

# 개선된 부하차단에 관한 전문가 시스템

김재철  
승실대학교

김용상  
한국전기연구소

유미복\*  
승실대학교

## Expert System On Advanced load shedding

Jae-Chul Kim  
Soong Sil UNIV.

Eung-Sang Kim  
KERI

Mi-Bog You  
Soong Sil UNIV.

### ABSTRACTS

In the case of system operation, a line overload cause damage to spread a whole range of power system.

Of the theorems on load shedding, this study applied power distribution theorem and load reduction theorem which are local load shedding method, which are not affected by the magnitude of the power system and need not a large memory capacity and computation time.

In this paper, we treat the problem of overload when power system occurred to fatal fault. Especially, there is the special case that local load shedding theorem is not always solved. Therefore, we introduce a solved device of the problem and construct the expert system of expanded local load shedding.

Because proposed method uses the merits of expert system, in the case of system operation, the system operator don't embarrass to fatal fault and promptly deals with.

본 논문에서는 위의 두 이론을 적용한 후에도 과부하가 해소되지 않는 특정한 경우가 발생한 예이다. 즉, 그 특정한 사고시 계산된 차단량 보다 그 모선에서 부하량이 적은 상태이다. 그러므로, 본 연구에서는 이 경우를 처리할 수 있는 적당한 방안을 제시하고 이 이론을 토대로 개선된 전문가 시스템을 구현하려 한다.

일반적으로 전력계통 운영에 있어서 운영자는 전력 계통 기술자들을 통해 얻은 지식이나 계통 운영에 관계되는 경험으로부터 전력계통의 전압, 위상, 주파수, 전력조류등을 감시하여 사고시 필요한 조치를 수행하였다. 그러나 위급상태에서 계통의 운영은 운영자의 마음상태에 따라 큰 영향을 받는다. 그러므로 위급한 상태에서 운영자가 당황하게 되어 불합리한 결정을 내리게 된다면 더 큰 위급한 상태를 야기시킬 수 있다. 이는 계통의 규모가 커질수록 계통 운영에 더 큰 장애가 된다. 그러므로 본 연구에 전문가 시스템을 도입한 중요한 목적은 위급상태시 운영자의 오만을 막고 초보자에게도 전문가와 같은 조치를 취할 수 있는 이유 때문이다. [2,3,4]

### 2. 규칙 적용 방법론

전력 조류 분배이론과 부하차단이론을 적용시 고려해야 될 사항들은 다음과 같다.

- 장비의 단시간 긴급정격과 비교해 볼때 과부하 증가량은 상대적으로 적어야 한다.
- 전체 모선 부하와 비교해 볼때 차단되는 부하의 양은 상대적으로 적어야 한다.
- 대개 지하 전송 회로망에서 변전소 부하 역율은 거의 일정한 값을 유지하고 전압은 계획된 전압의 1%이내 유지되어야 한다.
- 부하차단 계획에서 장비의 과부하 해소를 위한 목표치는 긴급정격 이하로 고정시켜야 한다.
- 이 과정에서 발전 장비와 과부하는 직접적으로 모선 부하 차단에 관련이 있다. [3]

다음에서 전개될 이론들중 전력 조류 분배이론은 기존의 논문에서 채택했던 것이다. 그러나 이 이론만으로는 해결되지 않은 경우에 부족 차단량을 결정하는 방법론을 제시 하였다.

#### 2-1. 전력 조류 분배이론

어떤 A모선에 유입하는 선로가 m개 유출되는 선로가 n개 연결되어 있다면 유입선로중에 i 선로가  $OL_i$ 만큼 과부하가 있을때 이를  $IOI_i$ 로 표시하고 이로 인한 i 선로의 과부하를 해소하기 위해서 A모선에 유입되는 모든 m개의 선로에 흐르는 조류를 줄여야만 가능하다. 그러므로  $OL_k$ 를 선형관계로 보고 A모선에 유입하는 k선로에서 줄여야할 조류량은 다음과 같다.

$$IOI_k = RPF_k \times \frac{IOI_i}{RPF_i} \quad k=1, \dots, m \quad (2-1)$$

단,  $IOI_i$  : A 모선에 유입되는 선로 i의 과부하

$RPF_i$  : 선로 i의 유효전력조류

$RPF_k$  : 선로 k의 유효전력조류

### 1. 서 론

자동화가 고도로 발달된 오늘날 전력공급에 있어서 정전 없이 공급되도록 요구되어지며, 전기 사업자는 소비자에게 신뢰할 수 있는 에너지원을 제공하는 것이 절대적으로 필요하게 되었다. 따라서, 전기사업자는 소비자에게 서비스를 충분히 제공하기 위해서 전력 계통 운영시 경제적 한계내에서 높은 수준의 안전도를 유지해야 한다.

일반적으로 계통 운영시 전기사업자의 수입의 손실뿐만 아니라 소비자에 대한 서비스 저하 때문에 부하차단이 빈번해서는 안된다. 하지만, 오늘날의 전력계통은 경제적 이유로 많은 전력을 동시에 운송하고 있기 때문에 과부하 선로가 자주 발생된다.

전력계통의 과부하를 해소하기 위한 방법은

- 1) 발전량 조정으로 인한 전력조류 재배분 방법
- 2) 위상변경 장치의 위상 변경으로 인한 전력조류 재배분 방법
- 3) 전력계통의 스위칭 작용으로 인한 전력조류 재배분 방법
- 4) 부하 차단으로 인한 전력 조류 재배분 방법

등이 있으며 일반적으로 전력계통의 안전도를 유지하는 방법은 주로 1), 2), 3)의 방법이 사용되었다. 그러나 경우에 따라서, 위의 1), 2), 3)의 방법만으로 과부하를 해소하는데 충분히 과부하를 해소하지 못할 수 있으며 그러한 상태를 계속 방치해 두면 결국은 계통이 붕괴되는 비상상태를 초래할 수도 있다. [1,4,5] 그러한 경우 계통을 정상상태로 회복하는 중요한 방법중의 하나로 부하차단이 필요하게 되었다. 그러므로, 과부하를 해소하기 위한 방법중 위의 1), 2), 3)의 방법을 고려한 후에도 과부하가 해소되지 않는 경우에 기존의 논문에서는 네 번째 방법인 부하 차단 방법을 적용하였다.

기존의 논문인 부하차단에 관한이론은 전력조류 분배이론과 부하차단이론을 토대로 전문가 시스템을 구현하였다.

여기서,  $IOL_i/RPF_i$ 를 overload factor라 하며 주어진 모선에서 한계 이상의 선로의 과부하가 발생할 경우 가장 큰 overload factor를 공통 overload factor로 결정해야 한다. [2, 3, 4, 5]

2-2. 부하 차단량의 결정이론

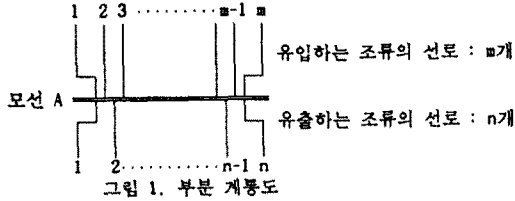


그림 1과 같이 모선 A에 유입하는 조류의 선로가 m개 이고 유출하는 조류의 선로가 n개 이면 이때 주어진 모선에서 유입되는 총 과부하량과 유출되는 총 과부하량은 다음과 같다.

$$\text{유입되는 총 과부하량} = \sum_{i \in m} IOL_i \dots\dots\dots (2-2)$$

$$\text{유출되는 총 과부하량} = \sum_{j \in n} OOL_j \dots\dots\dots (2-3)$$

단,  $IOL_i$  : A모선에 유입하는 선로에서 줄여야 할 유효 전력량.  
 $OOL_j$  : A모선에 유출하는 선로에서 줄여야 할 유효 전력량.

식 (2-2)와 식 (2-3)을 이용하여 1) 부하 차단량과 2) 감소해야 할 발전량을 계산하는 알고리즘은 다음과 같다.

1) 유입하는 선로의 과부하의 총합이 유출되는 선로의 과부하 총합보다 크다면 부하 차단량은 다음과 같다.

$$\text{부하 차단량}(LS_a) = \sum_{i \in m} IOL_i - \sum_{j \in n} OOL_j \dots\dots\dots (2-4)$$

2) 유출되는 과부하의 총합이 유입되는 과부하의 총합보다 크고 그 모선에 발전기가 연결되어 있으면 그 모선에서 줄여야 할 발전량은 다음과 같다.

$$\text{감소해야 할 발전량}(GLS_i) = \sum_{i \in m} OLi - \sum_{j \in n} ILi \dots\dots\dots (2-5)$$

부하 차단량을 계산하는 식 (2-4)는 기존의 논문에서 채택된 알고리즘이다. 그러나 모선 A에서 부하량이 부하차단량보다 더 적다면 위에서 제시한 알고리즘으로 과부하를 해결할 수 없었다. 그러므로 이 경우에 과부하 상태에서 정상상태로 회복시킬수 있는 알고리즘으로 제시될 부족량을 차단하는 방법론은 다음과 같다. [2, 3, 4, 5]

2-3. 부족량을 차단하는 방법론

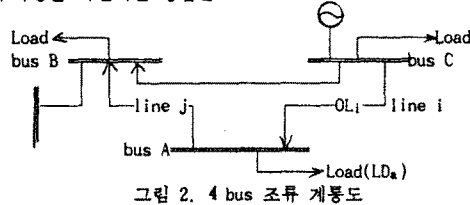


그림 2와 같이 선로 i에 과부하인  $OOL_i$ 가 존재 할 경우 선로 i의 과부하  $OOL_i$ 만큼 감소 시켜 주기 위해서 모선 A에서는 부하차단량을 나타낸 식 (2-4)와 같이 부하 차단량  $LS_a$  만큼을 차단해야 한다. 그러나 부하 차단량  $LS_a$  보다 부하량  $LD_a$  가 더 적은 경우가 발생 한다면  $LS_a - LD_a = \Delta LDS_a$  (부족량) 만큼을 어떤 모선에서 더 차단 해야 한다. 그러므로, 그 방법론을 다음과 같이 제안한다.

- 1) 유출되는 선로 중 부하모선이 하나일 경우
- 2) 유출되는 선로 중 부하모선이 둘 이상일 경우

2-3-1. 부하모선이 하나 있을 경우

그림 2는 부하모선이 하나 있는 경우이다. 이때 선로 i의 과부하를 모선 A에서 부하 차단을 하여야 하는데 그 모선의 부하량이 적을때 그 부족량은 다음과 같다.

$$\Delta LDS_a = LS_a - LD_a \dots\dots\dots (2-6)$$

- 단,  $\Delta LDS_a$  : 모선 A에서 부하량이 부하 차단량보다 더 적을 경우 과부하를 해소 하기 위해 더 감소해야 부족량.
- $LS_a$  : 모선 A에서 차단해야할 부하 차단량.
- $LD_a$  : 모선 A의 부하량.

그러므로 이 부족량( $\Delta LDS_b$ )만큼을 감소해야만 과부하가 해소 되므로 이때 그림 2의 선로 A에서 유출되는 선로 j의 끝 모선 B에서 감소시킬 실제 부족차단량은 다음과 같다.

$$\text{실제부족차단량}(RDLS_b) = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta f_k}{\Delta f_j} \times df_k \dots\dots\dots (2-7)$$

- 단,  $\Delta f_j$  : 모선 A에서 차단량이 부족하였을 경우 유출되는 선로 j의 조류량
- $\Delta f_k$  : 유출되는 선로 j의 끝모선 B에서 유입되는 선로가 n개일 경우의 n개 선로의 각각의 조류량

2-3-2. 부하 모선이 둘 이상일 경우

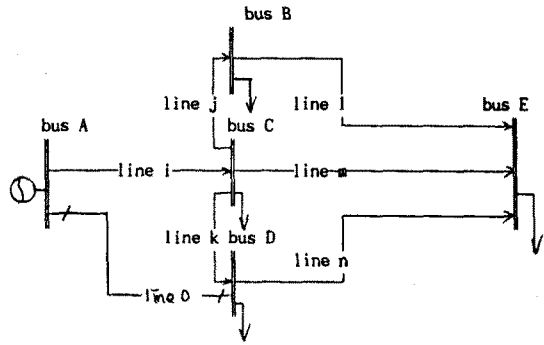


그림 3에서와 같이 선로 i에서 과부하가 발생할 경우 모선 C에서 부하 차단을 하려고 할 경우 차단량이 부족하다면 과부하를 해소하기 위해서 부족량만큼을 선로 j, m, k의 끝모선 B, E, D에서 차단해야 한다.

그때 선로 j, m, k의 각각의 끝모선 B, D, E에서 부족량 보다 큰 부하량이 있다면 그곳에서 차단하겠지만 그 차단량이 없다면 차단하기 위한 방법은 다음과 같다.

- 그림 3과 같은 loop를 이루고 있다면  
 실제부족감소량( $RDLSc$ ) =  $LD_c - \Delta LDC_c \dots\dots\dots (2-8)$

- 일반적인 경우는 다음과 같다.  
 실제부족감소량( $RDLSp$ ) =  $\frac{Cap - Flp}{Flp} \dots\dots\dots (2-9)$

단,  $Cap$  : 어떤 모선에서 부하량이 차단량보다 더 적을 경우에서 선로 i에서 선로 n중 그 모선에서 유출되는 각 선로들의 용량.

$Flp$  : 어떤 모선에서 부하량이 차단량보다 더 적을 경우에서 선로 i에서 선로 n중 그 모선에서 유출되는 각 선로들의 조류.

$RDLSp$ 의 각각의 결과 중 가장 적은 것 부터 선택하여 차단한다.

3. 전문가 시스템의 구성

전문가 시스템은 정보를 저장하는 database부분과 차단량과 부족 차단량을 계산하는 규칙 베이스로 크게 나누어진다.

3-1. 데이터 베이스

데이터 베이스는 대상 계통도의 각 모선과 선로의 연결 상태 및 조류와 조류 한계치등을 다음과 같은 정보로 저장한다.

[Line number, Start bus, End bus, Line flow, Line flow limit]

3-2. 규칙 베이스

규칙 베이스는 크게 1) 차단양에 대한 규칙, 2) 부족 차단양에 대한 규칙으로 나누어진다.

3-2-1. 차단양에 대한 규칙

- 기존의 전문가 시스템에서 사용된 규칙들은 다음과 같다.
- Rule 1 : 모든 선로의 유효 전력 조류와 선로 조류 한계치를 비교해서 과부하인 선로를 판정하라.
  - Rule 2 : 계통에 과부하인 선로가 여러개면 과부하인 선로의 리스트를 만들어라.
  - Rule 3 : 한 모선에 과부하인 선로가 여러개이고 조류의 방향이 같으면 모든 선로에서 출입량을 결정하라.
  - Rule 4 : 한 모선에 과부하인 선로가 여러개이고 조류의 방향이 다르면 유입되는 과부하뿐만 아니라 유출되는 과부하에 대한 합을 구하라.
  - Rule 5 : 한 모선에서 유입되는 과부하량이 유출되는 과부하량 보다 크면 그 차단량 부하를 차단하라.
  - Rule 6 : 한 모선에서 유입되는 과부하량이 유출되는 과부하량 보다 작고 발전기가 달려있으면 그 차단량 발전량을 줄여라.

3-2-2. 부족 차단양에 대한 규칙

- 본 전문가 시스템에서 사용된 규칙들은 다음과 같다.
- Rule 1 : 부하 차단양이 부하량보다 클 경우는 다음 Rule들을 적용한다.
  - Rule 2 : 유출되는 끝모선이 발전기 모선인지 부하모선인지 판별하라.
  - Rule 3 : 부하 모선이 한개 있다면 실제 부족 차단양을 계산하라.
  - Rule 4 : 부하 모선이 둘이상 있다면 실제 부족 차단양을 먼저 계산하고 이 실제 부족 차단양 보다 부하량이 더 크다면 선택하여 실제 부족 차단양과 부하량 차가 가장 작은 곳에서 차단하라.
  - Rule 5 : 부하 모선이 둘이상 있고 실제 부족 차단양 보다 부하량이 더 적다면 그리고, 부족 차단양을 차단해야 할 모선에서 유입되는 모선의 시작 모선끼리 연결 되었다면 실제 감소 차단양 식 (2-8) 과 같고 실제 감소 차단양만큼 차단하라.
  - Rule 6 : 부하 모선이 둘이상 있고 실제 부족 차단양 보다 부하량이 더 적고 Rule 5가 적용되지 않는다면 실제 부족 차단양은 식 (2-9)와 같다.

$$\text{실제부족차단양(RDLS}_p\text{)} = \frac{C_{ap} - F_{lp}}{F_{lp}}$$

4. 사례연구

본 논문에서 적용한 이론의 효율성을 검증하기 위해 사례 연구를 통하여 계통이 안전상태로 회복하는데 전문가 시스템 적용의 여러 경우를 시험해 보았다. 13모선의 모의 계통을 설정하여 기존의 알고리즘에서 해를 찾았던 경우, 기존의 알고리즘만으로도 해를 찾을수 없으므로 부족 차단양 이론을 채택해야만 할 경우의 예를 들어 개선된 전문가 시스템을 입증하였다.

13모선/19선로 계통도는 다음과 같다. (B : 모선번호)

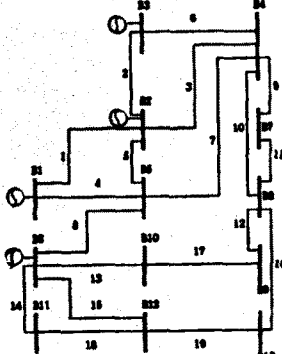


그림 4. 13모선/19선로 계통도

표 2. 선로 2,4번 open시 13 bus 계통의 조류계산

[MW]

선로 번호	모선연결상태		선로조류량		선로조류한계치	
	2번탈락	4번탈락	2번탈락	4번탈락	2번탈락	4번탈락
1	1 - 2	1 - 2	61.765	130.76	85.0	85.0
2	-	2 - 3	-	41.97	-	60.0
3	2 - 4	2 - 4	45.909	56.33	44.7	60.0
4	1 - 5	-	45.000	-	76.8	-
5	2 - 5	2 - 5	35.235	53.54	45.3	60.0
6	3 - 4	3 - 4	26.658	9.18	50.0	50.0
7	5 - 4	5 - 4	46.449	15.24	80.0	80.0
8	5 - 6	5 - 6	14.890	16.37	50.0	50.0
9	4 - 7	4 - 7	18.625	23.66	75.0	75.0
10	4 - 8	4 - 8	10.686	13.57	15.7	15.7
11	7 - 8	7 - 8	18.621	23.65	100.0	100.0
12	9 - 8	9 - 8	01.628	0.64	90.0	90.0
13	6 - 10	6 - 10	24.029	27.73	35.7	35.7
14	6 - 11	6 - 11	16.336	19.57	27.7	27.7
15	6 - 12	6 - 12	34.233	40.70	53.3	53.3
16	8 - 13	6 - 13	37.936	5.32	26.4	26.4
17	10 - 9	10 - 9	9.908	10.58	38.4	38.4
18	11 - 12	11 - 12	00.226	0.14	50.0	50.0
19	12 - 13	12 - 13	10.175	11.50	43.0	43.0

표3. 선로 2,3번 open시 부하량과 발전기량

모선번호	부 하 량 [MW]		발전기량 [MW]	
	2번탈락	4번탈락	2번탈락	4번탈락
1	0.00	0.00	129.87	130.76
2	23.95	23.95	48.00	48.00
3	91.99	91.99	60.7	60.00
4	41.74	41.74	0.00	0.00
5	20.39	20.39	0.00	0.00
6	12.36	12.36	84.0	84.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	32.59	32.57	0.00	0.00
9	9.94	9.94	0.00	0.00
10	15.86	15.86	0.00	0.00
11	18.85	18.85	0.00	0.00
12	28.15	28.15	0.00	0.00
13	16.45	16.45	0.00	0.00

4-1. 선로 2가 탈락된 경우

정상적인 계통에서 선로 2가 탈락된 경우 조류계산 결과 표 1에서의와 같이 선로 3이 과부하가 되었으며 이때 본 전문가 시스템을 실행한 후 모선 4에서 8.898[MW]의 부하를 차단하여 과부하를 해소하였다.

loaddev

[-23.3, -60.1, 2, -31.80, -10.1, -23.4, -33.6, -35.2, -56.4, -5.1, -81.4, -88.4, -11.70, -11.4, -19.10, -22.70, -28.5, -49.8, -32.9]

loaddev value

[-19.05, -57.3, 435, -27.96, -7.835, -20.9, -29.6, -32.7, -52.65, -4.315, -76.4, -83.9, -9.915, -10.015, -16.435, -21.380, -26.58, -47.3, -30.75]

overload line list [3]

Load Bus K = 1  
Bus number = 4

Amounts of Load shedding = 8.8980

overload line list [3,6,7]

이 결과로 보아 부하 차단하여야 할 모선은 4번인데 그곳의 부하량은 41.74[MW]이고 차단양은 8.8980[MW]이므로 기존의 논문에서 제시된 방법만으로도 해결될 수 있음을 보았다.

4-2. 선로 4가 탈락된 경우

정상적인 계통에서 선로 4가 탈락된 경우에 조류계산은 표 2에 나타나 있다. 그러나 표 3.에서의와 같이 2번 모선 부하 차단양은 64.26[KW] 산출되었는데 2번 모선에서 실제 부하량은 23.95[kW]이므로 기존의 방법론으로는 과부하를 해소할수 없다. 그러므로 본 논문의 방법론을 이용한다면 과부하가 해소됨을 결과2에서 볼수 있다.

· 결과1

4번 선로가 탈락된 후 과부하 선로는 1번선로가 되는데 이 과부하를 해소하기 위해 2번 모선에서 부하 차단을 해야한다. 그러나 2번모선의 부하가 23.95[MW]인데 비해 차단량은 64.26[MW]이므로 기존의 알고리즘을 사용하여 전문가 시스템을 구성한 결과1 로션는 과부하를 해소 시킬 수 없다.

decision dev lines

1

60.76

loaddev

[60.76, -18.21, -4.37, -76.8, -6.46, -40.82, -64.76, -33.63, -51.34, -2.130, -76.35, -89.352, -7.963, -8.13, -12.591, -21.08, -27.82, -49.859, -31.5]

loaddev value

[64.26, -15.210, -1.335, -72.960, -3.46, -38.32, -60.76, -31.13, -47.59, -1.345, -71.35, -84.852, -6.178, -6.745, -9.926, -19.76, -25.9, -47.359, -29.35]

overload line list [1]

Load Bus K = 1

Bus number = 2

Amounts of Load shedding = 64.26

overload line list = [1]

· 결과2

본 논문에서 채택한 알고리즘을 이용하여 전문가 시스템을 구성한 것으로 부하량이 차단량보다 더 적더라도 본 논문의 알고리즘으로 과부하가 해소됨을 입증하였다.

Difference Amount = 40.31

Outgoing line list = [2, 3, 5]

Outgoing end bus = [3, 4, 5]

Select end bus = [4]

Difference amounts of Load shedding = 40.31

5. 결론

불필요한 부하차단이 전기 공급업자에 대한 수익의 손실 뿐만 아니라 소비자들에게도 불편을 끼치기 때문에 전력계통의 과부하 해소를 위한 부하 차단은 바람직하지 않다. 그러나 어떤 사고로 인하여 전 계통에 확산될 위험이 있을 경우는 오히려 부하 차단함으로써 좀더 손실을 줄일수 있다. 그러므로 부하 차단시 얼마나 신속히 차단할수 있겠느냐는 매우 중요하기 때문에 본 연구에서 신속성을 주요 관점으로 두었다.

본 논문에서 개발된 전문가 시스템이 13모선 19선로에 적용되어 과부하를 해소하는데 만족 할만한 결론을 얻었다. 그리고 본 논문의 특징으로

- (1) 부하 차단 방법을 지역적으로 적용하여 좀더 신속한 대처를 할수 있으며,
- (2) 과부하 해소를 위하여 차단 해야 할 부하량이 부족한 특정 경우에 대한 방안을 제시함으로써 어떤 특정사고에 적절히 대처할 수 있고,
- (3) 전문가 시스템의 장점을 최대한 이용하였으므로 계통 운영에 종사하는 초보자에게 교육 시킬 수 있을 뿐만 아니라 새로운 지식을 첨가 및 불필요한 지식은 삭제가능하고 프로그램의 복제를 통해서 동시에 여러 장소에서 운영할 수 있는 장점이 있다.

6. 참고 문헌

- [1] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, " Power Generation Operation and Control, John Wiley & Sons, pp.355-384, 1984.
- [2] S. S. Shah and S. M. Shahidehpour, " A Heuristic Approach to Load Shedding Scheme ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No. 4, pp.1421-1429, October 1989.
- [3] M. M. Adibi and D. K. Thorne, "Local Load Shedding", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.3, pp. 1220-1229, August 1988.
- [4] 김재철 외, "부하차단 전문가 시스템에 관한 연구", 대한 전기학회 전력계통 순계학술 발표, 1991.2.
- [5] 김용상 외, "부하차단 전문가 시스템에 관한 연구", 숭실 대학교 대학원, 1990. 11.