad i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

여기서,

- $G_R = \{ h_1(y) + h_2(y) + h_3(y) \mid y \in Y \}$
- $Y = \{ \Delta LP(x), \Delta LP_{loop}(x), \Delta IOL_{t,con}(x) \mid x \in X \}$
- $P_L(\cdot)$ : 계통의 유효전력 손실 방정식
- $G_E(\cdot)$ : 전력평형 방정식에 대한 등호제약 조건
- $G_R(\cdot)$ : 방사상 계통 구성에 대한 등호제약 조건
- $\Delta LP(\cdot)$ : 표준 선로교환에 따른 손실증감의 평가 방정식
- $\Delta LP_{loop}(\cdot)$ : 최대손실 감소 루프계통 평가 방정식
- $\Delta IOL_{t,con}(\cdot)$ : 연계선로와 인접선로의 선로교환에 따른 손실지표 평가 방정식
- $X = [P, Q, V]^T$ : 계통 운영에 관한 변수벡터
- $S_{i,i+1}$ : 연계모선 (i, i+1)에서 사이의 선로 조류 페이지

$S_{i,i+1}^{max}$  : 연계모선 (i, i+1)에서 허용 가능한 선로 조류 페이저  
 $P, Q$  : 임의 모선에서 유출되는 유효·무효 전력 조류  
 $V$  : 임의 모선의 전압 페이저

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

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

그리고,  $N$ 은 공급모선을 제외한 부하모선 집합이고,  $TN$ 은 공급모선을 포함하는 전체 모선의 집합이다. 또한  $B_i$ 는  $\sum n_{ij} \neq 0$  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,  $p=path(i, j)$  은 연계모선 (i, i+1)에서 급전선 개폐기가 폐로 되어있는 상태에서 모선 (i) 와 모선 (j) 에 동시에 연계되어 있는 임의의 모선 집합을 의미한다.

#### 4. 개선된 선로교환 기법

본 논문에서는 Civanlar et al[1]에 의하여 최초로 연구된 선로교환 기법과 Baran et al[6]등의 선로교환 기법을 기반으로 개선된 선로교환 기법을 제안하였다. 선로교환 기법에서는 개폐 동작에 참여하는 대상 계통의 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.

##### 4.1 선로교환에 따른 손실변화식

수정된 선로교환 기법을 기존의 손실변화식[5]에서 유도하기 위하여 다음과 같은 간단한 루프계통을 예시하였다.

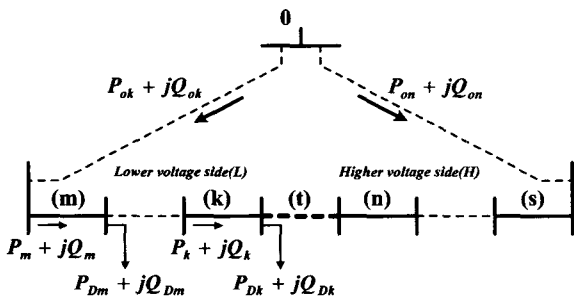


그림 2 연계선로 t에 관한 단일 루프계통

Fig. 2 The loop network associated with tie line t

그림은 방사상 배전계통 전체에서 일부분의 계통을 도시한 것이다. 그림과 같은 형태의 방사상 계통은 연계개폐기를 기준으로 루프계통(loop network)을 형성하게 되며 이러한 다수의 루프계통은 방사상 배전계통 전체를 구성하게 된다. 연계개폐기가 있는 선로를 연계선로(tie-line)라고 하며, 임의의 연계선로가 연결될 때 하나의 루프계통이 형성되므로 루프계

통의 개수는 연계선로의 개수와 동일하게 된다.

방사상 계통이 그림 2와 같이 연계선로 t에 의해서 루프를 형성한다고 할 때, 연계 개폐기에서 전압강하가 큰 쪽을 저전압측(L-side), 전압강하가 낮은 쪽을 고전압측(H-side)이라 하면 루프는 연계선로 t에서 0 노드까지의 저전압부와 연계선로 t에서 0 노드까지의 고전압부의 두 부분으로 구분된다. 본 논문에서는 선로 t와 m 사이의 선로 교환에 따른 손실변화 가능성을 추정하기 위하여 1차 적으로 손실감소 추정식을 도입하였다. 도입된 손실변화 추정식은 다음과 같은 간략한 형태로 표현할 수 있다.

$$\Delta LP_{tm} = 2AP_m + 2BQ_m - C(P_m^2 + Q_m^2) \quad (5)$$

$$(A = \sum r_L P_L - \sum r_H P_H, B = \sum r_L Q_L - \sum r_H Q_H, C = r_{loop})$$

여기서,

$\Delta LP_{tm}$  : 선로 t와 m의 선로교환에 의한 전력손실의 변화량

$P_m$  : 선로교환 이전의 m선로의 유효전력조류

$Q_m$  : 선로교환 이전의 m선로의 무효전력조류

$r_L P_L = \sum_{i \in L} r_i P_i$  : 루프계통의 L측에서의 r과 P의 곱

$r_H P_H = \sum_{i \in H} r_i P_i$  : 루프계통의 R측에서의 r과 P의 곱

$r_{loop} = \sum_{i \in (L \cup H)} r_i$  : 루프계통의 총 저항

#### 4.2 최대 손실감소 루프계통의 선정과 표준선로의 개념

기존의 BE 기법에서 최적해 탐색기법의 최대 쟁점은 모든 선로 교환을 고려하지 않으면서 효과적인 탐색 능력을 부여하는 것이다. 이것은 빈번한 선로교환에 따른 조류계산이 과다한 계산시간을 필요로 하며, 실제적인 적용에 있어서 너무나 소모적이기 때문이다. 이러한 전략을 위하여 Baran[5] 등은 모든 루프계통 각각에 대해서 독립적으로 선로 교환을 수행하였다. 각각의 루프계통에서 독립적으로 수행된 선로 교환의 결과들 중 최대의 손실 감소를 갖는 선로 교환을 그 단계에서의 최적의 선로 교환으로 선택하여 새로운 계통을 구성한 후, 새로이 구성된 구조에서 또 다시 개선된 해를 찾아가는 방법을 사용하였다. 이처럼 단계적인 손실감소를 통한 탐색의 진행은 단계마다 각각의 루프계통에서의 모든 선로 교환을 고려해야 하기 때문에 계산의 양이 증가되어 비효율적이다. 이러한 비효율성을 극복하기 위해 본 논문에서는 최대 손실감소루프계통 결정기법(decision method of maximum loss reduction in loop network)을 사용하였다. 최대손실 감소식의 유도과정은 선행연구[11]에 상세하게 설명되어있다. 제안된 최대 손실 감소식을 이용하면, 임의의 루프계통에서  $\Delta LP_{tm}$ 의 최대값은 다음처럼 결정할 수 있다.

$$\Delta LP_{tm loop} = [(\sum r_L P_L - \sum r_H P_H)^2 + (\sum r_L Q_L - \sum r_H Q_H)^2] / r_{loop} \quad (6)$$

앞서 유도된  $\Delta LP_{tm loop}$ 는 특정 루프계통에 대한 값으로  $P_m, Q_m$ 과 독립적이기 때문에 손실의 증감과 상관없이 항상 양의 값을 갖게된다. 즉,  $\Delta LP_{tm loop}$ 의 크기는 특정 루프계통의 구성 특성에 따라 결정되는 고유값에 해당되며 선로교환

에 의한 가변손실의 최대값에 대한 정보를 주는 지표로 사용할 수 있다. 그러므로 현재 결정된 최대 손실 변화량을 갖는 루프계통 중에서 실제적으로 손실감소를 나타낼 수 있는 루프계통을 선정해야 한다. 본 논문에서는 특정 루프계통에서 선로교환에 따른 손실의 증감 여부를 판단하기 위하여 선행 연구[11]에서 제안되었던 표준선로의 개념을 도입하였다. 표준선로의 개념은 IBE 기법의 탐색과정에서 전체 계산시간을 확률론적 측면에서 단축할 수 있는 방법으로 도입되었다.

**4.3 선로교환에 의한 연계선로의 전력조류 추정**

임의의 루프계통의 선로교환에 따라 부하가 증가되는 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. 다음 그림은 연계선로의 선로교환 이전과 이후의 상태 변화에 따른 전력조류의 변동을 예시한 것이다.

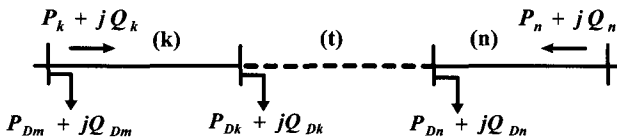


그림 3 선로교환 이전의 연계선로의 전력조류  
Fig. 3 Tie branch power flow before branch exchange

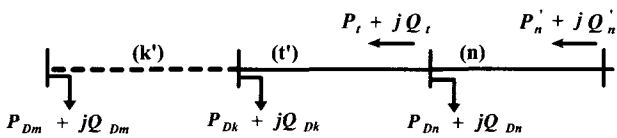


그림 4 선로교환 이후의 연계선로의 전력조류  
Fig. 4 Tie branch power flow after branch exchange

그림은 3,4는 선로교환 이후 루프계통의 상태변화로 새로운 연계선로 k 와 인접 선로 t 가 형성되는 과정을 나타낸 것이며, 부하이동에 따라 R 측에서는 새로운 선로조류  $P_t + jQ_t$  와 변화된 선로조류  $P_n' + jQ_n'$  등의 전력조류의 변화가 나타나게 된다. 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.

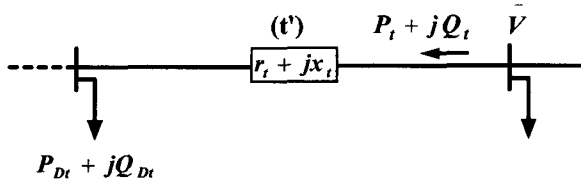


그림 5 연계선로 t와 연계된 2모선계통도  
Fig. 5 Two bus diagram connected with tie branch t

그림 5는 TBP 방정식을 유도하기 위하여 임의의 연계선로의 상태변화에 따른 전력조류를 표현한 것이며, 그에 따른 전력평형 방정식을 나타낸 것이다.

$$P_t + jQ_t = \bar{Z}_t \frac{|P_t + jQ_t|^2}{V^2} + P_{Dt} + jQ_{Dt} \quad (7)$$

제시된 2모선 계통도에서는 선로교환 이후 L측으로 이동되는 말단 부하를 기준으로 표현하였다. 선로교환 이후 루프계통에서 이동되는 부하를  $P_{Dt} + jQ_{Dt}$  로 표현하고, 선로교환 과정에서 투입되는 연계선로의 선로저항을  $r_t + jx_t$  로 표현하였다. 연계선로의 전력평형 방정식으로부터 전력조류의 실수부분과 허수부분을 결합하고, 전압 관계항  $(P_t^2 + Q_t^2)/V^2$  를 소거하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$x_t(P_t - P_{Dt}) = r_t(Q_t - Q_{Dt}) \quad (8)$$

상기 관계식을  $P_t, Q_t$ 에 관하여 정리하고, 전력평형 방정식에 대입하면 다음과 같은 방정식을 유도할 수 있으며, 그에 따른 유효전력 조류와 무효전력 조류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (r_t^2 + x_t^2)P_t^2 - (2x_t^2P_{Dt} - 2r_tx_tQ_{Dt} + V^2r_t)P_t \\ + (x_t^2P_{Dt}^2 + r_t^2Q_{Dt}^2 - 2r_tx_tP_{Dt}Q_{Dt} + V^2r_tP_{Dt}) &= 0 \\ (r_t^2 + x_t^2)Q_t^2 - (2r_t^2Q_{Dt} - 2r_tx_tP_{Dt} + V^2x_t)Q_t \\ + (x_t^2P_{Dt}^2 + r_t^2Q_{Dt}^2 - 2r_tx_tP_{Dt}Q_{Dt} + V^2x_tQ_{Dt}) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_t &= \frac{K_p - \sqrt{K_p^2 - 4K_z(x_tP_{Dt} - r_tQ_{Dt})^2 - 4K_zV^2r_tP_{Dt}}}{2K_z} \\ &= P(r_t, x_t, P_{Dt}, Q_{Dt}, V^2) \\ Q_t &= \frac{K_q - \sqrt{K_q^2 - 4K_z(x_tP_{Dt} - r_tQ_{Dt})^2 - 4K_zV^2x_tQ_{Dt}}}{2K_z} \\ &= Q(r_t, x_t, P_{Dt}, Q_{Dt}, V^2) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_p &= 2x_t^2P_{Dt} - 2r_tx_tQ_{Dt} + V^2r_t, \\ K_q &= 2r_t^2Q_{Dt} - 2r_tx_tP_{Dt} + V^2x_t, \quad K_z = r_t^2 + x_t^2 \end{aligned}$$

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 TBP 방정식은 근사 전압 페이저를 적용하기 때문에 실제 연계선로의 전력조류와 비교적 근소한 편차만을 나타내는 연계선로의 전력조류 방정식으로 사용될 수 있으며, 조류계산의 과다한 계산 수행시간을 배제할 수 있다. 추정된 연계선로의 전력 방정식을 근사 전압 페이저를 이용하여 표현하면 다음과 같은 간략한 형태의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{P}_t &= P(r_t, x_t, P_{Dt}, Q_{Dt}, \hat{V}^2) \\ \hat{Q}_t &= Q(r_t, x_t, P_{Dt}, Q_{Dt}, \hat{V}^2) \end{aligned} \quad (11)$$

**4.4 새로운 손실지표를 이용한 최적 선로교환 선로의 결정**

본 논문에서는 최대의 손실감소 확률이 높은 루프계통을 선정한 후에, 해당 루프계통 내에서 최대 손실감소의 선로교환 후보를 결정하기 위하여 새로운 손실지표(ΔIOL)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[5]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. 제안된 손실지표를 이용하여 임의 루프계통 k에서 선로 t와 선로 (t,con)의 선로교환에 따른 전력손실의 변화량(ΔIOL<sup>k</sup><sub>t,con</sub>)은 다음과 같은 형태로 유도된다. 상세한 유도 과정은 부록에 설명하였다.

$$\Delta IOL_{t,con}^k = \Delta P_{loss}(S) + \Delta Q_{loss}(T) \quad (12)$$

단,  $\begin{cases} S = [r_t^k, P_i^k, \hat{P}_t^k, P_{t,con}^k, P_{Dt}^k]^T \\ T = [r_t^k, Q_i^k, \hat{Q}_t^k, Q_{t,con}^k, Q_{Dt}^k]^T \end{cases}$

여기서,

- (·)<sup>k</sup> : k 번째 루프계통의 전력조류에 관한 물리량
- (·)<sub>t,con</sub> : 선로교환 이전에 연계선로와 직접 연결되어 있는 인접선로의 번호
- ΔP<sub>loss</sub> : 유효분 손실의 변화량 방정식
- ΔQ<sub>loss</sub> : 무효분 손실의 변화량 방정식
- P<sub>i</sub> : 선로교환 이전에 선로 i의 유효전력 조류
- Q<sub>i</sub> : 선로교환 이전에 선로 i의 무효전력 조류
- P<sub>t,con</sub> : 선로교환 이전에 선로 (t, con)의 유효전력 조류
- Q<sub>t,con</sub> : 선로교환 이전에 선로 (t, con)의 무효전력 조류

**4.5 제안된 알고리즘의 진행절차**

본 논문에서 제안된 최종 알고리즘의 수행절차는 다음과 같다. 또한 반복수행 과정에서 상태변수를 갱신하기 위하여 사용된 조류계산기법[6]은 계산결과의 신뢰성을 제시하기 위하여 사례연구에서는 기존의 뉴턴-랩슨(Newton - Raphson) 조류계산기법과 비교하였다.

- Step 1** : AGA 기법에 의하여 초기 방사상 전력계통 구성
- Step 2** : 전력조류계산 수행
- Step 3** : 각 루프계통의 표준손실 계산

**Step 4** : 양의 표준손실의 유무 점검하여 Step 5 로 진행  
**Step 5** : 결정된 최대 손실감소 루프계통에서 손실 지표(ΔIOL) 모듈 수행

- a. 현재 연계선로 (t)와 인접선로 (t, con)의 선로교환을 수행
- b. 연계선로에서 TBP 방정식을 다음과 같이 계산
- c. 현재의 선로교환에 따른 ΔP<sub>loss</sub>(S), ΔQ<sub>loss</sub>(T) 계산
- d. 현재 선로의 교환에 대한 ΔIOL 계산
- e. 현재 루프계통의 모든 선로가 고려되었으면 Step 6 으로 진행하고 그렇지 않으면 Step a 로 진행

**Step 6** : 제약조건을 만족하는 최적의 ΔIOL 을 ΔIOL\* 으로 선정하고 선로교환을 수행

**Step 7** : 전력조류계산으로 상태벡터를 갱신하고, 다음 Step 으로 진행

**Step 8** : 전력손실 평가지수 P<sub>L</sub>(Y)를 평가하고, 개선되었으면 단계 3으로 진행하고, 그렇지 않으면 다음 Step 으로 진행

**Step 9** : 모든 루프계통이 고려되었으면 종료하고, 그렇지 않으면 차 순위 루프계통을 최적 루프계통으로 선정하고 Step 5 로 진행

**5. 사례연구**

제안한 알고리즘은 IEEE 32, 69모선[5,6]의 배전계통 예제 모델과 KEPCO 148모선[12]에 적용하여 그 효용성을 확인하였다. 제안한 알고리즘의 수행은 Pentium 400MHz PC에 의해 수행되었다. 예제모델의 초기구성에 대한 요약은 표 1에 나타내었다.

표 2 시험계통의 요약

Table 2 Summary of test systems

Test systems	Num. of buses	Num. of branches	Num. of loop	Power demand
32 Bus	33	37	5	3715 [kW] 2300 [kVar]
69 Bus	70	74	5	3802.19 [kW] 2694.60[kVar]
148 Bus	149	167	19	44.2928 [MW] 21.5107[MVar]

표 2와 그림 7은 제안된 TBP 방정식의 타당성을 검토하기 위하여 제시된 결과이다. 표에서 case 1은 전력 조류계산에 의해 수립된 선로의 전력조류의 크기를 나타내며 비교를 위한 기준 값이 된다. Case 2는 제안된 TBP 방정식에 의하여 선로의 전력조류를 계산한 결과이다. 이때 전압은 부하이동 이후 전력조류 계산을 수행하여 계산된 값을 사용하였다. Case 2의 오차율(error rate)는 case 1의 선로 전력조류의 크기와 비교한 것으로서 전력조류계산에 의한 선로조류와 TBP 방정식으로 계산된 선로조류가 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 TBP 방정식의 신뢰성을 확인할 수 있는 결과이다. 표에서 case 3는 IBE 알고리즘의 진행과정에서 전압을 추정하여 TBP 방정식을 적용한 경우이다. 부하이동에 따른 모선전압의 크기가 0.9[p.u] 근방까지는 비교적 근소한 오차율이 보이게 된다는 것을 확인할 수 있으며, 과부하 이동에 따른 저전압의 0.7[p.u] 근방에서도 1.5[%] 미만의 오차율

을 보이고 있다. 이러한 오차율은 조류계산의 수행을 반복하지 않는다는 계산상의 이점을 감안한다면 추정된 TBP 방정식의 효용성을 확인할 수 있는 결과이다. 마지막으로 case 4의 경우는 TBP 방정식에서 전압 페이지의 크기를 무시하고 계산된 결과이다. 오차율을 비교하여 보면 동일한 부하이동의 상황에서 case 3에 비하여 높게 나타나며, 반복 계산과정에서 계산량의 오차로 인하여 왜곡된 결과를 도출할 수 있음을 확인할 수 있다.

표 3 연계선로 전력방정식의 타당성 검토

Table 3 Examination for the appropriateness of the TBP equation

Branch power flow by Load flow solution (case 1)				
Power demand loading		Branch power flow		
Real [kW]	Reactive [kVar]	Voltage [P.U]	Real [kW]	Reactive [kVar]
280.700	228.570	0.992	281.958	229.661
1400.700	1140.570	0.957	1435.803	1170.993
2800.700	2280.570	0.907	2967.961	2425.529
4200.700	3420.570	0.845	4680.618	3836.499
5880.700	4788.570	0.721	7659.434	6330.139
TBP eq. with voltage considered (case 2)				
Voltage [P.U]	Real [kW]	Error rate (%)	Reactive [kW]	Error rate (%)
0.992	281.958	0.000	229.661	0.000
0.957	1435.803	0.000	1170.993	0.000
0.907	2967.961	0.000	2425.530	0.000
0.845	4680.618	0.000	3836.499	0.000
0.721	7659.433	0.000	6330.119	0.000
TBP eq. with voltage estimated (case 3)				
Voltage	Real	Error rate	Reactive	Error rate
0.992	281.958	0.000	229.661	0.000
0.966	1433.246	0.178	1168.776	0.189
0.917	2963.591	0.147	2421.742	0.156
0.859	4661.584	0.407	3820.003	0.430
0.733	7551.397	1.411	6236.507	1.479
TBP eq. with voltage neglected (case 4)				
Voltage	Real	Error rate	Reactive	Error rate
1.000	281.937	0.007	229.642	0.008
1.000	1432.684	0.217	1168.289	0.231
1.000	2935.100	1.107	2397.050	1.174
1.000	4519.815	3.436	3697.136	3.633
1.000	6552.484	14.452	5370.782	15.155

표 3과 4는 제안된 알고리즘과 기존의 기법[5]을 비교하기 위하여 동일한 시스템 조건에서 100회를 실시하여 평균값을 기록한 것이다. 특히 기존의 선로교환 기법은 초기 계통구성 상태를 임의로 선정하는 방법으로 수행하였으며, 제안된 방법은 적응유전알고리즘(Adaptive Genetic Algorithm : AGA) 기법 기반[10]의 전역탐색 알고리즘으로 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.

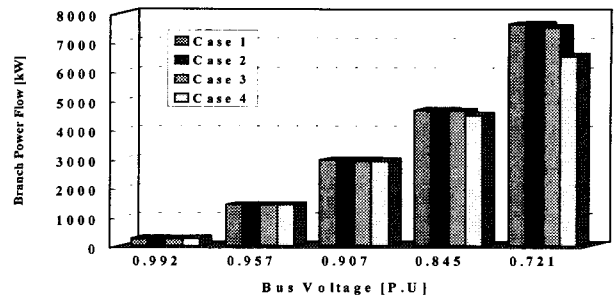


그림 6 조류계산과 TBP 방정식에 대한 유효전력조류

Fig. 6 Real power flow of load flow solution and TBP eq.

표 4 최적해에 대한 수렴확률의 비교

Table 4 Comparison with convergence probabilities of optimal solution

Optimization method	32 bus	69 bus	148 bus
BE method[5] with initial random network by random function	91.32[%]	87.23[%]	75.09[%]
Proposed IBE method with AGA	100 [%]	99.51[%]	90.52[%]

표 5 선로교환 기법의 평균 계산시간 비교

Table 5 Comparison with average computation time of branch exchange

Test systems	Iteration number	Number of load flow solution	Computation time in sec	
32 Bus	Con.	5	26	6.006
	Proposed	8	9	2.311
69 Bus	Con.	5	26	8.611
	Proposed	9	10	3.681
148 Bus	Con.	16	457	448.71
	Proposed	29	30	36.825

표 6 69모선의 선로교환의 결과

Table 6 BE result of 69 bus system

Iteration n	Branch - exchange			Critical Voltage in p.u	Power loss in kw
	Selected loop	close	open		
1	-	-	-	0.9092	225.0038
2	2	73	53	0.9245	138.9474
3	4	72	14	0.9245	128.2733
4	2	53	59	0.9263	123.0399
5	3	74	64	0.9414	100.7649
6	4	14	15	0.9414	100.6846
7	3	64	63	0.9414	100.6846
8	2	59	58	0.9414	100.6846
9	3	63	62	0.9428	99.6208
Initial tie branch sets obtained from AGA				70, 71, 72, 73, 74	
Final tie branch sets after branch exchange				15, 18, 62, 70, 71	

표 5는 IBE 수행과정을 확인하기 위하여 69모선의 BE 수행 결과를 정리한 것이며, 그림 7은 148모선의 BE결과를 도시한 것이다. 표에서 선택된 루프계통은 최대손실감소루프 결정기법으로 탐색된 결과이고, 선로교환의 순차적인 진행에 따라 연계개폐기와 구간개폐기의 on/off를 효과적으로 진행하였다. 표에서 임계전압(critical voltage)은 선로교환의 진행으로

구성된 임의의 계통구조에서 가장 저전압을 나타내는 모선의 전압 페이저의 크기를 의미하며 BE 진행과 더불어 임계전압은 0.9092[p.u](54모선)에서 0.9428[p.u](50모선)로 향상되었으며, 전력손실은 55.72[%] 감소하였다. 특히 그림 7은 대규모 계통에 대한 제안된 알고리즘의 적용결과를 나타낸 것이며, 선로교환과 더불어 임계전압은 0.8833[p.u](138모선)에서 0.9522[p.u](138모선)으로 상승하였으며, 계통손실은 2363.125[kW]에서 916.937[kW]로 61.198[%]의 감소가 이루어 졌다. 그림에서는 임계전압을 전력손실의 크기영역에 도사하기 위하여 임계전압을 전력손실의 크기 영역으로 적당하게 사상한 것이며, 손실변화에 따른 임계전압의 변화추이를 확인할 수 있다.

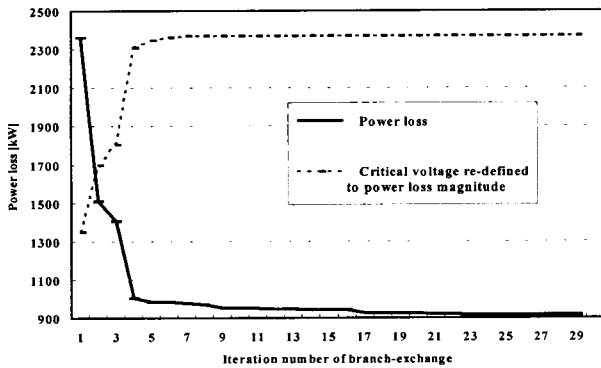


그림 7 선로교환에 따른 전력손실과 임계전압 곡선(148 모선)  
Fig. 7 Power loss and critical voltage followed by BE(148 bus)

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

Test systems		Tie branch number (sending bus, receiving bus)	Total loss
32 Bus	Con.[5]	7(6,7), 9(8,9), 14(13, 14), 32(31,32), 37(24,28)	139.549
	Proposed	7(6,7), 9(8,9), 14(13, 14), 32(31,32), 37(24,28)	139.549
69 Bus	Con.[6]	15(13,14), 59(47,48), 62(50, 51), 70(10, 70), 71(12,20)	99.66
	Proposed	15(13,14), 58(46,47), 62(50, 51), 70(10, 70), 71(12,20)	99.62
148 Bus	Con.[7]	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
	Proposed	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

표 6은 제안된 알고리즘과 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 8은 32모선에서 수행된 Distflow 조류계산 기법과 뉴턴-랩슨(Newton-Rapshon)조류계산 기법의 결과를 비교한 것이

며, 본 논문에서 제시된 수치적 결과의 신뢰성을 검토하기 위하여 제시하였다.

표 8 32모선에 대한 전력조류계산 기법 비교  
Table 8 Comparison with power flow methods of 32 bus system

Power flow solution by Distflow		Power flow solution by N/R method	
Bus no.	Bus voltage	Bus voltage	Angle (Deg.)
33	1.000	1.000	0.000
1	0.997	0.997	0.014
2	0.983	0.983	0.096
3	0.975	0.975	0.162
4	0.968	0.968	0.228
5	0.950	0.950	0.134
6	0.946	0.946	-0.096
7	0.941	0.941	-0.06
8	0.935	0.935	-0.133
9	0.929	0.929	-0.196
10	0.928	0.928	-0.189
11	0.927	0.927	-0.177
12	0.921	0.921	-0.269
13	0.919	0.919	-0.347
14	0.917	0.917	-0.385
15	0.916	0.916	-0.408
16	0.914	0.914	-0.485
17	0.913	0.913	-0.495
18	0.997	0.997	0.004
19	0.993	0.993	-0.063
20	0.992	0.992	-0.083
21	0.992	0.992	-0.103
22	0.979	0.979	0.065
23	0.973	0.973	-0.024
24	0.969	0.969	-0.067
25	0.948	0.948	0.173
26	0.945	0.945	0.229
27	0.934	0.934	0.312
28	0.926	0.926	0.390
29	0.922	0.922	0.496
30	0.918	0.918	0.411
31	0.917	0.917	0.388
32	0.917	0.917	0.380
$\sum P_D$ [kW]	3715.000	3715.000	
$\sum Q_D$ [kVar]	2300.000	2300.000	
$\sum P_L$ [kW]	202.676	202.677	
$\sum Q_L$ [kVar]	135.140	135.139	

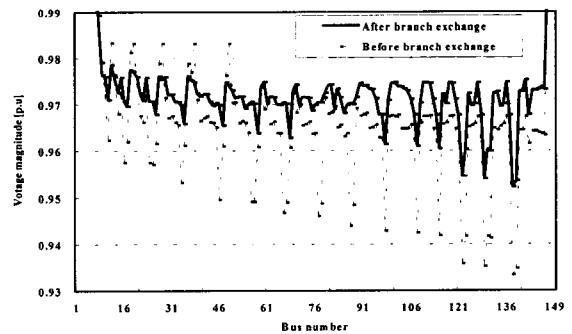


그림 8 최적구성에 대한 전압곡선(148 모선)  
Fig. 8 Voltage profile of optimal configuration(148 bus)

그림 8와 9의 그래프는 69, 148 모선의 전압 프로파일을 나타낸 것으로 전력손실의 감소에 따라 모선전압의 현저한 상승을 확인할 수 있으며, 제안된 IBE 알고리즘이 계통의 전압안정성 향상에 기여함을 확인할 수 있다.

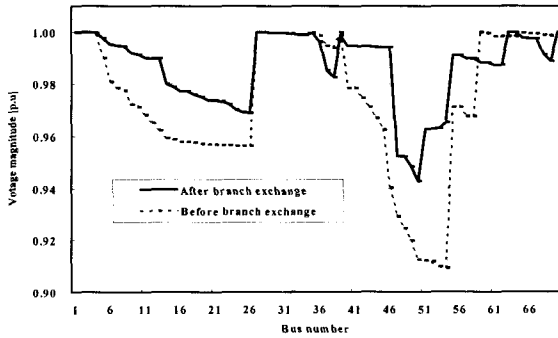


그림 9 최적구성에 대한 전압곡선(69모선)  
Fig. 9 Voltage profile of optimal configuration (69 bus)

### 6. 결 론

본 논문에서는 방사상 전력계통의 최적 경로선정 알고리즘을 개발하기 위하여 연계선로의 전력조류 방정식과 손실변화지표를 기반으로 하는 개선된 선로교환 기법을 적용하였다. 개선된 선로교환 알고리즘에 적용된 연계선로 전력방정식은 부하이동에 따른 전력조류의 변화량을 전력조류계산의 반복적인 계산을 배제하며, 비교적 정밀하게 추정할 수 있기 때문에 기존의 선로교환 알고리즘에서 보였던 과도한 계산시간의 문제를 극복할 수 있으며 최적해 수렴 확률을 향상시켰다. 특히 선로교환 과정에서 루프계통의 손실 변화량을 추정하기 위하여 제안된 새로운 손실지표는 조류계산을 반복 수행하지 않으며, 연계선로의 저 전압 측과 고 전압 측 양측을 손실 변화를 모두 추정할 수 있는 방법으로 기존의 근사 손실변화량 계산식에 비하여 손실변화량에 대한 정밀한 추정이 가능하다. 또한 적응 유전알고리즘기반의 전역탐색 알고리즘과 개선된 선로교환 기법을 적절히 혼용하는 하이브리드 형태의 최적 라우팅 알고리즘을 이용하여 최적해 탐색 확률을 증진하였다. 제안된 기법은 신뢰성 검증과 실계통 적용가능성을 모색하기 위하여 IEEE 32, 69모선계통에 적용하였으며, KEPCO 148모선 계통에 적용하여 대규모 계통의 적용 가능성을 검토하였다.

### 참 고 문 헌

[1] 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  
[2] Chihiro Fukui, and Junzo Kawakami, "Application of Hopfield-type Neural Network to Switch Planning Problem of Power Distribution System", IEE Japan, Vol. 111-D, No. 1, pp. 10-19, 1991.

[3] Ignacio J. Ramirez-Rosado, and Jose L. Bernal-Agustin, "Optimization of Power Distribution Network Design by Application of Genetic Algorithms ", International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 104-110. 1995.  
[4] K. Nara, et. al, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Re-configuration", IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, No. 3, August 1992.  
[5] 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.  
[6] 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.  
[7] 전영제, 김재철, "배전계통의 손실 최소화를 위한 개미 군집 알고리즘의 적용", 대한전기학회 논문지 Vol 50A, No. 4, pp188-196, 2001. 4.  
[8] M. Srinivas, and L. M. Patnaik, "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 24, No. 4, pp. 656-667, April 1994.  
[9] Whei-Min Lin, and Hong-Chan Chin, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp.870-875, July 1998.  
[10] 김병섭, 김민수, 신중린, "적응 유전알고리즘을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적경로 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 2, pp. 58-66, 2001. 2.  
[11] 최남진, 김병섭, 신중린, "휴리스틱 탐색전략을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적 경로 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 11, pp. 566-574, 2000. 11.  
[12] 김재철, 김진오, 신중린, " AI 기법을 이용한 배전계통의 최적라우팅 기법 개발에 관한 연구", EESRI, Final report, 2000.9.

### 부 록

#### A. 손실지표의 유도

임의 선로의 유효전력 손실 방정식은 다음과 같이 유효전력조류에 의한 유효전력 손실항(real power loss by real power flow)과 무효전력 조류에 의한 유효전력 손실항(real power loss by reactive power flow)의 선형조합의 형태로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 수식 전개 편의상 유효전력조류에 의한 유효전력 손실항을 유효분 손실(real part loss) 이라 하고, 무효전력조류에 의한 유효전력 손실항을 무효분 손실(reactive part loss)이라고 표현하였다.



$$\hat{P}_L = \sum_{i \in L} r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (a.1)$$

유효분 손실과 무효분 손실의 변화량을 기반으로 선로교환에 따른 손실지표를 다음과 같은 형태로 일반화 할 수 있다. 일반화 과정은 선행연구[11]에서 수정된 부분을 위주로 간략한 형태로 설명하였다. 부하량이 감소하는 L측과 부하량이 증가하는 R측 임의의 선로 i 에 대하여 선로교환 이후 변화되는 유효분 손실의 변화량 ( $\Delta P_{i, loss}$ )과 무효분 손실 ( $\Delta Q_{i, loss}$ )의 변화량은 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta P_{i, loss} = P_{i, loss} \times \left\{ \frac{(P_i - P_{t, con})^2}{P_i^2} - 1 \right\} \quad (i \in L) \quad (a.2)$$

$$\Delta P_{i, loss} = P_{i, loss} \times \left\{ \frac{(P_i + P_{Dt} + r_t \hat{P}_t)^2}{P_i^2} - 1 \right\} \quad (i \in R)$$

$$\Delta Q_{i, loss} = Q_{i, loss} \times \left\{ \frac{(Q_i - Q_{t, con})^2}{Q_i^2} - 1 \right\} \quad (i \in L) \quad (a.3)$$

$$\Delta Q_{i, loss} = Q_{i, loss} \times \left\{ \frac{(Q_i + Q_{Dt} + r_t \hat{Q}_t)^2}{Q_i^2} - 1 \right\} \quad (i \in R)$$

또한, 순차적인 선로교환의 진행과정에서 상태교환 이전에 선로 i에 흐르는 전력조류를  $P_i, Q_i$ 라고 하고, 상태교환 이후에 흐르는 전력조류를  $P_i', Q_i'$ 라고 한다면, 선로의 유효전력 조류와 무효전력 조류의 계산식은 L 측과 R 측에서 각각 다음과 같이 계산된다.

$$P_i' = P_i - P_{Dt} - \Delta P_{i, loss} \quad (i \in L) \quad (a.4)$$

$$P_i' = P_i + P_{Dt} + \Delta P_{i, loss} \quad (i \in R)$$

$$Q_i' = Q_i - Q_{Dt} - \Delta Q_{i, loss} \quad (i \in L) \quad (a.5)$$

$$Q_i' = Q_i + Q_{Dt} + \Delta Q_{i, loss} \quad (i \in R)$$

그러므로 각 선로의 전력조류 계산식과 손실 변화량 방정식을 연속적으로 적용하면, 각 선로의 상태교환에 따른 유효분 손실과 무효분 손실의 변화량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{loss} &= \sum_{i \in L} \left\{ P_{i, loss} \left[ \frac{(P_i - P_{t, con})^2}{P_i^2} - 1 \right] \right\} \\ &+ \sum_{i \in R} \left\{ P_{i, loss} \left[ \frac{(P_i + P_{Dt} + r_t \hat{P}_t)^2}{P_i^2} - 1 \right] \right\} \\ &+ r_t \hat{P}_t^2 \end{aligned} \quad (a.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{loss} &= \sum_{i \in L} \left\{ Q_{i, loss} \left[ \frac{(Q_i - Q_{t, con})^2}{Q_i^2} - 1 \right] \right\} \\ &+ \sum_{i \in R} \left\{ Q_{i, loss} \left[ \frac{(Q_i + Q_{Dt} + r_t \hat{Q}_t)^2}{Q_i^2} - 1 \right] \right\} \\ &+ r_t \hat{Q}_t^2 \end{aligned} \quad (a.7)$$

## 저 자 소 개



### 김 병 섭 (金炳燮)

1968년 8월 18일생. 1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

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