

碩士學位論文

퍼지 평가 함수를 이용한 변전소
주 변압기 사고시 복구계획



濟州大學校 大學院

제주대학교 중앙도서관
電氣工學科 LIBRARY

張 勝 弼

2000年 6月

퍼지 평가함수를 이용한 변전소 주 변압기 사고시 복구계획

指導教授 左 宗 根

張 勝 弼

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2000年 6月



張勝弼의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

吳 性 寶

委 員

員

左 宗 根

委 員

員

이 계 명

濟州大學校 大學院

2000年 6月

Fault Resoration Plan using Fuzzy Evaluation Function for Substation Main Transformer

Seung-Pill Jang

(Supervised by professor Chong-Keun Jwa)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2000. 6.

목 차

LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	ii
Summary	iii
I. 서 론	1
II. 퍼지이론	2
1. 퍼지이론	2
2. 멤버쉽함수	3
3. 퍼지추론	3
1) 고전적추론	4
2) 퍼지추론	5
4. 비퍼지화	6
III. 정전복구 알고리즘	8
1. 평가함수	8
2. 퍼지규칙과 멤버쉽함수	10
3. 정전복구 알고리즘	11
IV. 사례연구	13
V. 결 론	16
참고문헌	17

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Center of gravity method	7
Fig. 2 Structure of the 154[kV] substation	8
Fig. 3 Fuzzy rules and membership function	11
Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm	12
Fig. 5 Structure of the 154[kV] substation after #1M.Tr fault restoration	13



LIST OF TABLES

Table 1	M.Tr and D/L load before fault	14
Table 2	Restoration plan when #1M.Tr faults	14
Table 3	Switching sequence when #1 M.Tr faults	15



SUMMARY

154[kV] substation takes the responsibility of supplying power to customers in wide range. When a breakdown takes place in the substation, interruption in wide range breaks out and may have a serious effect on power supply reliability that customers require. If the fault occurs in power system, The operator quickly and accurately examines this situation, and then remove and minimize the black-out load through proper recovery operation. Therefore, when fault occurs in substation, the need of the method to minimize and recover the interruption damage increases.

This paper proposes an optimal restoration plan using fuzzy evaluation function when the main transformer fault occurs in the distribution substation. The elements of evaluation function are switching number of circuit breaker and disconnector switch, the load balancing and the black-out load. Evaluation function is calculated to determine optimal restoration plan though minimization problem.

1. 서 론

154[kV] 배전 변전소는 대규모 지역의 수용가들에게 전력을 공급하는 역할을 한다. 따라서 변전소 사고시에는 대규모의 정전이 발생하며 소비자들이 요구하는 안정적인 전력공급 신뢰도에 심각한 영향을 줄 수 있다. 전력계통에 고장이 발생하면 그 상황을 신속 정확히 파악하여 적절한 복구조작을 통하여 정전부하를 해소하거나 최소화하여야 한다. 그러므로 변전소 사고시 정전피해를 최소화하고 신속하게 복구하는 기법들의 필요성이 증대되고 있다.

변전소 사고 복구와 관련된 연구는 자동화된 변전소의 주변압기 사고시 제어전략 수립지원을 위한 전문가 시스템(고윤석등 1995), 배전 변전소 복구지원 전문가 시스템(Hun-Jae Lee 1996), 최적 개폐기 조작순서 결정(Z. Z. Zhang 등 1990), 변전소 고장판정 및 복구지원을 위한 전문가 시스템(daniel S. 1991)등 정전복구시 계통 운전원들의 고장복구 경험 및 관련 규정을 이용한 전문가 시스템적 접근 방안들이 최근 활발히 연구·제안되어지고 있다.

본 논문에서는 변전소 주변압기 사고시 복구계획을 위해 주어진 운영 목적에 가장 만족하는 복구 계획을 퍼지추론을 이용하여 선정하였다. 개폐기 조작 횟수, 부하 분담 균등이 복구계획 선정을 위한 평가 함수가 되며 각각의 퍼지 함수를 계산하여 최선의 복구 방안을 선정한다. 그리고 부하의 중요도에 따른 우선순위를 고려하여 정전부하가 최소가 될 수 있도록 조작순서를 결정하고 신속한 정전복구를 통하여 사고 파급을 최소화 할 수 있도록 한다.

II. 퍼지이론

1. 퍼지이론

퍼지이론은 1965년 미국 버클 대학의 L.A. Zadeh 교수에 의해 ‘퍼지 집합 이론(fuzzy set theory)’이 처음으로 소개되어진 뒤 많은 분야에서 다용도로 그리고 빠르게 응용되어져 오고 있다. 퍼지 이론은 컴퓨터가 인공적인 지능을 가지고 인간의 의사대로 수행하기 위해서 인간이 사용하는 수치는 물론 언어적으로 애매한 표현들을 처리할 수 있도록 한다. 기존의 디지털 논리 체계는 0과 1의 개념이 확실한 반면 퍼지 논리는 어떤 집합에 완전히 속하면 1, 완전히 속하지 않으면 0, 그 이외에도 0과 1 사이의 값을 가지게 되며, 인간의 애매 모호한 상황도 표현할 수 있는 것이 퍼지 논리 이론이다. 일반적으로 논리란 명제의 참·거짓 또는 복합명제에서 추론되는 명제의 참, 거짓을 각각의 명제에 대해 참·거짓으로부터 명확하게 알아내는 것이다 따라서 통상의 논리에서 다루어지는 명제는 참·거짓을 0과 1의 어느 한값으로 나타내는 것이 많다. 즉, 참일 때는 ‘진리값 = 1’, 거짓일 때는 ‘진리값=0’의 2진(2개의 값)으로 나타내어서 이 이론을 2진 논리 또는 사람의 이름을 따서 불(Boolean) 논리라고 한다.

한편, 인간의 사고체계는 0과 1의 2진 논리만 가지고는 인간의 애매한 표현을 처리할 수가 없다. 이러한 인간의 애매한 표현을 처리할 수 있도록 한 이론이 퍼지 집합이론(fuzzy set theory)이며, 이 이론에 근거하여 참·거짓의 정도를 0과 1 사이의 적당한 실수값, 예를 들면 진리값 = 0.8, 진리값 = 0.1을 택하여 ‘참일 것 같다.’, ‘아주 거짓 같다.’ 등으로 나타내며, 이 애매한 표현의 명제를 추론하여 참·거짓을 밝히는 것을 퍼지 논리(fuzzy logic)라고 한다.

인간의 사고체계에서 일어나는 표현 방식을 컴퓨터에 실행하려 할 때, 부딪히게 되는 문제가 우리의 일상 생활에서 쓰이는 용어 가운데 ‘많이’,

‘꽤 오래’, ‘아주’, …… 등의 표현을 수치로 나타내지 못한다는 것이다.

컴퓨터의 사고를 2진 논리 체계보다 인가에 가까운 논리체계로 나타내기 위하여 1965년 Zadeh 교수에 의해 소속이 명확하지 않는 대상들을 어떠한 표현을 만족하는 집합에 ‘속한다.’, ‘속하지 않는다.’, ‘어느 정도 속한다.’라는 애매한(fuzzy) 논리 체계를 다루는 퍼지 집합(fuzzy set)의 개념을 제안하여, 각 대상들을 그 집합에 ‘속하는 정도(grade of membership)’로 표현하여 수치상으로 언어적인 애매한 표현을 컴퓨터가 이해할 수 있도록 하였다. 따라서, 퍼지 집합을 이용하면 ‘아주’, ‘약간’, ‘매우’ 또는 ‘크다’, ‘작다’ 등의 인간이 사용하는 개념을 컴퓨터 언어로 변환할 수 있다.

2. 멤버쉽함수

입력변수는 매 입력시점에서 입력값으로부터 결정되고 “If-then” 형식의 언어적인 규칙으로 표현된다. 이러한 규칙은 주로 전문가의 지식이나 경험에 의해서 얻어진다. 다음에 하나의 규칙 예를 보자.

If A is PB and B is NS, then C is PM.

A 및 B는 입력변수이며 C는 출력변수이다. 그리고 PB, NS, PM와 같은 명확하지 않는 언어적인 값으로 표현되는 그 값을 퍼지 라벨(fuzzy label)이라고 한다. 이와 같이 규칙에서 사용되는 언어적인 변수들의 애매함을 정량적으로 표현하기 위하여 멤버쉽함수(membership function)를 사용한다. 이 멤버쉽 함수는 연속 또는 이산적인 언어적 값과 모양에 따라 여러 가지 형태가 있으나 여기에서는 계산이 용이하고 일반적으로 많이 사용하는 삼각형의 멤버쉽 함수를 사용하였다.

3. 퍼지 추론

주어진 사실(fact)과 규칙(rule)으로부터 논리적으로 타당한 새로운 사실을 추출하는 과정을 추론이라 한다. 본 절에서는 퍼지추론의 기본이 되는 고전적인 추론방법에 대하여 기술하고 그로부터 정의된 퍼지추론을

설명하기로 한다.

1) 고전적 추론

고전적인 추론(classical reasoning)에서는 전제와 규칙이 완전히 일치하거나 분명한 부정일 경우에만 결론을 도출하는 방법으로 연역추론(modus ponens), 대우추론(modus tollens), 삼단논법(hypothetical syllogism) 등의 원리를 이용한다.

① 연역추론

연역추론(modus ponens)의 형태는 다음과 같다.

Premise : x is A.

Rule : If x is A, then y is B.

Conclusion : y is B.

연역추론에서는 규칙의 전제부에 관계된 사실이 존재할 경우 규칙의 결론부가 사실로 추론되는 것으로, 예를 들면 다음의 경우를 생각할 수 있다.

Premise : 2는 짝수이다.

Rule : 2가 짝수이면, 2의 배수는 짝수이다.

Conclusion : 2의 배수는 짝수이다.

규칙의 전제부에 해당하는 “2가 짝수”라고 하는 참인 사실이 존재하므로 규칙의 결론부인 “2의 배수는 짝수”라는 참인 새로운 사실을 추론한다.

② 대우추론

대우추론(modus tollens)의 형태는 다음과 같다.

Premise : y is not B.

Rule : If x is A , then y is B .

Conclusion : x is not A .

대우추론에서는 규칙의 결론부를 부정하는 사실이 존재할 경우 규칙의 전제부를 부정하는 새로운 사실을 추론하는 것으로, 예를 들면 다음과 같다.

Premise : x 는 3의 배수가 아니다.

Rule : x 가 9의 배수이면 x 는 3의 배수이다.

Conclusion : x 는 9의 배수가 아니다.

규칙의 결론부를 부정하는 “ x 는 3의 배수가 아니다.”라는 사실이 존재하므로 대우추론에서는 전제부를 부정하는 “ x 는 9의 배수가 아니다”라는 결론을 도출한다.

2) 퍼지 추론



주어진 사실과 규칙으로부터 논리적으로 타당한 새로운 사실을 도출하는 과정을 추론이라 한다. 기존의 이진논리에 바탕을 둔 추론방법은 매우 단순하며 그 결과가 정확하였으나, 적용할 수 있는 범위가 한정되어 있었다. 고전적 추론법 중 연역추론의 경우 “If P , then Q .”라는 규칙과 P 라는 사실이 주어지면 Q 라는 새로운 사실을 추론해 낼 수 있다. 그러나, 여기에 사용되는 명제 P 와 Q 의 진리 값이 반드시 0과 1중의 하나이어야 한다는 제약조건이 있다. 또한, 규칙의 전제부에 있는 명제 P 와 완전히 동일한 명제가 사실로 존재하여야만 규칙의 적용이 가능하다는 제약도 있다.

퍼지 추론(fuzzy reasoning)은 인간의 사고에 보다 근접한 추론을 수행하기 위하여 고전적인 추론방법을 일반화하여 이진논리로 처리할 수 없었던 결론을 자연스럽게 유도해 낼 수 있는 추론법이다. 따라서, 규칙의 전제부에 있는 명제와 완전히 일치하지 않은 사실이 주어지더라도 부분적인 결론을 추론할 수 있는 추론방식이다.

고전적인 추론법을 일반화한 퍼지추론은 일반화된 연역추론(generalized modus ponens) 과 일반화된 대우추론(generalized modus tollens) 등이 있다.

① 일반화된 연역추론

일반화된 연역추론(generalized modus ponens)을 도식화하면 다음과 같다.

Premise : x is A' .
Rule : If x is A , then y is B .
Conclusion : y is B' .

일반화된 연역추론에서는 규칙의 전제부와 동일한 사실인 “ x is A ”가 존재하지 않고, 이와 비슷한 “ x is A' ”이 존재할 경우에도 규칙의 결론부와 비슷한 “ y is B' ”라는 결론을 도출한다.

② 일반화된 대우추론

일반화된 대우추론(generalized modus tollens)의 형태는 다음과 같다.

Premise : y is not B' .
Rule : If x is A , then y is B .
Conclusion : x is not A' .

일반화된 대우추론에서는 규칙의 결론부를 근사적으로 부정하는 “ y is not B' ”라는 사실이 존재할 때 결론으로서 규칙의 전제부를 근사적으로 부정하는 새로운 사실을 추론한다. 즉, 추론의 결과는 “ x is not A' ” 이다.

4. 비퍼지화

퍼지값을 비퍼지값으로 변환하는 것을 비퍼지화(defuzzification)라한다. 비퍼지화기는 퍼지 집합으로 표시되는 퍼지량으로부터 보통의 수치값(crisp number data)을 얻는 변환장치이다.

$u = \text{defuzzifier}(B')$ 으로 기술 할 수 있으며 최대값 선택법(max criterion method), 최대값 평균법(mean of maxima method), 무게중심법(center of gravity method)방법 등이 있다 무게중심법은 가장 많이 사용하는 방법으로 $\mu_{B'}(u)$ 의 무게중심값을 B' 의 비퍼지화값으로 정의하는 방법이다.

$$u^* = \text{defuzzifier}(B') = \frac{\int_u \mu_{B'}(u)u du}{\int_u \mu_{B'}(u) du} \quad (1)$$

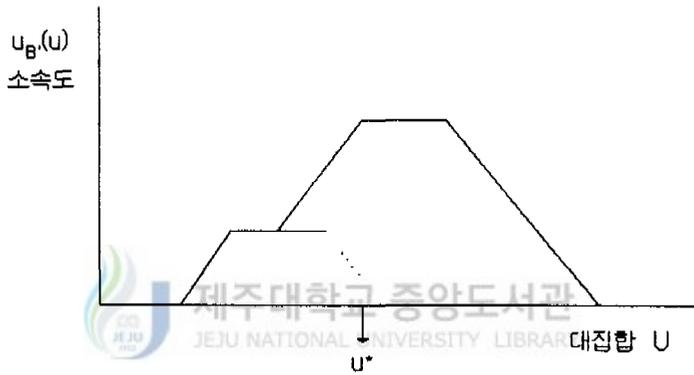


Fig.1 Center of gravity method

III. 정전복구 알고리즘

1. 평가함수

154[kV]변전소의 일반적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 22.9[kV]모선은 2중 모선인 상위모선과 하위모선으로 구성되고, 상호연결 및 절체를 위해 타이 차단기(tie CB)와 단로기(DS)들로 연결되어 있으며, 뱅크는 섹션 차단기(section CB)로 상호 연결되었고, 배전선로에는 선로 보호를 위한 차단기가 설치되어 있는 구조를 보인다.

변압기 사고시 사고 변압기에서 전력이 공급되는 배전선로들은 정전이 발생하므로, 이 정전 부하들은 신속하게 건전 변압기로 절체 되어야 한다. 모든 변압기는 각각 단독운전으로 고려하고 정전선로의 차단기는 수동 개방한다.

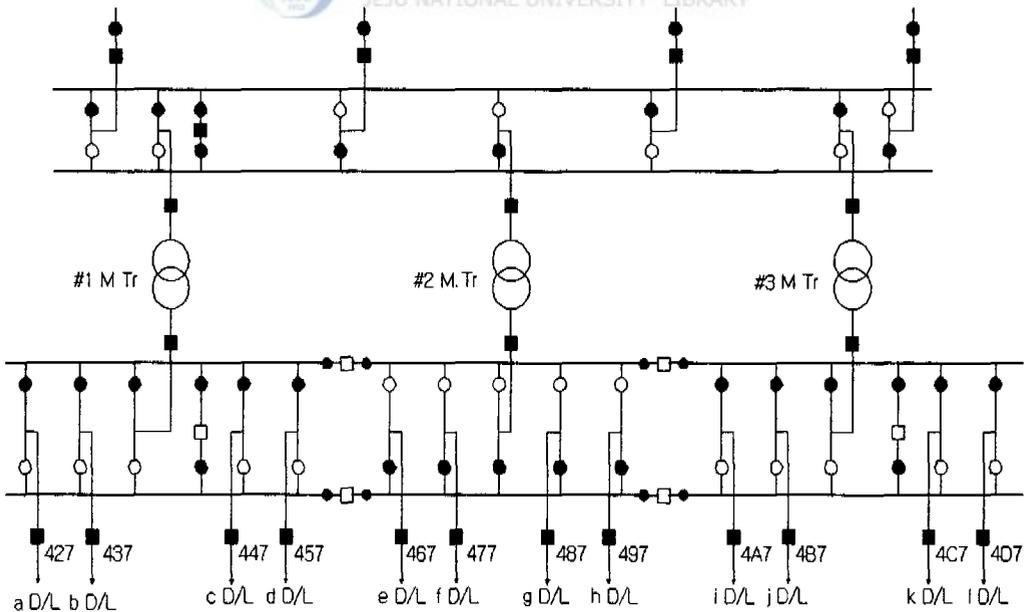


Fig. 2 Structure of the 154[kV] substation

변압기 선택조건은 (2)식, 정전 복구를 위한 평가 함수는 (3)식으로 표현한다.

$$\text{정전부하[kVA]} \leq \text{여유용량}(\sum_i M.Tr[kVA]) \quad (2)$$

$$PI = \alpha LB + \beta SN \quad (3)$$

α, β : 부하분담균등과 스위칭 횟수에 대한 가중치

- 부하분담균등(LB)

$$LB = \sqrt{\frac{\sum_{i \in T} |T_i^2 - \bar{T}^2|}{n}} \quad (4)$$

여기서 $T_i = \frac{i \text{ 번째 변압기의 실제부하}}{i \text{ 번째 변압기 최대용량}}$

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{n}$$

n : 선택된 변압기 수

$$T_i \leq 1$$



이다.

- 스위칭 횟수 (SN) 최소화

$$SN = \min (N_{DS} + N_{CB}) \quad (5)$$

여기서 N_{DS} 는 단로기 조작횟수이고 N_{CB} 는 차단기 조작횟수를 나타낸다.

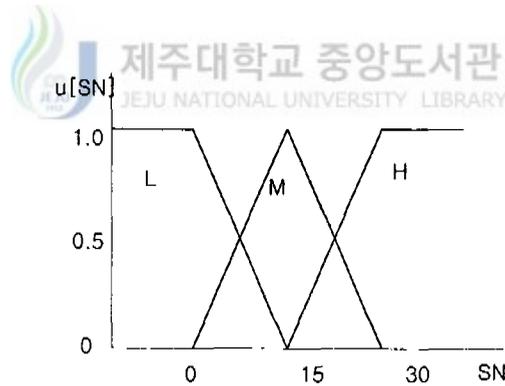
정전D/L을 건전 뱅크로 절체시 개폐기 조작 규칙은 차단기 조작횟수가 거의 일정하므로 단로기 조작횟수에 따라 스위칭 횟수가 결정이 된다. 그러므로 단로기 조작을 최소화하고 가급적 차단기 조작만으로 정전부하를 절체 할 수 있는 최단경로를 선택하여야 한다.

정전선로의 부하가 변압기 여유용량을 초과하는 경우는 우선순위를 고려하여 절체하되 정전부하가 최소가 되도록 한다.

2. 퍼지 규칙과 멤버십 함수

정전 복구를 위한 퍼지 규칙과 멤버십 함수를 결정할 때 퍼지 입력값인 SN과 LB는 삼각형 퍼지함수를 사용하여 이에 대한 퍼지추론 규칙을 정해 최선의 복구계획을 결정한다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 평가함수에 대한 멤버십 함수와 퍼지 추론 규칙을 나타낸다. 비퍼지화는 소속함수로 표현되는 퍼지량을 정확하고 크리스프한 값으로 전환하는 것으로 일반적으로 최대 평균법, 최대법, 무게 중심법 등 여러 가지가 있으나 여기에서는 비퍼지화 방법중에서 가장 보편적으로 쓰이는 무게 중심법(center of gravity)을 사용하였다.

최선의 복구계획을 선정하기 위해 퍼지 규칙을 사용하여 각각의 퍼지 값에 대한 값을 결정한 후 여기에 가중치를 주고 더하여 계산한다. 가중치는 운용목적에 경험적으로 결정할 수 있다.

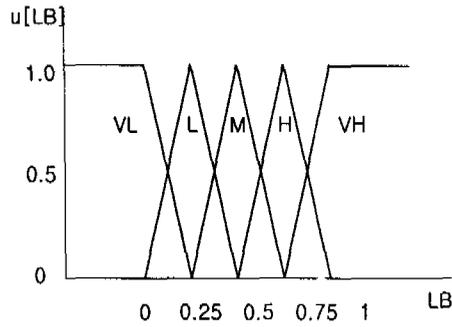


If SN is LOW, then PLAN is VERY_GOOD.

If SN is MID, then PLAN is MID.

If SN is HIGH, then PLAN is POOR.

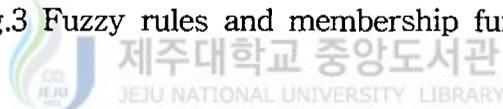
(a) Switching number



If LB is VERY_LOW, then PLAN is VERY_GOOD.
 If LB is LOW, then PLAN is GOOD.
 If LB is MID, then PLAN is MID.
 If LB is HIGH, then PLAN is POOR.
 If LB is VERY_HIGH, then PLAN is VERY_POOR.

(b) Load balance

Fig.3 Fuzzy rules and membership function



3. 정전복구 알고리즘

본 논문에서 제안한 알고리즘의 수행절차를 Fig. 3에 나타내었다. 변압기 사고 발생을 확인하면 우선 정전선로의 무압 차단기를 개방한 후 절체될 건전 변압기를 선택한다. 여유용량이 정전부하보다 큰 경우는 D/L을 선택된 변압기로 절체하는 모든 경우를 고려하여 LB를 구하며, 이때 T_i 의 값이 1을 초과하는 경우는 변압기 최대 용량을 초과한 경우 이므로 복구 방안에서 제외한다. 그리고 나서 각각에 대하여 최단 경로의 스위치(CB, DS) 조작 방안을 선택하고 fuzzy평가를 실시하여 평가함수 PI를 결정한 후 최선의 복구방안을 선정한다.

반면에 여유용량이 정전부하보다 적은 경우에는 우선순위와 정전 D/L 별 부하를 고려하여 중요부하선로를 선택·복구하고, 나머지 선로에 대해

서는 다른 변전소로 D/L 부하 절체 요청을 한다.

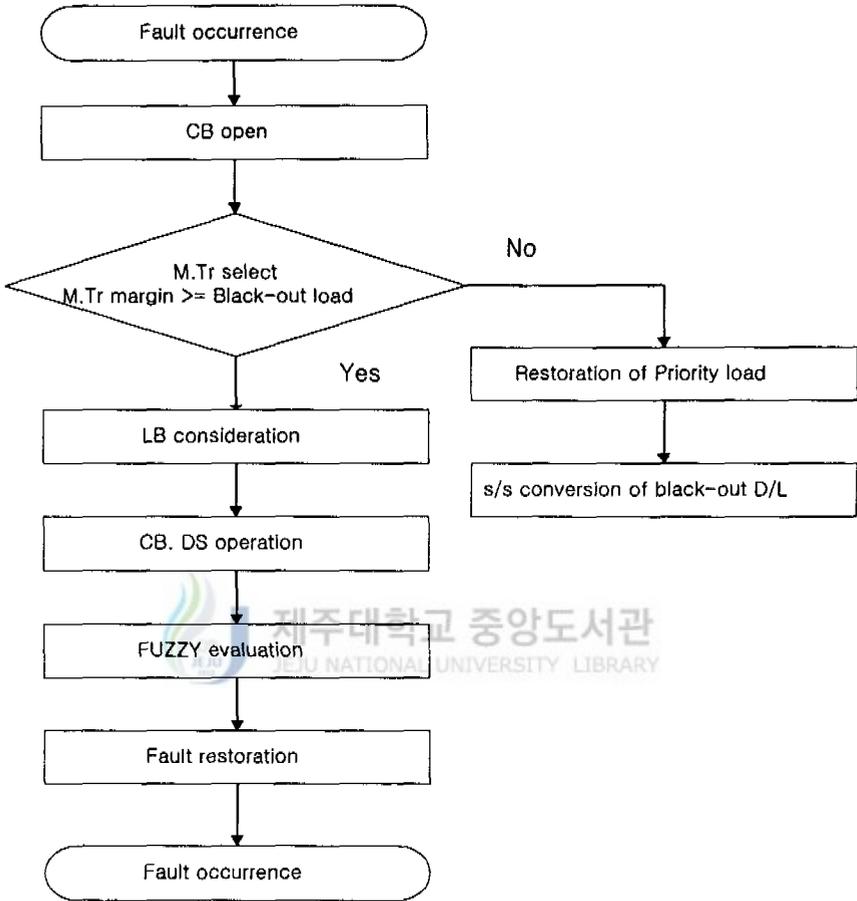


Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm

IV. 사례연구

본 논문에서는 Fig. 1의 변전소에서 #1, #2, #3 변압기를 통하여 각 25000, 26000, 32000[kVA]로 전력을 공급하던 중 #1 변압기의 고장으로 25000[kVA]의 정전부하가 발생한 경우에 대하여 제안한 알고리즘을 수행하였다.

변압기 여유용량은 #2가 14000[kVA], #3가 24000[kVA]가 된다. 따라서 #2와 #3 변압기 모두 선택된다. SN과 LB를 구하고 각각 0.45, 0.55의 가중치를 주어 계산하였다.

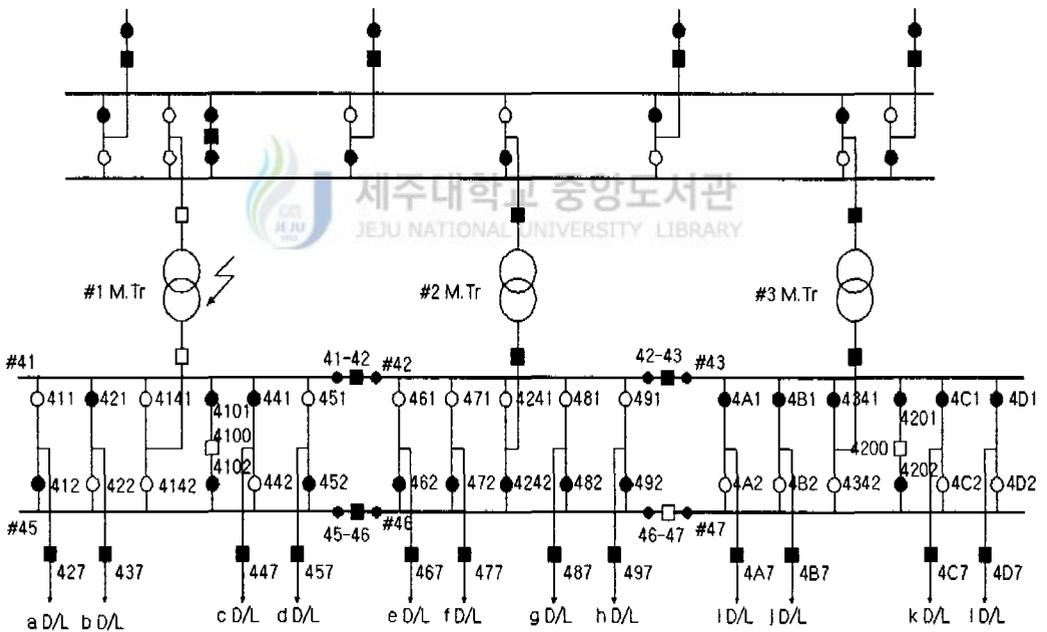


Fig. 5 Structure of the 154[kV] substation after #1 M.Tr fault restoration

Table 1 M.Tr and D/L load before fault

변압기별 최대용량	현재부하 [kVA]	선로명	선로부하 [kVA]	우선 순위
#1 M.TR 40[MVA]	25000	a D/L	7000	1
		b D/L	6000	6
		c D/L	5000	9
		d D/L	8000	4
#2 M.TR 40[MVA]	26000	e D/L	6000	12
		f D/L	5000	10
		g D/L	8000	3
		h D/L	7000	11
#3 M.TR 50[MVA]	32000	i D/L	8000	5
		j D/L	9000	7
		k D/L	8000	2
		l D/L	7000	8

Table 2에서 평가함수 결과 값이 가장 높은 방안인 #2 변압기로 a, d D/L을 #3변압기로 b, c D/L을 절체하며 우선순위가 높은 a, d, b c D/L 순으로 조작하며 조작순서는 Table 3에 표현하였다. Fig. 4에서는 사고 복구 후의 계통도를 나타내었다.

Table 2 Restoration plan when #1 M.Tr faults

N0	#2 M.Tr	#3 M.Tr	SN	LB	PI
1	d	abc	0.609	0.627	0.619
2	ab	cd	0.579	0.729	0.661
3	ac	bd	0.579	0.762	0.680
4	bc	ad	0.579	0.783	0.691
5	bd	ac	0.579	0.751	0.673
6	cd	ab	0.579	0.758	0.677

Table. 3 Switching sequence when #1 M.Tr faults

순서	sw	제어상태
1	4142,42-42,4100	on
2	421	on
3	422	off
4	427	on
5	452	on
6	451	off
7	457	on
8	45-46	on
9	437	on
10	447	on
11	4100	off

#3변압기 고장시 정전부하(32000[kVA])가 여유용량(29000[kVA])보다 크므로 우선순위와 여유용량을 비교 i, k, l D/L을 선택한다. j D/L은 l D/L보다 우선순위가 높지만 여유용량을 초과하므로 다음 우선순위가 높은 l D/L을 선택한다. LB를 고려하여 #1변압기에 k, l D/L을 #2변압기에 i D/L를 절체한다. 정전복구 불가능한 k D/L은 타 변전소로 절체요청을 한다.

V. 결 론

본 논문에서는 변전소 주변압기 사고시 복구계획을 위해 평가함수를 이용하였으며, 이 평가함수의 계산을 위하여 퍼지 추론과 멤버십 함수를 이용하였다.

평가 함수에서 고려한 부하 부담 균등화와 최소 개폐기 조작 횟수를 결정하고 운용목적에 따라 가중치를 두고 평가하였고 정전선로의 부하가 변압기 여유용량을 초과하는 경우는 선로의 중요도에 따른 우선순위를 고려하여 절체하되 정전부하가 최소가 되도록하였으며 그 결과 만족할 만한 복구계획을 얻을 수 있었다.



참고문헌

- 고윤석, 이기서, 1995, “자동화된 변전소의 주변압기 사고시 제어전략 수립지원을 위한 전문가 시스템” 전기학회 논문지, Vol. 44, No. 10, pp. 1258-1264.
- Hung-Jae Lee, Young-Moon Park, 1996, “A Restoration Aid Expert System for Distribution Substations” IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 4, pp. 1765-1770, October.
- Z. Z. Zhang, G. S. Hope, O. P. Malik, 1990, “A Knowledge-based Approach to Optimize Switching in Substations”, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 5, No. 1, pp. 103-109, Jan.
- T Ananthapadmanabha, A D Kulakarni, A S G Rao, J G Char and K R Rao, 1997, “Knowledge-based methodology for intelligent sequence switching, fault identification and service restoration of distribution system” Electrical Power System & Energy systems, Vol. 19, No. 2, pp. 119-124.
- Daniel S. Kirschen, Terry I. Volkmann, 1991, “GUIDING A POWER SYSTEM RESTORATION WITH AN EXPERT SYSTEM” IEEE transactions on Power System, Vol. 6, No. 2, pp. 558-564.
- 한국전력공사 전력연구원, 1995, Development of Expert Sysetm for Fault Diagnosis and Restoration at Substations.

감사의 글

어느덧 대학원생활의 막바지에 다달았습니다. 즐거운일, 힘든일, 아쉬운일 등, 지난 2년여의 시간들이 아쉬움이 남기는 하지만 아주 소중한 시간이었음을 더욱 느끼게 합니다.

미약하나마 이 작은 결실을 맺기까지 아낌없는 배려와 지도를 해주신 김세호 교수님과 좌종근 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 항상 따뜻한 관심과 가르침을 주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님께 감사를 드립니다.

또한 어렵고 힘든 여건속에서도 저를 도와주신 홍문석, 진충민, 한성훈, 김용현, 정영준군과 연구과정에서 많은 도움을 준 전력계통 실험실의 양형석, 한승효군과 김태익, 고석범과장님과 신삼균선배님, 송장익학형과 지금은 사회인이 되어 열심히 일하고 있는 안진오군과 문상호, 임대관선생님과 여러 학우들에게 고마움의 마음을 전합니다. 아무 불편없이 대학원생활을 하게 해주신 주신 직장 선배님들과 동료들에게 감사의 마음을 전합니다.

이러한 결실을 맺게까지 꾀은일을 도맡아 해주며 사랑으로 뒷바라지해 준 아내와 귀여운 딸 여운이에게 고마움을 전합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 헌신적인 사랑으로 보살펴주신 할머니님, 부모님, 장모님께 이 논문을 바칩니다.