

A Study on the Protective Coordination of Distribution Automation System under Loop Operation

이 회 태* · 문 종 필[†] · 김 재 철**
(Hee-Tae Lee · Jong-Fil Moon · Jae-Chul Kim)

Abstract - As a general radial configuration of power distribution system, the various researches have being studied to change a radial configuration to network one such as smart, intelligent and micro grid for loop operation. If a radial configuration changes to network, protective coordination comes to the biggest problem. When a typical protective algorithm is applied to loop distribution system protection, the interrupted section is expanded, therefore, reliability grows worse. This paper presents the new protective method being able to apply to loop distribution system with Distribution Automation System (DAS) which separate the minimal faulted section. Through contingency analysis of the sustained and momentary fault, we analyzed the influence for radial configuration and loop configuration using interrupted area and proved the effectiveness of proposed method.

Key Words : Loop Distribution System, Distribution Automation System, Protective Coordination, Reliability

1. 서 론

현재 배전계통은 기존 방사상 운전으로부터 루프운전, 특히 스마트 그리드(Smart grid), 지능형 그리드(Intelligent grid), 마이크로 그리드(Micro grid) 등의 네트워크의 개념으로 패러다임이 변화하기 시작하는 시점으로, 이들 시스템을 어떠한 방식으로 구현할지에 대한 많은 개념적인 연구가 진행 중에 있다[1-3].

그리드의 개념은 배전계통이 송전망과 같이 네트워크 구조로 변경되는 것을 의미하며, 간단히 말하면 단방향 전력공급 시스템을 양방향 공급시스템으로 변경하는 것을 의미한다. 가장 간단한 그리드 시스템은 루프(Loop) 형식으로써, 현재 배전 말단에 연계되어 있는 상시개로(Normally open) 스위치를 단아 양방향에서 전력을 공급할 수 있도록 연결한 시스템이다. 다시 말하면, 현재 배전계통은 구성자체는 그리드 형식으로 구성되어 있으나 상시개로 스위치를 이용하여 방사상 운전만 하고 있는 실정으로, 향후 분산전원이 연계된 스마트 그리드로 발전할 경우 상시개로 스위치를 상시폐로로 운전하여 그리드를 구성할 수가 있는 구조이다.

이러한 배전계통의 그리드화는 스마트그리드와 맞물려 체계적으로 연구되고 있다. 그러나 아직까지 직접적으로 운영된 사례는 없는 실정이다.

참고문헌 [4]의 경우 높은 신뢰도를 추구하기 위해 방향성 계전방식의 도입과 원리를 소개하고 있으며, 이를 이용하여 루프운전을 통해 단시간정전과 전압강하에 대한 신뢰도가 향상되었음을 기술하고 있다. [5]는 상시폐로 운전에 대한 보호계전방식에 대해 연구하여 고장시 정전지역과 고장 제거시간을 줄이기 위한 연구를 수행하였다.

위의 연구들과 같이 배전계통을 그리드로 운전하게 되면, 한 수용가에 2개의 피더가 연결된 구조가 되어 전력 신뢰도 측면에서 매우 큰 이점을 가질 수 있으나, 현재 사용하고 있는 방사상 방식의 보호협조 시스템으로는 양방향 전력공급에 대하여 보호협조가 무너지는 경우가 발생하게 되므로 양방향 시스템에 적합한 보호협조를 재구성해야 한다. 그러나 이에 대한 선행연구는 거의 없는 실정이며, 이것을 단순히 모든 보호기기를 양방향 보호를 할 수 있도록 교체하거나 또는 송전계통 보호와 같이 한 모선에 대하여 양방향으로 보호할 수 있도록 보호기기를 모선 양쪽에 추가적으로 설치하게 되면 매우 많은 비용을 요구하게 되므로, 가능한 현재 설치되어 있는 보호기기를 이용하여 구성하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 현재 방사상 배전계통 보호방식에서 사용하는 과전류계전기(Overcurrent Relay), 리클로저(Recloser)의 특성을 분석하고, 배전계통 루프운전시 보호협조 문제점을 분석하여, 배전자동화가 되어 있는 시스템을 대상으로 보호협조를 할 수 있는 기법을 개발하여, 정전구간을 최소화하고 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다.

[†] 교신저자, 정회원 : 숭실대 공대 전기공학부 전임강사 · 공학박사

E-mail : pichard@ssu.ac.kr

* 정 회 원 : 숭실대 공대 전기공학부 박사과정

** 펠로우 회원 : 숭실대 공대 전기공학부 교수 · 공학박사

접수일자 : 2009년 4월 17일

최종완료 : 2009년 6월 11일

2. 방사상 배전계통의 보호방식

배전계통에서 보호기기는 자기 부하측에서 발생한 고장을

검출하여 보호협조에 따라 고장을 제거하여 고장구간을 전 구간으로부터 분리시켜 수용가와 전력계통을 보호하기 위해 사용하고 있다. 배전자동화가 되어 있는 지역에서는 배전선로의 차단기(과전류계전기+리클로징 계전기)와 리클로저를 중앙에서 제어 가능하게 되어 있다[6].

그림 1과 같은 방사상 배전계통의 각 구간에서 고장발생 시 보호협조는 다음과 같다.

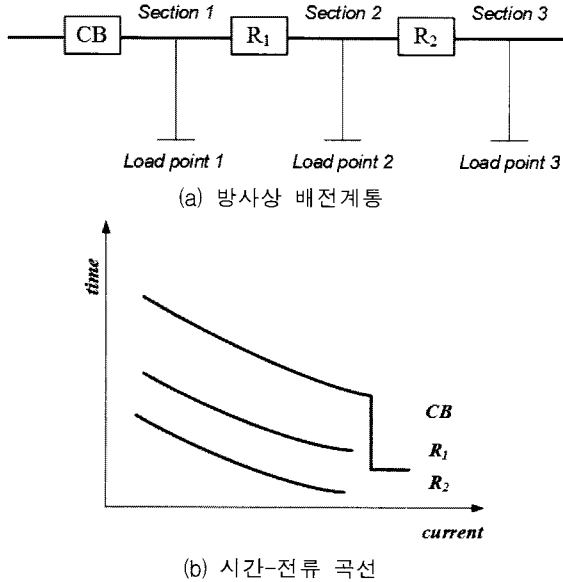


그림 1 방사상 배전계통의 구성 및 시간-전류곡선(TCC)
Fig. 1 Configuration of radial distribution system and TCC

2.1 과전류계전기 순시 동작

CB와 R₁사이에서 고장이 발생하게 되면, CB에서는 고장 전류가 흘러 고장을 감지하게 되며, 다른 보호기기 R₁, R₂는 고장전류가 흐르지 않아 고장을 감지할 수 없다. 따라서 CB에서는 과전류 계전기가 고장전류의 크기를 검출하고 시간-전류곡선(Time-Current Curve; TCC)에 의해 일정시간이 지난 후에 트립하게 된다. 또한 재폐로계전기가 추가적으로 설치되어 있어 순간고장시 차단기를 다시 폐로시켜 영구정전으로 확대되는 것을 방지하고 있다.

2.2 과전류계전기와 리클로저 협조

R₁과 R₂사이에서 고장이 발생하게 되면, CB와 리클로저 R₁은 고장을 감지하게 되며, R₂는 고장을 감지할 수 없다. 2.1의 경우와 마찬가지로 CB와 리클로저는 재폐로 기능을 갖고 있다. 따라서 이 구간에서 고장 발생시 R₁과 CB가 고장전류를 감지하여 재폐로를 수행하게 되는데 R₁은 주보호가 되고 CB는 후비보호가 되어, 우선 R₁이 재폐로를 수행하게 된다. 따라서 CB와 리클로저 사이의 부하인 Load Point(LP) 1은 R₁ 재폐로에 의한 순간정전을 경험하지 않게 되어, 리클로저가 아닌 차단기만 설치한 경우보다 신뢰도가 좋아지게 된다[7].

일반적으로 재폐로 동작은 순시동작 2회(2Fast; 2F) 지연 동작 2회(2Delay; 2D)를 하게 되고, 두 번째 Delay 동작에서도 계속해서 고장전류가 흐를 경우 영구고장으로 판별하여 락아웃(Lockout)시키게 된다. 본 논문에서는 2F1D를 기준으로 하였다.

그림 2는 리클로저 뒤에서 고장이 발생했을 경우 고장선로 리클로저의 순시 및 지연 동작에 따른 고장선로와 인근 선로의 전압파형을 보여준다.

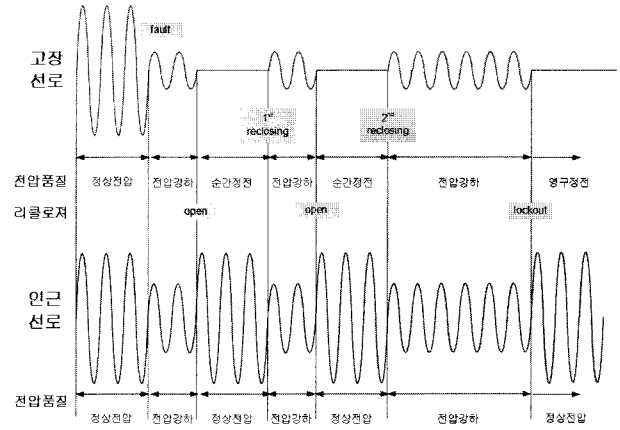


그림 2 리클로저의 동작에 따른 피더의 전압파형
Fig. 2 Voltage waveform by recloser's operation

3. 루프 배전계통의 보호방식의 알고리즘 제안

본 장에서는 방사상 배전계통을 루프계통으로 운전할 경우, 배전자동화가 구성된 계통에서 현재 설치되어 있는 보호 기기들을 그대로 활용하여 보호협조를 수행하기 위한 알고리즘을 제안한다.

3.1 단일루프 계통 및 보호협조 문제점 분석

그림 3은 상시개로 스위치로 연결된 2개의 피더가 스위치를 폐로시켜 연결할 경우 구성되는 루프 배전계통의 예를 나타낸다. 여기서 과전류계전기, 리클로저는 기존의 정정값을 갖고 있다고 가정한다.

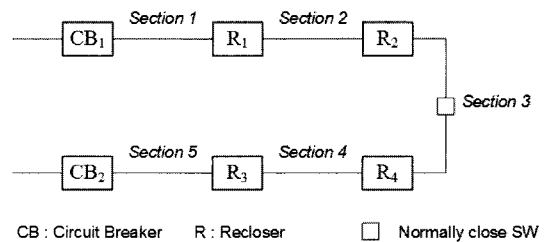


그림 3 루프 배전계통
Fig. 3 Loop configuration of power distribution system

현재 리클로저는 자기방향의 고장전류만 감지하는 단방향으로 정정되어 있다. 이 경우 각 구간에서 고장이 발생할 경우 영향을 받아 정전을 경험하는 지역과 재폐로에 따라

순간정전을 경험하는 지역을 분석하여 표 1에 나타내었다. 예를 들어, 1번 구간에서 영구고장이나 순간고장 발생시, CB_1 과 R_4 가 트립되게 되며 이에 따라 구간 1, 2, 3에 위치한 수용가들은 영구정전과 순간정전을 각각 경험하는 것을 나타낸다.

표 1 상정사고시 트립되는 기기와 정전지역
Table 1 Tripped protective devices and interrupted sections depending on faulted section

고장구간 [section]	트립기기명	정전지역 [section]						
		1	2	3	4	5	6	7
1	CB_1, R_4	■	■	■				
2	R_1, R_4		■	■				
3	R_2, R_4			■	■			
4	R_2, R_3			■	■	■		
5	CB_2, R_2			■	■	■	■	

만약 방사상 배전계통이라면 피더 1번에만 고장전류가 흐르게 되지만, 루프계통의 구조에서는 루프로 연결된 피더(피더2)도 고장점으로 고장전류가 흘러 고장전류를 감지하게 된다. 다시 말하면, 한 피더에서 고장 발생시, 루프로 연결된 다른 피더의 모든 보호기기는 고장을 감지하게 되어 고장구간이 늘어나게 된다.

루프운전시 최적의 보호방법은 고장구간에 가장 가까운 양 옆의 보호기기를 트립하는 것이다. 예를 들면, 1번 구간에서 고장이 발생할 경우 CB_1 과 R_4 만 트립하면 되고, 2번 구간에서 고장 발생시에는 R_1 과 R_2 만 트립하면 된다. 물론 이는 송전계통과 같이 각 모선을 중심으로 양쪽에 보호기기를 설치하면 되지만, 그럴 경우 각 리클로저의 왼쪽에 추가적으로 4개의 보호기기를 설치하게 되어 비용측면에서 효율적이지 못하게 된다. 따라서 배전자동화가 되어 있는 지역에서 루프 배전방식의 도입 시 다음과 같은 보호협조 기법을 제안한다.

3.2 루프 배전방식의 보호협조 알고리즘 제안

현재 보호방식으로는 1번 구간에서 고장발생시 CB_1 와 R_4 가 정전구간을 분리하게 되어 불필요하게 2번과 3번 구간에 정전을 발생시킨다. CB_1 은 사고발생시 순시동작으로 이미 트립이 되어 있기 때문에 R_4 대신에 R_1 이 트립이 되면 정전구간을 축소시킬 수 있다.

우선 배전자동화가 되어 있는 지역에서는 모든 차단기의 접점상태가 중앙제어실로 신호가 들어오게 된다. 따라서 1번 구간의 영구사고시 CB_1 과 R_4 가 트립되어 트립신호가 중앙제어실로 들어오게 되고 이 때에는 R_1 이 동작하도록 논리회로를 구성하면 된다. 만약 2번 구간에 고장이 발생할 경우에는 R_1 과 R_4 가 트립되고 이 경우에는 R_2 를 트립시키면 된다. 3번 구간에서 사고가 발생하면 원래의 방식대로 R_2 와 R_4 가 트립되게 된다.

그림 4는 위의 알고리즘을 논리회로로 표현한 그림이다.

제일 밑의 Section은 고장구간을 나타내며, 화살표는 그 구간에서 고장발생시 트립되는 보호기기를 나타낸다. 트립신호는 중앙제어실로 전송되어 중앙 제어실에서는 두 개의 트립신호가 발생시 다른 보호기기를 트립시키고, 불필요하게 트립된 보호기기는 다시 닫고 트립을 억제시키게 된다. 예를 들어 5번 구간에서 고장 발생시 R_2 와 CB_2 가 트립되게 되고, 이 신호를 이용하여 AND 게이트를 통하여 R_3 를 트립시키고 R_2 는 다시 닫고 트립을 억제시키게 된다.

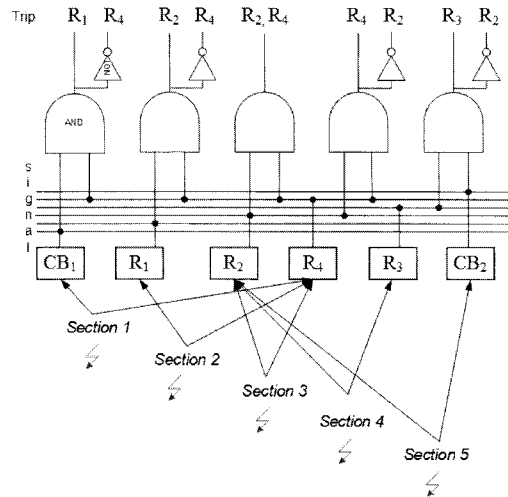


그림 4 루프운전시 보호협조 알고리즘
Fig. 4 Protective coordination Algorithm for Loop system

4. 사례연구

그림 5는 사례연구를 위한 배전계통 모델을 보여준다. 이 모델을 이용하여 방사상 계통 및 루프 배전계통의 보호협조 알고리즘을 이용하여 영구정전과 순간정전을 경험하는 지역을 비교 분석하였다. 본 사례연구는 방사상의 보호협조를 그대로 적용하였을 때와 제안한 알고리즘을 사용하였을 경우 정전구간의 축소 효과를 보기 위한 것이다.

사례연구 케이스는 다음과 같다.

- A. 방사상 운전시 정전구간
- B. 루프운전시 정전구간 (방사상 보호협조를 이용할 경우)
- C. 루프운전시 정전구간 (제안한 알고리즘을 이용할 경우)

A의 경우는 그림 5에서 피더 끝에 있는 상시개로스위치를 개로한 상태로, 피더 4개가 각각 전력을 공급하는 모델이고, B와 C모델은 이 스위치를 상시폐로로 운전하여 단아서 두 개의 루프를 만든 모델이다.

고장은 순간고장과 영구고장으로 분류하였으며, 수용가 영향을 순간정전과 영구정전을 평가하였다. 그림 7은 사례 A모델에 대한 구간별 정전지역을 나타낸다. 여기서 s 는 고장구간을, Lp 는 각 구간의 수용가군을 나타낸다. 방사상 계통의 경우에는 순간고장시 리클로저의 재폐로 동작으로 인하여 순간정전을 경험하는 수용가와 영구고장시 리클로저의 락아웃으로 영구정전을 경험하게 되는 수용가는 동일하게 나타난다.

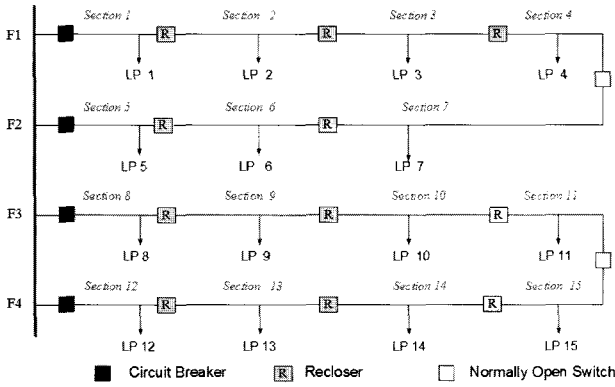


그림 5 사례연구를 위한 모의 계통
Fig. 5 Model of distribution system for case studies

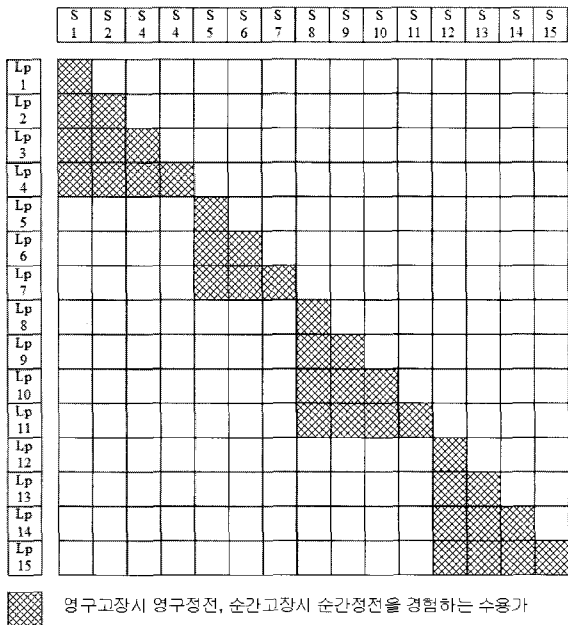


그림 6 고장구간에 따른 정전지역 (사례 A)
Fig. 6 Interrupted customers by faulted sections (Case A)

그림 7은 사례 B에 대한 정전구간을 나타낸다. 마찬가지로 영구고장과 순간고장 발생시 정전을 경험하는 수용가에 대한 위치를 구간별로 도식화한 결과이다. 사례 A와 비교했을 때 정전구간이 추가로 늘어나는 것을 알 수 있다. 즉, 방사상 보호협조 알고리즘을 루프계통에 그대로 적용할 경우에는 같은 고장에 대하여 고장구간이 늘어나게 된다.

그림 8은 제안된 알고리즘을 이용하였을 경우의 정전구간이다. 그림과 같이 영구고장시 영구정전 그리고 순간고장시 순간정전을 경험하는 수용가가 있고, 영구고장 및 순간고장시 모두 순간고장만 경험하는 수용가가 있다.

일반적인 A모델의 보호협조를 그대로 루프 계통의 B모델로 구조변경시 추가적으로 정전을 경험하는 수용가는 늘어나게 된다.

그림 6(사례A)과 그림 7(사례B)에서 보면, 정전의 영향을 받는 지역은 Lp4의 경우 방사상의 계통에 비해 5~7구간의 영구고장 및 순간고장시 모두 추가적인 영향을 받는 것을

볼 수 있다. 그리고 Lp7의 경우는 1~4구간, Lp11은 12~15구간, Lp15는 8~11구간의 정전구역이 확대됨을 알 수 있다. 이것은 방사상 계통을 루프계통으로 운전시 추가적으로 발생하는 정전구역을 나타낸다.

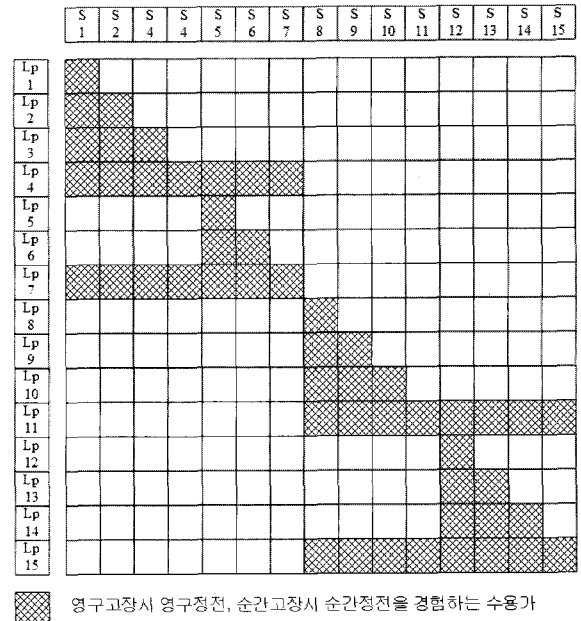


그림 7 고장구간에 따른 정전지역 (사례 B)
Fig. 7 Interrupted customers by faulted sections (Case A)

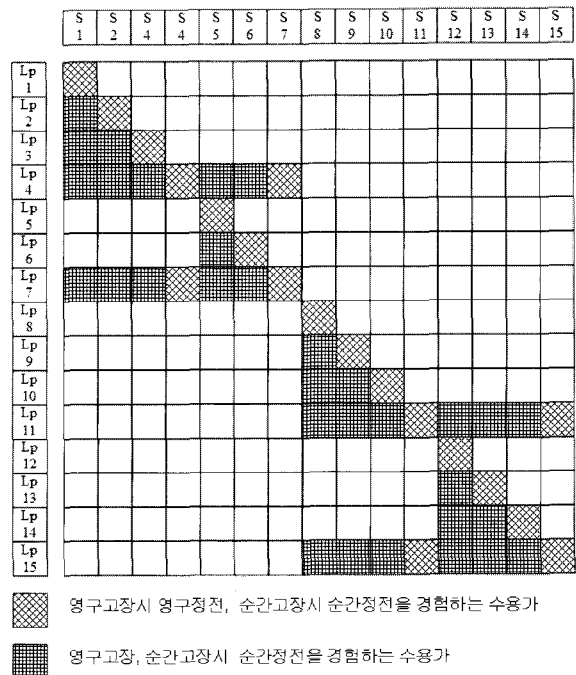


그림 8 고장구간에 따른 정전지역 (사례 C)
Fig. 8 Interrupted customers by faulted sections (Case C)

제안한 보호협조 알고리즘(사례 C)을 적용할 경우, 그림 8에서 보듯이 사례 A에 비하여 추가적으로 정전에 대한 영

향을 받는 지역이 생긴다. 그러나 이 지역은 루프운전에 따라 추가된 지역으로 사례 B와 동일한 것을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8을 비교하면, 사례 B에서 영구정전을 경험하게 된 수용가가 영구정전 대신 순간정전을 경험하게 되어 기존의 B모델의 보호협조보다 향상된 결과를 볼 수 있다.

사례 A와 사례 C를 비교하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서 α 는 각 구간의 고장시 방사상계통에서 영구정전을 경험하게 되는 지역이지만 제안한 알고리즘을 사용할 경우 영구정전을 경험하는 대신 순간정전을 경험하게 되는 지역을 의미한다. β 는 방사상의 계통이 루프계통으로 변경됨으로 인해 추가적으로 발생하는 영구정전 지역이었으나, 제안한 알고리즘을 이용하여 순간정전만 경험하게 만든 지역을 의미한다.

정리하면, 루프 계통에서 제안한 알고리즘을 사용하게 되면, 방사상 운전에 비해 영구정전을 경험하는 수용가를 순간정전만 경험하게 만들 수 있고, 루프운전에 비해 영구정전을 경험하는 수용가를 순간정전을 경험하게 보다 개선할 수가 있다.

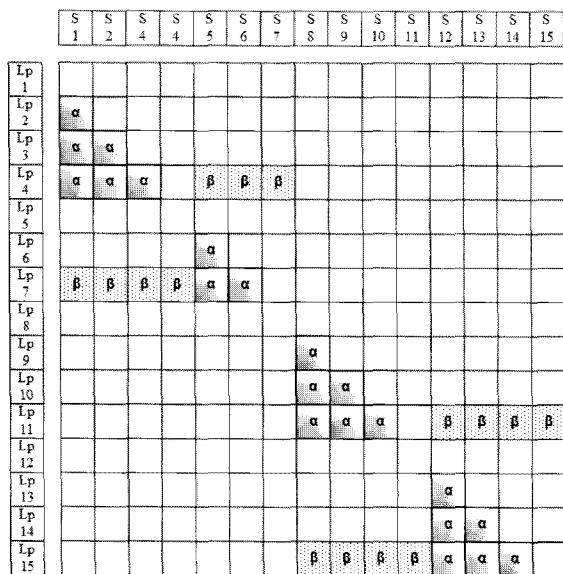


그림 9 고장구간에 따른 정전지역 (사례 A+B 대비 C)
 Fig. 9 Interrupted customer according to faulted section (Case A&B VS. Case C)

5. 결 론

스마트 그리드와 같은 배전계통의 구조변화는 현재의 방사상 운전을 루프 운전으로 변경됨을 의미한다. 이러한 상황이 발생할 경우 가정 먼저 보호협조에 대한 재구성이 필요하게 된다.

현재의 배전계통 보호협조를 그대로 적용하여 운전하여도 고장전류 차단 관점에서는 문제가 없다. 그러나 차단구간이 넓어져서 건전구간에 추가적인 정전지역을 발생시켜 고장구간만을 분리하여야 하는 보호의 기본 목적을 벗어나게 된다. 따라서 본 논문에서는 추가적인 정전지역을 최소화하기

위한 배전자동화 계통에서 루프구성시 기존의 보호기기를 그대로 이용하여 보호협조를 할 수 있는 기법을 제안하였다.

방사상 계통을 루프 계통으로 변경하여 발생하는 정전을 순간정전과 영구정전으로 분류하고, 모의계통에서 구간별 상정사고를 통해 지역을 도식화 하여 분석하였다. 그 결과 현재의 보호협조를 그대로 사용할 경우 A모델에 비해 정전에 대해 영향을 받는 지역이 추가적으로 발생하게 되는 문제점이 발생하여, 고장이 발생한 구역만을 정확히 차단하기 위한 알고리즘을 제안하였다.

제안한 알고리즘을 이용한 결과 A모델에서 영구고장시 영구정전을 경험하는 수용가의 대부분을 영구정전 대신 순간정전만을 경험하게 되었으며, 일부 지역은 루프구조로 변경됨에 따라 발생한 영구고장을 경험하는 수용가를 순간정전만을 경험하게 되어 신뢰도 측면에서 향상된 결과를 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papatlianassiou, N. Hatziargyriou, "Making microgrids work", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 6, No. 3, 2008

[2] Katiraei F., Iravani M.R., Lehn P.W., "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol., 20, No., 1, 2005

[3] B. Kroposki, C. Pink, T. Basso, R. DeBlasio, "Microgrid standards and technology development", IEEE PES General Meeting, 2007,

[4] Tobias J.C., Sautriau F., Hull, D.J. Fabray, S. "Improved quality of supply in MV distribution networks using directional blocking scheme", Proc. IEE Conf. on CIREN, No. 438, 1997

[5] Kun-Yuan, Shen, Jyh-Cherng Gu, "Protection coordination analysis of closed-loop distribution system", in Proc. IEEE Power System Technology Conf., 2002

[6] 한국전력공사 중앙교육원, "신입배전기초반II", 한국전력공사, 2006

[7] J. C. Bae, "A study on power system reliability cost assessment considering the demand varying factors and momentary interruptions", Ph.d. dissertation of Soongsil university, 2002

저 자 소 개



이 희 태 (李 羲 泰)

1976년 4월 2일생. 2002년 숭실대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사수료.

Tel : 02-824-2416

Fax : 02-817-0780

E-mail : visir@ssu.ac.kr



문 종 필 (文 鍾 必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 전임강사

Tel : 02-828-7266

Fax : 02-817-7961

E-mail : pichard@ssu.ac.kr



김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 12일 생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 숭실대 전기공학부 교수.

Tel : 02-820-0647

Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr