

배전지능화 시스템을 위한 배전계통 구분개폐기 교체 우선순위 결정에 관한 연구

(A Study on the Prioritization of Sectional Switchgear Replacement for Intelligent Distribution Automation in Distribution System)

성인제* · 채희석 · 문종필 · 서인용 · 김재철**

(In-Je Sung · Hui-Seok Chai · Jong-Fil Moon · In-Yong Seo · Jae-Chul Kim)

Abstract

Intelligent distribution automation system includes operating a switchgear of distribution system remotely when switchgear are not available to operate quickly. This system makes it possible to reduce the interrupt time. It also aims to improve the reliability of customers.

Currently, Intelligent distribution automation improves the reliability by replacing manual switchgear, which is installed as sectional switchgear. However the prioritization of the replacement for the switchgear is required for its intellectualization. Many studies have been conducted related with prioritization of switchgear replacement. But it is difficult to interpret and apply to the power distribution system. That is because most of the studies just considers customer numbers for prioritizing the replacement.

In this paper presents an algorithm to determine the intelligent switchgear replacement priority considering customer number, load quantity and interruption cost. Further, this algorithm is verified by using system reliability index.

Key Words : Switchgear, Intelligent Distribution, Automation, Prioritization, Reliability

1. 서 론

과거에는 배전계통에 정전이 발생하면 작업자가 현장에서 이동하여 복구하기까지 많은 시간이 소요되어 이러한 불편을 수용가가 그대로 겪어야만 했다. 배전지능화 시스템은 이러한 수용가의 불편을 저감하고자 배전계통에 설치되어 있는 구분개폐기를 원격으로 조작하여 고장시간을 단축시키고 공급신뢰도를 향상시키는 데 그 목적이 있다[1,7].

* Main author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil Univ, Korea.

** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Engineering, Soongsil Univ, Korea.

Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

Received : 2015. 6. 30

Accepted : 2015. 8. 13

최근의 배전지능화 시스템은 배전계통에 구분개폐기로서 설치되어 있는 수동 개폐기를 지능화개폐기로 교체하여 신뢰성을 향상시키고 있다. 국내 배전계통은 약 49%의 지능화율을 달성하여 기존 수동개폐기와 교체된 지능화개폐기가 혼재되어 있고 배전지능화 사업은 2030년까지 지능화율 100% 달성을 목표로 하고 있다. 여기서 지능화율이란 설치되어 있는 전체 구분개폐기(수동개폐기 및 지능화개폐기) 중 지능화개폐기가 차지하는 비율을 뜻한다[1,3].

이 과정에서 중요한 문제 중 하나가 개폐기 교체 우선순위를 결정하는 것이다. 구분개폐기 교체 우선순위 결정과 관련된 기존 연구에서는 구간 부하의 부하량과 상관없이 호단위의 수용가수만을 고려하여 개폐기 교체 우선순위를 결정하는 연구가 진행되었다. 하지만 수용가수만을 고려하여 교체 우선순위를 결정하는 방식은 실제 계통에 적용하기 쉽지 않은 단점이 있다. 예를 들어 아파트의 경우 굉장히 큰 부하량을 가지고 있지만 수용가수는 1호로 표기된다. 기존 방식인 수용가수 관점의 교체 우선순위를 이용한다면 상대적으로 불공평한 우선순위 결정이 될 수도 있다. 또한 사례연구를 위한 모의 배전계통 구성 시 구간부하가 지닌 부하량 및 수용가수와 같은 부하 데이터를 같은 값으로 지정하여 연구를 진행하였다[2].

본 논문에서는 배전계통 선로의 기존의 수용가수뿐만 아니라 구간선로가 가지고 있는 부하량과 수용가의 고장 경험 시 피해비용인 정전비용까지 세 가지의 측면을 고려하여 구분개폐기의 교체 우선순위를 결정한다. 구분개폐기 교체 우선순위를 결정할 수 있는 알고리즘을 제시하고 전체 개폐기 지능화 시의 시스템 신뢰도 지수 변화추이를 분석한다.

2. 구분개폐기 교체 우선순위 결정

2.1 구분개폐기 교체 우선순위 결정 방안

그림 1은 배전계통에 설치되어 있는 수동개폐기를 지능화개폐기로 교체할 때 그 우선순위를 결정하는 전체 흐름도이다. 부하량, 수용가수, 정전비용의 세 가지 요소를 각각 이용하여 개폐기별로 점수를 부여한

뒤 그 점수를 합산을 하는 방법이다. 합산 점수를 큰 순서대로 정렬하여 구분개폐기 교체 우선순위를 결정한다.

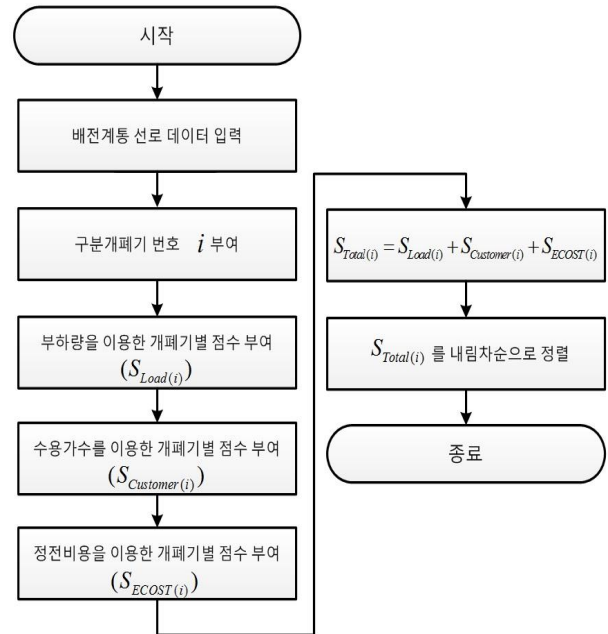


Fig. 1. Flow chart of determining the priority of the sectional switchgear

$$S_{Total(i)} = (S_{Load(i)} + S_{Customer(i)} + S_{ECOST(i)}) \quad (1)$$

식 (1)에서 $S_{Load(i)}$, $S_{Customer(i)}$, $S_{ECOST(i)}$ 는 각각 부하량, 수용가수, 정전비용을 이용하여 교체 우선순위를 결정하였을 때 i 번째 개폐기가 부여받는 점수를 뜻한다. $S_{Total(i)}$ 는 i 번째 개폐기가 최종적으로 부여받는 교체 우선순위 합산점수이며 이것을 큰 순서대로 내림차순 정렬하여 교체 우선순위를 결정한다.

2.2 부하량, 수용가수, 정전비용을 이용한 우선순위 결정 알고리즘

본 절에서는 부하량, 수용가수, 정전비용의 세 가지 구간부하의 정보를 이용하여 배전계통 수동개폐기를 지능화개폐기로 교체 시 교체 우선순위를 결정하는 알고리즘을 기술한다. 교체 대상인 수동개폐기에 대해 교체 우선순위를 부여하고 정해진 우선순위에 따

라 각 개폐기별로 점수를 부여하는 것이 기본적인 방법이다.

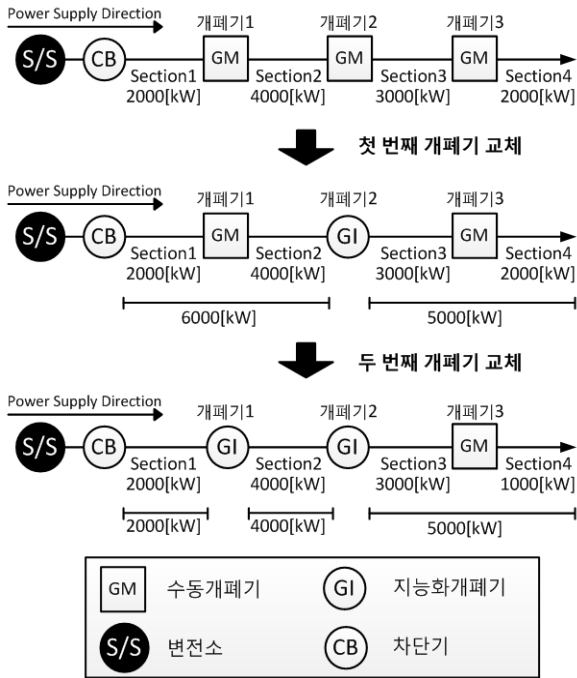


Fig. 2. Example of the determining the priority of the switchgear using load quantity

그림 2는 설치되어 있는 수동개폐기를 지능화개폐기로 교체할 때 그 우선순위를 결정하는 방법에 대해 설명하는 예시이다. 그림의 예시는 부하량, 수용가수, 정전비용 중 부하량을 이용하여 교체 우선순위를 결정한다. 우선 배전계통 구간부하의 부하량이 큰 구간을 선정한다. 그 후 선정된 부하량을 절반에 가깝게 양분하는 개폐기를 먼저 교체하는 것이 기본적인 방법이다. 그림 2의 첫 번째 배전선로를 보면 설치되어 있는 모든 개폐기가 수동개폐기이며 구간부하에 지정된 부하량을 가장 절반에 가깝게 양분하는 개폐기는 2번 개폐기이다. 이에 따라 2번 개폐기를 우선적으로 지능화개폐기로 교체한다. 교체가 진행된 2번 개폐기를 기준으로 양측 구간선로의 남은 부하량을 비교하면 6,000kW를 지닌 왼쪽 구간이 5,000kW인 오른쪽 구간보다 부하량이 크다는 것을 확인할 수 있다. 그림 부하량이 상대적으로 큰 왼쪽 구간선로의 1번 수동개

폐기를 지능화개폐기로 교체한다. 이러한 방식으로 개폐기의 교체 우선순위를 결정하며 만약 부하량이 같은 구간의 비교가 이루어지면 전원 측에 가깝게 설치된 수동개폐기를 먼저 지능화개폐기로 교체한다.

구분개폐기 교체 우선순위 결정 알고리즘의 경우 교체 대상 수동개폐기와 구간부하의 명확한 위치과약을 위해 개폐기 및 구간부하에 대한 번호가 지정되어야 한다. 지정된 번호 표기는 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

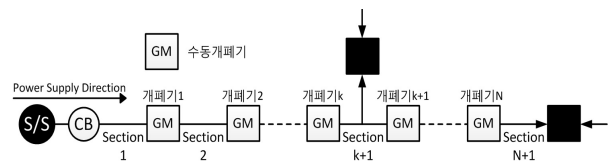


Fig. 3. Number notation of the sectional switchgear and each section

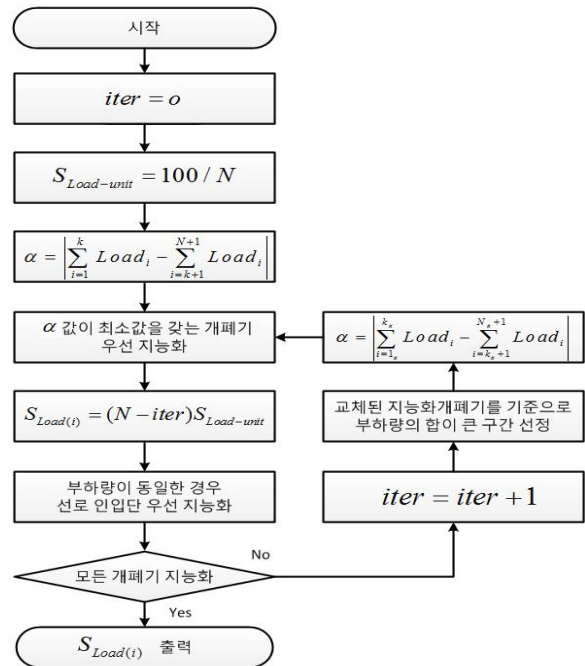


Fig. 4. Algorithm of the determining the priority of the switchgear using load quantity

그림 4는 그림 2의 예시를 통해 기술하였던 부하량을 이용한 구분개폐기 교체 우선순위 결정에 대한 알고리즘을 나타낸다. 반복을 위해 iteration(iter)을 0으

배전능화 시스템을 위한 배전계통 구분개폐기 교체 우선순위 결정에 관한 연구

로 지정하며 알고리즘은 시작된다.

$$S_{Load-unit} = 100/N \quad (2)$$

$$S_{Load(i)} = (N - iter) S_{Load-unit} \quad (3)$$

식 (2)의 $S_{Load-unit}$ 는 교체 대상 개폐기가 기본적으로 부여받는 점수이다. N 은 설치되어 있는 총 개폐기의 숫자이며 식 (3)을 통해 100점 만점으로 순차적으로 최종 교체 우선순위 점수를 부여받는다.

$$a = \left| \sum_{i=1}^k Load_i - \sum_{i=k+1}^{N+1} Load_i \right| \quad (4)$$

식 (4)는 그림 2에서 설명한 부하량을 절반에 가깝게 양분하는 개폐기를 찾는 방법을 수식으로 나타낸 것이다. 식 (4)에서 $Load_i$ 는 i 번째 개폐기와 동일한 번호를 갖는 구간부하의 부하량, k 는 임의의 구분개폐기 번호, N 은 마지막 구분개폐기 번호(총 개폐기수)를 나타낸다. a 는 구간부하별 부하량의 차이를 나타내며 a 값이 작을수록 부하량을 절반에 가깝게 나누는 것을 의미한다.

$$a = \left| \sum_{i=1_x}^{k_x} Load_i - \sum_{i=k_x+1}^{N_x+1} Load_i \right| \quad (5)$$

식 (4)를 통해 첫 번째 지능화개폐기 교체가 이루어지면 첫 번째 교체 개폐기를 기준으로 남은 구간 중 부하량의 합이 큰 구간을 선정한다. 이후 식 (5)를 통해 계속해서 남은 개폐기의 교체 우선순위를 결정하고 점수를 부여한다. 식 (5)에서 1_x 는 선정된 구간 내에서 인입단 측에 가장 가까운 구분개폐기 번호, k_x 는 선정된 구간 내에서 임의의 구분개폐기 번호, N_x 은 선정된 구간 내에서 마지막 구분개폐기 번호를 나타낸다. $S_{Load(i)}$ 를 출력하여 알고리즘은 종료된다.

수용가수와 정전비용을 이용한 개폐기 교체 우선순위 결정법도 부하량을 이용하였을 경우와 동일한 방법이다. 수용가수와 정전비용을 이용하는 알고리즘의 경우 식 (2)~(5)에서 $Load$ 로 표기된 부분을 각각 $Customer$, $ECOST$ 로 수정한다. 그리고 이를 통해 구

간부하의 부하량을 양분하는 개폐기를 찾는 방법과 동일하게 수용가수와 정전비용을 이용하여 최종적으로 $S_{Customer(i)}$, $S_{ECOST(i)}$ 를 출력한다.

3. 사례분석

3.1 모의 배전계통 구성

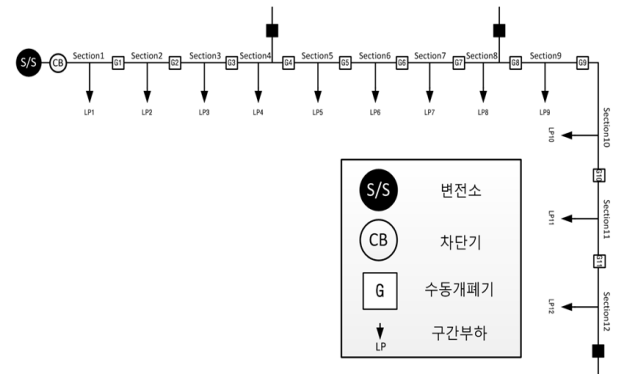


Fig. 5. Schematic of the simulated distribution system

Table 1. Load Characteristic for the simulated model

구간부하	부하량 (kW)	수용가수 (호)	정전비용 (원)
Section 1	1,079	11	13,454,863
Section 2	1,469	7	6,077,508
Section 3	2,189	296	28,189,113
Section 4	386	29	3,597,888
Section 5	386	29	3,597,888
Section 6	124	8	3,681,931
Section 7	29	7	67,947
Section 8	386	29	3,597,888
Section 9	386	29	3,597,888
Section 10	2,884	294	6,540,288
Section 11	367	72	741,321
Section 12	315	52	6,496,460

그림 5는 모의 배전계통 모델을 나타내며 기본적으로 12분할 3연계 형태이다. 총 12개의 구간선로로 구성되어 있고 11개의 수동개폐기가 설치되어 있다.

23.1km의 선로길이 및 10MW의 부하량을 가지고 있으며 고장 시 연계확률의 경우 100%이며 공급할 수 있는 충분한 전력 공급여력이 있는 것으로 가정하였다.

표 1은 모의 배전계통 모델의 구간부하별 부하량, 수용가수 및 정전비용 데이터를 나타낸다.

3.2 기존 알고리즘과의 비교

본 절에서는 구분개폐기 교체 우선순위를 결정하는 기존 알고리즘과 제안 알고리즘(그림 4 참조)의 신뢰도 지수 개선효과를 비교해 본다.

기존 구분개폐기 교체 우선순위 결정 알고리즘은 고객 관점의 지수인 평균정전지속시간 지수(SAIDI, System Average Interruption Duration Index)를 이용하여 각 구분개폐기의 민감도를 분석한 뒤 교체 우선순위를 결정하는 것이었다[2]. 배전계통에 설치되어 있는 구분개폐기를 하나씩 지능화개폐기로 교체했을 때 SAIDI 지수를 가장 크게 감소시키는 구분개폐기를 순서대로 나열하여 교체 우선순위를 결정하는 방법이다. SAIDI 지수는 기본적으로 구간부하의 수용가수와 밀접한 관련이 있는 신뢰도 지수로서 부하량이 아무리 변하여도 SAIDI 지수에 변화는 없다[4,8]. 따라서 기존 알고리즘 이용 시 신뢰도 지수의 변화를 본 논문에서 제안하는 수용가수를 이용한 교체 우선순위 결정 알고리즘 이용 시의 신뢰도 지수 변화와 비교한다.

Table 2. Failure rate and repair time for simulated model

	고장률 [고장빈도/년]	고장시간 [시간]	수동개폐기 스위칭시간 [시간]	지능화개폐기 스위칭시간 [시간]
가공 선로	0.00411	2.54	1	0

표 2는 신뢰도 지수 출력에 사용될 고장률과 고장시간을 나타내며 IEEE Goldbook을 참조하였다[5].

Table 3. SAIDI index and replacement priority using each algorithms

지능 화율 (%)	SAIDI(분/호)		교체 순서별 개폐기 번호	
	기존 알고리즘	제안 알고리즘	기존 알고리즘	제안 알고리즘
0	6.43	6.43	·	·
9.09	3.53	3.62	7	9
18.18	2.72	2.37	3	3
27.27	2.13	1.98	10	10
36.36	1.77	1.64	9	2
45.45	1.44	1.43	2	6
54.55	1.36	1.36	5	11
63.64	1.29	1.31	11	4
72.73	1.26	1.26	4	8
81.82	1.22	1.24	8	5
90.91	1.21	1.22	1	7
100	1.21	1.21	6	1

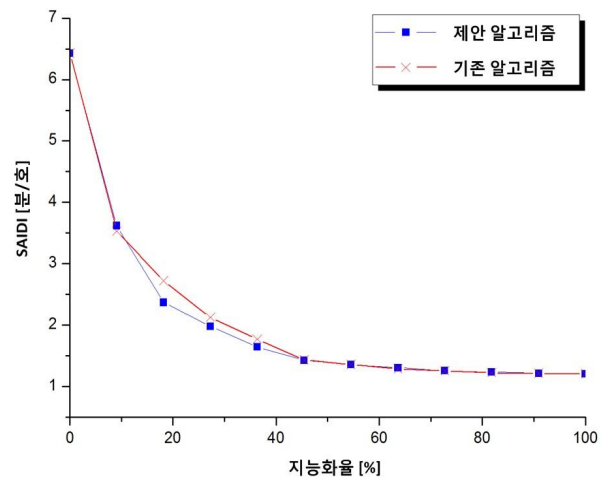


Fig. 6. Change of SAIDI index using each algorithms

표 3은 지능화율이 증가함에 따른 기존 알고리즘 및 제안 알고리즘의 SAIDI 지수 변화 및 교체 순서를 나타낸다. 표 3을 그래프로 나타낸 것이 그림 6이다. 이 경우 기존 알고리즘과 제안 알고리즘이 비슷한 값의 SAIDI 지수를 출력하고 초반 지능화에서는 제안 알고리즘이 기존 알고리즘보다 나은 개선 효과를 보여준다.

기존 알고리즘은 각 개폐기의 민감도를 일일이 계산하여 교체 우선순위를 결정하기 때문에 본 논문이 제안하는 알고리즘에 비해 상대적으로 계산에 많은 시간이 소요된다. 이러한 계산 시간의 차이는 배전계통의 규모가 커지거나 교체 대상 개폐기의 수가 많아질수록 기하급수적으로 늘어날 것이다. 또한 기존 알고리즘의 경우 부하의 다른 데이터를 고려하지 않고 수용가수와 밀접한 관련이 있는 SAIDI 지수만을 이용하였다. 이는 앞서 밝힌 바와 같이 교체 우선순위 결정시 부하량이나 정전비용은 크지만 수용가수가 작은 부하의 개폐기에 대해서 공정하지 못한 우선순위 결정법이 될 수 있다.

3.3 시스템 신뢰도 지수 변화추이 분석

본 논문에서 제안하는 알고리즘을 이용한 구분개폐기 교체 시 신뢰도 지수의 변화를 모의 배전계통을 대상으로 출력한다. 분석에 사용될 신뢰도 지수는 부하와 에너지 관점의 지수인 공급지장 에너지 지수(ENS, Energy Not Supplied Index)와 3.2절에 기술했던 SAIDI 지수 그리고 정전비용(ECOST)이다. ENS의 지수의 경우 SAIDI 지수와는 다르게 부하에 가장 큰 영향을 받는 시스템 신뢰도 지수이다[4,8].

Table 4. Replacement priority and score of simulated distribution system

교체 우선 순위	부하량 이용		수용가수 이용		정전비용 이용	
	개폐기 번호	부여 점수	개폐기 번호	부여 점수	개폐기 번호	부여 점수
1	4	100	9	100	3	100
2	2	91	3	91	2	91
3	9	82	10	82	8	82
4	10	73	2	73	1	73
5	3	64	6	64	10	64
6	1	55	11	55	5	55
7	7	45	4	45	9	45
8	11	36	8	36	6	36
9	8	27	5	27	11	27
10	5	18	7	18	4	18
11	6	9	1	9	7	9

표 4를 통해 확인할 수 있듯 모의 배전계통에 설치되어 있는 개폐기의 교체 순서가 부하량, 수용가수, 정전비용 중 어떤 것을 이용하였는지에 따라 전혀 다르게 나타난다.

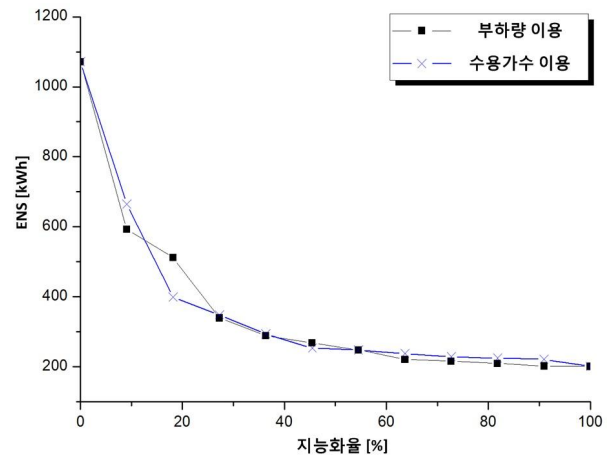


Fig. 7. Change of ENS index using load quantity and customer number

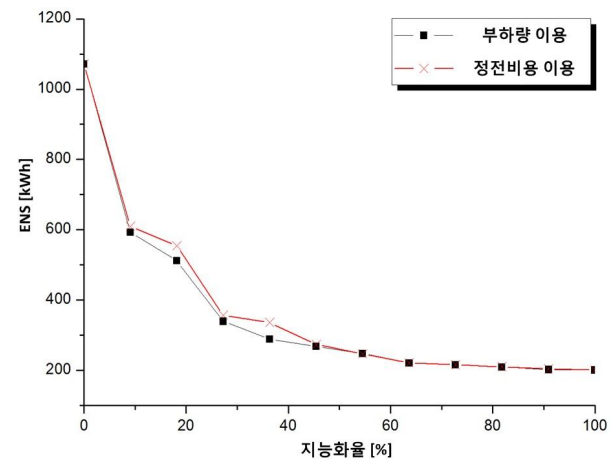


Fig. 8. Change of ENS index using load quantity and interruption cost

그림 7은 부하량과 수용가수 이용 시 ENS 지수의 변화이며 그림 8은 부하량과 정전비용 이용 시 ENS 지수의 변화를 나타낸다. 그림 7에서는 부하량을 이용한 경우의 ENS 지수 개선이 수용가수를 이용했을 때보다 두 구간을 제외하고 더 탁월한 것을 확인할 수 있다. 그림 8에서는 전구간에서 부하량을 이용한 경우의 ENS 지수 개선이 정전비용을 이용했을 때보다 더

뚜렷한 것을 확인할 수 있다.

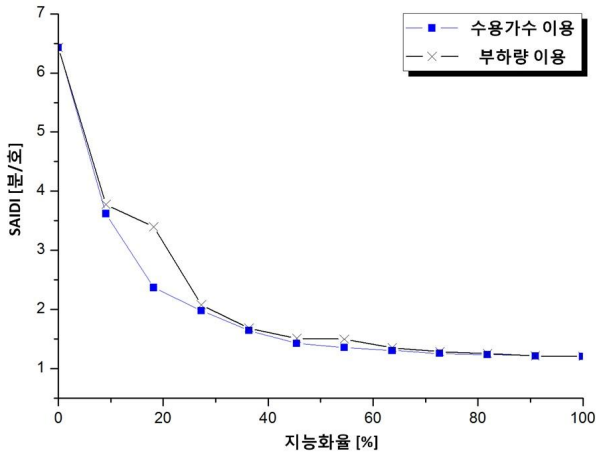


Fig. 9. Change of SAIDI index using customer number and load quantity

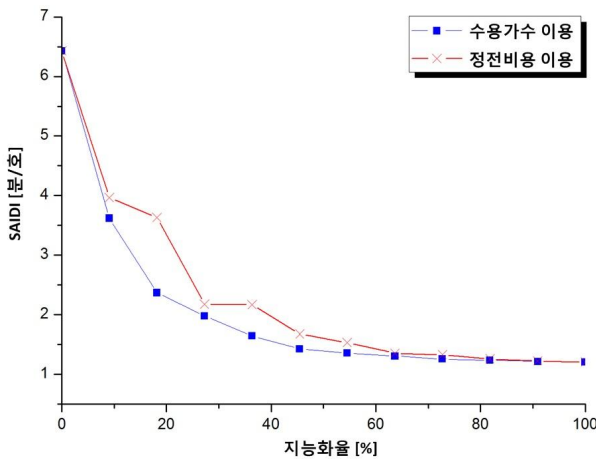


Fig. 10. Change of SAIDI index using customer number and interruption cost

그림 9은 수용가수와 부하량 이용 시 SAIDI 지수의 변화이며 그림 10은 수용가수와 정전비용 이용 시 SAIDI 지수의 변화를 나타낸다. 그림 9와 그림 10에서 확인할 수 있듯 수용가수를 이용한 경우의 SAIDI 지수 개선이 부하량과 정전비용을 이용했을 때보다 훨씬 탁월한 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 정전비용과 부하량 이용 시 ECOST의 변화이며 그림 12는 정전비용과 수용가수 이용 시 ECOST의 변화를 나타낸다. 그림 11에서는 정전비용을 이용한 경우의 ECOST 변화가 부하량을 이용했을

때보다 한 구간을 제외하고는 전체적으로 저감되는 것을 확인할 수 있다. 그림 12에서는 두 구간을 제외하고 정전비용 이용 시 ECOST가 수용가수를 이용했을 때보다 저감되는 것을 확인할 수 있다.

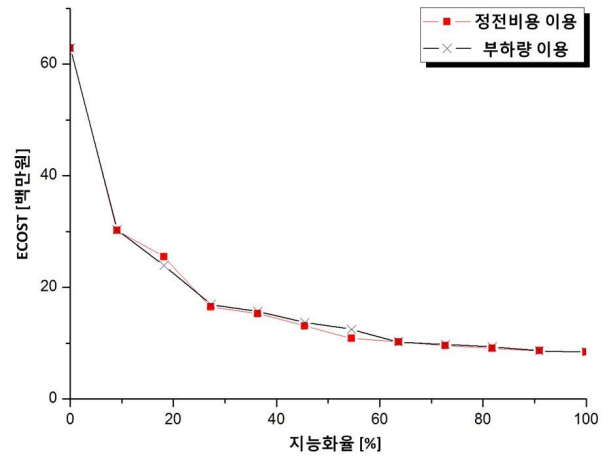


Fig. 11. Change of ECOST using interruption cost and load quantity

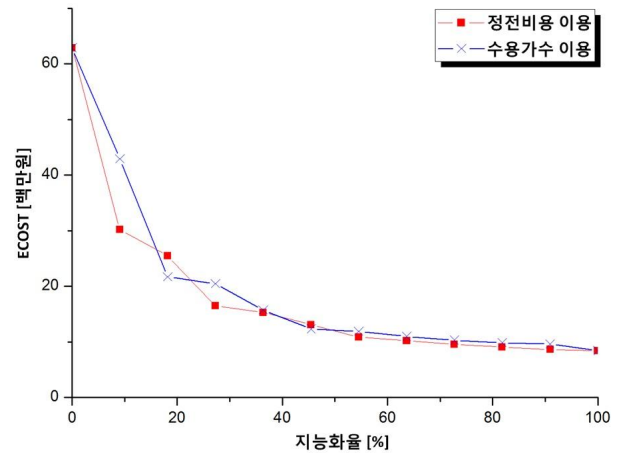


Fig. 12. Change of ECOST using interruption cost and customer number

위의 결과들을 통해 부하량, 수용가수, 정전비용을 이용한 지능화가 여러 가지 측면에서 전체적으로 신뢰도 개선에 탁월하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 배전계통 구간부하의 부하량, 수용가

수, 정전비용의 세 가지 관점에서 구분개폐기 교체 우선순위 결정 알고리즘을 제안하였고 시스템 신뢰도 지수 변화추이 분석을 통해 알고리즘의 탁월성을 확인하였다. 제안하는 알고리즘이 각 구간부하의 부하량, 수용가수, 정전비용 세 가지 요소를 모두 고려하여 구분개폐기 교체 우선순위를 결정했다는 것을 확인할 수 있다. 물론 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 현장에 적용하기 위해서는 배전선로의 분할과 연계 현황도 고려되어야 한다. 연계된 선로와의 부하 절체를 통해 정전구역을 최소화한 후 최종적으로 구성된 선로에 대해 부하량, 수용가수 그리고 정전비용을 고려한 결과를 토대로 우선순위가 결정되어야 할 것이다.

제안한 알고리즘을 이용하여 현재 배전계통에 설치되어 있는 구분개폐기 교체 시 우선순위를 결정할 수 있으며 본 논문이 향후 2030년까지 90% 이상의 지능화율을 목표로 하고 있는 배전지능화 시스템의 핵심인 구분개폐기 교체 시 우선순위 결정에 도움을 줄 것으로 사료된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2014년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

감사의 글

이 연구는 2015년도 숭실대학교 교내연구비 지원에 의한 연구임.

References

[1] K. H. Lee, "Establishment and Prospects of Intelligent Power Distribution Master Plan", Journal of the Electric World, KIEE, No. 451, pp. 77-86, 2014.7.

[2] H. S. Chai, H. S. Shin, S. M. Cho, J. F. Moon, J. C. Kim, "Study on the algorithm for the Reasonable Switch Automation Rate with Customer Interruption Cost and Reliability Evaluation", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 4, pp. 467-473, 2013.4.

[3] "Intelligent Power Distribution Long-term Master Plan for achieving Global Top Distribution Tech.", KEPCO, 2014.3.

[4] "Distribution Engineering", KIEE, Bookshell, 2008.

[5] "Goldbook - Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", IEEE, IEEE Std 493-2007.

[6] N. H. Cho, J. H. Oh, B. N. Ha, H. H. Lee, "The Switch Installation Criteria For Satisfying Future Reliability Goal", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 51A, No. 9, pp. 433-440, 2002.9.

[7] J. F. Moon, H. S. Chai, J. C. Kim, "Trends and Expected Performance of Intelligent Power Distribution Technology", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 29, No. 1, pp. 34-39, 2015.1.

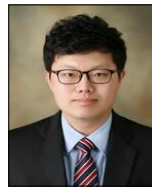
[8] R. Billinton, "Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd Edition", Plenum Press, New York, 1984.

◇ 저자소개 ◇



성인제 (成仁濟)

1987년 1월 18일생. 2013년 2월 안양대학교 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 전기공학부 석사과정.
E-mail : aflair10@ssu.ac.kr



채희석 (蔡熙石)

1984년 10월 6일생. 2011년 2월 숭실대학교 전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학부 석박 통합과정.
E-mail : selaff@ssu.ac.kr



문중필 (文鍾必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 한국교통대학교 전기공학부 부교수.
E-mail : moon@ut.ac.kr



서인용 (徐寅勇)

1961년 1월 13일생. 1989년 부산대학교 전기공학과 졸업(석사). 2000년 브라운대학교 응용수학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 경제경영연구원 수석연구원.
E-mail : soein@kepcoco.kr



김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수. 본 학회 회장.
E-mail : jckim@ssu.ac.kr