

# 신뢰도 지수를 고려한 배전계통의 최적 전력전송경로 결정

## Optimal Routing of Distribution Network Considering Reliability Indices

申 東 峻\* · 盧 炳 權\*\* · 金 鎮 吾\*\*\*

(Dong-Joon Shin · Pyung-Kweon Roh · Jin-O Kim)

**Abstract** - Optimal routing of distribution networks can be attained by keeping the line power capacity limit to handle load requirements, acceptable voltage at customer loads, and the reliability indices such as SAIFI, SAIDI, CAIDI, and ASAI limits. This method is composed of optimal loss reduction and optimal reliability cost reduction. The former is solved relating to the conductor resistance of all alternative routes, and the latter is solved relating to the failure rate and duration of each alternative route. The routing considering optimal loss only and both optimal loss and optimal reliability cost are compared in this paper. The case studies with 10 and 24 bus distribution networks showed that reliability cost should be considered as well as loss reduction to achieve the optimal routing in the distribution networks.

**Key Words** : Optimal Routing, Distribution, Reliability Indices, Reliability Cost Reduction, Failure Rate and Duration

### 1. 서 론

전력계통은 고장 없는 연속성과 높은 품질을 유지하면서 시스템의 부하 요구량을 충족시키고 에너지를 경제적으로 공급함을 원칙으로 한다. 근래 산업사회가 첨단화, 고도화, 정보화 됨에 따라 전기 차단에 의한 비용 손실이 증가하게 되고 수용가는 전기의 품질에 대하여 보다 많은 관심을 가지게 되었으며, 이와 함께 시스템 운용 비용과 신뢰도 가치 최적화의 필요성이 대두되었다. 기존의 배전계통 최적 전력전송경로는 손실 비용만을 고려하여 최소 손실을 가져오는 전송 경로를 선택하여 전력을 전송하였다[1~3]. 그러나, 손실 비용 이외에도 비용 최적화를 위해서는 전력 전송 경로에 따라 달라지는 고장율과 고장시간에 의해 결정되는 차단 비용을 함께 고려하여야 한다. 수용가의 형태 및 부하량에 따라 달라지는 차단 비용의 산정은 고객에 대한 설문이나[4] 분석적 방법[5]에 의해 이루어지며 이러한 차단 비용은 수용가의 형태 및 부하량에 따라 달라지는데, 차단 비용이 높은 부하일수록 고장율과 고장시간이 적은 고 신뢰도 전력 전송 경로를 선택하여야 하며, 이러한 경로는 최적 손실 경로와는 다를 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존에 있어왔던 연구의 손실 최소화 모델 계통에 대해 수용가의 유형에 따른

데이터를 첨가하고, 손실 비용과 차단 비용을 함께 고려하여 전체 비용 최소화 경로를 찾음으로써 비용 최적화를 시도하였다. 또한, 전압강하 제한조건, 전력수송 제한조건 및 다양한 신뢰도 지수 제한조건 등 실제적인 제한조건을 함께 고려하였다.

### 2. 고장 모델링

배전계통의 신뢰도 가치 평가를 위해서 모든 계통의 구성 요소를 적절하게 모델링 해야 한다. 연속적으로 동작하는 시스템의 신뢰도를 평가하는 매우 정확한 방법으로 상태변위도가 많이 쓰이고 있으며, 본 논문에서는 방사형 배전망(Radial Distribution Network)에 적합한 3변위 모델링을 사용하였다. 3변위 모델의 상태변위도는 그림 1에서 보여진다. 3변위 모델에서 계통 구성 요소는 Up, Down, Outage의 세 가지 형태로 표현된다. 여기에서 Up은 고장 이전의 상태, Down은 고장 이후 고장 분리 이전의 상태, Outage는 고장 분리 이후 수리가 완료되기 전의 상태로 정의된다.

그림 2는 수동사고의 메커니즘을 보여주는 데 여기서 수리시간은 고장 분리 이후 고장 수리에 이르는 시간을 말한다. 그림 3은 능동사고에서 수리시간과 스위칭시간을 잘 보여주고 있다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 고장 분리 이후 선로 재투입 이전까지의 시간은 스위칭시간, 고장 분리 이후 고장 수리 이전까지의 시간은 수리시간이다

\* 準 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 碩士課程  
 \*\* 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 碩士卒業  
 \*\*\* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 副教授 · 工博  
 接受日字 : 1998年 12月 11日  
 最終完了 : 1999年 5月 10日

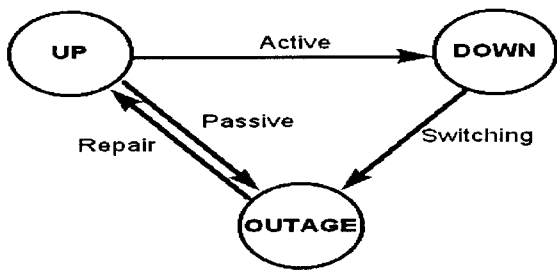


그림 1 3변위 모델  
Fig. 1 3 State model

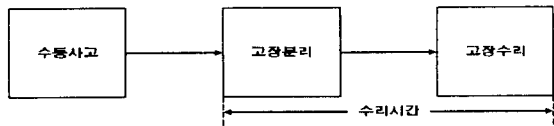


그림 2 수동사고  
Fig. 2 Passive failure

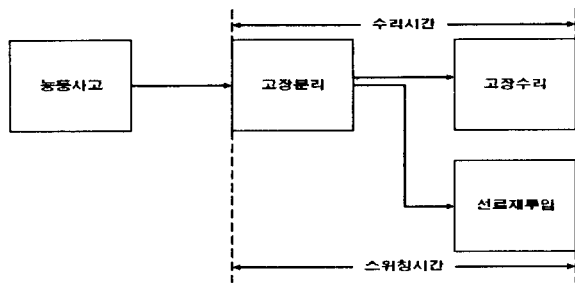


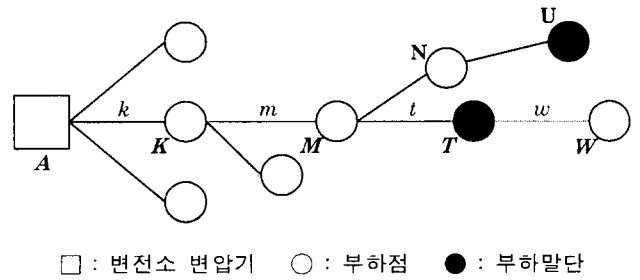
그림 3 능동사고  
Fig. 3 Active failure

### 3. 신뢰도 지수를 고려한 최적전력전송경로 결정

배전계통을 운용시, 전송선의 저항 성분 에 의한 저항 손실 과 낮은 신뢰도에 의해서 유발되는 차단 사고에 의한 신뢰도 비용이 발생한다. 따라서, 배전계통을 최적으로 운용하기 위해서는 손실 비용과 신뢰도 비용 모두를 최소로 하여야 한다. 그리고, 수용가에 전력을 전송하는 전송 경로는 전압 강하 제한조건, 선로 제한용량과 같은 전송 제한조건과 고객 이 전력의 품질에 대한 불만을 야기하지 않는 신뢰도 제한 조건을 만족시켜야 한다.

#### 3.1 전체운용비용(Total Cost)

전송선로의 저항성분과 전송선로에 흐르는 전류에 의하여 전송손실이 발생한다. 최적 전송 경로를 탐색하기 위하여 하나씩 순서적으로 부하점을 추가하여 전송 손실의 변화량 을 평가하였다.그림 4의 배전계통 모델은 하나의 변전소 A



□ : 변전소 변압기 ○ : 부하점 ● : 부하말단

그림 4 배전계통 모델  
Fig. 4 Distribution network model

에서 가지선로  $k, m, t, w$ 를 통하여, 수전점  $K, M, T, W$ 로 연결되는 방사상 배전망으로써, 부하말단에 부하점  $W$ 를 추가하였을 때 전송 손실의 변화량은 다음과 같이 평가할 수 있다[6].

전압  $V = \{V_A, V_K, V_M, V_T\}$ 과 전력  $S = \{S_k, S_m, S_t\}$ 은 이미 알고있는 값이며 여기에 평균부하  $S_w = P_w + jQ_w$ 인 부하점  $W$ 를 추가하면 전압과 전력 손실량이 변화하게 된다. 부하  $S_w$ 에 의한 새로운 전력손실 식  $PL_{New}$ 는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 PL_{New} &= R_k [(P_k + P_w)^2 + (Q_k + Q_w)^2] / V_k^2 + \dots \\
 &+ R_t [(P_t + P_w)^2 + (Q_t + Q_w)^2] / V_t^2 \\
 &+ R_w [P_w^2 + Q_w^2] / V_w^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

부하점  $W$ 에 의한 전송선로의 새로운 전력 손실  $\Delta PL_w$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Delta PL_w &= PL_{New} - PL_{Old} \\
 &= R_k [(2P_k P_w + P_w^2) + (2Q_k Q_w + Q_w^2)] / V_k^2 + \dots \\
 &+ R_t [(2P_t P_w + P_w^2) + (2Q_t Q_w + Q_w^2)] / V_t^2 \\
 &+ R_w [P_w^2 + Q_w^2] / V_w^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서  $PL_{Old}$ 는 기존 선로에 부하점  $W$ 를 첨가하기 전의 원래 전력손실이다.

위 식은 식 (3)과 같이 정리될 수 있다.

$$\Delta PL_w = \sum_i \{ R_i [(2P_i P_w + P_w^2) + (2Q_i Q_w + Q_w^2)] / V_i^2 \} + R_w [P_w^2 + Q_w^2] / V_w^2 \tag{3}$$

여기서  $W$ 는 기존 선로에 추가되는 부하점,  $w$ 는 부하점  $W$ 를 기존 선로에 이어주는 선로,  $T$ 는 가지 선로  $w$ 의 송전점,  $i$ 는 추가되는 부하점  $W$ 에 이르면서 지나는 각각의 선로구간,  $V_i$ 는 선로구간  $i$ 의 수전단 전압이다.

식 (3)에서 볼 수 있듯이, 전력 전송 손실은 추가되는 부하점  $W$ 을 연결하는 추가 선로  $w$ 에서 뿐만 아니라, 부하

점  $W$  에 이르는 모든 경로에서 발생한다. 손실비용(Loss Cost:  $LC$ )을 연간비용으로 나타내면, 식 (3)으로부터 식 (4)와 같이 된다.

$$LC = k_e \cdot \Delta PL_w \quad (4)$$

여기서  $k_e$  는 연간 단위전력당 전력 생산 비용(\$/kw/year)이다.

한편, 수용가는 전력 전송 경로의 고장과 고장시간에 따라 생산 차질 및 원료 손실을 포함하는 비용 손실을 입게되며 이러한 손실을 줄이기 위해 신뢰도를 개선하는데 투자비용이 필요하게 된다. 이러한 손실 비용과 투자 비용의 합이 신뢰도 비용(Reliability Cost:  $RC$ )이다. 본 논문에서는 배전 선로에 새로운 부하점이 추가되었을 경우 연결 가능선로의 신뢰도를 평가하여 비용 손실을 최소화하는 선로를 구성하는 것이 목적이므로 신뢰도 비용은 손실 비용만을 고려하였다. 이러한 신뢰도 비용을 평가하기 위하여 각각의 구성요소를 그림 2와 같은 3변위 모델로 표현하여 전력 전송 경로의 고장과 고장시간을 평가하였다. 또한, 수용가의 유형과 고장시간에 따른 고객 손실 함수(Customer Damage Function)는 각각의 차단시간 구간을 그림과 같이 부분선형으로 표시하여 평가할 수 있다[4].

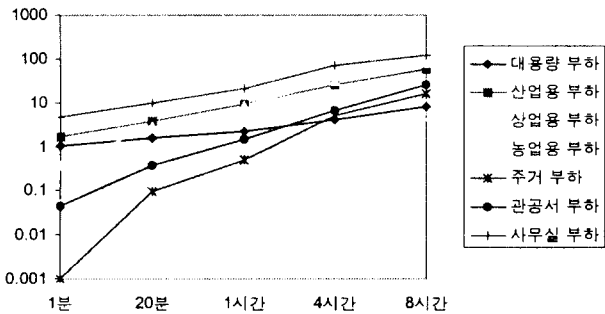


그림 5 수용가 유형별 고객손실 함수(\$/kw)  
Fig. 5 End-user customer damage function

따라서, 신뢰도 비용은 식 (5)와 같이 부하점의 부하 요구량 ( $L_i$ [kw]), 부하점에 이르는 경로의 사고율 ( $\lambda_i$ [f/year]), 고장시간에 따른 고객 손실 함수의 곱 ( $c_i(d_i)$ [\$/kw])으로 나타난다.

$$RC = \sum_{i=1}^{N_L} L_i \cdot \lambda_i \cdot c_i(d_i) \quad (5)$$

여기서  $d_i$  는 고장시간(hours)이고  $N_L$  은 공급 부하점의 수이다.

이와 같이 전체 운용 비용은 식 (4)와 (5)에서 보인 손실 비용과 신뢰도 비용의 합으로 표현될 수 있다. 전체 운용 비용을 줄이기 위해서는 전력 전송 선로의 저항성분에 의한 손실 비용과 신뢰도가 나쁜 전송 경로를 택함으로써 유발되

는 신뢰도 비용 모두를 고려하여야 한다. 최적 전력 전송 경로의 결정은 이러한 전체운용비용의 최소화로 대변될 수 있다.

### 3.2 제한조건

전력을 전송할 때에 만족시켜야 하는 제한조건으로 선로 제한용량과 일정한 범위내의 전압강하를 유지해야 한다. 기존 선로에 새로운 부하점을 추가하면 부하점까지의 경로를 포함하는 기존 선로에 흐르는 전류는 증가한다. 또한, 추가되는 부하점의 부하에 의한 전압강하는 범위내의 제한조건을 만족하지 않을 수 있다. 따라서, 최적 전력 전송 경로의 결정에 있어서 각각의 대안 경로마다 선로 제한용량과 전압강하 제한조건을 만족하는지 여부를 검토해야 한다.

또한, 산업의 정보화, 첨단화가 진행됨에 따라 수용가가 기대하는 신뢰도에 대한 요구도 높아지고 있다. 배전계통 신뢰도 안정시 기본적으로 가장 많이 쓰이는 지수는 사고율과 고장시간이다. 그러나, 이러한 지수들은 계통 전체의 수행도를 표현하지 못하는 결점이 있으므로, 참고 문헌 [8]에 나타난 전력 회사에서 가장 많이 쓰이는 전체 시스템 신뢰도 지수의 조사 결과에 따라 본 논문에서도 식 (6), (7), (8), (9)와 같이 계통 평균 고장빈도 지수 (SAIFI : System Average Interruption Frequency Index), 계통 평균 고장시간 지수 (SAIDI : System Average Interruption Duration Index), 고객 평균 고장시간 지수 (CAIDI : Customer Average Interruption Duration Index), 평균 공급유용성 지수 (ASAI : Average Service Availability Index)의 4가지 계통 전체 시스템 신뢰도 지수 제한조건을 고려하였다.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \leq SAIFI_{max} \quad (6)$$

$$SAIDI = \frac{\sum \lambda_i d_i N_i}{\sum N_i} \leq SAIDI_{max} \quad (7)$$

$$CAIDI = \frac{\sum \lambda_i d_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \leq CAIDI_{max} \quad (8)$$

$$ASAI = \frac{\sum N_i \times 8760 - \sum \lambda_i d_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \geq ASAI_{min} \quad (9)$$

여기서  $N_i$  는 부하점  $i$  의 수용가 수이다.

### 3.3 전체운용비용 최소화 알고리즘

전송 손실 최소화 알고리즘은 전력 조류를 계산하고, 선로 용량 및 전압강하 제한조건 만족여부를 검토한 후 전송 손실 비용을 계산하고 최종적으로 최소 전송 손실 경로를 저장하는 순서의 알고리즘이며, 신뢰도 지수를 고려한 전체 운용 비용 최소화 알고리즘은 전송 손실 최소화 알고리즘에

덧붙여, 고장을 및 고장 시간을 계산하고 전체 시스템 신뢰도 지수 제한조건 만족 여부를 검토하고 나서, 신뢰도 비용 및 전체 운용 비용을 계산하고 최소 전체 운용 비용 경로를 저장하는 순서의 알고리즘으로써 그림 6과 같다

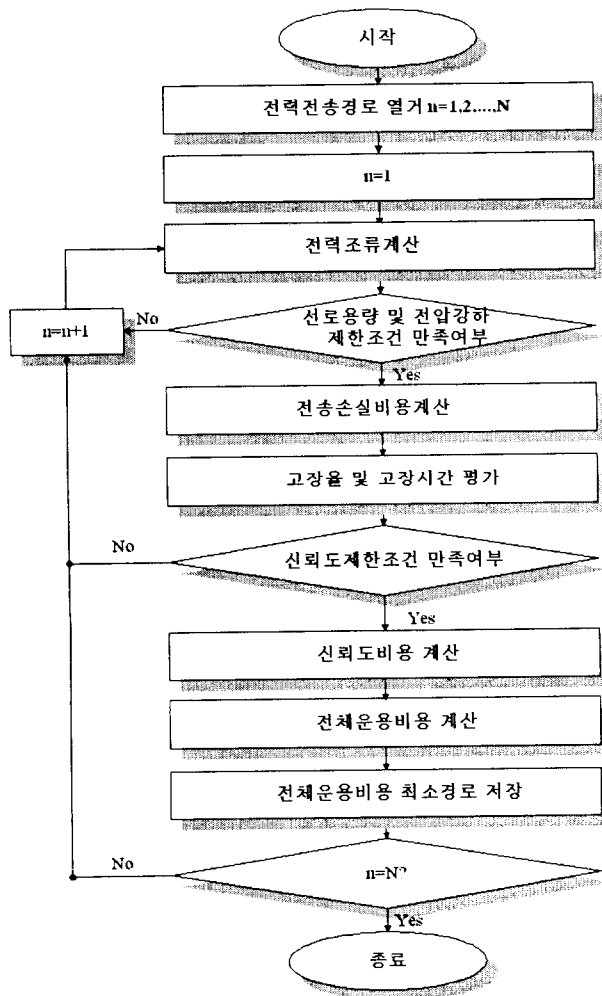


그림 6 최적전력전송경로 결정 알고리즘  
Fig. 6 Optimal routing algorithm of distribution network

#### 4. 사례연구 및 결과

##### 4.1 10모선 배전계통

본 논문에서는 13개의 선로구분과 10개의 부하점을 갖는 배전계통을 사용하였으며, 선로의 임피던스 데이터는  $(0.391+j0.106)[\text{ohms/km}]$ 이고 최대 허용전류는  $194[\text{A}]$ , 전압 제한 조건은 5%, 연간 단위전력당 전력 생산비용  $k_e$ 는  $168[\text{\$/kw/year}]$ 이다[8]. 10모선 배전계통에서 각 선로의 길이는 표 1, 부하점에서 부하요구량과 수용가 수는 표 2와 같이 나타나고, 그림 7은 이러한 선로 데이터의 계통 구성도로

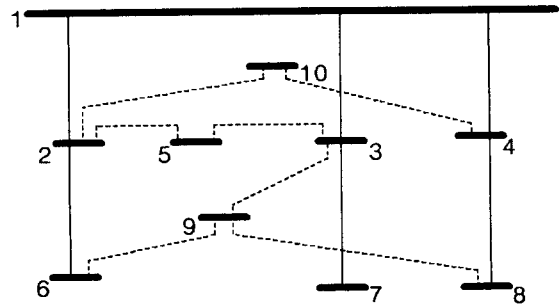


그림 7 10모선 배전계통 모델  
Fig. 7 10 Bus distribution network model

실선은 기존 계통을 나타내고 점선은 추가되는 부하점 5, 9, 10에 이르는 대안 경로를 나타낸다.

참고문헌 [6]에서 보인 전송 손실 최소화 알고리즘에 의한 경로가 최적 전력 전송 경로가 되지 않을 수도 있으므로 최적 전력 전송 경로를 결정하기 위해서는 전송 손실과 신뢰도 비용의 합, 즉, 전체 운용 비용을 최소로 하여야 하며, 부하점의 고장과 고장시간, 신뢰도 비용을 평가하기 위하여 표 3을 사용하였다[8]. 여기에서 배전계통은 배전변압기 9개, 차단기 27대, 모선 10개, 선로 9개로 구성하였다.

또한, 본 논문에 쓰인 배전계통에서의 수용가 유형에 따른 공급지장시간에 따른 고객 손실 함수는 표 4와 같다.

표 1 10모선 배전계통의 선로 데이터  
Table 1 Line data of 10 bus distribution network

선로 구간	1-2	1-3	1-4	3-5	2-6	3-7	4-8	8-9	2-10	2-5	3-9	6-9	4-10
길이	2.0	2.0	4.0	3.0	3.0	3.5	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0	3.0

표 2 10모선 배전계통의 부하점 데이터  
Table 2 Load point data of 10 bus distribution network

부하점	2	3	4	5	6	7	8	9	10
유효전력 [MW]	0.6	0.5	0.1	0.6	1.3	1.3	0.1	0.8	0.3
무효전력 [MVAR]	0.4	0.3	0.09	0.4	1.1	1.0	0.09	0.6	0.1
수용가 수	200	130	30	200	390	390	30	1	1

표 3 계통구성요소별 신뢰도 데이터  
Table 3 Reliability data of system components

구분	수동사고율 (f/year)	능동사고율 (f/year)	수리시간 (hours)	스위칭시간 (hours)
배전 변압기	0.015	0.015	10	1
차단기	0.006	0.004	4	1
모선	0.001	0.001	2	1
선로	0.065	0.065	5	1

표 4 고객손실함수(\$/kw)

Table 4 Customer damage function

수용가 유형	공급지장시간				
	1 분	20 분	1 시간	4 시간	8 시간
주거 부하	0.001	0.093	0.482	4.914	15.69
대용량 부하	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
사무실 부하	4.778	9.878	21.06	68.83	119.2

표 5 신뢰도 제한조건

Table 5 Reliability indices constraints

구분	SAIFI <sub>max</sub>	SAIDI <sub>max</sub>	CAIDI <sub>max</sub>	ASAI <sub>min</sub>
신뢰도 지수	0.7	4.0	6.0	0.999

각각의 수용가 유형에 따른 최적 경로를 고려하기 위하여 5번 부하점에 주거 부하, 9번 부하점에는 대용량 부하, 특히 10번 부하점에는 신뢰도 비용 부담이 큰 사무실 부하로 각기 다른 수용가 유형을 고려하였다. 한편, 전력 전송 경로에 따른 고객의 불편을 고려하기 위한 전체 시스템 신뢰도 지수 제한조건은 표 5와 같다.

이상과 같은 배전계통에서 전송 손실을 최소로 하는 경로는 참고논문 [6]에서 제시한 바와 같이 그림 8과 같이 나타난다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 2번과 5번, 3번과 9번, 4번과 10번을 연결하는 대안 경로를 선택하였을 때 전송 손실을 최소로 한다.

이에 추가로 본 논문에서 제시한 신뢰도 비용까지 고려한 전체 운용 비용 최소화 알고리즘의 최적 전력 전송 경로는 그림 9와 같다. 최소 전송 손실 경로와는 다르게 3번과 5번, 8번과 9번, 2번과 10번을 연결하는 대안 경로를 선택하였을 때 전체 운용 비용을 최소로 한다.

계통 구성요소의 3변위 모델링에 의한 참고논문 [6]에서 결정된 최소 전송 손실 경로(LC Route)와 본 논문에서 제안한 최소 전체 운용 비용 경로(TC Route)의 부하점에 따른 고장율과 고장시간은 그림 10으로 나타난다.

그림 10에서 보이듯이, 신뢰도 비용의 결정 요인인 수용가 유형과 고장율에 있어서, 최소 전체 운용 비용 경로는 신뢰도 비용 부담이 큰 사무실 부하(10번 부하)의 고장율이 낮은 경로를 선택하였음을 알 수 있다. 한편, 참고논문 [6]의 최소 전송 손실 경로와 본 논문에서 제시한 최소 전체 운용 비용 경로의 전송 손실 비용, 신뢰도 비용, 전체 운용 비용을 표 6과 같이 비교할 수 있다.

전송 손실만을 고려하면 최소 전송 손실 경로가 가장 좋은 값을 보이지만, 신뢰도 비용을 포함한 전체 운용 비용을 고려하면 전체 운용 비용 최소 경로가 최적의 값을 가진다. 따라서, 신뢰도 지수를 고려한 전체 운용 비용을 최소화 하는 경로를 선택하였을 때 참고문헌 [6]에서 결정된 전송

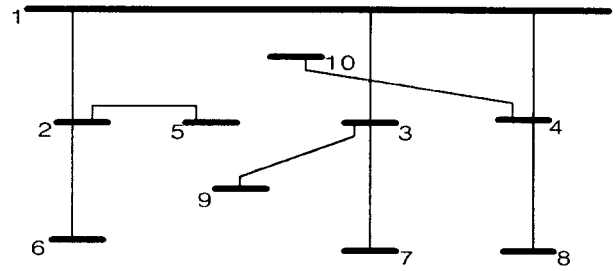


그림 8 10모선 배전계통의 최소 전송손실경로  
Fig. 8 Minimal loss route of 10 bus distribution network

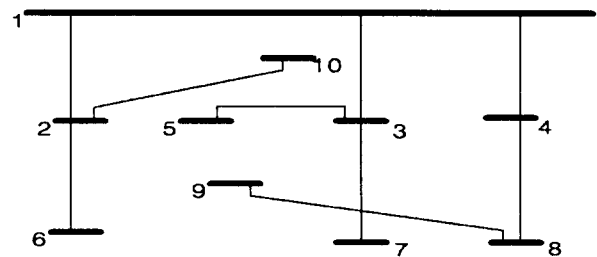
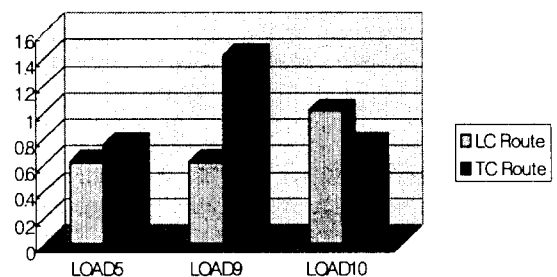
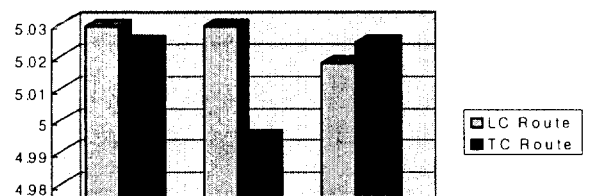


그림 9 10모선 배전계통의 최소 전체운용비용경로  
Fig. 9 Minimal total cost route of 10 bus distribution network



(a) 고장율 [f/year]  
(a) Failure Rate [f/year]



(b) 고장시간 [hours]  
(b) Failure Duration [hours]

그림 10 10모선 배전계통의 고장율과 고장시간  
Fig. 10 Failure rate and duration of 10 bus distribution network

손실을 최소로 하는 경로보다 매년 1107.10(\$)의 이익을 더 볼 수 있다.

한편, 최소 전체 운용 비용 경로의 최대 전류와 최대 전압 강하치, 신뢰도 지수는 표 7에 나와 있으며 각각의 제한조건을 만족하는지 여부를 검토하기 위해 제한의 기준값을 1로 보고, 각각을 그림 11에서 비교하였다.

그림 11에서, 최소 전체 운용 비용 경로는 전력 전송 제한 조건인 선로용량, 전압강하와, 신뢰도 제한조건인 SAIFI, SAIDI, CAIDI에서 제한값보다 낮고 공급유용성 지수인 ASAI에서는 제한값보다 높으므로 모든 제한조건을 잘 만족시키고 있다.

표 6 10모선 배전계통의 전체운용비용  
Table 6 Total cost of 10 bus distribution network

최소 전송 손실 경로				
선택경로	2-5	3-9	4-10	총 합
전송손실비용	6236.80	8910.32	887.17	16034.29
신뢰도비용	2868.25	2521.05	24786.50	30175.80
전체운용비용	46210.09(\$/year)			
최소 전체 운용 비용 경로				
선택경로	3-5	8-9	2-10	총 합
전송손실비용	6204.57	9014.05	2316.26	17534.88
신뢰도비용	3402.76	5729.89	18435.46	27568.11
전체운용비용	45102.99(\$/year)			

표 7 10모선 배전계통의 제한조건과 신뢰도 지수결과  
Table 7 Results of constraints and reliability indices of 10 bus distribution network

	최대 전류 [A]	최대 전압강하 [%]	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI
허용치	194[A]	5%	0.7	4.0	6.0	0.999
실제치	169.9[A]	4.4%	0.66	3.38	5.05	0.9996

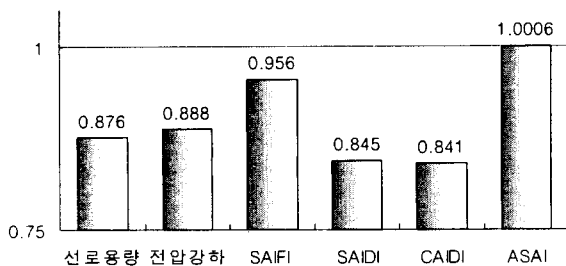


그림 11 10모선 배전계통의 제한조건  
Fig. 11 Constraints of 10 bus distribution network

#### 4.2 24모선 배전계통 모델

그림 12과 같이 선로구분이 33개이고 변전소가 3개인 24개의 부하점을 가진 확장된 배전계통에 전송 손실 및 전체 운용 비용 최소화 알고리즘을 적용해 보았다. 여기에서 사례 계통은 21개의 배전 변압기, 63개의 차단기, 24개의 모선, 21개의 선로로 구성되며, 10모선의 경우와 마찬가지로 계통 구성 요소의 3변위 모델링에 의한 사고율을 구분하였다.

그림 12에서 SYSTEM1, SYSTEM2, SYSTEM3은 각각 모선 1, 모선 11, 모선 21로부터 공급받는 계통이다. 이와 같은 배전계통에서 전송 손실만을 최소로 하는 경로는 그림 13과 같이 나타난다.

그림 13에서 SYSTEM1에서 부하점 5, 9, 10을 모두 공급하였을 때 전송 손실을 최소로 함을 알 수 있다. 한편, 본 논문에서 제시한 전체 운용 비용 최소화 알고리즘에 의한 최소 전체 운용 비용경로는 그림 14와 같다.

그림 14에서 최소 전체 운용 비용 경로는 최소 전송 손실 경로와는 다르게 SYSTEM1과 SYSTEM2에서 부하점 5, 9,

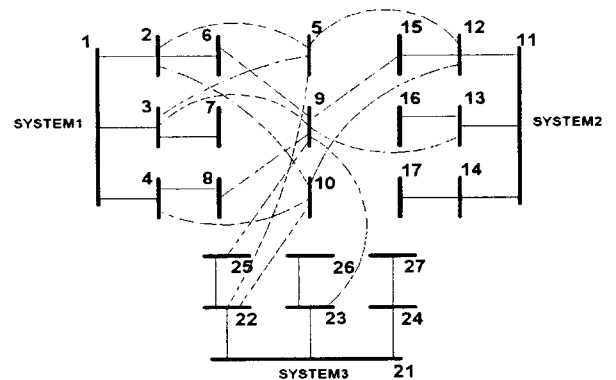


그림 12 24모선 배전계통  
Fig. 12 24 Bus distribution network

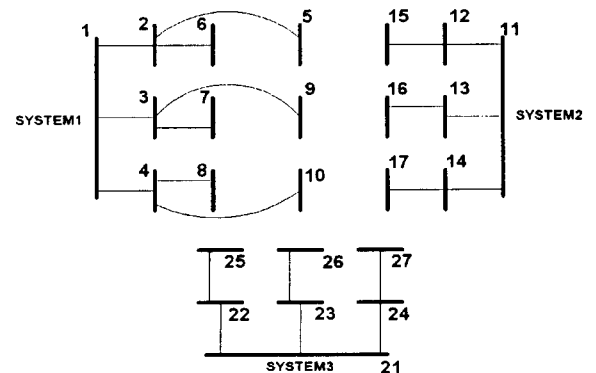


그림 13 24모선 배전계통의 최소 전송손실경로  
Fig. 13 Minimal loss route of 24 bus distribution network

10을 나누어 공급하고 있다는 것을 볼 수 있다. 최소 전송 손실 경로(LC Route)와 본 논문에서 제안한 최소 전체 운용 비용 경로(TC Route)의 부하점에 따른 고장율과 고장시간은 그림 15로 나타나며, 최소 전체 운용 비용 경로는 신뢰도 비용 부담이 큰 사무실 부하의 고장율을 낮게 할 수 있는 경로로 결정됨을 알 수 있다. 앞에서의 10모선 배전계통에서와 마찬가지로, 최소 전송 손실 경로와 본 논문에서 제시한 최소 전체 운용 비용 경로의 전송 손실 비용, 신뢰도 비용, 전체 운용 비용을 표 8로 비교할 수 있다.

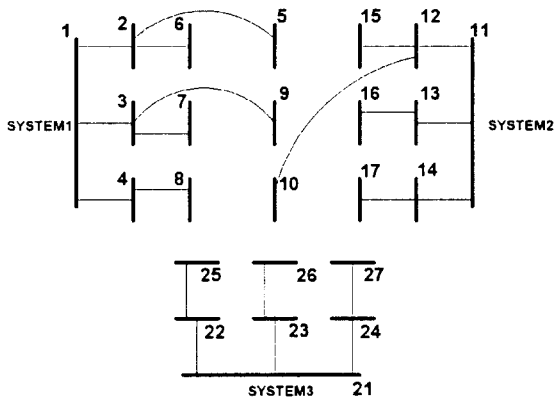
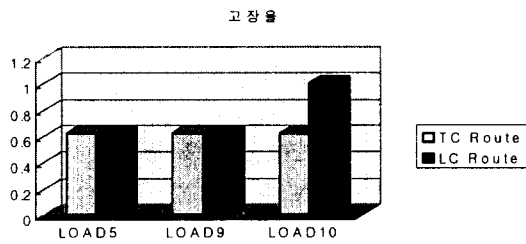
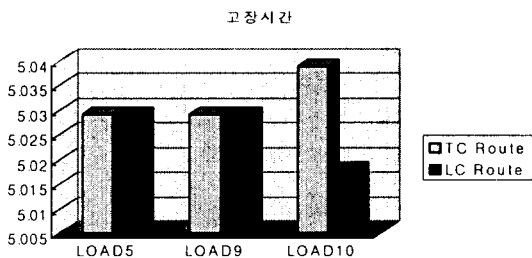


그림 14 24모선 배전계통의 최소 전체운용비용경로  
Fig. 14 Minimal total cost route of 24 bus distribution network



(a) 고장율 [f/year]  
(a) Failure Rate [f/year]



(b) 고장시간 [hours]  
(b) Failure Duration [hours]

그림 15 24모선 배전계통의 고장율 및 고장시간  
Fig. 15 Failure rate and duration of 24 bus distribution network

표 8 24모선 배전계통의 전체운용비용  
Table 8 Total cost of 24 bus distribution network

최소 전송 손실 경로				
선택경로	2-5	3-9	4-10	총 합
전송손실비용	6236.80	8910.32	887.17	16034.29
신뢰도비용	2868.25	2521.05	24786.50	30175.80
전체운용비용	46210.09(\$/year)			
최소 전체 운용 비용 경로				
선택경로	2-5	3-9	12-10	총 합
전송손실비용	6236.80	8910.32	2247.23	17394.35
신뢰도비용	2868.25	2521.05	15233.73	20623.03
전체운용비용	38017.38(\$/year)			

표 9 24모선 배전계통의 제한조건과 신뢰도 지수 결과  
Table 9 Results of constraints and reliability indices of 24 bus distribution network

	최대 전류 [A]	최대 전압강하 [%]	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI
허용치	194[A]	5%	0.7	4.0	6.0	0.999
실제치	186.0[A]	4.6%	0.66	3.36	5.0	0.9996

확장된 24모선 배전계통에서도 전송 손실 비용만을 고려하면 최소 전송 손실 경로가 더 낮은 비용으로 전력을 전송할 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제시한 신뢰도 비용을 고려하면 최소 전체 운용 비용 경로를 선택하였을 때 최소 전송 손실 비용 경로보다 매년 8192.71(\$의 이익을 더 볼 수 있으며, 이것은 10모선에서 보다 더 많은 이익임을 감안한다면 배전계통의 크기가 클수록 최소 전체 운용 비용 경로의 유용성은 더 높아진다는 것을 알 수 있다. 최소 전체 운용 비용 경로의 선로용량과 전압강하, 신뢰도 제한조건은 표 9와 그림 16에서 볼 수 있듯이 모든 제한조건을 잘 만족시키고 있음을 알 수 있다.

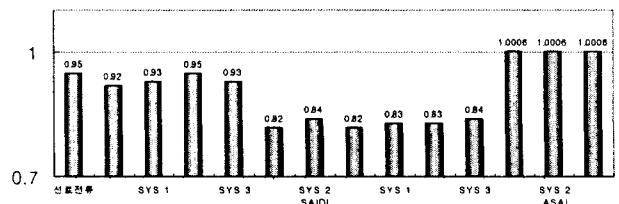


그림 16 24모선 배전계통의 제한조건  
Fig. 16 Constraints of 24 bus distribution network

5. 결론

배전계통에서 발생하는 비용에는 저항손실에 의한 전송 손실 비용과 낮은 신뢰도에 따른 높은 고장율에 의해 발생하는 신뢰도 비용의 두 가지로 요약될 수 있다. 특히, 사고 정전에 의해서 생산 차질을 유발함으로써 발생하는 신뢰도 비용은 무시할 수 없는 요소이다. 본 논문에서는 최적 전력 전송 경로를 찾기 위해 수용가 유형과 신뢰도 지수를 고려해야 한다는 것을 전체 운용 비용 측면에서 입증하였다. 즉, 전력 전송 경로에 따라 선로의 임피던스도 변화하지만 부하 점의 고장율과 고장시간도 역시 변화한다. 따라서, 전송 손실 비용만을 고려한 경로는 전송 손실은 최소로 하지만 신뢰도 비용을 크게 할 수 있고 비용 측면에서 최적의 전력 전송 경로를 제공하지 못한다. 또한, 전력 전송에는 전압강하 제한조건, 선로용량 제한조건, 전체 시스템 신뢰도 지수 제한조건과 같은 실제적인 제약조건들이 따르게 되는데 배전계통에 대해서 이러한 제약조건들을 만족하면서 전체 운용 비용을 최소로 하는 전력 전송 경로를 제시하였다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] S.Civanlar, J.J.Grainger, H.Yin, S.S.H.Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.3, No.3, pp.1217-1223, July 1988

[2] C.C.Liu, S.J.Lee, K.Vu, "Loss Minimization of Distribution Feeders : Optimality and Algorithms", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.4, No.2, pp.1281-1289, April 1989

[3] D.Shirmohammadi, H.W.Hong, "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.4, No.2, pp.1492-1498, April 1989

[4] A.Sankarakrishnan, R.Billinton, "Effective Techniques for Reliability Worth Assessment in Composite Power System Networks Using Monte Carlo Simulation", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.11, No.3, pp.1255-1261, August 1996

[5] A.Mäkinen, J.Partanen, E.Lakervi "A Practical Approach For Estimating Future Outage Costs In Power Distribution networks". *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.5, No. 1, pp.311-316. January 1990

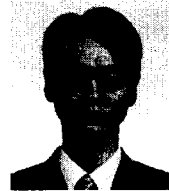
[6] R.N.Allan, R.Billinton, I.Sjarief, L.Goel, and K.S.So, "Reliability Test System For Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.6, No.2, pp.813-820, May 1991

[7] R.Billinton, J.E.Billinton, "Distribution System Reliability Indices", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, January 1989

[8] V.Glamocanin, "Optimal Loss Reduction of Distribution Networks", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.5, No.3, pp.774-782, August 1990

[9] R.Billinton, R.N.Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum Press, New York, 1996

저 자 소 개



신 동 준 (申 東 峻)

1972년 1월 28일 생. 1998년 한양대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정  
Tel : (02) 2290-0347  
E-mail : capricorn@hanimail.com



노 병 권 (盧 炳 權)

1971년 12월 4일 생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 근무

김 진 오 (金 鎭 吾)

전기학회논문지 48A권 3호 참조  
Tel : (02) 2290-0347  
E-mail : jokim@email.hanyang.ac.kr