

연계선로가 없는 배전선로에서 BESS기반 정전복구를 위한 토폴로지 재구성 방안

A Network Reconfiguration Method for BESS based Service Restoration in Distribution Systems

임 성 일*
(Seongil Lim)

Abstract - Outage areas can be transferred to adjacent feeders to restore power supply in case of the fault on the distribution system. Feeders in the small island or mountain area may not have backup feeders due to the low density of load. In this weakly meshed open loop system, BESS can be used as a backup feeder to improve reliability of power supply. This paper proposes a new network reconfiguration method for BESS based service restoration. Fuzzy decision making technique is adopted to deal with fuzziness of service restoration planning rules. Case studies using KEPCO real distribution system have been performed to verify feasibility of the proposed method.

Key Words : Service restoration, Network reconfiguration, Battery, Fuzzy logic

1. 서 론

배전계통은 일반적으로 개방형 루프 방식으로 운영된다. 선로에 고장이 발생하면 고장구간 부하측의 건전한 정전구간을 이웃한 연계선로로 절체하여 정전을 복구한다. 배전자동화의 도입으로 개폐기 원격제어가 가능하여 전력공급 신뢰도가 매우 높아졌다. 그러나, 도서/산간 지역은 부하밀도가 낮아서 부하절체를 위한 연계선로 확보가 어렵다. 따라서 부하절체에 의한 정전복구가 불가하여 전력공급신뢰도가 상대적으로 낮다.

최근 보급이 확대되고 있는 BESS(Battery Energy Storage System)를 활용하면 연계선로가 없는 도서/산간 지역에 고장이 발생했을 때 정전복구가 가능하다. 그러나, 정전구간 전체에 전력을 공급할 수 있는 충분한 용량의 BESS 확보하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서, 분산전원과 부하의 위치와 용량을 고려하여 정전구역의 토폴로지를 재구성하여, 일부구간은 포기하더라도 용량범위에서 최대한 많은 구간에 전력을 공급해야 한다. 배전선로의 토폴로지 재구성은 특고압 선로 자동화 개폐기의 투입/개방 상태를 해공간으로 하는 조합최적화 문제이다.

배전계통 토폴로지 재구성은 대표적인 조합최적화 문제로서 다양한 연구가 진행되었다. D. Rupolo 등은 메타발견적학습법인 분산탐색법을 이용한 방사상 배전선로 최적화 방법을 제시하였다[1]. R. Rao는 Harmony Search Algorithm (HSA)을 이용하여 분산전원이

포함된 배전선로의 손실최소화 방법을 제시하였다[2]. F Sayadi 등은 Particle Swam Optimization Algorithm (P-PSO)을 이용한 손실 최소화 및 캐패시터 위치 최적화 방법을 제시하였다[3]. A. Asrari 등은 퍼지기반 유전알고리즘을 이용한 시변부하모델 선로의 최적화 방법을 제시하였다[4]. B. Ghazani 등은 보호기기 협조를 고려한 상시개방점 최적화 방법을 제시하였다[5]. S. Lim 등은 배전선로에 발생한 다중고장을 복구하기 위한 토폴로지 재구성 방법을 제시하였다[6]. 기존의 연구들은 정전복구, 부하균등화, 손실감소, 전압제어를 위한 상시개방점 최적화 문제를 다루고 있다. BESS 정전복구를 위한 배전선로 토폴로지 재구성 방안에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 부하밀도가 낮아서 연계선로가 없는 도서/산간 지역의 배전선로에 고장이 발생하였을 때 BESS를 이용하여 정전을 복구하기 위한 토폴로지 재구성 방안을 제시한다. 각 BESS의 위치, 용량, 특성을 고려하여 감당할 수 있는 적당한 범위의 부하에 전력을 공급할 수 있도록 정전구역 토폴로지를 재구성한다. 부하량, 운전모드, 중복해 제약조건을 만족하는 후보 중에서 공급부하량, 중요부하 복구량, 스위칭횟수 등으로 구성된 목적함수를 퍼지론적으로 평가하여 최적의 토폴로지를 선택한다.

2. BESS 정전복구 토폴로지 재구성

도서/산간 지역에 설치된 BESS는 일반적으로 배전선로에 발생한 정전구역 전체에 전력을 공급할 만큼 공급용량이 충분하지 않다. 또한 여러 대의 BESS가 병렬로 전력을 공급하는 것은 초기 기동과정이 매우 복잡하므로 임시 정전복구에서는 각각의 BESS가 CVCF

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering
Kyungnam University, Korea

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr

Received : May 30, 2017; Accepted : August 21, 2017

(Constant Voltage Constant Frequency) 모드로 단독 운전하는 것이 바람직하다. 이러한 실질적인 이유들로 BESS를 이용하여 정전을 복구하기 위해서는 배전자동화용 개폐기를 이용하여 정전구간을 적절하게 분할하여야 한다. 고장의 발생위치가 매번 다르고 BESS의 충전량도 시시각각 변동되므로 BESS 정전복구를 위한 정전구역 분할을 통한 토폴로지 재구성 계획은 고장발생시점에 수립되어야 한다.

그림 1은 BESS 기반 정전복구를 위한 정전구역 토폴로지 재구성 방안의 예를 나타내고 있다. 각각의 BESS가 전력을 공급하는 구역에 따라 (가) 혹은 (나)의 방법으로 토폴로지를 재구성 할 수 있다. (가)와 (나)는 공급부하량, 중요부하 복구량, 스위칭횟수, 지속시간이 다르다. 물론 그림과 같은 배전선로에서 토폴로지를 재구성하는 방법은 (가), (나)외에도 각 개폐기의 투입/개방 상태에 따라 매우 많은 방법이 존재한다. 이러한 다양한 토폴로지 중에서 여러 가지 운전조건에 관점에서 최적의 토폴로지를 선택해야 한다. 따라서 본 논문에서 다루고자하는 BESS 기반 정전복구를 위한 토폴로지 재구성 방법은 정전구역 개폐기의 투입/개방 상태를 해공간으로 하는 조합최적화 문제가 된다.

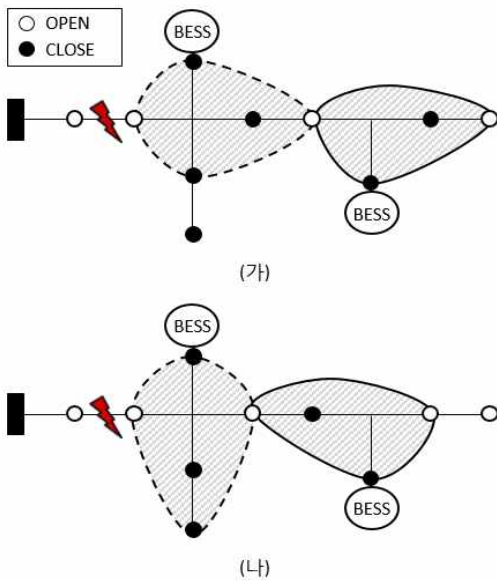


그림 1 BESS 기반의 정전복구
Fig. 1 BESS based Service restoration

본 논문에서 제시하는 정전구간 토폴로지 재구성을 위한 조합최적화 문제의 해법은 두개의 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 각 토폴로지 후보들이 전기적인 관점에서 운전가능한지 여부를 판단한다. 이 단계에서는 모든 가능한 토폴로지 조합을 대상으로 중복해, 운전모드, 부하량 등의 제약조건을 검사한다. 제약조건을 만족하는 토폴로지 후보들은 BESS 정전복구 토폴로지 방안으로 실행 가능하다. 두 번째 단계에서는 제약조건을 만족하는 토폴로지 후보들을 대상으로 목적함수를 평가하여 최선의 방안을 선택한다. 평가기준으로는 복구부하량, 중요부하 복구량, 스위칭횟수, 지속시간 등이

적용된다. 본 논문에서는 목적함수 평가방법으로서 퍼지로지 의사 결정기법을 사용한다.

3. 제안하는 토폴로지 재구성 방안

3.1 제약조건

모든 토폴로지 후보들에 대하여 제약조건을 검사하고 만족하는 토폴로지를 가려서 BESS 정전복구 토폴로지 재구성 방안 후보군을 형성한다.

제약조건 1 : 중복해

첫 번째 제약조건에서는 불필요한 스위칭이 포함된 토폴로지를 복구방안 후보에서 제외한다. 그림 2에서 개폐기 SW₃은 복구포기 구간에 포함되어 있으므로 개방하더라도 정전복구에는 영향을 주지 않으면서 개폐기 조작횟수만 증가 시키므로 복구방안 후보에서 제외된다.

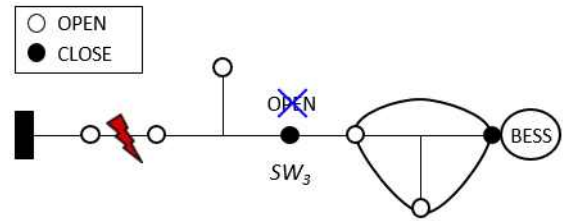


그림 2 불필요 스위칭
Fig. 2 Unnecessary switching

식 (1)은 불필요한 스위칭을 포함한 토폴로지 재구성 방안 후보의 판별식을 나타내고 있다. 그래프 이론으로부터 총 스위칭 횟수가 분기점의 개수와 BESS 개수의 합보다 크면 불필요한 스위칭이 포함되었다고 판단할 수 있다.

$$S \leq J + E \tag{1}$$

여기서, S : 총 스위칭 횟수
 J : 분기점의 개수
 E : BESS의 개수

제약조건 2 : 병렬운전

두 번째 제약조건은 두 개 이상의 BESS가 하나의 정전구역에 전력을 공급하지 않고 각각 독립적으로 운전되는지를 검사한다. 본 논문에서는 모든 BESS가 CVCF모드로 운전된다고 가정하고 BESS의 정적인 운전특성만을 고려한다. BESS들의 병렬운전이 가능하다면 좀 더 유연한 토폴로지 구성이 가능하겠지만, 매우 복잡한 동적인 운전특성을 고려해야 하므로 배전선로 긴급 정전복구를 위한 토폴로지 재구성 방안으로는 비현실적이다. 이는 적절히 설계된 마이크로그리드의 독립운전을 위한 향후 연구로 남겨두고 본 논문에서는

다루지 않는다.

그림 3은 제약조건 2의 적용예를 나타내고 있다. 그림에서 개폐기 SW₃가 개방되어 있는 토폴로지는 재구성 방안이 될 수 있지만 SW₃가 투입되는 토폴로지는 BESS₁과 BESS₂가 병렬운전하게 되므로 토폴로지 후보에서 제외된다.

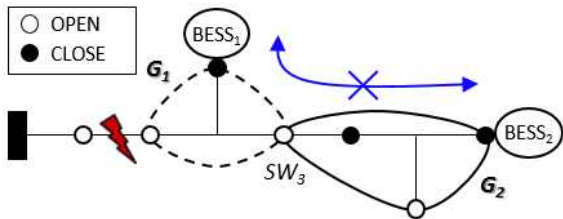


그림 3 BESS 병렬운전
Fig. 3 BESS Parallel operation

제약조건 3 : 부하량

세 번째 제약조건은 BESS 공급용량이 전력을 공급할 정전구역의 부하량보다 커야한다는 것이다. 그림 4와 그림 5는 정전구역의 시간대별 부하량 변화와 BESS 용량의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 G₁의 부하량은 BESS 공급용량보다 작으므로 실행 가능 하지만, G₂의 부하량은 BESS의 공급용량을 초과하므로 실행 불가능하다. 제약조건 3에서 추가로 고려해야 할 사항은 전력공급 요구 시간이다. BESS 총전량 적어서 전력공급 요구시간 동안 전력공급할 수 없는 경우에는 전력공급 요구시간을 고려하여 BESS 공급용량을 감소하여 계산하여야 한다.

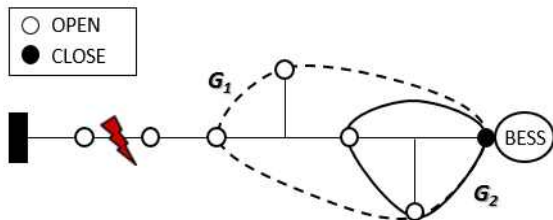


그림 4 전력공급능력
Fig. 4 Power supply capability

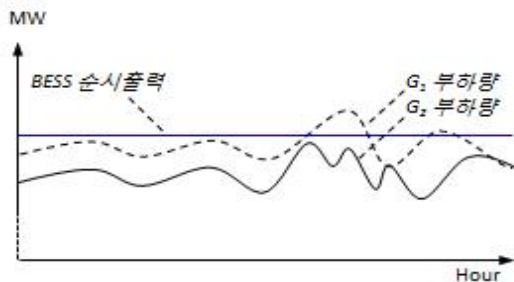


그림 5 BESS 순시출력 및 부하량
Fig. 5 BESS capacity and load amount

3.2 목적함수

제약조건을 만족하는 토폴로지 후보군을 대상으로 다음의 목적함수를 평가하여 BESS기반 정전복구에 가장 적합한 토폴로지를 최적으로 선택한다.

목적함수 1 : 복구부하량

첫 번째 목적함수는 정전복구 부하량 최대화이다. BESS의 용량과 위치에 따라 정전복구에서 제외되는 차단부하가 발생할 수도 있지만 이를 최소로 하는 토폴로지가 선호된다. 그림 6은 정전복구 부하량이 더 큰 토폴로지를 선택하는 예를 나타내고 있다. 그림에서 BESS의 용량이 부족하여 모든 정전구간은 복구할 수 없고 G₁ 또는 G₂를 복구하는 토폴로지가 가능하다. G₁과 G₂의 부하량을 비교하여 더 많은 정전부하를 복구하는 방안이 선호된다.

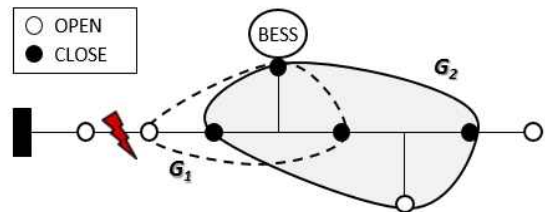


그림 6 차단부하량 최소화
Fig. 6 Load shedding minimization

목적함수 2 : 중요부하 복구량

두 번째 목적함수는 중요부하의 우선복구이다. BESS의 공급용량이 부족하여 모든 정전부하에 전력을 공급할 수 없는 경우에는 병원이나 전화국 등과 같이 중요한 부하에 일반부하보다 우선하여 전력을 공급해야 한다. 그림 7은 중요부하가 포함된 구간을 우선적으로 복구하는 예를 나타내고 있다. G₁은 일반부하로 구성되지만 G₂에는 중요부하가 포함되므로 가급적 G₂의 방안이 선호된다.

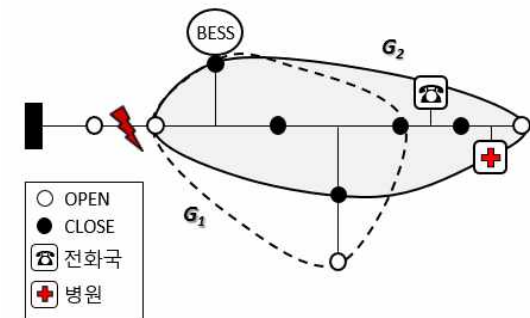


그림 7 중요부하 우선복구
Fig. 7 Priority restoration of critical load

목적함수 3 : 스위칭횟수

세 번째 목적함수는 스위칭 횟수 최소화이다. 개폐기 조작횟수가 증가되면 계통변경으로 인한 복잡도가 증가하므로 배전계통 운영자는 가급적 스위칭 횟수가 적은 방안을 선호한다. 그림 8은 토폴로지

재구성 방안에 따른 스위칭 횟수의 차이를 나타내고 있다. 구역 G_1 에 전력을 공급하기 위해서는 1번의 스위칭이 필요하지만 구역 G_2 에 전력을 공급하려면 2번의 스위칭이 필요하다. 다른 조건이 같다면 스위칭 횟수 최소화의 관점에서는 구역 G_1 에 전력을 공급하는 방안이 선호된다.

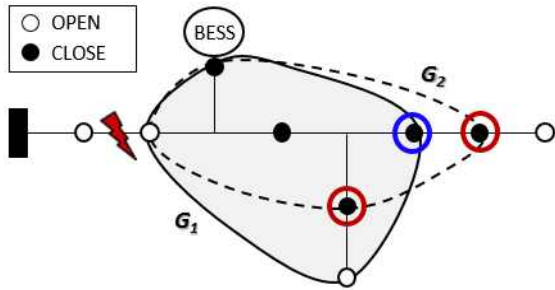


그림 8 스위칭횟수 최소화
Fig. 8 Switching number minimization

3.3 퍼지로직을 이용한 평가방법

배전계통 운전원이 정전복구를 위한 토폴로지 재구성 방안을 도출하기 위하여 적용하는 판단기준은 스위칭 횟수가 많다/적다 혹은 복구부하량이 크다/작다 등이다. 그런데 이러한 판단기준은 크다/작다 많다/적다 등의 애매모호(Fuzziness)한 용어들을 포함하고 있다. 본 논문에서는 판단기준의 애매모호함을 컴퓨터 프로그램으로 처리하기 위하여 퍼지로직 의사결정 기법을 적용하였다.

퍼지변수는 3.2절에 설명한 토폴로지 재구성 목적함수로부터 복구부하량, 중요부하 복구량, 스위칭횟수가 된다. 그림 9는 각 퍼지변수의 조건부 멤버쉽 평선을 나타내고 있다. 그림에서 멤버쉽 평선을 결정하는 MAX 값은 다음과 같이 결정된다.

- 복구부하량 : 전체 정전부하량
- 중요부하 복구량 : 복구되는 중요부하량
- 스위칭횟수 : 모든 후보 스위칭수 중 최대치

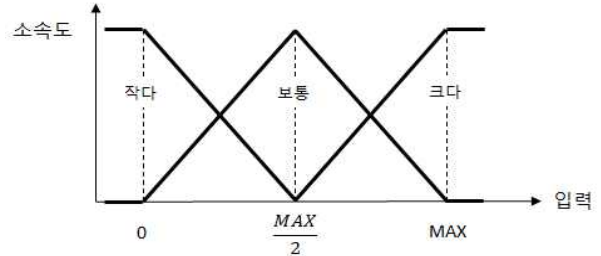


그림 9 퍼지 멤버쉽 함수
Fig. 9 Fuzzy membership function

표 1은 각각의 기준에 따라 토폴로지 후보를 평가하기 위한 퍼지룰을 나타내고 있다.

표 1 퍼지룰
Table 1 Fuzzy rules

평가기준	작다	보통	크다
복구부하량	매우나쁨	보통	매우 좋음
중요부하 복구량	매우나쁨	보통	매우 좋음
스위칭횟수	좋음	보통	나쁨

퍼지추론은 최대-최소법을 사용하였으며 무게중심법을 이용하여 비퍼지화를 수행하였다. 각 기준에 대한 퍼지평가 결과는 가중치 합계로 종합한다. 복구부하량, 스위칭횟수, 중요부하 복구량에 대한 가중치는 각각 0.4, 0.4, 0.2이다.

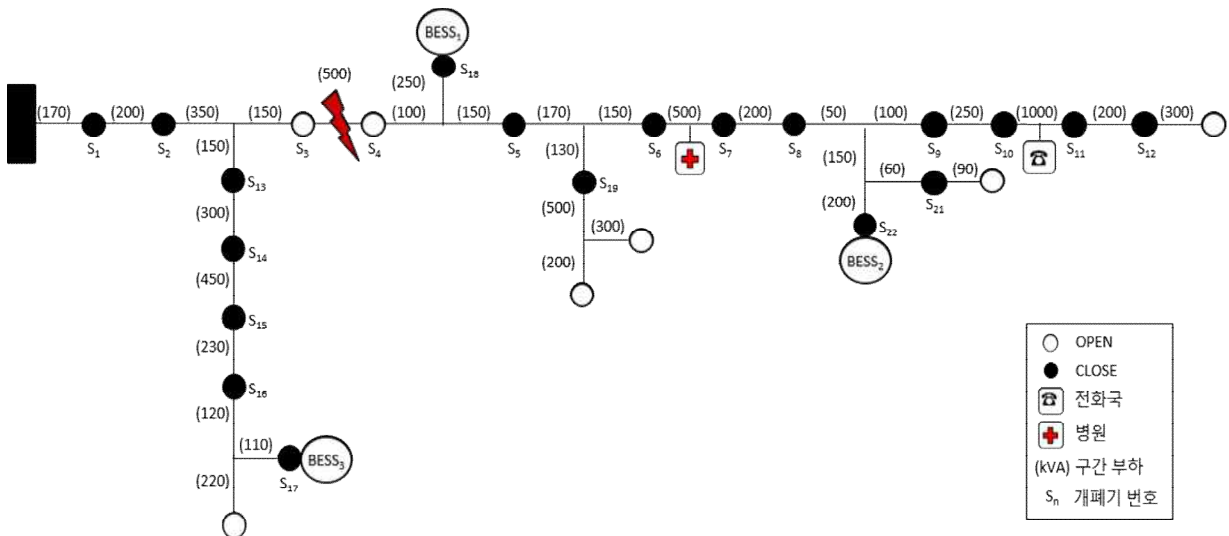


그림 10 사례연구에 사용된 한전의 실제 배전선로
Fig. 10 KEPCO distribution line used in case studies

4. 사례연구

본 논문에서 제안하는 BESS 정전복구 토폴로지 재구성 방안의 유용성을 검증하기 위하여 한전의 도서지역 실계통 데이터를 이용하여 사례연구를 수행하였다. 그림 10은 사례연구에 사용된 배전선로를 나타내고 있다. 배전선로는 총부하량 8000[kVA], 중요부하 1500[kVA], BESS는 2대, 자동화 개폐기 27대로 구성되어 있다. 개폐기 S₃과 S₄ 사이 구간에서 고장이 발생한 상황에 대하여 본 논문에서 제시한 방법에 따라 토폴로지 재구성 방안을 도출하였다.

표 2는 배전선로에 설치된 BESS의 용량, 출력 및 고장발생 시점의 충전량을 나타내고 있다.

표 2 BESS 정보

Table 2 BESS information

BESS	용량 [kWh]	충전량 [%]	출력 [kW]
B1	10000	20	2000
B2	5000	50	2200

정전구역에는 12대의 개폐기가 있으므로 해공간의 크기는 2¹²으로 4096개의 조합이 된다. 표 3은 토폴로지 후보에 대하여 3.1절에서 설명한 제약조건 검사결과를 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 3가지 제약조건을 모두 만족하는 실행 가능한 토폴로지는 45 가지 조합이 된다. 제약조건 만족여부는 과도한 토폴로지 탐색이나 퍼지추론이 필요하지 않고 3.1절에 제시된 방법으로 간단히 검사할 수 있다. 따라서 비정상적으로 개폐기 수가 많은 사례연구 배전선로에 대해서도 매우 짧은 시간에 모든 후보에 대한 제약조건 검사가 가능하다.

표 3 제약조건 검사

Table 3 Constraint inspection

제약조건	검토대상	불만족	만족
중복해	4096	3518	578
부하량	578	476	102
병렬운전	102	67	45

제약조건을 만족하는 45개의 후보를 대상으로 3.2절에 설명한 목적함수에 대한 퍼지평가를 실시하였다. 표 4은 가장 높은 선호도를 획득한 상위 2개 후보의 퍼지평가 결과를 나타내고 있다. 그림 11과 그림 12는 각각 1위 후보와 2위 후보의 토폴로지 재구성 방안을 나타내고 있다. 1위 후보는 2위 후보에 비하여 복구

표 4 토폴로지 후보에 대한 퍼지평가 결과

Table 4 Evaluation result of topology candidates

평가후보	종합 선호도	복구부하량		중요부하 복구량		스위칭횟수		조작 개폐기
		kVA	평가	kVA	결과	횟수	평가	
1	0.699	3550	0.614	1500	0.920	4	0.250	S7, S8, S12, S19
2	0.604	4050	0.666	1000	0.603	3	0.373	S6, S8, S12

부하량이 작고 스위칭횟수도 많지만 중요부하에 전력을 공급하기 때문에 선호도가 높다.

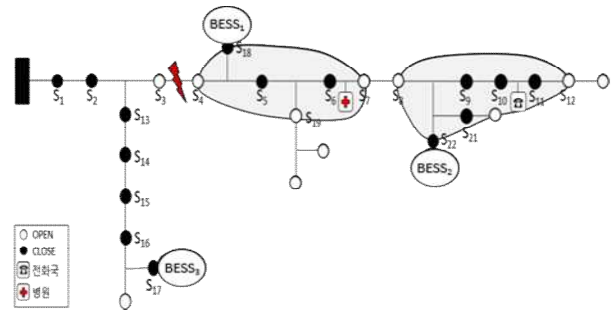


그림 11 토폴로지 후보 1순위

Fig. 11 Topology candidate ranking 1

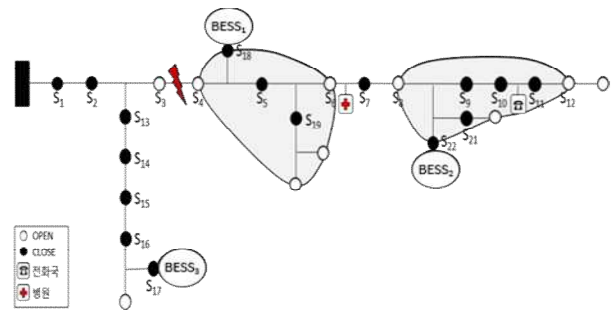


그림 12 토폴로지 후보 2순위

Fig. 12 Topology candidate ranking 2

5. 결 론

연계선로 확보가 어려운 도서/산간지역의 배전선로에 고장이 발생하면 정전을 복구하기 위하여 BESS를 활용할 수 있다. 본 논문에서는 BESS 정전복구를 위한 배전선로 토폴로지 재구성 방안을 제시한다. 운전규칙의 모호성을 처리하고 여러 가지 목적함수를 종합하기 위하여 퍼지 의사결정 기법을 도입하였다. 본 논문에서 제시하는 방법을 적용하면 부하밀도가 낮은 지역 배전계통의 공급신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] D. Rupolo and J. R. S. Mantovani, "Reconfiguration of radial electric power distribution system via a scatter

- search algorithm", IEEE Latin America Transactions, Vol. 13, No. 4, pp. 1022-1028, 2015.
- [2] R. Srinivasa Rao, K. Ravindra, K. Satish and S. V. L. Narasimham, "Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 1, pp. 317-325, 2013.
- [3] F. Sayadi, S. Esmaili and F. Keynia, "Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 10, pp. 2316-2326, 2016.
- [4] A. Asrari, S. Lotfifard and M. Ansari, "Reconfiguration of smart distribution systems with time varying loads using parallel computing", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2713-2723, 2016.
- [5] B. Khorshid-Ghazani, H. Seyedi, B. Mohammadi-ivatloo, K. Zare and S. Shargh, "Reconfiguration of distribution networks considering coordination of the protective devices", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 1, pp. 82-92, 2017.
- [6] S. I. Lim, S. J. Lee, M. S. Choi, D. J. Lim and B. N. Ha, "Service restoration methodology for multiple fault case in distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1638-1944, 2006.

저 자 소 개



임 성 일 (Seongil Lim)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수

Tel : 055-249-2630

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr