

Research on Backup Protective Coordination for Distribution Network

네트워크 배전계통용 백업 보호협조에 관한 연구

WooHyun Kim, WooKyu Chae, SungWook Hwang, JuYong Kim
김우현, 채우규, 황성욱, 김주용

Abstract

The radial distribution systems (RDS) commonly used around the world has the following disadvantages. First, when the DL is operated on a radial system, the line utilization rate is usually kept low. Second, if a fault occurs in the radial DL, a power outage of 3 to 5 minutes is occurring depending on the operator's proficiency and fault situation until the fault section is separated and the normal section is replaced. To solve this problem, Various methods have been proposed at domestic and foreign to solve this problem, and in Korea, research is underway on the advanced system of operating multiple linked DL always. A system that is electrically linked always, and that is built to enable high-speed communication during the protection coordination is named networked distribution system (NDS). Because the load shares the DL, the line utilization rate can be improved, and even if the line faults, the normal section does not need to be cut off, so the normal section does not experience a power outage. However, since it is impossible to predict in which direction the fault current will flow when a failure occurs in the NDS, a communication-based protection coordination is used, but there is no backup protection coordination method in case of communication failure. Therefore, in this paper, we propose a protective cooperation method to apply as a backup method when communication fails in NDS. The new method is to change TCC by location of CB using voltage drop in case of fault.

Keywords: Closed-loop system, Meshed distribution system, Networked distribution system, Non-communication, Protection coordination

I. INTRODUCTION

전세계에서 일반적으로 사용되고 있는 수지상계통은 다음과 같은 단점이 있다. 첫번째로, 배전선로를 수지상으로 운전하면 해당 선로의 부하 패턴과 최대부하에 따라 선로 이용률이 결정되며, 이용률은 통상 낮게 유지된다. 두번째로, 수지상 배전선로에서 고장이 발생할 경우 고장구간을 분리하고 건전구간(고장이 발생하지 않은 구간)을 다른 배전선로로의 절체까지 운전원의 숙련도와 고장 상황에 따라 3~5분 정도의 정전이 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 국내외에서 다양한 방법이 제안되고 있으며, 한국에서는 다수의 선로를 상호 상시 연계하여 운전하는 계통방식에 대한 연구를 진행하고 있다 [1]. 전기적으로 그물망과 같이 복잡하게 연계되어 있으며, 나아가 보호기간 고속도 통신까지 가능하도록 구축된 계통을 네트워크 배전계통(Networked distribution system, NDS)라 명명하였다.

네트워크 배전계통에서 고장이 발생할 경우 차단기 입장에서 고장조류가 어떤 방향으로 흐를지 예측할 수 없기 때문에 수지상 배전계통의 보호협조 방식을 그대로 적용하는 것이 불가능하다. 이를 해결하기 위해 통신을 이용하여 보호협조를 수행하지만 통신실패에 따른 백업 보호협조가 전무한 실정이다 [2-4]. 통신실패 시 연계차단기를 개방하여 수지상으로 전환한다는 컨셉이 있긴 하지만

백업방안으로 적절하지 않다. 통신 실패는 크게 두 가지로 나뉘는데 통신 모듈의 고장 혹은 통신선의 물리적 절단으로 인한 영구적 통신고장은 '통신두절'로 나타내고, 통신기반 보호협조시 데이터 송수신이 지연되거나 고장조류의 방향판단에 실패하여 일시적으로 통신에 실패하는 것을 '통신지연'이라 한다. 제어단말장치가 통신두절 상황 시, 자단만의 문제인지 계통 보호기기의 전체 문제인지 알 수 없기 때문에 픽업이 되면 무조건 시간-전류 곡선(Time-current curve, TCC)에 의한 개방동작을 할 수 밖에 없다. 또한 통신지연에 의한 보호협조 실패 시 일시적인 현상인지 확인할 방법이 없기 때문에 반드시 수지상 계통으로 전환해야 하는지 의문점이 생기기도 한다. 따라서 통신실패에 대한 백업 방법으로써 다음 두 가지 원리를 이용한다. 첫째, 고장 시 선로의 고장전압은 변전소에서 고장점에 가까울 수록 낮아진다. 둘째, 고장이 발생한 선로의 고장전류는 정상 선로를 통해 공급되는 고장전류에 비해 그 크기가 크다. 위 두 가지 원리를 이용하면, 고장지점에 근접한 보호기기 일수록 계측되는 전압이 낮고 고장전류가 크기 때문에 다른 보호기기 보다 더 빨리 개방동작을 수행한다. 즉, 보호기간 별도의 통신이 필요 없고, 고장조류의 방향을 판단할 필요도 없어진다.

본 논문에서 제안한 방법을 통해 네트워크 배전계통에서 고장 발생 시 통신실패 상황에서도 고장구간만 자동으로 분리가 가능하고(자가회복), 차단기의 자체 고장에 의한 차단실패 시 다음 구간의

Article Information

Manuscript Received November 29, 2021, Accepted April 28, 2022, Published online December 30, 2020

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: WooHyun Kim (wh.kim@kepco.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

차단기가 자동으로 차단(고장 백업)할 수 있게 된다. 또한 제안된 방법은 분산전원 및 전동기 밀집 부하에도 적용 가능하고, 별도의 장치가 불필요하여 기존 설비를 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다.

II. PROPOSED METHOD

네트워크 배전계통에서 고장 발생 시 통신실패 상황에서 보호 기기간 협조를 위해 두 가지 원리를 이용한다. 첫째, 고장시 선로의 고장전압은 변전소에서 고장점에 가까울 수록 낮아진다. 이는 수직상 선로나 네트워크 선로 모두에서 발생하는 공통적인 현상이다. 둘째, 고장이 발생한 선로의 고장전류는 정상 선로를 통해 공급되는 고장전류에 비해 그 크기가 크다. 즉, 고장이 발생한 선로의 보호기기는 그렇지 않은 선로에 비해 더 큰 고장전류를 경험한다. 두 가지 원리를 이용하여, 보호기기에서 측정되는 전압이 낮을수록, 측정되는 전류가 클수록 보호기기의 개방동작 지연시간이 짧게 계산된다. 이렇게 하면 고장지점에 근접한 보호기기 일수록 측정되는 전압이 낮고, 고장선로는 정상선로에 비해 고장전류가 크기 때문에 다른 보호기기 보다 더 빨리 개방동작을 수행한다. 즉, 보호기기간 별도의 통신이 필요 없고, 고장조류의 방향을 판단할 필요도 없어진다.

차단기 동작지연시간 계산은 기존 수직상 선로에서 사용하는 시간-전류 곡선을 그대로 사용한다. 이때 선로에 설치된 모든 보호기기의 시간-전류 곡선의 탭(Tap)과 레버(Lever)는 동일하게 설정된다. 고장에 따른 최종적인 차단기 동작지연시간은 전압의 크기에 비례하며 계산되는데, 이를 위해 배수-전압 곡선을 새로 제안한다. 전압이 측정되면 배수-전압 곡선에 따라 시간-전류 곡선이 위(동작시간이 더 느려짐) 또는 아래(동작시간이 더 빨라짐)로 움직인다. 마치 보호협조 정정시에 시간-전류 곡선에서 레버를 조정하는 것과 같다. 각 용어에 따른 정의를 TABLE 1에 정리하였다. 전압을 측정하는 PT의 정밀도가 높을수록 운영측면에서 유리하지만, 배수-전압 곡선의 경우 고장이 발생하면 기존 측정값에서 얼마나 감소하였는지를 판단하는 요소이기 때문에 PT의 열화에 따른 측정값 오류는 무시할 수 있다.

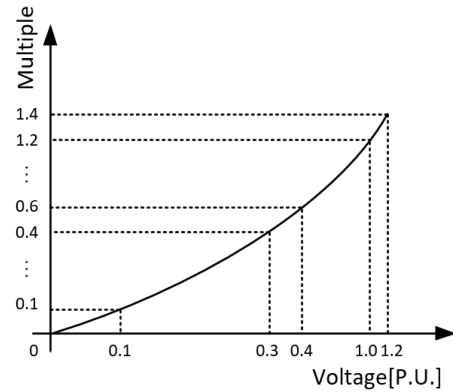
발명의 핵심인 배수-전압곡선 및 시간-전류곡선을 수식 1 및 Fig. 1에 나타내었다. 고장이 발생한 후 고장전류를 픽업하고 나면, 고장전압[P.U.]을 x에 대입하여 2차 함수 꼴의 배수-전압곡선에 의한 배수가 도출되고 이러한 배수는 기존 커브의 레버 역할을 하게 된다. 또한 기기간 측정 전압 기반의 시간지연을 두기 위해 다음 항에 0.02x를 가산하게 된다. 그 후 픽업된 고장전류를 수식에 대입하여 차단기 개방 지연시간을 도출한다. 따라서 배전계통의 보호기기에 모두 동일한 수식으로 설정 했을 때, Fig. 2와 같이 고장 위치에 따라 시간-전류곡선이 능동적으로 움직이기 때문에 방향성을 판별하지 않아도 고장지점에 가장 가까운 보호기기 2대만 먼저 동작하기 때문에 고장구간만 분리가 가능하다. 예를 들어, 설비가 고장점에 가까울수록 낮은 레버의 시간-전류곡선이 되고, 고장점에서 멀수록 높은 레버의 곡선이 된다. 단락고장일 경우 선간전압을 적용하고 지락고장일 경우 고장상의 상전압을 적용하여 x를 도출한다.

$$T_{open\ delay\ time} = \frac{13.5}{I_s^{1-1}} \times 0.4x^2 + 0.02x \quad (@\ x = \frac{V_{fault}}{V_{normal}}) \quad (1)$$

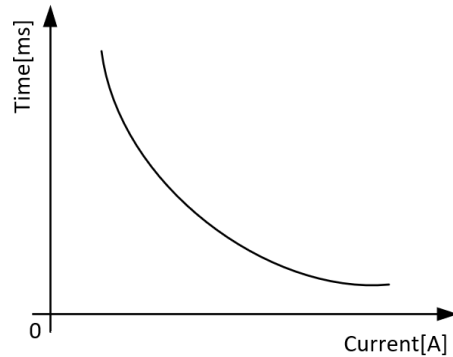
각 차단기가 수행하게 될 보호협조 알고리즘을 Fig. 3에 나타냈다. 차단기의 제어장치에서 전압 및 전류를 상시 계측하여 고장전

Table 1
Definition of term

용어	설명
배수-전압 곡선	고장발생 시 측정되는 전압의 크기에 비례하여 시간-전류 곡선의 레버 정정
시간-전류 곡선	고장발생 시 계측된 전류의 크기에 반비례하여 차단기의 동작지연 시간을 도출
동작지연시간	두 곡선 방정식에 의해 도출된 값으로 고장픽업에서 차단신호 발생까지의 시간



(a) Multiple curve



(b) Time-current curve

Fig. 1. Example curve.

류를 감지하면, 제안된 배수-전압곡선 및 시간-전류곡선으로부터 동작지연시간을 계산한다. 계산된 시간만큼 대기하던 중에 고장이 해소되어 정상상태로 회복되거나, 픽업 전류 값에서 큰 폭으로 전류가 증가하면 초기단계로 복귀하고 동작지연시간을 초기화한다. 최종적으로 차단기 동작지연시간 동안 고장이 해소되지 않으면 개방동작을 하고 알고리즘은 종료가 된다. 이때 보호구간이 재페로가 필요한 경우(수목접촉, 조류접촉 등의 우려가 빈번한 곳) 재페로 시퀀스를 포함시킬 수 있다.

대부분의 경우에서는 고장점에서 가까운 차단기들이 우선 동작하지만, 고장점과 연계된 선로 중 한쪽이 임피던스가 극단적으로 낮다면 반대쪽으로는 고장 전류가 거의 흐르지 않아 고장을 감지 못하거나 감지한 경우에는 도출된 차단기 지연시간이 매우 긴 경우가 있다. 해당 경우에는 고장을 감지한 차단기가 먼저 개방되고 나면 그 후 반대측으로 더욱 큰 고장전류가 유입되게 되고 반대측 차단기가 가장 먼저 동작하게 된다. 반대측에서는 초기 고장전류를

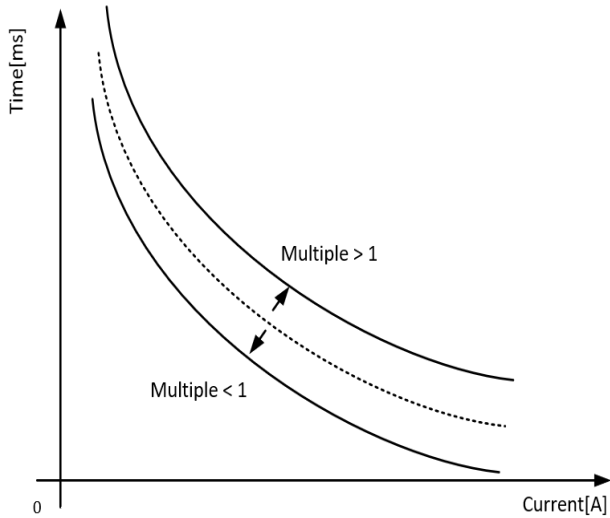


Fig. 2. Moving TCC by breaker location.

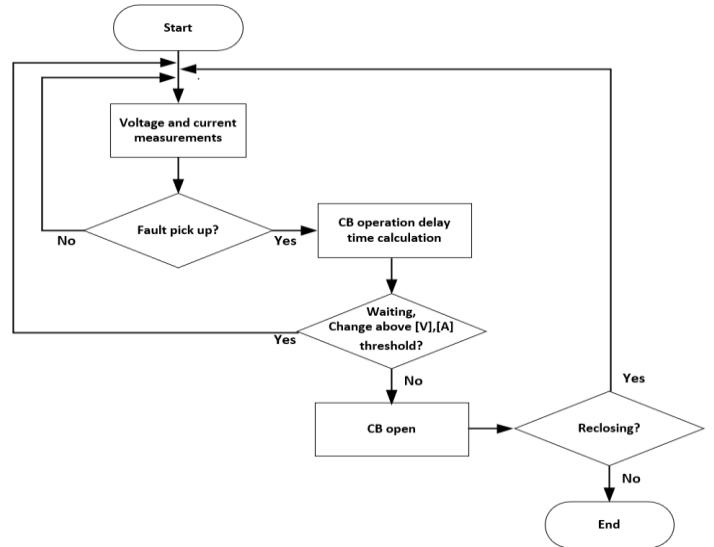


Fig. 3. Protection coordination algorithm.

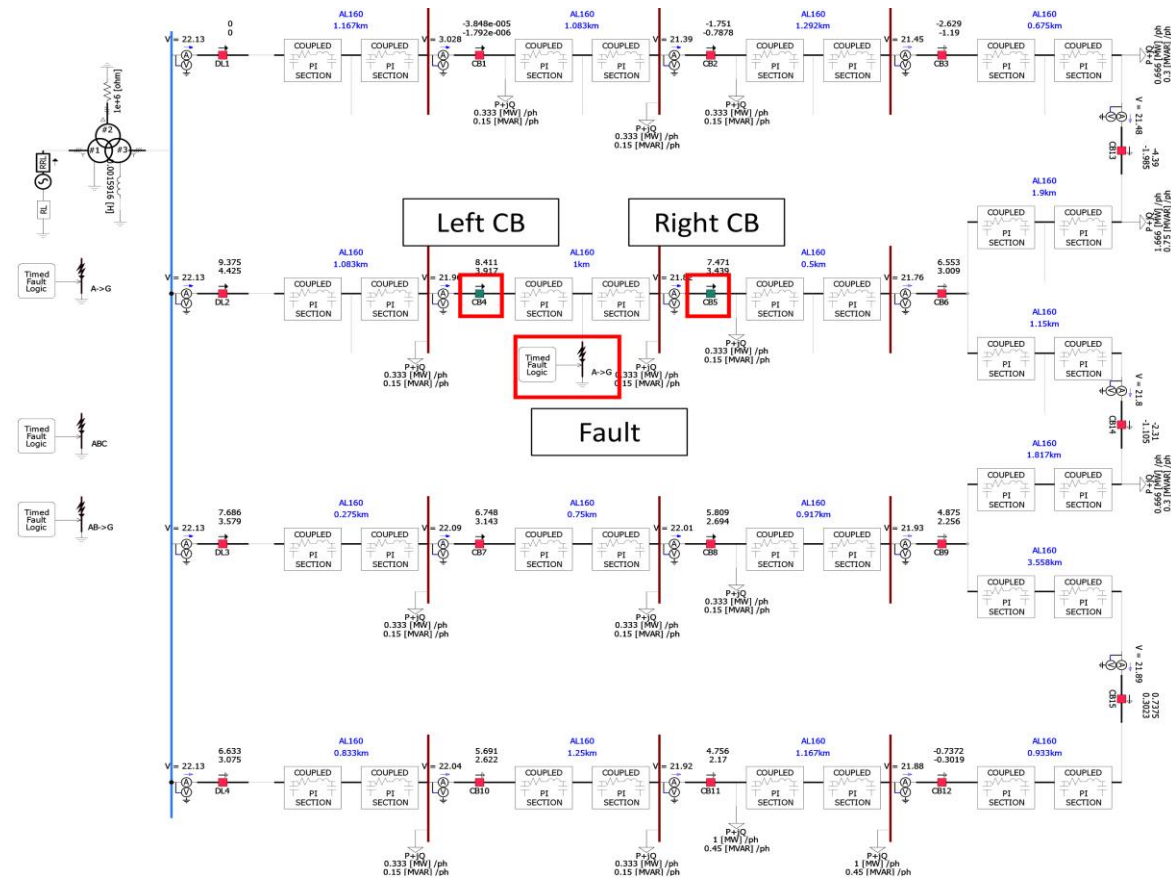


Fig. 4. NDS schematic diagram for simulations.

겪지 못했다가 고장전류를 겪게 되는데, 이 경우 타 차단기에서 앞 시퀀스에서 계산했던 동작지연시간을 초기화해야 보호협조가 실패하는 경우가 없다. 따라서 '시간대기 중 전압/전류가 기준치 이상 (15%)으로 변경되면 초기상태로 귀환' 조건을 추가하였다. 차단기가 내부고장으로 인해 차단에 실패하면 그 다음 구간의 차단기가 기준에 계산했던 동작지연시간이 끝나자마자 개방동작을 하여 백업하게 된다.

III. SIMULATION SETUP

PSCAD/EMTDC를 활용하여, 네트워크 배전계통을 모델링하였다. Fig. 4와 같이 변전소 변압기 동일뱅크에서 인출된 4회선을 중단 연계하여 계통을 모의하였고, 각 선로에는 변전소 CB를 제외하면 3개의 차단기가 설치되어 있다. 연계선로마다 차단기가 설치되어 있어 계통에는 총 15개의 보호기가 있는 상태이다. 선로의 길이는

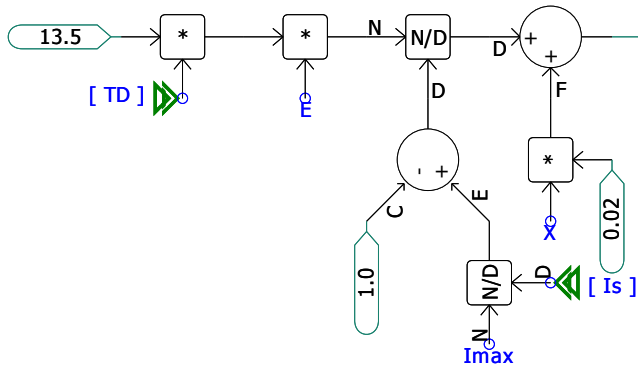


Fig. 5. Applied curve in PSCAD/EMTDC.

Table 2
Result by fault impedance and type of fault

고장 종류	1 선 지락		2 선 지락		3 선 지락		2 선 단락		3 선 단락		
	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하	
0.01	구분	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하
	동작 시간 [ms]	35	41	27	34	26	30	27	31	26	29
0.1	구분	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하
	동작 시간 [ms]	41	46	30	36	32	34	30	33	27	30
1	구분	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하
	동작 시간 [ms]	155	291	128	250	126	244	79	121	49	60

모두 상이하나 가공/지중 선로를 합해 평균 8km이며, 각 연계선로는 2km이다. 본 논문에서 모의한 고장 시뮬레이션은 Fig. 4와 같이 좌측 차단기(L)와 우측 차단기(R) 사이에서 진행하였다.

시뮬레이션에 사용된 ATCC의 파라미터 값은 수식1과 동일하며, 구현된 커브는 Fig. 5와 같다. 이때 OCR의 IS(픽업 기준)는 400 A로 설정하였으며, OCGR의 IS는 75 A이다. E는 배수-전압곡선을 의미하며, 수식 1의 2차함수 항을 대입하게 된다. 배수-전압곡선 및 지연 시간에 사용되는 X파라미터는 고장전압(=픽업후의 계측전압/픽업 전 정상전압)을 의미한다.

구현된 알고리즘으로부터 고장저항 및 종류에 따른 차단기 동작지연시간을 TABLE 2에 나타내었다. 현재국내 수지상계통에서 사용되는 IEEE VI(Very inverse)보다 전압-배수곡선에 의해 커브가 아래쪽으로 이동되므로, 모든 케이스에서 고속도로 동작되었다. 또한 Fig. 4계통의 어느 위치이던 고장점 양단의 차단기만 동작함을 확인할 수 있었다. 고장저항이 5 Ω 이상인 고저항 지락 고장에서는 전압강하가 크지 않아 기기간 보호협조가 되지 않아 정전범위가 확대 되었으나, 수지상계통에서의 인출단 고장에 비해 정전범위는 유사하거나 적었다. 고저항 지락 고장은 수지상계통과 마찬가지로 별도의 연구가 필요해보이며, 일반적인 고장상황에서는 제안 방법이 모든 고장상황에서 통신없이 고속도로 처리하였다.

IV. CONCLUSION

현대사회는 급격한 산업화 및 도시화의 진전에 따라 부하밀도가 매우 높아졌고, 전력에 대한 의존도가 갈수록 높아지고 있다. 특히 반도체 공장과 같은 민감 산업시설, 엘리베이터, 지하철, 교통 신호 등은 수분 이내의 짧은 정전에도 막대한 경제적 피해를 받을 수 있어 무정전 전력공급에 대한 요구가 갈수록 커지고 있다. 현재 운영 중인 수지상 배전방식은 고장발생시 고장구간을 분리하고 건전구간에 전력을 정상적으로 공급하기까지 건전구간에 3~5분 정도의 정전이 발생하고 있다. 네트워크 배전방식을 도입하면 고장구간이 자동으로 분리되어 건전구간에 정전이 발생하지 않아 전력공급 신뢰도를 획기적으로 향상할 수 있다. 네트워크 배전계통의 구현을 위해선 기존 보호협조 방법을 사용할 수 없어 통신기반의 보호협조 방식이 필요하다. 그러나 아직까지 통신실패에 대한 방법이 없었기 때문에 이에 대한 방안을 제시하였다.

본 논문에서 제안하는 보호협조 방식은 가공, 지중 및 혼재선로의 수지상 계통 혹은 네트워크 계통에 모두 적용이 가능하며 통신이 불필요하다. 제안된 보호협조 알고리즘은 배전 계통에서 고장 발생 시 고장구간만 자동으로 분리가 가능하고(자가회복), 차단기의 자체 고장에 의한 차단실패 시 다음 구간의 차단기가 자동으로 차단되며(기기 고장 백업), 분산전원 및 전동기 밀집 부하에도 적용가능 하고, 별도의 장치가 불필요하여 기존 설비를 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다. 따라서 신재생에너지가 대량 연계된 '수지상 계통', '루프 계통'뿐만 아니라 '네트워크 계통'에서도 보호협조가 가능하므로, 현재 n분할/n연계된 기존 수지상 계통에서 모든 연계점을 상시 상호 연계하여 네트워크 계통을 구현할 수 있게 된다.

제안된 곡선은 기존 커브와 같이 연산이 간단하며, 조류 방향의 판단이 불필요하게 되어 제어단말장치(eq. FRTU or IED)의 연산 시간 및 오류를 최소화 시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 보호협조를 위해 선로를 n분할한 제어장치마다 레버값(시간지연)을 다르게 할 필요없이 모두 동일 커브 적용이 가능하여 배전담당원의 업무를 간소화시킬 수 있고, 이해도를 높일 수 있다. 본 연구는 네트워크 배전방식의 백업용 보호협조 관련 연구를 위해 제안되었지만, 수지상 배전선로에도 적용 가능하다. 제안된 알고리즘과 이를 탑재한 IED의 시작품을 원내에서 실시간 시뮬레이션(Hardware in the loop simulation, HILS)를 통해 최적화하여 차년도에 고장전력센터의 네트워크 배전계통('22년도 구축 예정)에서 실증할 예정이다.

Acknowledgment

This research was supported by Korea Electric Power Corporation under "Development of Networked distribution system(R20DA24)".

References

- [1] M.-C.Alvarez-Herault, N.N'Doye, C.Gandioli, N.Ha-djsaid and P.Tixador, "Meshed distribution network vs reinforcement to increase the distributed generation connection," Sustainable Energy, Grids and Networks, Volume 1, pp.20-27, March 2015, [https://doi.org/10.1016/j.segan.2014.11.001].
- [2] Bin Li, Xuan Yu and Zhiqian Bo, "Protection schemes for closed loop distribution network with distributed generator," International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, April 2009, [10.1109/SUPERGEN.2009.5348370].

- [3] F. Belloni, R. Chiumeo, C. Gandolfi and M. Brenna, "Application of back-to-back converters in closed-loop and meshed MV distribution grid," AET Annual Conference - From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AET), Trieste, Italy, Sept. 2014, [10.1109/AET.2014.7002023].
- [4] Sadegh Jamali and Hossein Borhani-Bahabadi, "Non-communication protection method for meshed and radial distribution networks with synchronous-based DG," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 93, pp. 468-478, December 2017, [<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.019>].