

선로자동화 시스템의 신뢰도 향상에 관한 연구

김 세 호*

A Study on Reliability Improvement of Feeder Automation System

Se-Ho Kim*

ABSTRACT

Automated breakers combined with remote control of distribution circuit breakers, reclosers and load breaker switches can significantly reduce the time required to detect and locate faults, increase the speed of isolating fault equipment and provide faster load restoration above and below a faulted feeder zone. This paper deals with the reliability improvement of feeder automation in distribution system. It is shown that the reliability of automated breakers is improved by considering security and operational failure.

Key words : Feeder Automation, Reliability Evaluation, Reliability Model, Operational Failure, Security Failure

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 배전계통은 설비의 증가 및 지중계통의 확대 등으로 복잡하게 하게 되어 운용 및 보수 등에 대한 업무의 효율화가 절실히 요구되고 있다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 전력공급 신뢰도의 향상 및 보수 업무의 효율화를 도모할 수 있는 선로자동화 시스템의 개발을 추진하게 되었다.

선로 자동화 시스템은 1950년대부터 개발되었으나 많은 문제점을 지니고 있어 본격적으로 사용할 수 없는 실정이었다. 그러나 1970년대에 정보화 사회가 전개되면서 컴퓨터의 보급 등으로 인해 전력공급의 고신뢰성 및 경제성을 고려한 새로운 선로 자동화 시스템이 개발되었으며 현재 실용화 및 실계통 적용단계에 이르고 있다.

국내의 경우 자동화는 재폐로 기능을 가지고 있는 Recloser 와 Sectionalizer의 보호협조에 의해 고장구간을 자동으로 분리할 수 있는 계통의 구성으로부터 출발하여 1990년 본격적으로 국산화 개발을 시작하였으며 현재 서울 강

* 제주대학교 전기공학과
Dept. of Electrical Eng., Cheju Univ

동지점의 피더에 자동화개폐기를 설치하여 실증 시험 중에 있다.

이러한 선로자동화 시스템이 성공하기 위해서는 자동화 개폐기의 고신뢰성이 요구되며 신뢰성의 고저에 따라 수용가에서 느끼는 신뢰도는 많은 차이가 나게 된다.

배전계통의 신뢰도를 평가하는 연구는 Chang⁽¹⁾이 배전계통의 설계의 타당성을 평가하기 위해 비용신뢰도 지수(cost reliability index)와 비용효과 지수(cost effectiveness ratio)를 도입한 이후 많은 연구가 이루어 지고 있다. 그후 Lawler⁽²⁾는 배전자동화에 따른 신뢰도 평가를 위해 자동화 전,후의 정전비용의 차를 평가하였고, Warren⁽³⁾은 일시적 정전(변개나 수목 등의 접촉 등)을 감소시켜 신뢰도 지수를 산정한 효과에 대해 고찰하였으며, Chen⁽⁴⁾은 신뢰도 평가를 위한 수용가를 정의 하여 배전계통의 신뢰도를 평가하고 이를 이용하여 변전소의 증설대신 배전선의 신설을 제안하는 등 최근에까지 계속해서 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 자동화 개폐기가 설치된 선로에 대해 신뢰도를 평가하고 자동화개폐기의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 개폐기의 구성방안을 제안하며 이에따른 신뢰도의 변화를 파악하고자 한다.

II. 신뢰도 지수

배전계통은 선로, 개폐기, 변압기, 차단기, 퓨즈 등으로 구성되어 있으며 이러한 계통의 신뢰도를 평가하기 위해서는 다음의 정보를 필요로 한다.

- i) 선로, 변압기, 개폐기 등 모든 구성요소들의 사고율
- ii) 각 구성요소의 복구시간
- iii) 개폐기와 차단기 등의 조작시간
- iv) 계통의 구성상태와 부하량

2.1 계통축약 및 부하지점의 신뢰도 지수

임의의 부하지점에 대한 신뢰도 지수의 산출식은 다음과 같다.

$$\lambda = \sum \lambda_i \text{ [failure/year]} \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum \lambda_i r_i}{\lambda} \text{ [hours/failure]} \quad (2)$$

$$U = \lambda \times r = \sum \lambda_i r_i \text{ [hours/year]} \quad (3)$$

여기서

λ_i : 구간 i의 선로고장율 [failure/km, year]

r_i : 구간 i의 평균복구시간[hours]

식 (1)은 부하지점의 평균고장율을 평가하는 수식으로 각 구간의 사고에 대하여 부하지점에 정전사고를 미치는 모든 구간 구성요소들의 고장율을 누적하여 구하게 된다.

식 (1)과 (2)는 계통을 구성하는 많은 요소들이 직렬로 연결되어 있을 때 등가의 요소로 대체시킬 수 있는 수식이다. 따라서 부하지점과 공급지점 사이의 각 요소들의 고장율과 복구시간이 계산되어져 있다면 즉시 등가의 하나의 요소로 대체될 수 있으며 식 (1)과 (2)를 계속해서 이용함으로써 계통을 간략화시킬 수 있다.

2.2 신뢰도 평가지수

신뢰도 산출에 사용되는 부하지점의 평균사고율, 평균 정전시간(평균 복구시간), 연평균 정전시간은 가장 기본적인 지수들이지만 수용가의 호수나 수용가의 부하 등에 대한 정보를 포함하고 있지 않으므로 계통의 특성을 정확하게 반영하기 어렵다. 따라서 계통의 수행능력, 동작특성을 반영하기 위해 다른 형태의 지수를 사용하게 되며 일반적으로 크게 수용가 중심의 지수와 부하 및 에너지 중심의 지수로 구분된다.

0 수용가중심의 신뢰도 지수

신뢰도 지수	정 의
시스템 평균 정전횟수 지수 (SAIFI : System Average Interruption Frequency Index)	$\frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i}$ = $\frac{\text{전체 정전된 수용가 수}}{\text{전체 수용가 수}}$
시스템 평균 정전시간 지수 (SAIDI : System Average Interruption Duration Index)	$\frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i}$ = $\frac{\sum \text{수용가정전 지속시간}}{\text{전체 수용가 수}}$
수용가 평균정전 횟수 지수 (CAIFI : Customer Average Interruption Frequency Index)	$\frac{\sum \lambda_i N_i}{N_a}$ = $\frac{\text{전체 정전된 수용가 수}}{\text{영향받는 수용가 수}}$
수용가 평균 정전시간 지수 (CAIDI : Customer Average Interruption Duration Index)	$\frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i}$ = $\frac{\sum \text{수용가 정전 지속시간}}{\text{전체 정전된 수용가 수}}$
평균 공급가용 지수 (ASAI : Average Service Availability Index)	$\frac{\sum N_i \times 8760 - \sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760}$ = $\frac{\text{수용가 공급 가용시간}}{\text{수용가 공급 수요시간}}$
평균 공급 불가용 지수 (ASUI : Average Service Unavailability Index)	$= \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760}$ = $\frac{\text{수용가 공급 불가용시간}}{\text{수용가공급 수요시간}}$ = 1 - ASAI

0 부하 및 에너지 중심의 신뢰도 지수

신뢰도 지수	정 의
공급부족 에너지 지수 (ENS : Energy Not Supplied Index)	$\sum L_{ai} U_i$ U_i : 부하지점 i 의 연평균 정전시간 L_{ai} : 부하지점 i 의 평균부하
평균 공급부족 에너지 지수 (AENS : Average Energy Not Supplied Index)	$\frac{\sum L_{ai} U_i}{\sum N_i}$ = $\frac{\text{공급부족 에너지}}{\text{전체 수용가 수}}$
평균수용가 단축지수 (ACCI : Average Customer Curtailment Index)	$\frac{\sum L_{ai} U_i}{N_a}$ = $\frac{\text{공급부족 에너지}}{\text{영향받는 수용가 수}}$

III. 자동화개폐기의 신뢰도

자동화 개폐기는 전류나 전압을 변환시켜주는 변성기, 전압, 전류 등의 신호를 받아 동작의 필요 여부를 판정하는 계전기, 계전기의 판정결과에 따라 동작을 하는 차단부분인 차단기 외에 각종 전원장치, 신호전송장치 등으로 이루어져 하나의 시스템으로 취급되고 있다. 그러나 구성 요소중 어느 하나라도 기능을 성공적으로 수행하지 않으면 개폐기 전체가 그릇된 기능을 수행하는 결과를 나타낸다.

3.1 동작불량(실패)의 형태

어떤 요소가 정상적으로 동작하지 않는 동작 불량에는 두가지 형태가 있다. 하나는 필요한 경우에도 동작이 되지 않는 경우로서 부동작(operational failure, 동작실패)으로 표현되며 다른 하나는 필요하지 않은 경우 동작하는 것으로서 오동작(security failure, 안정실패)이라 한다.

두개의 동일한 요소 A_1 과 A_2 가 병렬로 연결된 시스템에 대해 동작불량의 두가지 형태를 고려해 보자.

q_0 를 부동작 확률, q_s 를 오동작 확률이라 하면 전체 시스템의 부동작 확률은 다음과 같다.

$$Q_0 = q_0^2 \tag{4}$$

오동작에 대해서는 하나의 요소라도 오동작을 일으키면 전체 시스템이 오동작을 하는 결과이므로 직렬형태가 되어 다음과 같이 표현된다.

$$Q_s = 1 - R_s = 1 - p_s^2 = 1 - (1-q_s)^2 = q_s(2 - q_s) \tag{5}$$

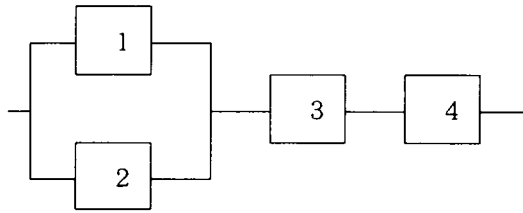
부동작과 오동작의 원인에 의한 병렬 시스템의 동작불량 확률과 신뢰도는 식 (4)와 (5)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$Q = R' = Q_0 + Q_s = q_0^2 + q_s(2-q_s) \tag{6}$$

$$R = 1 - R' = 1 - q_0^2 - q_s(2-q_s) \quad (7)$$

두 가지 형태의 동작불량에 대한 로직은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1로부터 두 개의 요소가 동시에 부동작을 일으키거나 어느 하나의 요소가 오동작을 일으키는 경우 시스템은 정상적으로 동작을 하지 않는 동작불량 상태가 된다.



1, 2 : Security Failure
3, 4 : Operational Failure

Fig. 1 Logic diagram of dual unreliability modes for two parallel elements

3.2 자동화개폐기의 신뢰도 모델

개폐기의 신뢰도를 평가하기 위하여 다음과 같이 동작불량 확률을 정의하였다.

q_{oi} = 사고가 보호범위 안에 발생하였을 때 동작해야 할 장치 i 의 부동작 확률

q_{si} = 계통에 사고가 발생하지 않았거나 보호구역 밖에서의 사고에 대해 동작할 장치 i 의 오동작 확률

Q_{oi} = 부시스템 i 의 부동작 확률

Q_{si} = 부시스템 i 의 오동작 확률

Fig. 2에 간단한 부시스템의 여러 형태를 표시하였다.

Fig. 2(a)의 병렬로 연결된 보호계전기에 대해 각 요소의 부동작 확률을 q_{o1} , q_{o2} 라 하면 두 요소가 모두 동작불량일 때 부시스템이 정상적인 기능을 수행하지 못하므로 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{oa} = q_{o1} q_{o2} \quad \text{if } q_{o1} \neq q_{o2} \quad (8)$$

$$= q_o^2 \quad \text{if } q_{o1} = q_{o2} = q_o$$

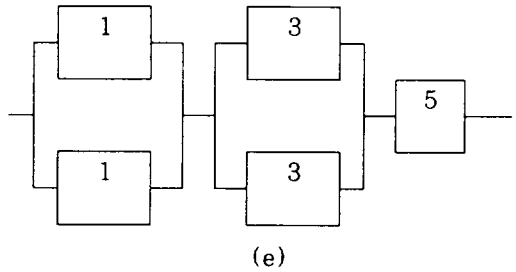
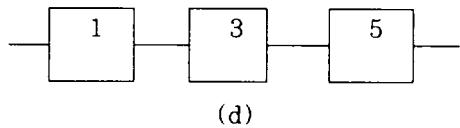
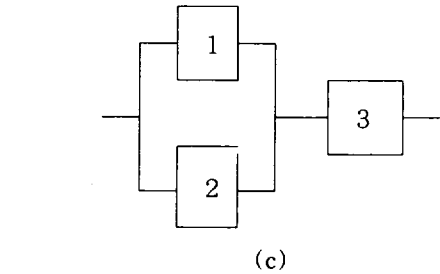
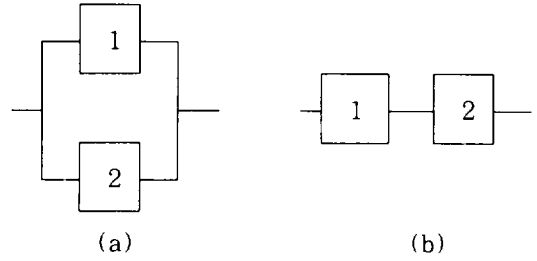


Fig. 2 Several simple subsystem connections

식 (8)에서 $q_{o1}, q_{o2} < 1$ 이므로

$$Q_{oa} = q_o^2 < q_o \quad (9)$$

병렬로 연결함으로써 Q_{oa} 즉 부시스템이 부동작할 확률은 감소된다.

오동작 확률 Q_{sa} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$Q_{sa} = 1 - (1-q_{s1})(1-q_{s2}) \quad (10)$$

$$= q_{s1} + q_{s2} - q_{s1} q_{s2} \quad \text{if } q_{s1} \neq q_{s2}$$

$$Q_{sa} = 1 - (1 - q_s)^2 \quad (11)$$

$$= q_s (2 - q_s) \text{ if } q_{s1} = q_{s2} = q_s$$

식 (11)에서 $q_s < 1$ 이므로

$$(2 - q_s) > 1, Q_{sa} > q_s \quad (12)$$

이다. 즉 병렬처리함으로써 오동작의 확률은 증가될 수 있다.

Fig. 2(b)의 직렬연결에 대해서는 다음의 식이 성립한다.

$$Q_{sb} = q_{s1} q_{s2} \text{ if } q_{s1} \neq q_{s2} \quad (13)$$

$$= q_s^2 \text{ if } q_{s1} = q_{s2} = q_s$$

$$Q_{ob} = q_{o1} + q_{o2} - q_{o1} q_{o2} \text{ if } q_{o1} \neq q_{o2}$$

$$= q_o (2 - q_o)$$

$$\text{if } q_{o1} = q_{o2} = q_o \quad (14)$$

식 (13)과 (14)로부터 직렬연결시 단일 요소인 경우에 비해 부동작의 확률은 증가하고 오동작의 확률은 감소한다.

Fig. 2(c)의 직병렬 연결인 경우에는 Fig. 2(a)와 (b)로부터 다음의 표현식을 구할 수 있다.

$$Q_{sc} = Q_{sa} Q_{sb}$$

$$= (q_{s1} + q_{s2} - q_{s1} q_{s2}) q_{s3} \text{ if } q_{s1} \neq q_{s2}$$

$$= q_s (2 - q_s) q_{s3} \text{ if } q_{s1} = q_{s2} = q_s$$

$$= q_s \quad (15)$$

$$Q_{oc} = Q_{oa} + Q_{ob} - Q_{oa} Q_{ob}$$

$$= q_{o1} q_{o2} + q_{o3} - q_{o1} q_{o2} q_{o3}$$

$$\text{if } q_{o1} \neq q_{o2}$$

$$= q_o^2 (1 - q_{o3}) + q_{o3} \text{ if } q_{o1} = q_{o2} = q_o$$

$$= q_o \quad (16)$$

Fig. 2(c)의 경우를 계전기 병렬, 차단기 직렬인 경우에 적용시켜 보자. 식 (15)와 (16)으로부터 계전기 병렬형태는 오동작에 민감하지만 차단기가 오동작을 일으킬 확률은 적기 때문에

전체적으로는 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 부동작인 경우에 대해서는 계전기의 병렬연결로 인해 계전기의 영향은 크지 않지만 직렬 연결되는 차단기의 부동작이 큰 영향을 미친다. 따라서 Fig. 2(c)와 같은 계전기 병렬, 차단기 직렬인 시스템인 경우 신뢰도는 계전기의 실패보다는 차단기의 실패에 많은 영향을 받는다.

Fig. 2의 (d)와 (e)의 오동작과 부동작은 다음과 같이 표현된다.

Fig. 2(d)의 경우

$$\text{오동작 : } Q_s = q_{s1} q_{s3} q_{s5} \quad (17)$$

$$\text{부동작 : } Q_o = q_{o1} + q_{o3} + q_{o5} - q_{o1} q_{o3} - q_{o1} q_{o5} - q_{o3} q_{o5} + q_{o1} q_{o3} q_{o5} \quad (18)$$

Fig. 2(e)의 경우

$$\text{오동작 : } Q_s = q_{s1} q_{s3} q_{s5} (2 - q_{s1}) (2 - q_{s3}) \quad (19)$$

$$\text{부동작 : } Q_o = q_{o1}^2 + q_{o3}^2 + q_{o5}^2 - q_{o1}^2 q_{o3}^2 - q_{o3}^2 q_{o5}^2 - q_{o1}^2 q_{o5}^2 + q_{o1}^2 q_{o3}^2 q_{o5}^2$$

$$\text{if } q_{o1} = q_{o2}, q_{o3} = q_{o4}, q_{s1} = q_{s2}, q_{s3} = q_{s4} \quad (20)$$

식 (17)과 (19)로부터 변성기, 계전기, 차단기로 구성되는 경우 오동작은 거의 무시될 수 있다.

IV. 사례연구

Fig. 3에서 보는 바와 같이 구간 1에서 4까지는 지중선로, 나머지 구간은 가공선로로 구성되어 있으며 간선(Fig. 3의 구간번호 1, 2, 4, 5, 11, 12, 13, 18, 19, 22, 23)에 자동화개폐기가 설치되어 있다.

각 구성요소의 신뢰도 데이터는 Table 1에,

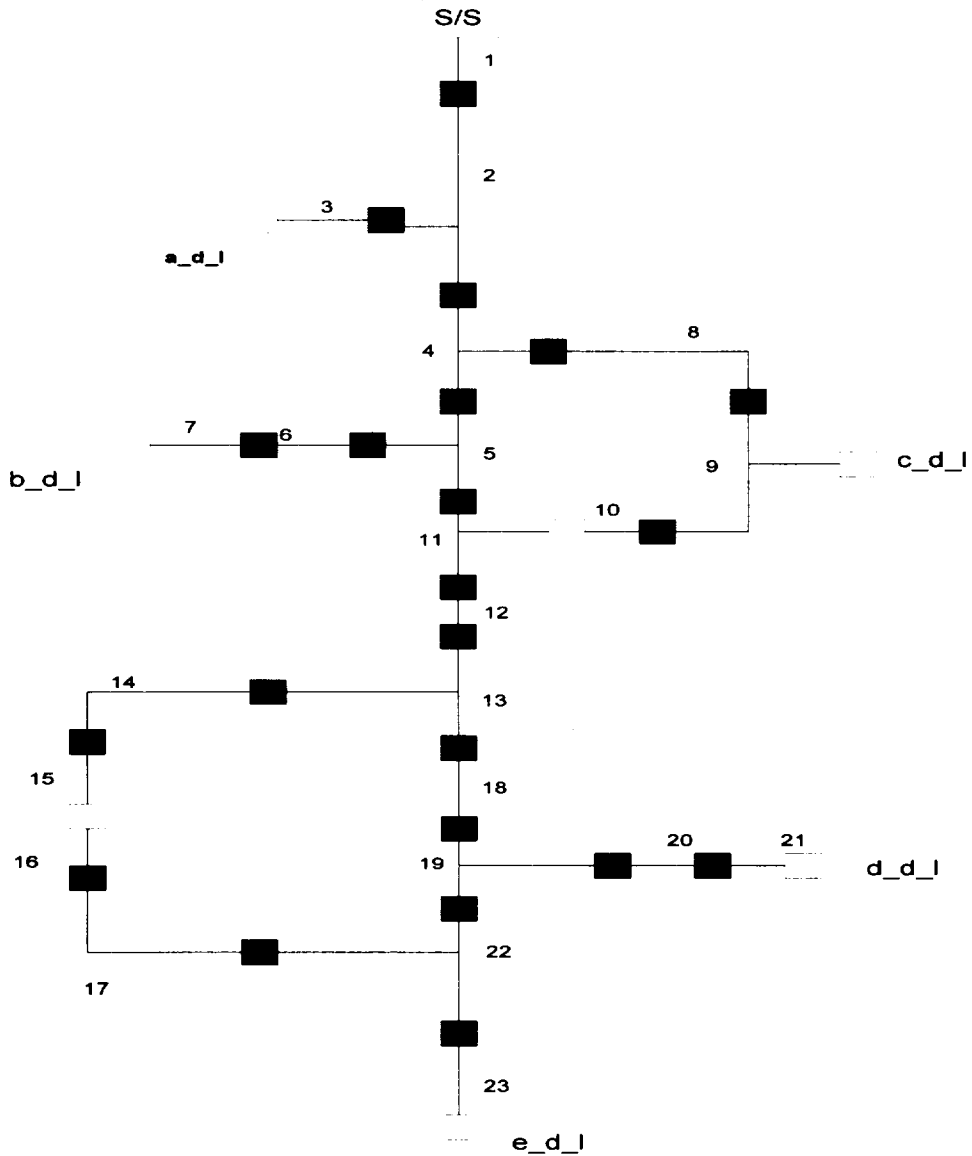


Fig. 3 Model system

자동화 개폐기의 구성방법에 따른 신뢰도 데이터는 Table 2와 3에 수록하였다. 또한 Table 2와 3을 이용하여 자동화개폐기의 구성방법에 따른 사고율을 다음과 같은 사례로 구분하여 평가하였으며 결과를 Table 4에 수록하였다.

사례 1) 단일시스템

사례 2) 계전기, 차단기 직결

사례 3) 병렬계전기, 차단기 직결

사례 4) 변성기, 계전기, 차단기 직결

사례 5) 병렬변성기, 병렬계전기, 차단기 직결

Table 4로부터 개폐기 구성요소의 수가 증가하거나 또는 병렬로 연결하는 경우 사고율이 감소되는 것을 알 수 있다.

사례 1), 2)에 대한 부하지점별 신뢰도 지수

Table 1 Reliability data for each component

Component	Failure Rate (f/100km, year)	Restoration Time (hour/f)
Overhead Line	1.006	1.0
Cable	0.118	3.0
Breaker(Manual)	0.13	0.5
Breaker(Auto)	0.13	0.0833(=5분)

Table 2 Reliability data for automated breaker (Relay+Circuit Breaker)

Component	Security Failure Rate	Operational Failure Rate
Relay	0.0277	0.0066
Circuit Breaker	0.019	0.0767

Table 3 Reliability data for automated breaker(Transducer + Relay + Circuit Breaker)

Component	Security Failure Rate	Operational Failure Rate
Transducer	0.0132	0.0053
Relay	0.0145	0.0013
Circuit Breaker	0.019	0.0767

Table 4. Failure rate for automated breaker

Composition Method	Failure Rate
Case 1	0.13
Case 2	0.0833
Case 3	0.0777
Case 4	0.0828
Case 5	0.0767

를 Table 5와 6에 수록하였으며 각 사례에 대한 부하지점별 신뢰도 지수의 합계를 Table 7에 나타내었다.

Table 8은 각 사례에 대한 신뢰도 평가지수를 계산한 결과이다.

Table 5와 6의 각각의 부하지점에 대한 사고율이나 정전시간을 비교해 보면 개폐기를 단일요소로 취급하는 것에 비해 계전기부분과 차단기부분으로 나누어 취급함으로써 신뢰도가 향상되는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 Table 5 - 8로부터 case 1, case 2, case 4, case 3, case 5의 순서로 신뢰도가 향상되는 것을 알 수 있다.

각 사례의 검토결과 개폐기 구성요소 또는 병렬로 연결하는 요소의 수를 증가시킬 경우 신뢰도가 향상되지만 신뢰도 향상의 효과는 사례 2)와 같이 계전기 부분과 차단기 부분의 직렬 연결로도 충분하다는 것을 알 수 있다.

Table 5. Reliability index for each load point

(Case 1)

Load Point	Failure Rate	Restoration Time	Average Annual Outage Time
1	0.42006	0.30062	0.12628
2	0.42006	0.31382	0.13182
3	0.55006	0.35037	0.19273
4	0.55006	0.35231	0.19379
5	0.68006	0.39027	0.26541
6	0.68006	0.38062	0.25885
7	0.81006	0.4104	0.33245
8	0.68006	0.38535	0.26207
9	0.81006	0.41754	0.33823
10	0.94006	0.42161	0.39634
11	0.81006	0.41084	0.3328
12	0.94006	0.41621	0.39126
13	1.07006	0.445	0.47618
14	1.2006	0.44653	0.53589
15	1.33006	0.45013	0.5987
16	1.72006	0.45299	0.77917
17	1.59006	0.45622	0.72541
18	1.2006	0.44266	0.53122
19	1.33006	0.44623	0.59354
20	1.46006	0.44647	0.65188
21	1.59006	0.45734	0.72719
22	1.46006	0.45054	0.65781
23	1.59006	0.45806	0.72834
Sum	23.8314	0.42915	10.2273

Table 6 Reliability index for each load point
(Case 2)

Load Point	Failure Rate	Restoration Time	Average Annual Outage Time
1	0.32576	0.24291	0.10293
2	0.32576	0.25992	0.10847
3	0.45576	0.31941	0.16937
4	0.36146	0.27525	0.14709
5	0.39716	0.31212	0.19536
6	0.39716	0.29559	0.18879
7	0.52716	0.36231	0.26239
8	0.49146	0.34136	0.21536
9	0.62146	0.39251	0.29153
10	0.75146	0.40194	0.34964
11	0.43286	0.33314	0.2394
12	0.56286	0.36005	0.29786
13	0.59856	0.40168	0.35943
14	0.72856	0.41193	0.41912
15	0.85856	0.42274	0.48194
16	0.87136	0.4072	0.56902
17	0.74136	0.40609	0.51526
18	0.53996	0.37257	0.36777
19	0.57566	0.37582	0.40674
20	0.70566	0.38925	0.46508
21	0.83566	0.41882	0.54039
22	0.61136	0.38187	0.44766
23	0.64706	0.39693	0.49484
Sum	18.6477	0.40946	7.63547

V. 결 론

본 연구에서는 선로자동화 시스템이 설치된 배전선로의 신뢰도를 평가하였으며 신뢰도를 증

Table 7 Reliability index for each case

Case	Failure Rate	Restoration Time	Average Annual Outage Time
1	23.8314	0.42915	10.2273
2	18.6477	0.40946	7.63547
3	18.0261	0.40633	7.32467
4	18.5922	0.40919	7.60772
5	17.9951	0.40575	7.26917

진시키기 위한 자동화개폐기의 구성모델을 제시하여 신뢰도가 증진되는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과를 이용하면 개폐기의 설치 위치에 따른 신뢰도를 평가할 수 있어 개폐기의 최적 위치를 선정할 수 있으며 배전 계획시 활용할 수 있다. 또한 선로 자동화의 효과를 측정하는데 활용할 수 있으며 설비의 교체나 위치 이동시에 대한 효과 산정에 이용할 수 있다.

참고문헌

- 1) Chang N. E., 1977, "Evaluate distribution system design by cost reliability indices", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 5, pp. 1480-1487, September/October.
- 2) Lawler J. S., Monteen L. D. et al, 1989, " Impact of automation on the reliability of the ATHENS utilities board's distribution system", IEEE

Table 8 Reliability performance index for each case

Index	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
SAIFI	0.92467	0.92467	0.92467	0.92467	0.92467
SAIDI	0.38632	0.28664	0.27468	0.28557	0.27255
CAIDI	0.4178	0.30999	0.29706	0.30884	0.29475
ASAI	0.99996	0.99996	0.99997	0.99996	0.99997
ASUI	4.41x E-5	3.27x E-5	3.13x E-5	3.26x E-5	3.11x E-5
ENS	2876.03	2144.06	2056.29	2136.22	2040.61
AENS	0.63489	0.4733	0.45392	0.47157	0.45046

- Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 770-778.
- 3) Warren C. M., 1992. " The effect of reducing momentary outages on distribution reliability indices ". IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1610-1617.
 - 4) Chen R., Allen K., Billinton R., 1995. " Value-based distribution reliability assessment and planning". IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp. 421-429.
 - 5) 김재철, 1994. 22.9kVY 배전선로 적정운전용량 기준선정에 관한 연구, 한국전력공사 배전처.
 - 6) 1996년도 보호계전기 동작상태 분석보고서, 한국전력공사 계통운용처