

신뢰도지수를 고려한 배전계통시스템의 최적전력전송경로 결정

노 병 권, 김 진 오  
한양대학교 전기공학과

Optimal Routing of Distribution Networks Considering Reliability Indices

P.K. Roh, J.O. KIM  
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

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 results showed that reliability cost should be considered as well as loss reduction to achieve the optimal routing in the distribution networks.

1. 서 론

배전계통 최적전력전송경로는 전력전송선의 수송한계와 전압강하 제한조건, 그리고, 고객의 불편을 초래하지 않는 신뢰도지수 조건 내에서 손실비용과 차단비용의 합을 최소로 하여야 한다. 기존의 배전계통 최적전력전송경로는 손실비용만을 고려하여 최소손실을 가져오는 전송경로를 선택하여 전력을 전송하였다. 그러나, 손실비용 이외에도 비용최적화를 위해서는 전력전송경로에 따라 달라지는 고장율과 고장시간에 의한 차단비용을 함께 고려하여야 한다. 이러한 차단비용은 수용가의 형태 및 부하량에 따라 달라지는데, 차단비용이 높은 부하일수록 고장율과 고장시간을 줄이는 고 신뢰도 전력전송경로를 선택하여야 하고, 이러한 경로는 최적손실경로와는 다를 수도 있다. 따라서, 본 논문에서는 기존 논문의 손실최소화 모델 계통에 대해 수용가의 유형에 대한 데이터를 첨가하고, 손실비용과 차단비용을 함께 고려하여 이들의 합을 줄이는 전체비용최소화경로를 찾음으로써 비용최적화를 시도하였다. 또한, 전압강하 제한조건, 전력수송 제한조건 및 다양한 신뢰도지수 제한조건 등 실제적인 제한조건을 함께 고려하였다.

2. 손실비용

요구하는 부하량을 부하점까지 공급하기 위해서는 일정 규모의 손실비용이 발생한다. 또한, 기존 선로에 추가되는 부하점에 의한 전송손실은 추가되는 선로뿐 아니라 전력공급경로를 포함하는 기존선로에서도 발생한다. 즉, 평균부하  $S_w = P_w + jQ_w$ 인 부하점  $W$ 를 기존 선로에 추가하면 부하전압과 전송손실량이 변화하게 된다. 추가된 부하  $S_w$ 에 의해 증가하는 전력손실은 (1)식과 같이 나타난다(1).

$$APL_w = \sum_i \{ R_i [(2P_i P_w + P_w^2) + (2Q_i Q_w + Q_w^2)] / V_i^2 \} + R_w [P_w^2 + Q_w^2] / V_T^2 \quad (1)$$

- $W$  : 기존 선로에 추가되는 부하점
- $w$  : 부하점  $W$ 를 기존 선로에 이어주는 선로
- $T$  : 가지 선로  $w$ 의 송전점
- $i$  : 추가되는 부하점  $W$ 에 이르면서 지나는 각각의 선로구간
- $V_i$  : 선로구간  $i$ 의 수전단 전압

손실비용(Loss Cost:  $LC$ )을 연간비용으로 나타내면, (1)식으로부터 (2)식이 유도된다.

$$LC = \sum_i k_e \cdot APL_w \quad (2)$$

$k_e$  : 전력생산비용(\$/kw/year)

3. 신뢰도비용

신뢰도비용을 평가하기 위해서는 모든 계통의 구성요소들을 적절하게 모의해야 한다. 본 논문에서는 각각의 구성요소를 그림 1과 같은 3변위 모델로 표현하였다.

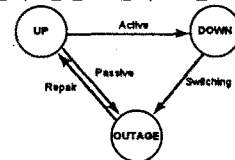


그림 1. 3변위 모델

전력공급이 차단되면 수용가는 각각의 수용가 유형, 요구부하량 및 전력전송경로에 따른 고장율과 고장시간에 따라 일정규모의 손실을 입게된다. 이러한 비용을 신뢰도비용(Reliability Cost:  $RC$ )이라고 하며 (3)식과 같이 계산할 수 있다.

$$RC = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \lambda_i \cdot c_i(d_i) \quad (3)$$

- $L_i$  : 부하점의 부하요구량(kw)
- $\lambda_i$  : 부하점에 이르는 경로의 사고율(f/year)
- $d_i$  : 고장시간(hours)
- $N$  : 공급 부하점의 수
- $c_i(d_i)$  : 고장시간에 따른 차단비용(\$/kw)

4. 전체운용비용

전체운용비용은 손실비용과 신뢰도비용의 합으로 표현될 수 있다. 전체운용비용을 줄이기 위해서는 전력전송 선로의 저항성분에 의한 손실과, 신뢰도가 나쁜 전송경로를 택함으로써 유발되는 신뢰도비용 모두를 고려하여야 한다. 최적전력전송경로는 이러한 전체운용비용의 최

소화로 대변될 수 있다. 따라서, 전체운용비용은 식(2)와 (3)에서 보인 LC와 RC의 합으로 나타난다.

### 5. 제한조건

#### 5.1 전력전송 제한조건

전력전송시 만족시켜야 하는 제한조건으로 선로제한용량과 일정한 범위내의 전압강하를 유지해야한다. 기존선로에 새로운 부하점을 추가하면 부하점까지 경로를 포함하는 기존 선로에 흐르는 전류는 증가한다. 또한, 추가되는 부하점의 부하에 의한 전압강하는 범위내의 제한조건을 만족하지 않을 수 있다. 따라서, 최적전력전송경로가 전력전송제한조건을 만족시키기 위해서, 각각의 대안 경로마다 선로제한용량과 전압강하 제한조건을 만족하는지 여부를 검토해야 한다.

#### 5.2 신뢰도 제한조건

배전계통 신뢰도지수로 기본적으로 가장 많이 쓰이는 신뢰도 지수는 사고율, 고장시간, 연중 고장시간이다. 그러나, 이러한 지수들은 계통전체의 수행도를 표현하지 못하는 결점이 있다. 계통에 대한 신뢰도문제의 심각성과 중요성을 고려하기 위하여 세 가지 신뢰도 지수에 덧붙여, 부가적인 지수들이 쓰인다. 이러한 계통전체시스템의 신뢰도지수를 최적전력전송경로는 만족해야 한다. 이러한 계통전체시스템 신뢰도지수 제한조건은 식 (4), (5), (6), (7)과 같이 나타난다.

$$SAIFI(\text{System Average Interruption Frequency Index})(\text{Interruptions/Customer}) = (\text{총 수용가 정전회수})/(\text{총 수용가수}) = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \leq SAIFI_{\max} \quad (4)$$

$$SAIDI(\text{System Average Interruption Duration Index})(\text{Hours/Customer}) = (\text{총 수용가 정전시간})/(\text{총 수용가수}) = \frac{\sum \lambda_i d_i N_i}{\sum N_i} \leq SAIDI_{\max} \quad (5)$$

$$CAIDI(\text{Customer Average Interruption Duration Index})(\text{Hours/Customer Interruption}) = (\text{총 수용가 정전시간})/(\text{총 수용가 정전회수}) = \frac{\sum \lambda_i d_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \leq CAIDI_{\max} \quad (6)$$

$$ASAI(\text{Average Service Availability Index}) = (\text{수용가 유용시간})/(\text{수용가 수요시간}) = \frac{\sum N_i \times 8760 - \sum \lambda_i d_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \geq ASAI_{\min} \quad (7)$$

$N_i$ : 부하점  $i$ 의 수용가수

### 6. 사례연구

최적전력전송경로를 찾는 방법을 보이기 위하여 그림 2와 같은 배전계통 모델 [1]을 제시하였다. 전력손실과 신뢰도비용을 최소화 하는 전력전송경로 최적화는 13개의 선로구분과 10개의 부하점에서 수행된다. 선로의 임피던스는  $(0.391 + j0.106)$ (ohms/km)이고, 최대허용 전류는 194[A]이다. 그리고, 사례연구에서 전압제한조건은 5%이다.

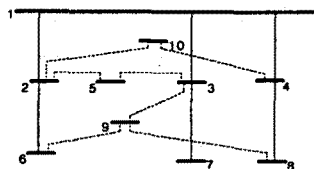


그림 2. 사례 배전계통모델

배전계통모델에 사용된 데이터는 표 2와 같이 나타난다.

표 2. 사례 배전계통모델 선로데이터

구 간	길 이 (km)	부 하 (MW) (MVAR)		수용가수
1-2	2.0	0.60	0.40	200
1-3	2.0	0.50	0.30	130
1-4	4.0	0.10	0.09	30
3-5	3.0	0.60	0.40	200
2-6	3.0	1.30	1.10	390
3-7	3.5	1.30	1.00	390
4-8	3.0	0.10	0.09	30
8-9	3.0	0.80	0.60	1
2-10	3.0	0.30	0.10	1
2-5	2.0			
3-9	2.0			
6-9	2.0			
4-10	3.0			

#### 6.1 전송손실최소화경로

전력생산비용  $k_e$ 가 168(\$/kw/year)[2]로 주어졌을 때, 전송손실을 최소로 하는 경로를 식(2)에 의해 구하면, 그림 3과 같이 구성된다.

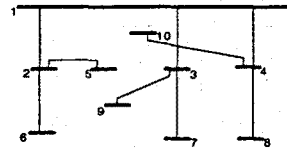


그림 3. 최소전력손실경로

그림 3에서 보인 전송손실최소화경로의 최대선로전류는 186[A] ( $\leq 194$ [A])이고, 전압강하 최대치는 4.64% ( $\leq 5\%$ )이므로, 전력전송제한조건을 모두 만족한다. 이때, 전송손실최소화 경로의 손실비용은 표 3과 같이 나타난다.

표 3. 최소전송손실비용증가

추가선로	2-5	3-9	4-10	총 합
증대손실비용 (\$/year)	6236.80	887.17	8910.32	16034.29

#### 6.2 전체운용비용 최소화 알고리즘

전체운용비용 최소화 알고리즘은 그림 4와 같이 나타난다.

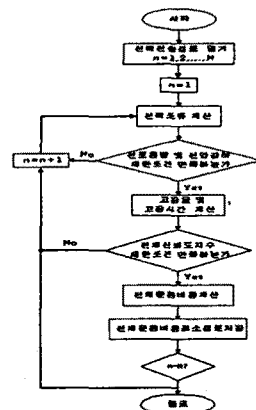


그림 4. 전체운용비용 최소화 알고리즘

신뢰도비용을 고려하기 위해서 표 4와 같은 신뢰도데이터[3]를 포함하였다.

표 4. 계통구성요소별 신뢰도 데이터

구분	수동사고율 (f/year)	능동사고율 (f/year)	수리시간 (hours)	스위칭시간 (hours)
배전변압기	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

또한, 수용가 유형별 차단시간에 따른 신뢰도비용은 표 5와 같다[4].

표 5. 수용가 유형별 신뢰도비용(\$/kw)

수용가 유형	1 분	20 분	1 시간	4 시간	8 시간
주거부하	0.001	0.093	0.482	4.914	15.69
대용량부하	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
사무실부하	4.778	9.878	21.06	68.83	119.2

표 2에서 제시한 모델에 수용가 유형 데이터를 첨가한다. 즉, 5번 부하점의 수용가 유형은 주거부하이고, 9번 부하점의 수용가 유형은 대용량부하이고, 10번 부하점의 수용가 유형은 사무실부하라고 한다. 또한, 시스템 전체의 수행도에 대한 표 6과 같은 신뢰도 제한조건을 갖는다.

표 6. 신뢰도 제한조건

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

전체운용비용 최소화 알고리즘에 의한 경로는 그림 5와 같다.

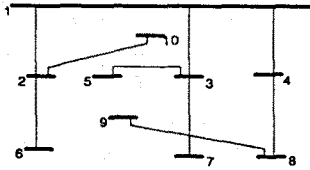


그림 5. 최소전체운용비용경로

계통구성요소를 포함한 전체운용비용 최소화 경로는 그림 6과 같다.

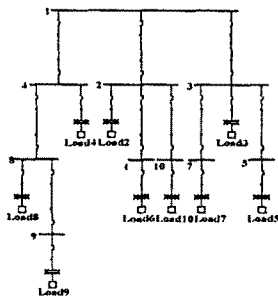


그림 6. 계통구성요소를 포함한 최소전체운용비용경로

그림 5와 같은 최소전체운용비용경로의 최대선로전류는 170(A) ( $\leq 194(A)$ )이고, 전압강하 최대치는 4.44% ( $\leq 5\%$ )이므로, 전력전송제한조건을 모두 만족한다. 그리고, 최소전체운용비용경로의 손실비용은 표 7과 같이 나타난다.

표 7. 전송손실비용증가

추가선로	2-5	3-9	4-10	총 합
증대손실비용 (\$/year)	6204.57	9014.05	2316.26	17534.88

최소전체운용비용경로의 고장율, 고장시간, 연간 신뢰도 비용은 표 8과 같이 나타난다.

표 8. 최소전체운용비용경로의 신뢰도 비용

부하점	고장율	고장시간	신뢰도비용 (\$/year)	총신뢰도비용 (\$/year)
부하점5	0.751918	5.024132	3402.76	27568.11
부하점9	1.423897	4.994488	5729.89	
부하점10	0.751918	5.024132	18435.46	

최소전체운용비용경로의 전체시스템 신뢰도 지수는 표 9와 같이 나타난다.

표 9. 최소전체운용비용경로의 신뢰도지수

구분	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI
신뢰도지수	0.669637	3.382440	5.051148	0.999613

최소전송손실모델과 최소전체운용비용모델의 전체운용비용을 비교하면, 표 10과 같다.

표 10. 전체운용비용

구분	전송손실비용 증가(\$/year)	신뢰도비용 (\$/year)	전체운용비용 증가(\$/year)
전송손실모델	16034.29	30175.80	46210.09
전체운용비용모델	17534.88	27568.11	45102.99

두 모델 모두가 주어진 제한조건들을 모두 만족하고 있으나, 최소손실비용모델의 전체운용비용증가량은 46210.09(\$/year)인 반면에, 최소전체운용비용모델의 전체운용비용증가량은 45102.99(\$/year)이다. 최소전체운용비용모델에 의한 경로를 선택하였을 때, 최소전송손실모델에 의한 경로보다 매년 1107.10(\$)의 이익을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 최적전력전송경로를 찾기 위해 신뢰도지수를 고려해야 한다는 것을 전체운용비용 측면에서 입증하였다. 즉, 전력전송경로에 따라 선로의 임피던스도 변화하지만, 부하점의 고장율과 고장시간도 역시 변화한다. 따라서, 전송손실비용만을 고려한 경로는 전송손실은 최소로 하지만, 신뢰도비용을 크게 할 수 있고, 비용 측면에서 최적의 전력전송경로를 제공하지 못한다. 또한, 전력전송에는 전압강하 제한조건, 선로용량 제한조건, 전체 시스템 신뢰도지수 제한조건과 같은 실제적인 제약조건들이 따르게 되는데, 모델계통에 대해서 이러한 제약조건들을 만족하면서 전체운용비용을 최소로 하는 전력전송경로를 제시하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] V. Glamocanin, "Optimal Loss Reduction of Distribution Networks", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.5, No.3, pp.774-782, August 1990
- [2] S. Jonnavithula, and R. Billinton, "Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.11, No.4, pp.1935-1940, October 1996
- [3] 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
- [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