

# 서비스우선순위를 고려한 긴급정전복구 알고리즘

송길영\* 소민호\* 정민화\* 남궁재용\*

\* : 고려대학교

## Emergency Service Restoration Algorithm Considering Service Rank in Distribution System

Kil-Yeong, Song\* Min-Ho, So\* Min-Hwa, Jeong\* Jae-yong, Namkung\*

\* : Korea University

### ABSTRACT

This paper proposes the algorithm to solve emergency service restoration problems using efficient reconfiguration method in distribution system. In this algorithm, we try to avoid the blackout of important loads by considering service rank. It is possible to reconfigure the system by using fuzzy inference results in which was reflected the expected distribution power, line capacity and service rank. A 27-bus, 32-branch model system is used to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

### 1. 서론

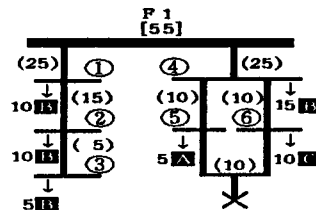
수용가에 직접 전기를 공급하는 배전계통은, 도시의 재개발 및 신도시의 건설 등으로 인해 더욱 복잡해지고 있다. 이에 따라 공급신뢰도를 향상시키기 위한 2차 계통에서의 사고 후 긴급 정전복구문제에 대한 중요성이 차츰 부각되고 있다. 한편, 대규모의 병원이나 군시설, 기간산업 등과 관련된 부하로의 공급신뢰도 확보의 필요성이 점차 증가하고 있다.<sup>[1,2,3]</sup>

정전구간을 복구하기 위한 알고리즘을 1980년에 Castro 등이 처음으로 제시하였으며,<sup>[4]</sup> 그 얼마 뒤 Ross 등이 탐색법을 이용한 프로그램을 제안하였다.<sup>[5]</sup> 그리고 근래에는 국소브랜치 교환법과 점중최대조류법(GMP법) 등이 제안되었다.<sup>[6]</sup> 그러나 이러한 방법들은 반복계산을 행하므로 시간이 많이 걸리는 등의 단점이 있었다. 한편 최근에는 퍼지추론을 적용하여 정전구간의 각 부하모선이 어느 피더로부터 전력을 공급받는 것이 타당한가를 나타내는 공급타당성지표를 계산하여 사고점 부근의 부하용량 패턴을 결정하는 수법이 제안되었다.<sup>[7]</sup> 여기에서는 해의 근거가 되는 지표를 이용하고 있기 때문에 최적해에 도달하는 시간이 상당히 단축되었다. 그러나 이 방법은 정전구간에 직접 연결된 피더 위주로 정전복구가 행해졌으며 선로용량제약이 고려되지 않았기 때문에 실제계에 적용하는 데에는 문제가 있었다.

본 논문에서는 정전구간에 직접 연결된 피더 뿐만 아니라 인접 피더의 여유용량도 활용하여 계통전체의 여유전력의 이용이 효율적으로 이루어지도록 진술한 논문의 내용을 수정·확장한 알고리즘을 소개한다. 제안한 알고리즘에서는 선로용량도 고려되도록 하였으며, 각 부하의 중요도에 따라 서비스우선순위를 정하고 이를 계산과정에 반영하여 중요한 부하가 정전되는 상황을 가급적 피하도록 하였다.<sup>[8]</sup> 특히 중요한 부하가 특정 피더로부터 공급이 가능한데도 멀리 떨어져 있어서 정전이 된 경우는 서비스우선순위의 고려로 그 부하에 대한 공급타당성지표를 높일 수 있었다. 제안한 방법을 27모선 32선로 모델계통에 적용하여 그 유효성을 살펴보고자 한다.

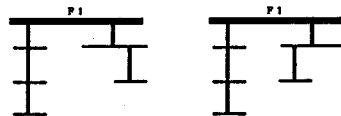
### 2. 서비스우선순위 고려의 중요성

다음 그림 1(a)와 같은 사고시 계통에 대해 종래의 방법<sup>[7]</sup>과 본 논문에서 제시한 서비스우선순위를 고려한 방법으로 긴급정전 복구를 행한 결과를 각각 그림 1(b)와 그림 1(c)에 나타내었다. 종래의 방법에서는 원래 선로의 용량이 고려되지 않았었지만, 본 방법과 비교하기 위하여 선로용량을 계산과정에 추가하였다.



■ : 매우 중요한 부하, ■ : 중요한 부하, ■ : 일반적인 부하  
( ) 안은 선로용량, 화살표 하단은 부하량을 표시

(a) 사고시 계통도



(b) 종래 방법의 결과 (c) 제안한 방법의 결과

그림 1 서비스우선순위의 설명을 위한 계통도

이 그림 1의 결과에서 알 수 있듯이 종래의 방법에서는 단순히 부하량만을 고려하였기 때문에 서비스우선순위에서 중요하다고 본 ⑤번 모선의 부하가 정전되었지만, 제안한 방법으로는 총정전 복구량은 다소 줄어들더라도 서비스우선순위에 따라 중요하다고 본 부하가 복구되었다. 이와 같이 정전복구과정에서 서비스우선순위를 고려함으로써 중요부하의 공급신뢰도를 향상시킬 수 있었다.

### 3. 서비스우선순위를 고려한 긴급정전복구 알고리즘

본 논문에서는 계통사고시 서비스우선순위가 높은 부하의 공급신뢰도를 향상시키면서, 선로용량이 고려되며 배전계통의 효율적인 선로접속변경이 가능하도록 문헌[7]의 방법을 수정·확장하여 알고리즘을 구성하였다. 이 알고리즘은 계통사고시 각 피더에서

부하상태에 따라 1차근접선로로 배분되어야 한다고 예상되는 전력으로 정의된 전력배분기대량을 구하는 데서 시작한다. 여기서 1차근접선로란 피더로부터 직접 전력이 공급되는 선로를 말하는데, 피더에서의 모선 경우수에 따라 각 선로를 1차, 2차, ..., n차 근접선로로 정의하였다. 그리고 이 전력배분기대량과 1차근접선로의 용량을 조건부 변수로 삼아 퍼지추론을 해서 각 피더에 연결된 1차근접선로로의 공급전력을 결정하였다. 다음 이를 이용하여 각 부하모선이 어느 피더로부터 전력을 공급받는 것이 타당한가를 나타내는 공급타당성지표를 산출해 내어 정전량을 최소화 하는 방사상계통 조합을 1차로 구성하였다.

이 때 만약 정전된 부하가 발생한다면 서비스우선순위에서 매우 중요하다고 판단된 부하의 공급신뢰도를 향상시키기 위하여 퍼지추론의 조건부변수에 서비스우선순위를 추가하여 위 과정을 반복하였다. 이렇게 함으로써 서비스우선순위가 고려된 최적 계통 조합을 구성하였다.

### 3.1 전력배분기대량의 계산 및 퍼지추론의 적용<sup>[9]</sup>

배전계통에서는 사고발생시 정전구간과 연관된 1차근접선로들의 전력배분기대량이 크게 변하게 되는데, 이 값은 피더에서의 공급전력을 배분하는 중요한 지표가 된다. 이는 아래 식 (1)처럼 계산한다. 이 때 피더는 정전구간에 직접 연결된 피더 뿐만 아니라 인접피더까지도 고려함으로써 계통전체의 여유전력의 이용이 효율적으로 이루어지도록 한다.

$$W_r = \sum_i \frac{L_{ir}}{N_{ir}} \quad \text{단, } \sum_i L_{ir} \leq P_{rk} \leq BC_r \quad (1)$$

단,  $W_r$  : 1차근접선로의 선로군 r의 전력배분기대량

$L_{ir}$  : 부하모선 ①의 부하량

$N_{ir}$  : 선로용량의 제약을 만족하며 모선 ①에 공급가능한 피더수

$P_{rk}$  : 피더  $F_k$ 로부터 선로군 r로의 공급전력

$BC_r$  : 선로군 r로의 1차근접선로의 용량

위의 식 (1)에서 우변을 공급가능한 피더수  $N_{ir}$ 로 나누었는데, 그 이유는, 부하모선이 여러 피더로부터 전력을 공급받을 수 있는 경우에는 그만큼 전력배분기대량을 낮추어, 공급전력을 적절하게 배분하기 위해서이다.

이렇게 구한 전력배분기대량과 1차근접선로의 용량을 변수로 하여 퍼지추론을 함으로써 부하상태에 따라 피더에서 각 1차근접선로군으로 배분할 공급전력을 구한다. 여기서 서비스우선순위를 바로 계산과정에 넣지 않은 이유는, 대개의 정전사고시 완전한 정전복구가 가능하므로 서비스우선순위에 따른 각 부하의 중요도를 고려할 필요가 없기 때문이다. 따라서 정전복구가 완전히 이루어질 수 없는 경우에만 서비스우선순위를 고려하도록 단계를 나눔으로써 계산소요시간이 단축된다.

추론규칙은 다음과 같이 설정하였다.

규칙 1 : IF 전력배분기대량이 작고 1차근접선로의 용량이 작으면,  
THEN 공급전력은 아주 작게 한다.

⋮

규칙 9 : IF 전력배분기대량이 크고 1차근접선로의 용량이 크면,  
THEN 공급전력은 아주 크게 한다.

위의 추론규칙에서, 전력배분기대량의 멤버십 함수를  $\mu_A(x)$ , 1차근접구간의 용량의 멤버십 함수를  $\mu_B(y)$ 로 나타내고, 공급전력비율의 멤버십 함수를  $\mu_C(z)$ 라고 하면, 각 규칙의 퍼지관계  $R_i$ 는 Mamdani의 변환공식에 의해 다음 식 (2)와 같이 구해진다.<sup>[9]</sup>

$$\mu_{R_i}(x, y, z) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_C(z) \quad (2)$$

단,  $i$  : 추론규칙의 수 ( $i = 1, \dots, 9$ )

각각의 규칙에 대해 퍼지관계  $R_i$ 를 작성한 뒤, 다음의 연산을 행하여 최종적인 퍼지관계  $R$ 을 얻는다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_9 = \bigcup_{i=1}^9 R_i \quad (3)$$

식 (3)의 퍼지관계와 다음 식 (4)의 추론의 합성규칙을 이용하여, 전력배분기대량과 1차근접선로용량의 어떤 확정치의 퍼지집합  $A'$  및  $B'$ 에 대해, 추론결과와 퍼지집합  $C'$ 를 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$C' = B' \cdot (A' \cdot R) \quad (4)$$

$$\mu_{C'}(x, y) = \max_y \{ \mu_{B'}(y) \wedge \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y, z)] \} \quad (5)$$

이때의 추론결과는 퍼지집합으로 얻어지므로, 다음 식 (6)과 같이 비퍼지화 과정에 의해서 확정치인 각 1차근접선로로의 공급전력비율을 구할 수 있다.

$$P_{rk}' = \frac{\sum_{j=1}^J \mu_{C'}(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^J \mu_{C'}(z_j)} \quad (6)$$

단,  $P_{rk}'$  : 피더  $F_k$ 로부터 구간군 r로의 공급전력

$t$  : 퍼지집합  $Z_j$ 에 정의된 언어적 LABEL의 갯수

하나의 피더에는 여러 개의 1차근접선로가 있으므로, 각 1차근접선로로의 공급전력은 다음 식 (7)과 같이 계산한다.

$$P_{rk} = F_k \cdot \frac{P_{rk}'}{\sum_r P_{rk}'} \quad (7)$$

단,  $F_k$  : 피더 k의 용량 ( $= \sum_r P_{rk}$ )

각 부하모선에 대한 피더의 공급타당성지표를 구하기 위해 공급전력  $P_{ik}$ 를 계산한 후 다음 식 (8)을 이용한다.

$$A_{ik} = P_{ik} / P_{\max} \quad (8)$$

단,  $P_{\max}$  : 1차근접선로로의 최대공급가능량

### 3.2 제약조건의 검토를 통한 계통의 재구성

본 논문에서는 피더용량제약, 방사상 운전제약, 그리고 선로용량제약을 고려하였다.

피더용량제약은 각 피더가 담당하는 부하량이 피더용량을 넘지 않는 것을 말한다. 이를 위해, 각 부하모선의 공급타당성지표 중 가장 큰 값을 가진 피더를 선택하고, 피더의 조합  $C_k$ 를 구성한 뒤, 각 조합의 부하량을 계산한다. 그리고, 각 피더의 용량과 그 피더가 담당해야 할 부하량을 비교해서 과부하인가를 체크하는 데, 이때 과부하이면, 지표치가 작은 순으로 부하를 여유가 있는 인접피더로 절제한다.

다음에는 방사상 운전제약을 체크한다. 배전계통은 보호기기의 효과적인 협조를 위해서 방사상으로 운전하는 것이 통례이기 때문에, 위에서 구성한 각 피더조합사이를 연결하고 있는 선로를 보목으로 간주하고 이를 개방한다.

끝으로 선로용량제약은 공급타당성지표를 계산하는 과정에서 미리 고려되도록 하였다.

### 3.3 서비스우선순위의 고려

앞에서 설명한 방법으로 배전계통의 공급지장이 완전히 해소되지 못한 경우, 다음과 같이 서비스우선순위를 고려한 알고리즘을 추가하여 서비스우선순위상에서 중요시되는 부하의 공급신뢰도를 높일도록 하였다.

- A : 총정전복구량이 줄어들더라도 반드시 복구되어야 하는 중요한 부하  
 B : 가급적 복구되어야 할 중요한 부하  
 C : 일반적인 부하

위에서 행한 서비스우선순위의 분류와 그 분류에 따른 지수선정은 전문가의 경험과 실제의 계통상황에 따라 달라질 수 있다. 이 서비스우선순위를 피지추론의 조건변수로 추가하여 각 모선부하에 대해 새로이 공급타당성지표를 산출하여 계통을 재구성하였다. 서비스우선순위를 고려하기 위하여, 먼저 추론규칙을 다음과 같이 27개로 확장하였다.

규칙 1 : IF 전력배분기대량이 작고 1차근접선로의 용량이 작고 서비스우선순위가 낮으면,  
 THEN 공급전력은 아주 작게 한다.

규칙27 : IF 전력배분기대량이 크고 1차근접선로의 용량이 크고 서비스우선순위가 높으면,  
 THEN 공급전력은 아주 크게 한다.

원래 추론규칙에 서비스우선순위에 대한 멤버십 함수  $\mu_D(d)$ 를 첨가하면, 각 규칙의 피지관계  $R_i$ 는 다음 식 (9)와 같이 구해진다.<sup>[6]</sup>

$$\mu_{R_i}(x, y, d, z) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_D(d) \wedge \mu_C(z) \quad (9)$$

단,  $i$  : 추론규칙의 수 ( $i = 1, \dots, 27$ )

각각의 규칙에 대해 피지관계  $R_i$ 를 작성한 뒤, 다음의 연산을 행하여 최종적인 피지관계  $R$ 을 얻는다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_{27} = \bigcup_{i=1}^{27} R_i \quad (10)$$

식 (10)의 피지관계와 다음 식 (11)의 추론의 합성규칙을 이용하면, 서비스우선위의 어떤 확정치의 피지집합  $D'$ 를 추가한 추론결과의 피지집합  $C'$ 를 식 (12)와 같이 얻을 수 있다.

$$C' = B' \cdot (A' \cdot (D' \cdot R)) \quad (11)$$

$$\mu_{C'}(x, y, d) = \max_y [\mu_{B'}(y) \wedge \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \max_d [\mu_{D'}(d) \wedge \mu_R(x, y, d, z)]]] \quad (12)$$

이때의 추론결과로 얻어진 피지집합을 식 (6)~(8)에 이용함으로써 새로이 공급타당성지표를 산출하여 계통을 재구성한다. 이렇게 서비스우선순위를 고려한 피지추론의 결과로 구해진 2차 조합에 의한 계통은, 서비스우선순위상에서 중요하다고 분류된 부하의 정전을 가급적 방지하도록 구성되었으므로 다소 정전복구량이 줄어들었다더라도 이 조합을 선택한다.

한편, 2차 조합의 계통에서의 정전부하가 앞서 구한 1차 조합의 정전부하를 포함하면서 공급지장량이 더 커진 경우가 발생할 수도 있는데 이런 경우는 서비스우선순위의 고려가 적절하게 안된 것으로 그대로 1차 조합의 결과를 선택한다.

### 3.4 전체 흐름도

그림 2는 지금까지 설명한 서비스우선순위를 고려한 긴급정전 복구 알고리즘을 나타낸다.

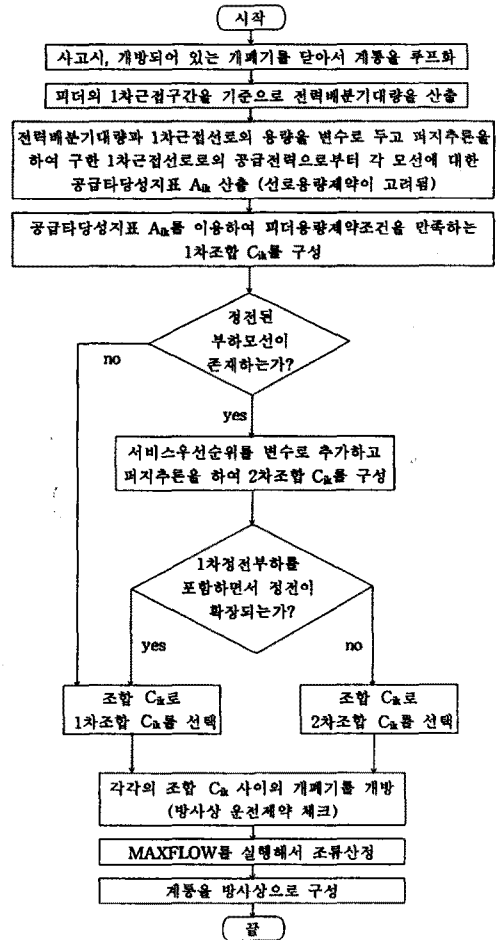


그림 2 서비스우선순위를 고려한 긴급정전복구 알고리즘

### 4. 사례연구

그림 3에 본 논문에서 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위한 27모선, 32선로의 모델계통을 나타내었다. 계통을 방사상으로 구성하기 위하여 개폐기를 개방한 선로를 점선으로 나타내었는데 이로 인해 각 피더는 계통을 지역 I, II, III로 나누어 담당한다.

먼저 서비스우선순위를 고려한 본 알고리즘을 설명하기 위하여 ③번 모선과 ②번 모선 사이에서 발생한 선로사고의 경우에 대해, 선로용량제약 등을 고려하여 수정·보완한 종래의 방법<sup>[7]</sup>과 제안한 방법의 공급타당성 지표를 표 1에 보인다. 종래의 방법에서는 단순히 정전량 최소가 목적이었으므로 ②번 모선에 정전이 발생하였으나 제안한 방법은 서비스우선순위를 고려함으로써 정전량은 다소 희생되더라도 ②번 모선이 정전됨 서비스우선순위상에서 중요하다고 본 ②번 모선부하의 정전을 복구할 수 있었다.

지역 I

지역 II

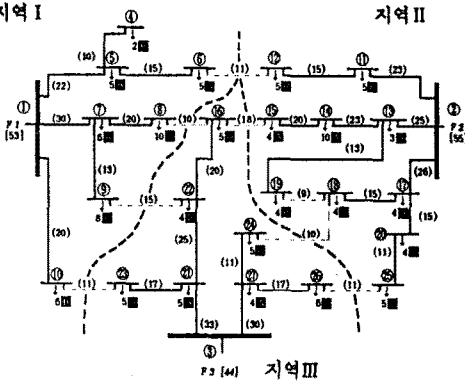


그림 3 27모선 32선로 모델제통도

표 1 ③-⑭번 모선사이 선로사고시 공급타당성의 비교

NODE	종래의 방법			제한한 방법		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
④	0.053	---	---	0.049	---	---
⑤	0.367	---	---	0.373	---	---
⑥	0.200	0.003	---	0.210	---	---
⑦	0.580	---	0.059	0.608	---	0.054
⑧	0.303	---	0.136	0.347	---	0.049
⑨	0.141	---	0.196	0.125	---	0.191
⑩	0.257	---	0.079	0.224	---	0.076
⑪	---	0.231	---	---	0.222	---
⑫	0.087	0.117	---	0.096	0.108	---
⑬	---	0.521	---	---	0.522	---
⑭	---	0.155	0.067	---	0.297	0.162
⑮	---	---	0.158	---	---	0.253
⑯	0.076	---	0.407	0.120	---	0.416
⑰	---	0.499	---	---	0.506	---
⑱	---	0.233	---	---	0.317	---
⑲	---	0.298	---	---	0.157	---
⑳	---	0.175	---	---	0.098	---
㉑	0.007	---	1.000	---	---	1.000
㉒	0.004	---	0.694	0.003	---	0.697
㉓	0.121	---	0.192	0.087	---	0.189
㉔	---	0.080	---	---	0.132	---
㉕	---	0.106	---	---	0.007	---
㉖	---	0.015	---	---	---	---
㉗	---	---	---	---	0.019	---

표 2 종래의 방법과 제한한 방법과의 비교

사고선로		종래의 방법 <sup>[7]</sup>	제한한 방법			
			서비스우선순위를 고려 안한 경우 <sup>[8]</sup> (1차조합 결과)		서비스우선순위를 고려한 경우 (2차조합 결과)	
			공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]	공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]
1차 근접 선로	① - ⑤	④	2	④	2	④
	① - ⑦	⑦	6	⑦	6	⑦
	① - ⑩	-	-	-	-	-
	② - ⑩	⑩	4	-	-	-
	② - ⑬	⑬	10	⑬	10	-
	② - ⑰	-	-	-	-	-
	③ - ㉑	㉑	5	-	-	-
	③ - ㉒	㉒	6	㉒	4	㉒
	③ - ㉓	㉓	4	㉓	4	㉓
	④ - ⑤	④	2	④	2	④
2차 근접 선로	⑬ - ⑭	⑭	10	⑭	10	-
	㉔ - ㉗	-	-	-	-	-

표 2는 종래의 방법<sup>[7]</sup>과 제한한 방법의 결과를 정전모선과 그 공급지장량에 대해 비교한 것이다. 이 표 2에서 알 수 있듯이, 식 (1)의 구성식 밝힌 것처럼 피더의 여유용량을 모두 활용함으로써 종래의 방법에 비해 공급지장량이 일반적으로 줄어들었다. 그리고 종래의 방법에서는 서비스우선순위상에서 매우 중요하다고 보았던 부하인 ⑭번, ㉒번 모선의 정전을 복구할 수 없었지만, 제한한 방법에서는 서비스우선순위를 고려함으로써 이들 모선의 정전복구가 가능하였다. 예를 들어 ③번 모선과 ㉒번 모선 사이의 선로사고시, 총정전량이 4[MW]에서 6[MW]로 다소 증가하였으나 서비스우선순위상에서 중요하다고 본 ㉒번 모선부하의 정전이 복구되었다. 한편 ㉒번 모선과 ⑬번 모선 사이의 선로사고나 ⑬번 모선과 ⑭번 모선 사이의 선로사고시, 서비스우선순위를 고려함으로써 1차조합의 결과보다도 공급지장량이 줄어들었는데, 이는 ⑭번 모선의 부하가 서비스우선순위상에서 매우 중요한 부하로 분류되어 이 모선에 대한 공급타당성지표가 높아졌기 때문이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 서비스우선순위를 고려함으로써 중요한 부하가 정전되는 것을 가급적 방지하도록 하였다. 그리고 정전구간과 직접 연결된 피더뿐만 아니라 인접피더의 여유용량도 활용할 수 있도록 열고리점을 구성함으로써 계통 전체의 여유전력이 좀 더 효율적으로 이용되도록 하였다. 이하 중요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 군시설이나 대규모병원과 같이 높은 공급신뢰도를 요하는 부하에 대해서는 정전복구를 다른 부하와 차별화하여 시행하는 과정이 필요할 것으로 사료된다. 이와 같은 과정을 위하여, 사고시 정전복구를 하는 과정에서 서비스우선순위를 고려함으로써 각 부하에 대해 공급신뢰도를 차별적으로 적용할 수 있었다.

(2) 종래의 발견적 수법에서는 반복계산에 의존하기 때문에 계산 소요시간이 많았지만, 제한한 방법은 각 모선에 대한 피더의 공급타당성지표를 일괄적으로 구하여 계통을 재구성하므로 계산소요시간을 크게 줄일 수 있었다.

## 6.참고문헌

- [1] 송길영, "송배전 공학", 동일출판사, pp.390-411
- [2] 송길영, "계통해석의 기초와 응용", 동일출판사, pp.245-255
- [3] "2次系統の供給信頼度評價システムの開發-供給支障電力量과供給支障時間의評價-", 日本電力中央研究所 依頼報告 T93524, 1994
- [4] D. Shirmohammadi, "Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration", IEEE Trans. on PD, Vol.7, No.2, 1992
- [5] D.W.Ross, T.Patton, A.I.Cohen, M.Carsen, "New Methods for Evaluating Distribution Automation and Control (DAC) Systems Benefits" IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-100, pp.2978-2986, 1981
- [6] "2次系統の供給信頼度評價システムの開發", 日本電力中央研究所 研究報告 T91032, 1992
- [7] 今村 謙 外, "配電融通問題へのファジィ推論の適用", 日本電気學會論文誌 B, 113卷 5號, 1993
- [8] 송길영, 이승원 외, "배전계통의 효율적인 선로접속변경에 의한 긴급정전복구 열고리점", 전기학회 논문지, 1995
- [9] 엄정국, 원성원, "기초 퍼지 이론과 응용 퍼지 시스템", 정보시대 출판부, pp.114-141, 1992