휴리스틱 탐색전략을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적 경로 선정

論 文
49A - 11 - 6

Optimal Feeder Routing for Distribution System Planning Using a Heuristic Strategy

崔 南 鎭* · 金 炳 燮** · 愼 重 麟***
(Nam-Jin Choi · Byung-Seop Kim · Joong-Rin Shin)

Abstract - This paper propose a heuristic algorithm based on the Branch-Exchange(BE) method to solve the Optimal feeder Routing(OFR) problem for the distribution system planning. The cost function of the OFR problem is consisted of the investment cost representing the feeder installation and the system operation cost representing the system power loss. We propose a properly designed heuristic strategy, which can handle the horizon-year expansion planning problem of power distribution network We also used the loop selection method which can define the maximum loss reduction in the network to reduce calculation time, and proposed a new index of power loss which is designed to estimate the power loss reduction in the BE. The proposed index, called loss index, can be considered with both sides, the low voltage side and high voltage side branch connected with tie one. The performances of the proposed algorithms and loss index were shown with 32, 69 example bus system.

Key Words : Opimal Routing, Distribution System Planning, Heuristic Algorithm, Branch Exchange, Loss Index

1. 서 론

전력계통의 운영에서 배전계통의 계획(optimal distribution system planning)분야는 전압강하, 전력손실, 신뢰도 문제 등의 다각적인 검토가 요구된다. 특히 배전계통 계획과 운영에 관련하여 급전선의 최적 경로 선정문제(OFR)는 경제적인 면에서 가장 중요한 기능적 위치를 차지하며 미치는 영향 또한 크다[1]. 배전계통의 급전선 신설에는 지형적 제약 외에 전압강하, 전력손실 등 여러 제약조건을 만족하는 많은 후보구조 중에서 최소의 설치비용을 보장하는 최적의 대안을 선택하여야 한다.[2] 일반적으로 OFR 문제는 비용으로 표현되는 목적함수와 이를 최적화하기 위하여 수반되는 다양한 등호, 부등호 제약조건을 만족하여야 하는 조합최적화 문제(combinatorial optimization problem)로 정식화된다.

급전선 신설비용에 따른 투자비용(InVestment Cost: IVC)과 전력손실 비용에 따른 계통운용비용(System Operation Cost: SOC)을 종합적으로 고려해야 하는 OFR 문제는 지금까지 다양한 방법에 의해 연구되었다. Adams와 Laughton[3]은 개개의 연결에서의 전력조류와 투자비용에 의한 계통운용비용을 고려한 혼합정수계획법으로서 분기 한정법(branch & bound)에 의한 연구를 수행하였다. Aoki[4] 등은 단일단계 배전계획에 대한 최적 근사해를 위해 선로교환법(Branch Exchange: BE) 알고리즘을 제시했다. Aoki 등은 개연성이 있는 루프 회로에서 출발하여 높은 비용과 제약조건에 위배되는 선로를 차례로 제거해 가는 경험적인 알고리즘을 제시했다. 최근에는 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)과 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing: SA)[5] 등의 인공지능 기법을 도입한 연구들이 보고되고 있다. GA와 SA에 의한 방법은 전역해 탐색에 우수한 특성을 보이나 비교적 많은 시간이 요구된다는 단점을 보인다.

본 논문에서는 배전계통 계획의 OFR을 위하여 신속한 전체비용의 최소화를 수행하는 알고리즘을 제안하였다. OFR문제는 계획문제의 특성상 모든 가능 선로를 고려해야 하며, 실제적으로는 초기상태를 정의할 수 없기 때문에, 임의의 계통을 설정한 후 선로교환에 의해 최적해를 탐색하는 방법을 사용하였다. 본 논문에서는 전체비용 최적화를 위한 방법으로 먼저 IVC, SOC 각각의 최적해를 구한 후, 이를 기반으로 전체 가중 평균 비용을 최적화 시키는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 Baran 등이 제시한 손실 감소식은 고전압 측으로의 선로교환 시 손실의 변동에 대한 유용한 정보를 얻을 수 없다는 단점을 극복하기 위하여 고전압 측으로의 선로교환 시에도 손실 증감의 효율적 추정이 용이한 새로운 손실 변동식을 제안하였다. 또한 계통운용비용과 전체비용 최적화 시에는 최대 손실감소루프 선정기법을 사용하여, 기존의 BE방법에 비하여 계산효율을 증진하였으며,

* 準 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 碩士課程
** 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 正敎授 · 工博
接受日字 : 2000年 8月 25日
最終完了 : 2000年 11月 1日

투자비용 최적화에서는 루프단위의 비교탐색 알고리즘을 제안하였다.

제안한 알고리즘은 비교적 대규모 모의 계통인 32, 69모선 배전계통 예제모델에 적용하여 다각도로 사례연구를 수행하여, 알고리즘의 효용성을 검증하였다.

2. 조류계산과 손실방정식

배전계통은 방사상 형태이기 때문에 변전소에서 공급되는 조류는 방향성을 가지며 변전소는 연계된 모든 노드에서 요구되는 부하량과 전체선로에서 발생하는 손실전력을 공급해야하는 특성을 보인다. 계통의 전체손실은 계통이 완전하게 구성된 상태에서 반복적인 순환식을 이용하며, 본 논문에서는 방사상 배전계통에 적합하며, 계산효율이 우수한 Distflow조류계산[6] 알고리즘을 사용하였다.

조류계산의 형태를 간략하게 설명하기 위하여 다음과 같은 지선(lateral)을 포함한 배전계통을 나타낼수 있다.

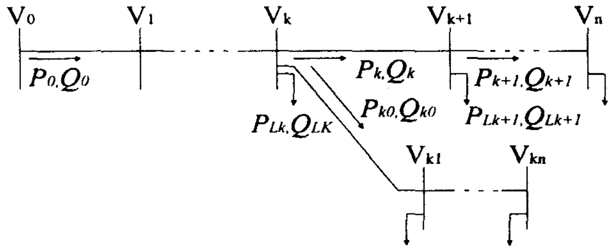


그림 1 지선이 있는 배전계통

Fig. 1 Diagram of a radial network with laterals

그림에서 분기점을 분기노드 k, 분기되어 나오는 지선을 지선 k라고 한다면, 새로운 지선 k를 하나의 간선으로 취급하여, 종단노드에서의 조건식을 이용하여 조류계산 방정식은 다음처럼 표현할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
P_k &= \hat{P}_k(X_{k-1}) - P_{k0} \\
Q_k &= \hat{Q}_k(X_{k-1}) - Q_{k0} \\
|V_k| &= \hat{V}_k(X_{k-1})
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

여기서 $\hat{P}_k(X_{k-1})$, $\hat{Q}_k(X_{k-1})$, $\hat{V}_k(X_{k-1})$은 각각 k노드로 유입되는 유·무효 전력조류량과 전압의 추정값을 의미한다. P_{k0}, Q_{k0}는 지선 k로 흘러 나가는 전력조류를 나타내며, $X_i=[P_i, Q_i, V_i^2]^T$ 이고, V_i 는 i노드의 전압을 나타낸다. 본 논문에서 고려된 계통손실은 저항에 의해 발생하는 유효전력손실을 고려하였으며 계통의 상태값이 결정되면 다음과 같은 손실방정식으로 전체선로의 유효전력손실을 계산할 수 있다.

$$
P_{loss} = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \qquad (2)
$$

3. OFR 문제의 정식화

본 논문에서는 배전계획을 위한 최적경로선정 문제를 고려함에 있어서 단일단계 모델(single-period model)의 시스템 급전선 모델(system feeders model)[10]로 한정하여 알고리즘을 제안하였다. 일반적인 시스템 급전선 모델의 목적함수는 부하의 수요예측지점과 공급변전소의 계통이 구성된 상태에서 최소의 비용으로 부하수요량을 충족시키기 위하여 변전소와 부하예측지점을 연계하는 최적의 전력 전송경로를 결정하는 것이다. 이를 위하여 본 논문에서는 계통운용비용(SOC)과 투자비용(IVC)이 고려된 전체비용 최소화 형태의 목적함수를 다음처럼 고려하였다.

3.1 전체 비용 최소화를 위한 목적함수

$$
\min \quad f_{COST}(Y, U) = \alpha \cdot SOC(Y) + \beta \cdot IVC(U) \qquad (3)
$$

여기서,

$Y=[P, Q, V, \Delta IOL]^T$: 계통운용비용 변수벡터

$U=[\Delta IVC]$: 급전선 신설 투자비용 변수벡터

P, Q, V : 계통의 유효·무효전력 및 모선전압 벡터

ΔIOL : 연계선로 교환에 따른 선로 손실의 변화량 벡터

ΔIVC : 연계선로 교환에 따른 투자비용의 변화량 벡터

$SOC(\cdot)$: 계통 운전비용에 따른 유효전력 손실비용

$IVC(\cdot)$: 급전선 신설에 따른 투자비용

α, β : $SOC(\cdot), IVC(\cdot)$에 대한 활성화 계수

3.2 OFR문제의 등호 및 부등호 제약조건

■ K.C.L 제약조건을 위한 전력평형방정식

$$
\begin{aligned}
P_k &= \hat{P}_k(X_{k-1}) - P_{k0} \\
Q_k &= \hat{Q}_k(X_{k-1}) - Q_{k0} \\
|V_k| &= \hat{V}_k(X_{k-1})
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

■ 방사상(Radiality)계통구성에 관한 제약조건

$$
\sum_{i=1}^{TN} \sum_{j=1}^{TN} Y_{ij} = TN-1 \qquad (5)
$$

■ 변전소와 급전선 용량 제약조건

$$
0 \le X_{ij} \le U_F \qquad (6)
$$

$$
0 \le S_i \le U_S \qquad (7)
$$

여기서,

D_i : 부하노드 i의 수요 부하량

S_i : 변전소에서 i노드로 전달되는 전력 조류량

X_{ij} : 노드 i에서 j로 흐르는 전력 조류량

Y_{ij} : 급전선 (i, j)의 결정변수 (설치: 1,비설치: 0)

TN : (변전소 노드 + 부하노드)의 전체 노드 개수

U_F : 급전선의 용량한계

U_S : 변전소의 용량한계

3.3 계통운용비용 최적화 알고리즘

본 절에서는 OFR문제의 전체비용 최적화를 위한 계통운용비용 최적알고리즘에 대하여 설명한다. 본 알고리즘에서는 계통의 운영시에 발생하는 선로손실을 최소화하기 위하여 선로교환기법을 기반으로 하는 다양한 휴리스틱 전략을 도입하였다.

3.3.1 선로교환에 의한 손실 변화식

방사상 배전계통은 초기 급전선 신설가능경로(right of way)의 임의의 구성으로부터 형성되며, 임의의 방사상 계통은 몇 개의 루프로 표현 가능하다. 임의의 연계선로(tie-line)가 연결될 때 하나의 루프가 형성되므로 루프의 수는 연계선로의 수와 동일하게 된다 임의의 방사상 계통이 그림 2에서와 같이 연계선로 t에 의해서 단일 루프를 형성

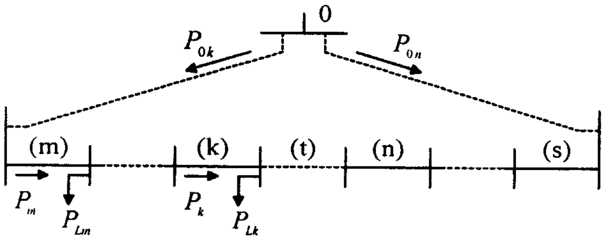


그림 2 연계선로 t 에 관한 단일 루프 계통
Fig. 2 The loop associated with tie-line t

한다고 할 때, 연계선로 t에서 전압강하가 큰 쪽을 저전압측 L, 전압강하가 낮은 쪽을 고전압측 R이라 하고 루프는 연계선로(tie-branch) t를 기준으로 노드 0에서 L까지의 저전압부와 노드 0에서 R까지의 고전압부의 두 부분으로 구분된다.

본 논문에서는 그림 2에서 t와 m 사이의 선로 교환에 따른 손실변화 가능성을 추정하기 위하여 참고문헌 [6]에서 제시된 손실감소 추정식을 도입하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta LP_{tm} = 2AP_m + 2BQ_m - C(P_m^2 + Q_m^2) \qquad (8)$$

단,

$A = \sum r_L P_L - \sum r_R P_R,\ \ B = \sum r_L Q_L - \sum r_R Q_R,\ \ C = r_{loop}$

여기서,

ΔLP_{tm} : 선로 t-m의 교환에 의한 전력손실 변화량

P_m : 선로교환 이전의 m선로의 유효전력조류

Q_m : 선로교환 이전의 m선로의 무효전력조류

$r_L P_L$: 루프의 L측에서의 r과 P의 곱

$r_R P_R$: 루프의 R측에서의 r과 P의 곱

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

3.3.2 최대 손실감소 루프의 결정

BE 기법에서 최적해 탐색기법의 최대 쟁점은 모든 선로교환을 고려하지 않으면서 효과적인 탐색 능력을 부여하는 것이다. 빈번한 선로교환에 따른 조류계산은 과다한 계산시간을 필요로 하며, 실제적인 적용에 있어서 너무나 소모적이기 때문이다. 이에 관한 전략으로 Baran[6] 등은 모든 루프 각각에 대해서 독립적으로 선로 교환을 수행하였다. 각각의 루프에서 독립적으로 수행된 선로 교환의 결과들 중 최대의 손실 감소를 갖는 선로 교환을 그 단계에서의 최적의 선로교환으로 선택하여 새로운 계통을 구성한 후, 새로이 구성된 구조에서 또 다시 개선된 후보해를 찾아나가는 방법을 사용하였다. 이러한 단계적인 손실감소를 통한 탐색의 진행방법은 각 단계마다 각각의 루프에서의 모든 선로 교환을 고려해야 하기 때문에 계산량이 증가되어 비효율적이다. 이러한 비효율성을 극복하기 위하여 본 논문에서는 최대 손실감소 루프 결정기법을 사용하였다. 최대손실 감소식은 앞서 유도된 손실 추정식 (8)로부터 다음처럼 유도될 수 있으며, 과정은 부록 A에 상술하였다.

$$\Delta LP_{tm\ loop} = [A^2 + B^2]/C \qquad (9)$$

식 (9)의 $\Delta LP_{tm\ loop}$는 특정 루프에 대한 값으로 P_m, Q_m과 독립적이기 때문에 손실의 증감과 상관없이 항상 양의 값을 가진다. 그러므로 특정 루프에서 선로교환 따른 손실의 증감 여부를 판단하기 위하여 표준선로의 개념을 도입한다.

3.3.3 표준 선로의 도입

일반적으로 선로교환은 저전압측(Low voltage side)에서 손실감소가 발생한다고 알려져 있다[8]. 본 논문에서는 루프의 저전압측에서 연계선로에 인접한 첫 번째 선로를 표준선로라 정의하고, 연계선로와 표준선로교환에 의해 발생하는 손실을 표준손실이라고 정의한다. 이 표준손실은 식 (8)의 ΔLP_{tm} 식으로 결정되며 특히, ΔLP_{tk}로 표현한다. 특정 루프에서 $\Delta LP_{tk} > 0$이면 양의 손실 감소, 즉 선로교환에 의해 손실이 감소할 수 있음을 의미하고, $\Delta LP_{tk} < 0$이면 음의 손실 감소이므로 선로교환에 의해 손실이 증가함을 의미한다. 그러므로 본 논문에서는 계통운용비용과 전체비용 최적화 알고리즘에서 표준선로를 고려하여 손실감소 루프를 결정하였다.

식 (8)을 변형하여 ΔLP_{tk}가 표현할 수 있는 3가지 손실변화 정보(손실증가, 손실감소, 손실부동)를 얻을 수 있다. 손실변화 정보의 개념은 다음 원의 방정식으로 설명할 수 있다. 먼저 식 (8)을 다음처럼 변형하여 표준 전력조류 (P_k, Q_k)에 의한 궤적을 원의 방정식으로 표현할 수 있으며, 이를 손실원(loss circle)이라 하고, 다음 식으로 표현할 수 있다. 이에 따른 손실원의 작도는 그림 3에 나타내었다.

$$\Delta LP_{tk} = \frac{A^2+B^2}{C} - C\{(P_k - \frac{A}{C})^2 + (Q_k - \frac{B}{C})^2\} \quad (10)$$

식 (10)에서 원의 반지름은 $\sqrt{(A^2+B^2)/C^2 - \Delta LP_{tk}/C}$ 이며, 선로교환 t-k에 따른 ΔLP_{tk}의 변화방향은 다음 3가지 형태의 손실변화 정보를 얻게 된다.

i) if $\Delta LP_{tk}=0$, 손실 부동인 경우이고, 손실원의 궤적상에 위치
ii) if $\Delta LP_{tk}>0$, 양의 손실변화로 손실감소인 경우이고, 손실원의 내부영역에 위치
iii) if $\Delta LP_{tk}<0$, 음의 손실변화로 손실증가의 경우이고, 손실원의 외부영역에 위치.

3.3.4 손실지표를 이용한 최적 선로교환의 결정

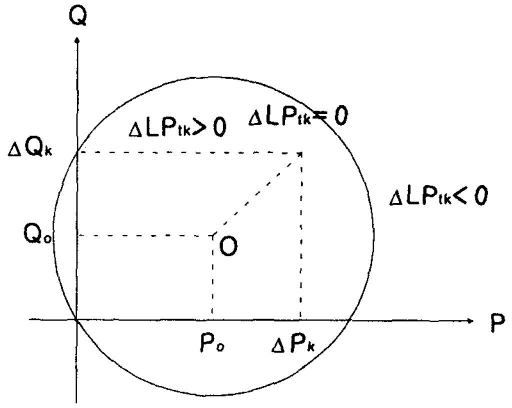


그림 3. 표준 선로교환에 의한 손실원의 궤적
Fig. 3 Locus of loss circle from the NBE.

본 논문에서는 최대의 손실감소 루프를 선정한 후에, 해당 루프 내에서 최대 손실감소의 선로교환 후보를 결정하기 위하여 새로운 손실지표(ΔIOL: Index Of Loss)를 제안하였다. 제안된 손실지표는, 기존의 손실 항을 무시하고 유도된 손실변화 추정식 (8)에 비하여 교환된 후보선로에 대한 정밀한 손실변화 정보를 줄 수 있으며, 저전압측과 더불어 고전압측의 선로교환을 모두 고려할 수 있는 이점을 가진다. ΔIOL을 유도하기 위하여 앞서 저전압측과 고전압측의 구분을 단지 L(left)측과 R(right)측의 방향성 구분으로 대체한 그림 2의 단일 루프계통을 고려한다. 그림에서 연계선로 t와 이에 인접한 L측 선로 k의 상태를 교환하는 경우, 기존의 연계선로 t가 연결되고 선로 k는 새로운 연계선로가 되어 부하 P_{Lk}과 Q_{Lk}는 R측으로 이동하게 된다. 이때 새로운 부하이동의 결과로 L측에서는 손실감소가 일어나며, R측에서는 선로조류의 증가로 손실증가가 발생하게 된다. 앞서 유도된 조류계산 수식 (1)로부터 선로에서 발생하는 손실은 전력조류의 제곱에 비례하게 되므로 각 선로에서의 손실변화량에 관한 정보를 추정할 수 있다. 제안된 손실지표는 양측의 부하 증감의 방향이 바뀌는 경우에도 동일하게 적용할 수 있으며 선로교환을 위한 후보선로를 선택하기 위하여 조류계산을 수행하지 않으므로 계산시간의 이점을 가져온다. 제안된 손실지표 ΔIOL은 다음과 같은 형태로 표현되며, 상세한 유도과정은 부록 B에 설명하였다.

$$\Delta IOL = \Delta P_{loss} + \Delta Q_{loss} \quad (11)$$

여기서,

$$\Delta P_{loss} = \sum_{i\in L}\left\{ P_{i,\,loss}\left[\frac{(P_i - P_k)^2}{P_i^{\,2}} - 1\right] \right\} + \sum_{i\in R}\left\{ P_{i,\,loss}\left[\frac{(P_i + P_{Lk} + r_t P_{Lk}^2)^2}{P_i^{\,2}} - 1\right] \right\} + r_t P_{Lk}^{\,2}$$

$$\Delta Q_{loss} = \sum_{i\in L}\left\{ Q_{i,\,loss}\left[\frac{(Q_i - Q_k)^2}{Q_i^{\,2}} - 1\right] \right\} + \sum_{i\in R}\left\{ Q_{i,\,loss}\left[\frac{(Q_i + Q_{Lk} + r_t Q_{Lk}^2)^2}{Q_i^{\,2}} - 1\right] \right\} + r_t Q_{Lk}^{\,2}$$

3.3.5 계통운용비용 최적화 알고리즘의 수행 절차

계통운용비용 최적화 알고리즘은 앞서 설명된 다양한 휴리스틱 전략을 기반으로 다음과 같은 순서로 진행된다.

단계 1 : 임의의 방사상 계통 구성.
단계 2 : DistFlow 조류계산 수행.
단계 3 : 각 루프의 표준손실 ΔLP_{tk} 계산.
단계 4 : 양의 ΔLP_{tk}의 유무 점검.
  a. 양의 ΔLP_{tk}가 존재하면 단계 5로 진행,
  b. 양의 ΔLP_{tk}가 존재하지 않으면 최소의 $\Delta LP_{tm\ loop}$ 선정하고 단계 7로 진행
단계 5 : 양의 ΔLP_{tk}인 루프들에 대해 루프 최대손실감소 $\Delta LP_{tm\ loop}$ 계산.
단계 6 : 최대 $\Delta LP_{tm\ loop}$를 최대 손실감소 루프로 선정.
단계 7 : 결정된 최대 손실감소 루프에서 손실 지표 ΔIOL 을 계산하고, 최대손실 감소 선로를 결정.
단계 8 : 제약조건을 만족하며, 손실이 감소되면 선로 교환을 실행하고, 단계 3으로 진행하고 그렇지 않으면 다음 단계로 진행.
단계 9 : 모든 루프에 대해 고려되었으면 종료.

3.4 투자비용 최적화 알고리즘

본 절은 전체비용 최소화의 구성요소 중 투자비용 최소화 단계이며, 제안된 목적함수는 다음과 같이 신설 급전선의 투자비용의 최소화 형태로 표현할 수 있으며 제약조건은 앞서 언급된 방사상 배전 계통의 등호 및 부등호 제약조건을 고려하였다.

$$min \quad 0.5\sum_i\sum_j IVC_{ij}Y_{ij} \quad (12)$$

여기서,

IVC_{ij} : 급전선 신설에 따른 투자비용 계수행렬

제안된 투자비용 최적화 알고리즘은 계통운용비용 최적화 알고리즘과 연계하여 전체 계획비용의 최소화를 수행하기 위하여 선로교환 탐색방법에 기반을 두었다. 제안된 알고리즘은 모든 설치 가능한 후보선로가 연결되어 있는 루프 구조의 초기 계통상태로부터 제약조건을 만족하는 최소 투자비용 선로를 찾아 개방하는 방법을 사용하였으며, 루프구조의 배전계통을 순차적으로 최소 투자비용의 방사상 계통으로 만들어 간다. 제안된 알고리즘의 수행절차는 다음과 같다.

아래에서 $IVC_i^{\max}$, $IVC_i^{\max-1}$은 각각 i번째 루프에서 최대 투자비용을 갖는 선로의 투자비용계수와 차순위 선로의 투자비용계수를 의미하며, $\max\{IVC_i^{\max}\}$는 $IVC_i^{\max}$중에서 최대값의 크기를 나타낸다.

단계 1 : 각 루프계통에서 $IVC_i^{\max}$인 후보선로를 선택.

단계 2 : 선택선로의 개방에 따른 방사상 계통구성의 제약조건 식 (5)를 검사.

단계 3 : 제약조건을 위반하는 루프의 존재여부 점검.

a. 제약조건을 위반하는 루프 i에서는 $IVC_i^{\max-1}$인 선로를 후보선로로 결정하고 단계 2로 진행.

b. 제약조건을 모든 루프가 만족하면 다음 단계 진행.

단계 4 : 전체계통에서 $\max\{IVC_i^{\max}\}$ 인 선로 결정.

a. 결정된 $\max\{IVC_i^{\max}\}$값이 두 개 이상의 루프에서 중복되면, 루프들 중에서, $IVC_i^{\max-1}$값이 최소인 루프를 현재 단계의 최대 손실비용 루프로 결정하고 다음 단계로 진행.

단계 5 : 이전 단계에서 선택된 루프 i에서 $IVC_i^{\max}$인 선로를 신설하지 않는 것으로 결정하고, 루프 i는 이후 고려대상에서 제외.

단계 6 : 모든 루프가 방사상 구조이면 목적함수 식 (12)를 계산하여 종료하고, 그렇지 않으면, 단계 1로 진행.

3.5 전체비용의 최소화 알고리즘

OFR의 전체비용을 최소화 하기 위하여 본 논문에서 제안된 최적화 알고리즘의 흐름도를 그림 4와 같다. 알고리즘의 전체 수행순서는 먼저, 계통에서의 투자비용 최적화 ($\alpha=0$, $\beta=1$)를 1차적으로 수행한 다음 계통 운용비용 최적화 단계 ($\alpha=1$, $\beta=0$)를 수행한다. 그리고 최종적으로 앞에서 구해진 투자비용과 계통 운용비용의 개별적인 최적화 결과를 기반으로 하여 전체비용 최적화 ($\alpha=1$, $\beta=1$)를 수행하도록 하였다.

4. 사례연구

제안한 알고리즘은 비교적 대규모인 32, 69모선의 배전계통 예제모델[6, 7]에 적용하여 그 효용성을 확인하였다. 선정된 모의 계통은 OFR에 적용하기 위하여 모든 선로를 설치 가능경로로 재구성하였으며, 계통의 기준 전압은 12.66[kV]

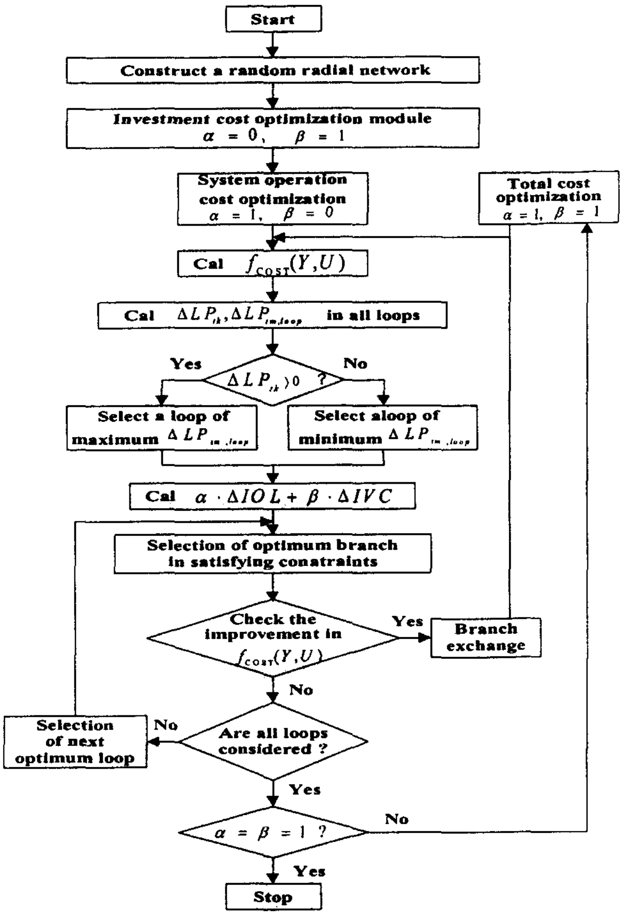


그림 4. OFR를 위하여 제안된 흐름도

Fig 4. A proposed flowchart for OFR

이다. 각 계통의 설치가능경로와 급전선의 신설비용(Cost) 등은 표 1과 표 2에 각각 나타내었고, 급전선 신설비용은 선로의 임피던스와 비례한다고 가정하였다. 제안한 알고리즘의 수행은 MMX 166MHz IBM-PC에 의해 수행되었다.

표 1 32모선 계통 데이터

Table 1 32-bus system data

LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST
1	0.1035	11	0.3943	21	1.1752	31	0.4768
2	0.5533	12	1.8679	22	0.5465	32	0.6304
3	0.4107	13	0.8953	23	1.1442	33	2.8284
4	0.4277	14	0.7912	24	1.1377	34	2.8284
5	1.0819	15	0.9241	25	0.2278	35	2.8284
6	0.6465	16	2.1502	26	0.3189	36	0.7071
7	0.7492	17	0.9302	27	1.4118	37	0.7071
8	1.2683	18	0.2267	28	1.0666		
9	1.2797	19	2.0248	29	0.5695		
10	0.2071	20	0.6297	30	1.3700		

제안한 알고리즘의 적용을 위한 32, 69 모선 예제모델의 초기구성은 각각 그림 5, 6과 같다. 각각의 번호는 부하노드를, 점선들은 신설 가능 경로를 나타내며, 전체 부하의 예상 전력 요구량은 32 모선이 3715 [kW], 2300[kVAR]이고, 69 모선은 3802.19 [kW], 2694.6[kVAR]이다.

표 2 69모선 계통 데이터
Table 2 69-bus system data

LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST
1	0.0013	20	0.2218	39	0.0467	58	0.8267
2	0.0013	21	0.3598	40	0.0028	59	0.3204
3	0.0000	22	0.0147	41	1.1200	60	0.4035
4	0.0039	23	0.1676	42	0.4768	61	0.5695
5	0.0387	24	0.3647	43	0.0630	62	0.1093
6	0.4107	25	0.7886	44	0.0148	63	0.1627
7	0.4277	26	0.3253	45	0.1752	64	0.7974
8	0.1035	27	0.1824	46	0.0015	65	1.1682
9	0.0553	28	0.0117	47	0.0091	66	0.2103
10	0.8626	29	0.1691	48	0.2250	67	0.0049
11	0.1972	30	0.4190	49	0.7660	68	0.7787
12	0.7492	31	0.0739	50	0.2173	69	0.0050
13	1.0847	32	0.3697	51	0.1042	70	0.7071
14	1.0995	33	0.8850	52	0.3501	71	0.7071
15	1.1143	34	1.7989	53	0.1953	72	1.4142
16	0.2071	35	1.5525	54	0.2278	73	2.8284
17	0.3943	36	0.0117	55	0.3189	74	1.4142
18	0.0050	37	0.1691	56	0.3157		
19	0.3450	38	0.1619	57	1.6772		

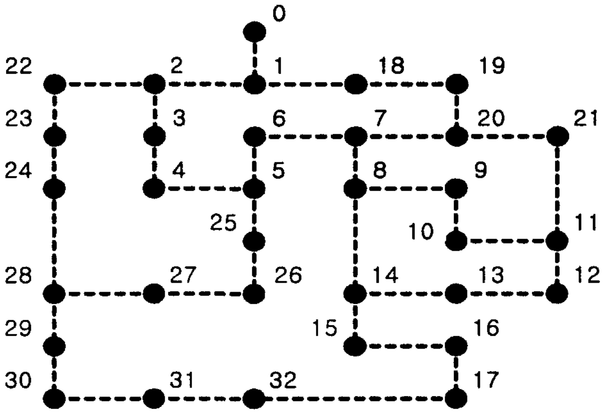


그림 5 32 모선 계통의 초기 구성 상태
Fig. 5 Initial configuration of 32 bus system

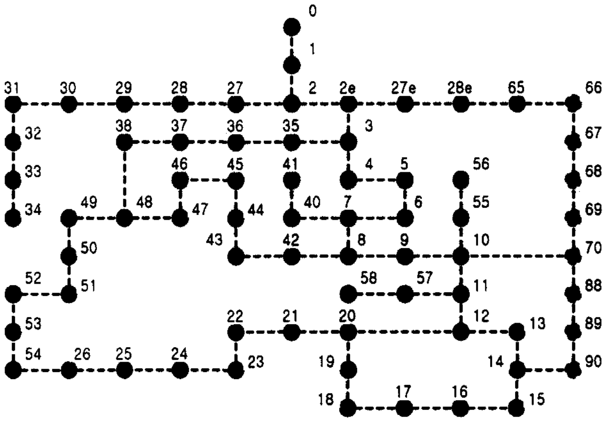


그림 6 69 모선 계통의 초기 구성 상태
Fig. 6 Initial configuration of 69 bus system

표 3 개별 최적화 알고리즘의 결과
Table 3 Result of an individual case

		투자비용 최적화	계통운용비용 최적화	전체비용 최적화
32 모선	Open line	16,27,33,34,35	7,8,14,32,37	33,27,9,14,31
	투자비용	25.4899	33.3795	30.7492
	전력손실[kW]	178.779	139.549	148.161
69 모선	Open line	15,41,57,72,73	15,59,62,70,71	13,14,57,64,70
	투자비용	25.7296	30.9302	28.5178
	전력손실[kW]	464.489	99.621	100.976

표 3은 개별 최적화 알고리즘인 SOC, IVC의 최종결과와 전체 비용 최적화 결과를 비교하기 위하여 나타낸 것이다. 표에서는 개방된 선로번호를 각각 표현하였으며, IVC와 SOC를 동일한 비용수준으로 알고리즘을 진행하였기 때문에, 전체비용 최적화 결과의 전력손실이 개별최적화 결과에 비하여 다소 상승된 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 알고리즘이 개별최적화는 물론, OFR에서도 효과적으로 적용 가능하다는 사실을 나타내는 것이다.

표 4 OFR 결과
Table 4 Result of OFR

모선	탐색 단계	최대손실 감소루프	BR-EX close	BR-EX open	SOC	IVC	Total cost
32 모선	Open branches of initial state				18, 5, 9, 14, 28		
	1	-	-	-	868.322	33.0910	7.5205
	2	Loop 2	5	37	387.846	33.4658	4.0922
	3	Loop 1	18	5	386.182	32.6106	4.0467
	4	Loop 5	28	31	282.989	33.2004	3.3303
	5	Loop 1	5	33	161.826	31.4539	2.3916
	6	Loop 2	37	27	148.161	30.7492	2.2680
	Open line of final state				33, 27, 9, 14, 31		
	수행 시간				1.98 [s]		
69 모선	Open branches of initial state				6, 73, 25, 13, 17		
	1	-	-	-	411.049	28.3770	5.2290
	2	Loop 1	6	70	208.297	28.0806	3.1823
	3	Loop 2	73	57	127.805	29.2320	2.4190
	4	Loop 5	17	15	126.520	28.5118	2.3781
	5	Loop 3	25	64	101.102	28.5030	2.1227
	6	Loop 5	15	14	100.976	28.5178	2.1219
	Open line of final state				70, 57, 64, 13, 14		
	수행 시간				2.53 [s]		

표 4는 OFR 최종결과이며, 탐색 단계 별로 선정된 루프와 개폐되는 선로, 각각의 비용과 소요 시간 등을 나타내었고, SOC와 IVC의 개별 최적화 결과를 기준값으로 하였다. 단계 1은 초기 구조에서의 상태이며 모의계통에서는 대략 6번 정도의 반복계산을 통하여 수렴하는 것을 확인하였다. 표 4의 결과는 기존의 GA나 SA의 전역탐색결과에 비하여 95%이상의 최적결과에 근접한 값이다. 그림 7, 8은 32모선과 69모선의 최종 OFR 결과를 나타낸다.

표 5는 Baran 등이 제안한 손실 변동식 (8)과 본 논문에서 제안된 손실 지표 ΔIOL을 동일한 SOC 최적화 알고리

즘에 적용하여 최적해 탐색성능을 비교한 것이다. 동일한 조건의 비교를 위하여 랜덤하게 설정된 초기 방사상 계통구성상태로부터 기존의 손실 추정식과 제안된 손실지표에 동일한 초기조건을 부과하여 SOC 개별 알고리즘에 적용하여 수행한 결과를 비교한 것이다.

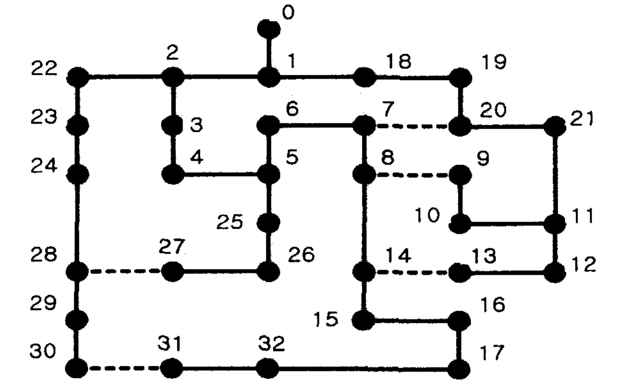


그림 7 32 모선 계통의 최적 구성

Fig. 7 Optimal configuration of 32 bus system

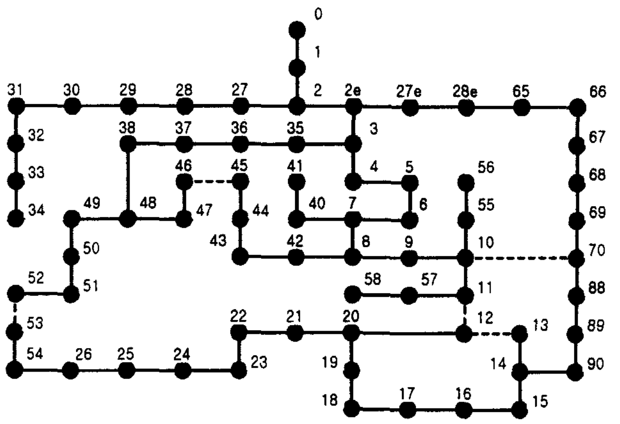


그림 8 69 모선 계통의 최적 구성

Fig. 8 Optimal configuration of 69 bus system

탐색 성능의 비교를 위하여 저전압 측(L-side)으로의 선로교환만을 고려한 단방향과 저전압과 고전압 측(R-side)으로의 선로교환을 모두 고려한 양방향의 두 가지 경우로 구분하여 수행하였다. 표 5의 결과를 통하여 제안한 손실지표의 수렴성능이 전역탐색 알고리즘에 비하여 손색이 없음을 확인할 수 있으며, 양방향으로의 탐색이 수반되는 OFR 문제의 적용에도 기존 손실 변화식에 비하여 적용가능성이 향상되었음을 확인할 수 있다.

표 5 제안된 손실지표의 성능 비교

Table 5 Comparison with proposed method

	참고문헌 [8]	제안된 손실지표
L-side	82 [%]	91 [%]
R-side	-	91 [%]

그림 9와 10의 그래프는 SOC 최적화의 결과에 의한 32, 69 모선 예제 모델에서 각 모선의 전압을 나타낸 것으로 계통 재구성 문제와 관련한 계통손실 최소화 문제와의 비교를 위하여 도시한 것이다. 초기상태는 계통 재구성 문제의 초기운전상태를 나타낸다. 그림으로부터 전력손실의 감소에 따라 모선전압의 현저한 상승을 확인할 수 있다.

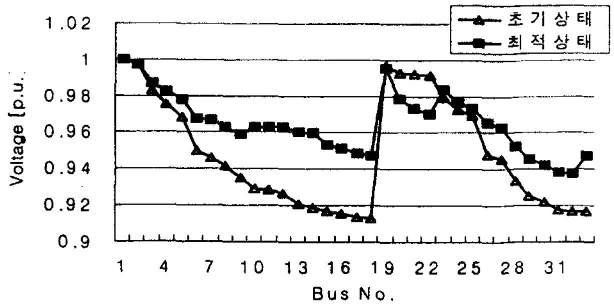


그림 9 32 모선 계통의 전압 분포

Fig. 9 Voltage distribution of 32 bus system

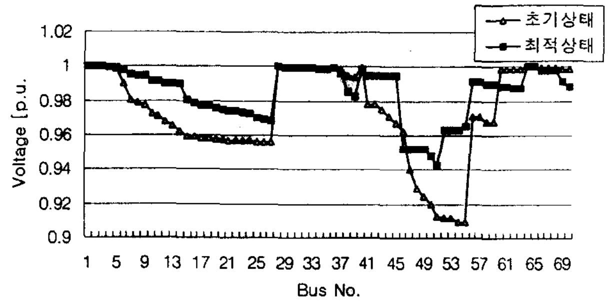


그림 10 69 모선 계통의 전압 분포

Fig. 10 Voltage distribution of 69 bus system

본 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여, 표 6은 SOC 최적화 단계의 결과를 다른 연구[6,9]의 결과와 비교한 것으로 제안한 알고리즘이 SOC 단일비용의 최적화에도 유용하게 적용될 수 있음을 시사한다.

표 6 다른 연구 결과와의 비교

Table 6 Comparison with other studies

	32 모선		69 모선	
	전력손실 [kW]	Open line	전력손실 [kW]	Open line
기존연구1 [6]	139.548	7,9,14,32,37	-	-
기존연구2 [9]	139.548	7,9,14,32,37	99.619	15,59,62,70,71
제안한 방법	139.548	7,9,14,32,37	99.619	15,59,62,70,71

5. 결론

본 논문에서는 경험적 탐색 알고리즘 형태의 선로교환기법을 배전계통의 OFR 문제에 효과적으로 적용하였다. 기존의 선로교환방법에서 나타나는 계산량 단점과 지역적 수렴특성을 보완하기 위하여 다양한 최적화 전략을 제안하였다. 특히 OFR 문제의 선로교환 시에도 양방향의 손실추정이 가

능한 새로운 손실지표를 제안하였으며, 사례연구를 통하여 효용성을 입증하였다. 또한 투자비용 최적화를 위해 루프 단위의 비교탐색 알고리즘을 제시하였다. 제안한 알고리즘을 32, 69 모선 예제모델 계통에 적용하여 그 결과를 기존 연구들과의 비교를 통해 그 효용성을 확인하였고, 비교적 우수하고 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 계산시간의 이점이 상당히 향상되었으며, OFR문제의 적용과 아울러 배전계통의 실시간 운용문제에 적용이 가능한 것으로 판단된다. 향후 제안된 방법의 전체비용 최적화 탐색의 전역적 특성을 향상시킬 수 있는 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구(97-중-05)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행하였음.

참 고 문 헌

[1] Turan Gonen et. al. "Opimal Multi-Stage Planning of Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, April, 1987.

[2] Y. Hayashi et. al. "Efficient Determination of Optimal Radial Power System Structure Using Hopfield Neural Network with Constrained Noise", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July, 1996.

[3] Adams R. N., Laughton M. A. "Optimal Planning of Networks using Mixed-integer Programming.", Proc. IEE, Vol 121, No. 2, 1973.

[4] Aoki. K. at al., "New Approximate Optimization Method for Distribution System Planning." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, 1990.

[5] Satish Jonnavithula, Roy Billinton, "Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning", IEEE Transactions on Power Delievery, Vol. 11, No. 4, October, 1996.

[6] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April, 1989.

[7] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January, 1989.

[8] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin and S. S. H. Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction:", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July, 1988

[9] Y. J. Jeon, S. K. Choi, J. C. Kim, "Implementation of simulated Annealing for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", Trans. KIEE. Vol 48A, No. 4, April, 1999.

[10] Suresh K. Khator, Lawrence C. Leung, "Power Distribution Planning : A Review of Models and Issues", IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 3, August, 1997

부 록

A. 최대 손실감소 루프의 결정식 유도

최대 손실감소 루프 식을 유도하기 위하여 손실변화 추정식(9)을 도입하여 다음과 같은 형태로 재 표현한다.

$$\Delta LP_{tm} = 2AP_m + 2BQ_m - C(P_m^2 + Q_m^2) \quad \text{(a.1)}$$

상기 표현에서 A, B, C는 각각의 루프에서 결정되는 상수 형태이며, P_m, Q_m과 독립적이므로 식 (a.1)은 P_m, Q_m의 함수로 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\Delta LP_{tm} = f(P_m) + f(Q_m) \quad \text{(a.2)}$$

여기서,

$$f(P_m) = 2AP_m - CP_m^2, \quad f(Q_m) = 2BQ_m - CQ_m^2$$

식 (a.2)는 2차 함수 형태이므로 $\partial(\Delta LP_{tm})/\partial P_m = 0$, $\partial(\Delta LP_{tm})/\partial Q_m = 0$일 때의 최적조건식을 $P_{m\ loop}$, $Q_{m\ loop}$이라고 한다면 다음처럼 표현할 수 있다.

$$P_{m\ loop} = A/C, \quad Q_{m\ loop} = B/C \quad \text{(a.3)}$$

식(a.3)에서 $P_{m\ loop}$와 $Q_{m\ loop}$는 루프에서 최대 손실감소를 주는 값이며, 이 값들을 식 (a.1)에 대입하면 루프에서 ΔLP_{tm}의 최대값은 다음처럼 결정할 수 있다.

$$\Delta LP_{tm\ loop} = \frac{(A^2 + B^2)}{C} \quad \text{(a.4)}$$

B. 최적 선로결정을 위한 손실지표 ΔIOL의 유도

B.1 선로교환에 따른 L측에서의 손실변화량 유도

상태교환 후 선로 m 의 변화된 유효전력손실을 $P'_{m,\ loss}$라고 한다면, 손실과 전력조류의 비례적인 관계를 고려하여 $P'_{m,\ loss}$는 다음처럼 정의할 수 있다.

$$P'_{m,\ loss} = \frac{(P_m - P_k)^2}{(P_m)^2} \times P_{m,\ loss} \quad \text{(b.1)}$$

여기서, m 선로의 유효전력손실의 변화량을 $\Delta P_{m,\ loss}$ 라고 정의하고 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta P_{m,\ loss} = P_{m,\ loss} \times \left\{ \frac{(P_m - P_k)^2}{(P_m)^2} - 1 \right\} \quad \text{(b.2)}$$

한편, m 선로의 변화된 무효전력손실을 $Q'_{m,\,loss}$ 라고 정의한다면 유효전력 손실과 동일한 과정을 거쳐 무효전력 손실 변화량은 다음처럼 유도할 수 있다.

$$\Delta Q_{m,\,loss} = Q_{m,\,loss} \times \left\{ \frac{(Q_m - Q_k)^2}{(Q_m)^2} - 1 \right\} \quad \text{(b.3)}$$

B.2 선로교환에 따른 R측에서의 손실변화식 유도

L측과 반하여 R측에서는 상태교환에 의한 부하증가로 인하여 손실이 증가하게 된다. 상태교환 후 선로 s 의 유효전력손실은 다음처럼 정의된다. 아래수식에서 r_t는 기존 연계선로의 저항을 의미하며, $r_t P_{Lk}^2$ 는 말단의 상태교환 선로의 손실량을 나타낸다. 선로 교환으로 이동되는 부하량은 기본적으로 R측 선로의 조류를 증가시키며, 이와 함께 말단 선로의 손실량도 각 선로에서의 선로조류의 증가에 일조를 하게 된다.

$$P'_{s,\,loss} = \frac{(P_s + P_{Lk} + r_t P_{Lk}^2)^2}{P_s^2} \times P_{s,\,loss} \quad \text{(b.4)}$$

여기서, s 선로의 유효전력손실의 변화량을 $\Delta P_{s,\,loss}$ 라고 정의하고 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta P_{s,\,loss} = P_{s,\,loss} \times \left\{ \frac{(P_s + P_{Lk} + r_t P_{Lk}^2)^2}{(P_s)^2} - 1 \right\} \quad \text{(b.5)}$$

한편, s 선로의 변화된 무효전력손실을 $Q'_{m,\,loss}$ 라고 정의한다면 유효전력 손실과 동일한 과정을 거쳐 무효전력 손실 변화량은 다음처럼 유도된다.

$$\Delta Q_{s,\,loss} = Q_{s,\,loss} \times \left\{ \frac{(Q_s + Q_{Lk} + r_t Q_{Lk}^2)^2}{(Q_s)^2} - 1 \right\} \quad \text{(b.6)}$$

B.3 손실지표 ΔIOL의 일반화

앞서 정식화된 양측의 손실변화량은 선로교환에 따른 손실지표를 유도하기 위하여 다음처럼 일반적인 형태로 확장할 수 있다. 먼저 부하량이 감소하는 L측 선로에서 선로교환 t-k에 의한 유·무효 전력의 손실변화량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,\,loss} &= P_{i,\,loss} \times \left\{ \frac{(P_i - P_k)^2}{(P_i)^2} - 1 \right\} \\ \Delta Q_{i,\,loss} &= Q_{i,\,loss} \times \left\{ \frac{(Q_i - Q_k)^2}{(Q_i)^2} - 1 \right\} \end{aligned} \quad \text{(b.7)}$$

또한 R측 선로의 부하증가량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,\,loss} &= P_{i,\,loss} \times \left\{ \frac{(P_i + P_{Lk} + r_t P_{Lk}^2)^2}{P_i^2} - 1 \right\} \\ \Delta Q_{i,\,loss} &= Q_{i,\,loss} \times \left\{ \frac{(Q_i + Q_{Lk} + r_t Q_{Lk}^2)^2}{Q_i^2} - 1 \right\} \end{aligned} \quad \text{(b.8)}$$

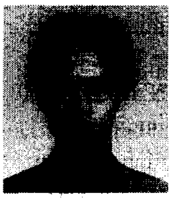
선로의 상태교환 후 변환되는 선로의 전력조류를 각각 P_i' , Q_i' 라고 하면 각각의 선로조류는 다음처럼 갱신된다.

$$\begin{aligned} P'_i &= P_i - P_k - \Delta P_{i,\,loss} \\ Q'_i &= P_i - Q_k - \Delta Q_{i,\,loss} \end{aligned} \quad (i \in L) \quad \text{(b.9)}$$

$$\begin{aligned} P'_i &= P_i + P_{Lk} + \Delta P_{i,\,loss} \\ Q'_i &= Q_i + Q_{Lk} + \Delta Q_{i,\,loss} \end{aligned} \quad (i \in R) \quad \text{(b.10)}$$

또한 선로의 상태교환으로 발생되는 각 선로의 손실변화량은 양측선로에서 발생된 개별 손실변화량을 가산하여 표현할 수 있으며 식(b.8)과 (b.10)를 이용하여 최종 손실지표의 형태가 유도된다.

저 자 소 개



최 남 진 (崔 南 鎭)
1973년 11월 14일생. 1999년 건국대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 02-458-4778
E-mail : pporori@netian.com

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 : dkkbbss@kkucc.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(공박). 현재 건국대 전기공학과 교수.
Tel : 02-450-3487
E-mail : jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr