

퍼지 논리 적용에 의한 배전계통의 고장 검출 시스템 개발

김 창 중
수원대학교 전기공학과

○ 오 용 태
한국기술교육대학교 전기공학과

Development of a Fuzzy Logic-based Fault Identification System in Distribution System

Chang-Jong Kim
Suwon University

Yong-Taek Oh
Korea Institute of Technology and Education

Abstract:

Abnormal conditions and disturbances in distribution system cause an immediate influence to the customers. Conventional detection schemes for the distribution abnormalities have been applied in limited extents mainly because of their low reliability. In this paper, we developed a disturbance identification system which monitors the load level after a transient, checks the harmonic behavior of the load, and finally makes decision on the cause of the disturbance. This system identifies and discriminates overcurrent faults, arcing ground faults, recloser activities, and foreign object or tree contacts. In the implementation of the identification system, we applied fuzzy logic to better represent some variables whose quantities are expressed only in non-numerical terms.

I. 서론

배전 선로에 있어서의 고장 지락에 대한 연구가 진행되면서 고조파 현상에 대한 연구가 주로 진행되었다. 그러나 고조파 현상에만 국한하여 검출 이론을 추구할 경우 여러 가지 문제에 부딪치게 되는데 그 중의 하나는 배전 선로 고장 지락 검출기의 신뢰성 문제이다. 신뢰성에 있어 특히 안전성(Security)면에서 큰 문제를 일으켜 오동작을 일으키게 한다. 최근에 발표된 상업적인 고장 지락 검출기 채용에 있어서도 고장 지락의 검출보다는 우선 감시 장치로 사용하면서 고장 지락의 검출에 대한 결정은 여전히 운전자의 판단에 맡겨 두고 있다.

이같은 이유는 고장 지락 현상의 검출에 오직 고조파 현상만을 이용하여 일반적인 보호 기기의 동작에 의해서 발생하는 부하의 변화를 이용하지 않고 있기 때문으로, 본 연구에서는 어떤 외란현상 이후에 벌어지는 부하의 변화 및 동시에 고조파의 현상이 계속 되는가의 여부를 조사하여 고장 지락뿐 아니라 과전류 고장 및 이를 접촉 현상 등의 고장과 recloser 동작등의 현상도 구분하여 고장 검출의 신뢰성을 높이고 오동작을 최소화하는데 그 목적이 있다.

위의 원리를 적용하기 위해서는 부하의 변화량 및 과전류 크기가 상태와 현상에 따라 달라질수 있으므로 이러한 비수치적인 내용을 잘 표현할 수 있는 Fuzzy Logic을 이용하도록 한다. [1]

arc현상에 대해서도, 이 arc 현상의 지속 여부 그리고 arc 전류의 크기와 발생 빈도에 따라 arc현상의 증대 또는 지속 또는 무작위성 여부를 어떻게 규정하느냐의 문제가 있어 arc 검출기를 이용하여 이것을 해결하였다 [2].

이 arc 검출기는 현재 개발된 두 개의 알고리즘, 즉 magnitude algorithm과 randomness algorithm [3, 4]을 동시에 이용하여 각 알고리즘의 장점과 단점을 이용하여 각 arc 상태에

서 계산한 confidence level을 사용하도록 한다. 본 연구에서는 이 confidence level의 계산은 다루지 않고 이미 구한 값을 그대로 사용하였다.

본 연구에서 중점을 둔 또 하나의 특이한 점은 본 시스템은 기존의 보호 기기가 동작하는 동안에 보호 기기가 역할을 할 수 있도록 지연시간을 부여하는 것이다. 이 지연시간이 종료되었는데도 배전 선로에 고장 현상이 지속된다면, 보호 기기의 불량 또는 보호 기기로 검출할 수 없는 고장 현상으로 판단하여 본 시스템이 동작되도록 되어 있다.

II. 배전 선로에서의 이상현상 검출 원리

부하전류의 형태를 보면 어떠한 이상 또는 정상 현상이 생기는 지를 알 수가 있다. 즉, 부하 Level에 따라서 다음과 같은 다양한 형태의 배전선로 현상을 구분할 수 있는 것이다. 부하와 arc현상의 두 변수에 의하여 배전 선로에서의 현상을 살펴보면 다음과 같다 [5].

	Load의 변화	arc behavior(고조파 현상)
고장 지락:	감소	현상 계속 (random behavior)
수목 고장:	변화없음	현상 계속 (바람과 날씨의 영향 받음)
선로단선:	감소	짧은 순간의 transient 그 후에는 quiescent
recloser:	감소/증가/원위치	반복짧은 순간의 transient
과전류 고장:	증가	없음

즉, 위의 분류에서처럼 부하에서의 변화는 차단기 또는 recloser의 동작으로 나타나며 이러한 초기 동작 이후에는 부하 level에 변화가 있으며 또한 부하에서의 arc현상이 이상 현상에 따라서 다르게 나타나므로 부하와 arc현상을 체크하면 여러 현상을 식별할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서는 기존에 시스템에 설치되어 있는 보호기기가 기능을 담당할 수 있도록 충분한 시간을 주고 주어진 시간내에 동작하지 않을 경우에 본 연구 시스템이 동작하도록 하여 불필요한 동작과 오동작(false alarm)의 확률을 줄이도록 하였다.

III. 이상현상 검출을 위한 구성

이상현상의 검출과 구분을 위해서는 위에서 언급한 바와 같이 부하와 arc를 감시하여 구분에 대한 결정을 내리도록 되어 있다. 이러한 기능을 위하여 다음과 같은 function block을 형성하였다.

이상 현상 발견 trigger function

우선 이상 현상의 시작을 check하여야 하는데 이 이상현상이 발견되면 검출시스템을 가동(trigger)시키게 된다. trigger가 되지 않은 동안은 정상상태이므로 검출시스템은 idle 상태에 있게

된다. Trigger되는 조건은 아래의 조건을 OR logic으로 조합하여 결정된다.

- a: Overcurrent fault (과전류 고장)
- b: Significant loss of load (부하 전류의 현저한 감소)
- c: breaker open (차단기의 개방)
- d: high arc confidence (arc현상이 뚜렷함)

이상 현상 검출 및 구분 결정 function

이상 현상 검출 및 결정을 위하여 다음과 같은 일련의 기능을 수행하게 된다. 즉, 우선 Reset 기능이다. arc 현상의 변수 중에서 MARC(Multiple arc 현상)는 arc현상이 반복적으로 일어나고 있는 것을 나타내는데 trigger된 후에 이 count를 reset 시키는 기능이다. 그리고 또 하나의 기능은 지연시간 기능이다. 이 기능은 trigger가 발생한 후에 약 5 초동안 지연시간을 주어 모든 과도 현상이 없어지도록 한다. recloser나 3-phase 현상에 의한 false alarm을 막기 위하여 이 기능이 필요한 것이다. 이때 결정에 소요된 시간을 계수하는 timer를 제기동시킨다. 검증 시간 이내에 기존의 보호기기가 동작되는 것을 전제로 하며, 이 시간이 초과된 뒤에도 이상 현상이 존재하면 본 검출 시스템에 의하여 현상이 식별되도록 하였다.

위의 trigger logic과 decision making의 기본 원리를 흐름도로 나타내면 그림 1과 같다.

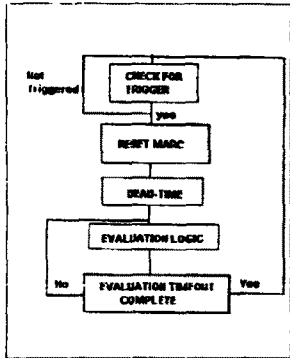


그림 1. 이상현상 검출 및 식별 기능도

표 1. 이상 현상 결정 로직

LOSS of LOAD	ARC Present	still OCF occurred	MARC	Decision
NO	NO	X	X	Normal
NO	YES	NO	NO	Increase Counter
NO	YES	YES	X	Fault!!! Trip Condition
NO	YES	NO	YES	Alarm
YES	NO	NO	NO	Normal
YES	NO	YES	NO	Normal
YES	YES	X	X	Fault!!! Return to start

여기서 문제가 되는 것은 표 1과 같은 로직에 따라 결정을 내릴때 검사대상인 변수에 대하여 변화량을 어떻게 구분하여 표 1의 구분처럼 YES와 NO를 분류하느냐하는 것이다. 즉, 변수값의 변화량에 따른 변화 여부의 판정이 어려워져서 본 연구에서는 이러한 문제에 대하여 좋은 fuzzy logic을 적용하기로 하였다. 변수 중에서 fuzzy value를 갖는 것과 그 변수를 규정하기 위하여 감시해야 하는 전기적 parameter를 표 2에 나타내었다. MARC는 arc현상을 count하는 것이어서 fuzzy value가 아닌 crisp value를 갖는 변수이다. 다음과 같은 조건에 대하여 Fuzzy rule을 설정하였다. Fuzzy logic을 적용한 경우에는 OR의 경우에는 max rule을 AND인 경우에는 min rule을 적용하게 됨으로 다음과 같은 fuzzy rule을 프로그램으로 구현하게 된다.

표 2. fuzzy 변수와 그 감시대상 parameter

변수	내용	감시 parameter
OCF	Overcurrent Fault 발생	rms
LOL	Loss of Load 발생	rms
BRK	CB action 발생	rms
ARC	Arc behavior 발생	confidence

1. Trigger Logic:

max of (LOLYES, ARCYES, BRKYES)--> TRIGYES

2. Trip Condition logic

max of (min of (LOLYES, ARCYES, OCFYES, MARCYES), min of (LOLYES, ARCYES, OCFYES, MARCNO), min of (LOLYES, ARCYES, OCFNO, MARCYES), min of (LOLYES, ARCYES, OCFNO, MARCNO), min of (LOLNO, ARCYES, OCFYES, MARCYES), min of (LOLNO, ARCYES, OCFYES, MARCNO)) --> tripmax

3. Alarm Condition logic

min of (LOLNO, ARCYES, OCFNO, MARCYES) --> alarmax

4. Normal Condition logic

max of (min of (LOLNO, ARCNO, OCFYES, MARCYES), min of (LOLNO, ARCNO, OCFYES, MARCNO), min of (LOLNO, ARCNO, OCFNO, MARCYES), min of (LOLNO, ARCNO, OCFNO, MARCNO), min of (LOLYES, ARCNO, OCFYES, MARCNO), min of (LOLYES, ARCNO, OCFNO, MARCNO)) --> normalmax

5. Defuzzification using Centroid for final output

Centroid(tripmax, alarmax, normalmax)--> Final output with probability of the distribution status.

fuzzy logic에 의한 최종 결과는 현재의 배전 선로에서의 이상 현상에 대한 종합적인 상태를 나타내는 것이 되는데 3-phase와 residual에서의 결과를 결합하여 최종적인 결론을 내리도록 되어 있다. 각 phase에 대한 위의 defuzzification의 Centroid결과를 actA, actB, actC 라고 나타내고 residual에대한 결과를 actR이라고 하면 다음과 같이 최종 결론을 위한 결정을 내릴 수 있다.

즉, If (max of (actA, actB, actC, actR) is greater that 0.94) and (min of (max of (actA, actB, actC), actR) is less than 0.98, then WARNING

If min of (max of (actA, actB, actC), actR) is greater than 0.98, then TRIP

위의 rule에서 actA, actB, actC와 actR을 다르게 취급한 것은 Phase-A, B, 또는 C의 변화는 residual에 나타나기 때문이다. 위의 결과에 의하여 직접 TRIP 신호를 보내거나 ALARM신호를 운전자에게 전달하여 필요한 조치를 취하도록 하였다. 위에서 결과의 값이 높게 책정된 것은 safety를 중시하는 방향으로 잡았기 때문이다.

IV. 검출 및 구분 시스템의 적용 및 테스트

본 시스템을 적용하고 테스트하기 위하여 PC환경에서 프로그램하고 실제 데이터를 이용하여 테스트하였다. 테스트에 사용된 데이터의 실효치는 그림 2와 같다. 프로그램에서는 이 실효치 데이터에 대하여 위의 fuzzy 변수를 30개의 실효치에 대하여 계산하였다. 즉, 30개의 실효치를 1 packet으로 단위화 하고 각 packet에 대하여 위의 fuzzy 변수를 적용하고 위의 Fuzzy rule에 따라서 계산을 행하였다. 그림 3에 결과의 한 예를 나타내었다. 이 결과는 다음과 같은 데이터를 순서적으로 나타내었다. 처음칸 부터, packet(PAC), dead-time Count(UTC), Evaluation time count(ETC), 그리고 max of (actA, actB, actC) (MABC),

그리고 그 다음 칸에는 $\min(\max(\text{actA}, \text{actB}, \text{actC}), \text{actR})$ (ABCR) 을 나타내었고, 마지막 칸에 decision의 결과 (STAT)를 나타내었다. decision의 결과는 숫자로 나타내었는데 그것은 다음과 같다.

0: system ready 상태 1:Normal 상태 2:Abnormal 상태
3: Alarm 상태 4:Trip 조건

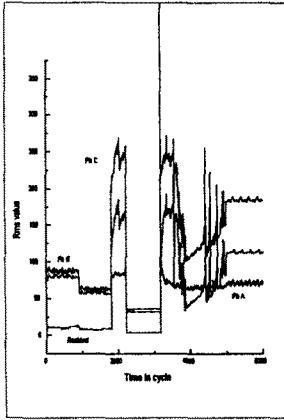


그림 2. 적용 데이터 예

그림 3에서 보면 우선 Trigger의 조건이 Ltrigger 즉, Loss of load에 의한 것인지, 아니면 Otrigger, 즉, OCF의 조건에 의한 것인지를 판정되고 바로 15 packet동안의 dead-time이 Count되어 count가 15가 될 때까지는 idle상태가 되고, 이후에 계산이 시작되고 decision이 내려지는데 decision이 정상인 경우여는 Evaluation timer가 count를 시작하게 된다. 이 evaluation timer는 30 packet이후에 종료된다.

그림 3을 보면 30번째의 packet에서 loss of load의 원인에 의하여 trigger가 일어났고, 31번째 packet부터 45번째 packet까지 즉, DTC=15될 때까지 idle상태로 유지된다. DTC=15부터 MABC와 ABCR이 계산되고 STAT가 결정된다. 그리고 이 시점부터 ETC가 카운트되기 시작한다. ETC는 STAT=1일때는 증가하지만 그 외의 경우에는 ETC는 그대로 유지된다. 즉, 61번째의 packet을 보면 STAT=1에서 STAT=2로 변화했기 때문에 ETC=15가 유지되고 있는 것이다. 이 ETC는 STAT=1로 돌아간 80번째의 packet에서 다시 증가되기 시작하여 최종 30에 이르게되면 decision making이 끝나고 system은 준비상태로 되는 것이다.

PAC	ETC	MABC	ABCR	STAT
1	0	0.000000	0.000000	0
2	0	0.000000	0.000000	0
27	0	0.000000	0.000000	0
28	0	0.000000	0.000000	0
29	0	0.000000	0.000000	0
30	0	0.000000	0.000000	0
31	1	0.000000	0.000000	0
44	14	0.000000	0.000000	0
45	15	0.000000	0.000000	0
46	15	0.330147	0.330147	1
47	15	0.330147	0.330147	1
48	15	0.330147	0.330147	1
49	15	0.330147	0.330147	1
58	15	0.330147	0.330147	1
59	15	0.330147	0.330147	1
60	15	0.330147	0.330147	1

Ltrigger1=0.790666 and Otrigger=0.000000
 Ltrigger2=0.790665 and Otrigger2=0.000000
 TRIGGERED at PHASE=1 (DATA=0)
 with RMS=66.000000
 and OCF=0.000000 and LAL=0.790666
 and OCF=0.000000 and ARC=0.000000

61	15	0.980970	0.330147	2
62	15	0.980970	0.330147	2
63	15	0.980970	0.330147	2
79	15	0.980970	0.330147	2
80	15	0.330147	0.330147	1
81	15	0.330147	0.330147	1
82	15	0.330147	0.330147	1
83	15	0.330147	0.330147	1
90	15	0.330147	0.330147	1
91	15	0.330147	0.330147	1
92	15	0.330147	0.330147	1
93	15	0.330147	0.330147	1
94	15	0.330147	0.330147	1
95	15	0.000000	0.000000	0

그림 3. 이상 현상 검출의 한 예

V. 결론

배전선로의 주된 고장원인으로는 수목조류 등의 이물접촉, 일반인의 과실, 비바람에 의한 자연현상, 수용가 설비 등에 의한 타상과 과급동 사고의 대부분은 순간고장이며, 전력사고가 다수를 차지한다. 기존에 개발된 고지향고장 검출 알고리즘의 겨우 안전성 측면에 문제가 있어 상업적인 고장지력 검출기를 채용하면서도, 우선 감시장치로 이용하면서 지력고장의 검출에 대한 결정은 여전히 운전자의 판단에 맡겨두고 있는 실정에서 본 연구에서는 arc현상뿐 아니라 부하 변화와 변화 이후에 따르는 부하에서의 감응현상을 변수로 활용하여 배전선로의 이상 현상을 검출하고 분류하고자 하였다. 이 시스템을 실현함에 있어 다수 변수를 정량적으로 표시하기 위하여 퍼지 로직을 적용하였다. 본 시스템에 의한 실제 예를 데이터를 통해 보았다. 제시한 시스템은 기존의 보호기기가 동작할 수 있도록 무동작 지연시간을 부여함으로써 일정시간 이후에도 배전선로의 고장신호가 계속되는 경우에 보호기기의 불량, 또는 보호기기로 검출할 수 없는 고장으로 판단하여 본 시스템이 동작되도록 하는 후비보호 기능을 갖도록 함으로서 신뢰성 향상을 기하였다. 제시한 방법으로 본 고장 검출기가 배전계통에 적용된다면, 배전계통의 신뢰성 및 안정성 측면에 있어 상당한 개선을 가지 을 수 있으리라 생각한다.

VI. 참고문헌

- [1] C. J. Kim, B. D. Russell, "A Structure of Fuzzy Decision Making System for Power System Protection," Proc. of the Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 998-1003, 1993.
- [2] C. J. Kim, B. D. Russell, "Classification of Faults and Switching Events by inductive reasoning and expert system methodology," IEEE PWRD 5, 3, 1314-1320, July 1990.
- [3] B. M. Aucoin, B. D. Russell, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Component," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No. 6, pp. 1596-1606, June 1982.
- [4] C. L. Renner, P. W. Carswell, B. D. Russell, "Improved Algorithm for Detecting Arcing Faults using Random Fault Behavior," Electric Power Systems Research, Vol. 17, No. 1, pp. 49-56, 1989.
- [5] 김창중, 유명호, "배전선로 고장 제시 및 종합전단 기술", 대한전기학회지 1996년 5월호.
- [6] R. Patterson, W. Tyska, B. D. Russell, B. M. Aucoin, "A Microprocessor-based Digital Feeder Monitor with High Impedance Fault Detection," Forty-Seventh Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, March 21-23, 1994