

A study of communication-based protection coordination for networked distribution system

네트워크 배전계통용 통신기반 보호협조에 관한 연구

WooHyun Kim, WooKyu Chae, SungWook Hwang, Hakju Lee
 김우현, 채우규, 황성욱, 이학주

Abstract

Although the distribution system has been structured as complicated as a mesh in the past, the connection points for each line are always kept open, so that it is operated as a radial distribution system (RDS). For RDS, the line utilization rate is determined according to the maximum load on the line, and the utilization rate is usually kept low. In addition, when a fault occurs in the RDS, a power outage of about 3 to 5 minutes occurs until the fault section is separated, and the healthy section is transferred to another line. To improve the disadvantages of the RDS, research on the construction of a networked distribution system (NDS) that linking multiple lines is in progress. Compared to the RDS, the NDS has advantages such as increased facility utilization, load leveling, self-healing, increased capacity connected to distributed generator, and resolution of terminal voltage drop. However, when a fault occurs in the networked distribution system, fault current can flow in from all connected lines, and the direction of fault current varies depending on the fault point, so a high-precision fault current direction determination method and high-speed communication are required. Therefore, in this paper, we propose an accurate fault current direction determination method by comparing the peak value polarity of the fault current in the event of a fault, and a communication-based protection coordination method using this method.

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

1. Introduction

수지상 배전계통(Radial distribution system)은 선로의 연중 최대부하(Peak load)를 공급하기 위해 설계되는데, 최대부하가 걸리는 시간은 비교적 짧기 때문에 설비 이용률이 매우 낮다. 이러한 설비 이용률 저하 문제는 최근 급증하고 있는 분산전원(태양광, 풍력발전 등)과 전기차 충전 설비 등으로 인해 가속화될 것으로 예상된다. 또한 배전선로에 고장이 발생할 경우 고장선로를 분리하고 정상구간(고장구간의 말단측 선로)에 전력을 공급하기까지 약 3~5분 정도의 정전이 발생하고 있다.

이러한 수지상 배전계통의 단점을 해결하기 위해 네트워크 배전계통에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 네트워크 배전계통은 기존에 수지상으로 운전하던 다수의 배전선로의 연계점을 상시 상호 연계하는 방식이다. 네트워크 배전계통은 각 선로 간 부하공유(혹은 분산자원 공유)를 통해 설비 이용률을 향상시킬 수 있다. 또한 분산전원으로 인한 전압변동 문제를 해소할 수 있으므로 분산전원 연계용량 향상도 가능하다. 기존에 사용하던 계통과 개발중인 네트워크 배전계통에 대한 비교를 Table 1에 나타내었다.

네트워크 배전계통에서 고장발생시, 고장전류가 연계된 다수의 선로를 통해 고장지점으로 공급되기 때문에 기존 수지상 선로의 보호협조 방식으로는 고장구간을 적절하게 분리할 수 없다[2]. 과거

개발된 2회선 루프계통(Closed-loop system, CLS)에서 고장이 검출되면 고장전류의 방향을 판별한 후 통신을 통해 고장 정보를 공유하고, 고장 구간 판단 및 고장 구간만 분리하게 된다[3]. 이때 고장

TABLE 1
 배전선로 운영방식간 비교

구분	수지상	루프	네트워크
대표도			
신뢰도	보통	중간	최고
구축비	1	1.2 ~ 1.3(이용률 ↓)	1.1
설계-운영 난이도	보통	중간	중간
이용률	보통	중간	낮음
주대상	전 지역	준 도심~도심(지중)	전 지역
통신	불요	필요	필요

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@kepc.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.kepc.co.kr>

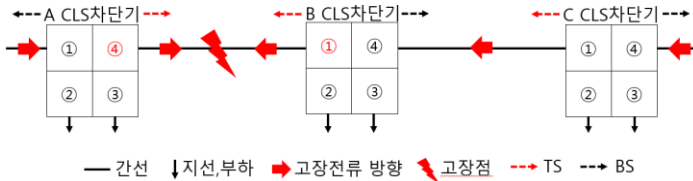


Fig. 1. CLS 통신기반 보호협조 방법

TABLE 2
기존 보호협조 방식의 방향판단 요소 및 방향판단식

구분	단락	지락
기준성분	$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c)$	$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$
작동성분	$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c)$	$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$
정방향 (And 조건)	$ I_1 > I_1 \text{ Threshold}$	$ I_0 > I_0 \text{ Threshold}$
	$ V_1 > V_1 \text{ Threshold}$	$ V_0 > V_0 \text{ Threshold}$
	$\cos[(\angle V_1 - MTA) - \angle I_1] > 0$	$\cos[(\angle V_0 - MTA) - \angle I_0] > 0$
역방향 (And 조건)	$ I_1 > I_1 \text{ Threshold}$	$ I_0 > I_0 \text{ Threshold}$
	$ V_1 > V_1 \text{ Threshold}$	$ V_0 > V_0 \text{ Threshold}$
	$\cos[(\angle V_1 - MTA) - \angle I_1] < 0$	$\cos[(\angle V_0 - MTA) - \angle I_0] < 0$
방향판단 금지 (Or 조건)	$ I_1 < I_1 \text{ Threshold}$	$ I_0 < I_0 \text{ Threshold}$
	$ V_1 < V_1 \text{ Threshold}$	$ V_0 < V_0 \text{ Threshold}$

구간은 판단하기 위한 가장 중요한 고장전류 방향판단에 실패하게 되면 고장이 픽업되어도 차단기가 오·부동작을 하게 되고 변전소 차단기 개방으로 인한 대규모 정전에 이르게 된다. 따라서 본 논문에서는 차단기 오·부동작의 원인인 방향판별 방법을 개선하여 네트워크 배전계통을 구현하고자 한다.

II. Existing Protection Coordination Method

네트워크 배전계통의 고장구간 차단 방법은 Fig. 1과 같다[4]. 계통 보호를 위한 알고리즘은 크게 3단계로, 고장검출 → 고장전류 방향판단 → 고장구간 판단 및 차단 순이다. 고장 검출 후 고장전류 방향을 판별하여 고장전류가 정방향(차단기로부터 나가는 방향)이면, 해당 방향에 연계된 차단기에 통신을 통해 트립 신호를 보내어 고장구간만 분리하게 된다. Fig. 1과 같이 각 CLS차단기에서 설정값 이상의 전류가 상(A, B, C) 또는 중성선(N)에서 발생되면 고장이 검출(픽업)되고, 검출 시점의 조류 방향을 판단한다. 그리고 고장조류가 정방향이면 해당방향의 연계 차단기로 트립 신호(Trip signal)를 송신을 송신한다. 역방향이면 해당방향의 연계 차단기로 개방억제 신호(Block signal)을 송신한다. 통신 후 자단이 정방향이면 수신한 데이터도 정방향이면 해당 구간이 고장이므로 개방하게 된다.

이러한 기존 고장조류 방향판단방법은 Table 2와 같다. 정방향 판단범위의 정밀도를 상승시키기 위해, ϕ 와 MTA(Maximum torque angle)를 활용한다. 여기서, ϕ 는 전압에 대한 전류의 위상($\angle V - \angle I$)이며, 동작영역과 부동작 영역 사이의 경계부분을 정의하는 것으로 대체로 2~8°의 값으로 설정한다. MTA는 Fig. 2와 같이 기존 연구에 의해 국내계통에서는 60°의 값으로 설정한다. 계통에서는 Fig. 3과 같이 선로 및 부하의 임피던스에 의해 일반적으로 전류의 위상이

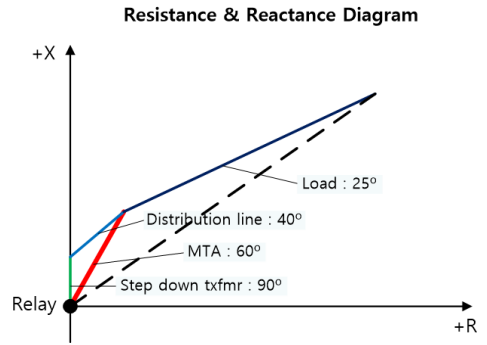


Fig. 2. 한전 MTA

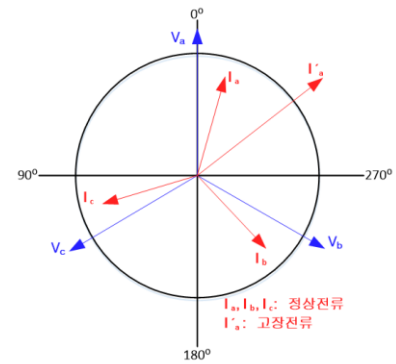


Fig. 3. 3상 벡터도

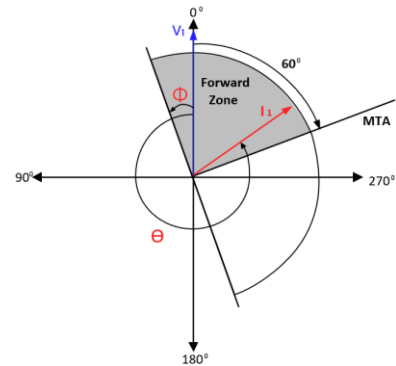


Fig. 4. 단락 고장 방향판정

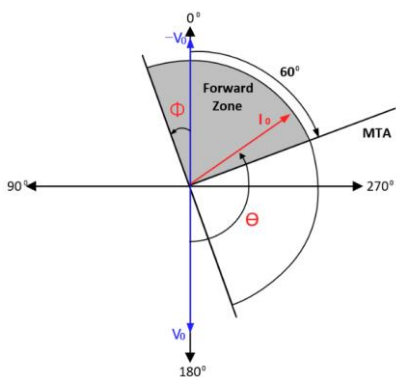


Fig.5. 지락 고장 방향판정

전압에 대해 뒤지게 된다. 기존 보호협조 알고리즘의 경우, 계통에 고장이 발생하여 일정값 이상의 전류(단락 : 정상분, 지락 : 영상분)

가 검출되면 고장여부의 확실한 판단을 위해 고장전압(단락 : 정상분, 지락 : 영상분)이 기준치(상전압의 10%) 이상인지 판별한다. 그 후 Fig. 4 및 5와 같이 '계산된 고장전류의 위상'이 설정된 범위에 포함되면 정방향으로 판별한다.

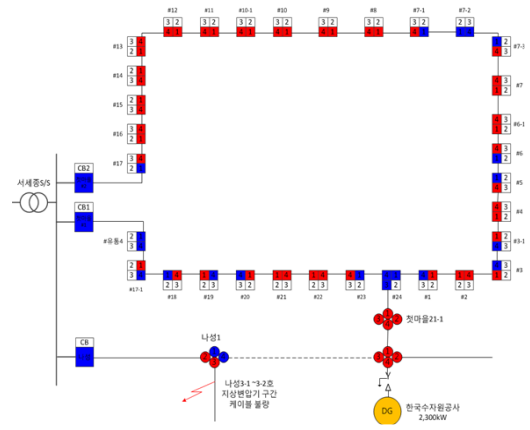
위 방법은 두 가지 문제점이 있다. 첫째, 고장 저항의 크기가 매우 작아 완전 지락 및 단락이 발생할 경우 방향성 판정이 불가능해 고장범위 넓어진다. 3상 지락 및 3상 단락 시 고장저항의 크기가 작을 경우(고장전류가 매우 큰 경우) 판별 기준이 되는 영상전압 및 정상전압이 '0V'에 가깝게 수렴하기 때문에 설정 기준치를 넘지 못한다. 이 경우 3사이클 전에 측정한 과거전압(Memory voltage)의 위상을 이용하여 방향성을 판단한다. 그러나 과거전압 위상은 고장상태의 값이 아니라 이전 정상상태의 값이므로, 영상전류의 위상으로 도출된 계산 값이 방향판단 경계선에 겹치는 경우 오동작이 발생한다. 둘째, 계통에 분산전원 연계용 변압기가 많으면 기준 방향성 판별 알고리즘은 실패하게 된다. 고장발생시 고장전류가 분산형전원 연계용 변압기(Yg-Δ 결선)의 고압측으로 일부 나뉘어 흐르기 때문에, 영상전류는 픽업되지만 영상전압이 판단 기준치를 넘지 못해 방향판단에 실패하게 된다. 따라서 위 문제들을 해결하여 네트워크 배전계통에 분산전원을 접속할 수 있도록 새로운 방향성 판별 방법과 고장구간 분리방법이 필요하다.

세종지사에 발생했던 타선로 고장에 의한 CLS 선로 오동작 사례를 Fig. 6에 나타내었다. 고장발생 시 영상전류는 주변압기와 계통의 분산전원 연계용 변압기에서 공급된다. 즉, Fig. 6의 사례를 보면 CLS에 분산전원이 연계되어 있을 때 동일 주변압기의 타선로(수지상 선로)에서 고장이 발생하면 영상전류는 bus 2~9, bus 11~8~9, bus 11~8~7~6~5~4~3~9의 3가지 경로로 흐른다. 즉, 영상전류가 3가지 경로로 공급되기 때문에 각 차단기에서 측해지는 영상전류는 비교적 작아지고 감소한 영상전류로 인해 영상전압 역시 기대값 이하로 작아지게 된다. 따라서 영상전류는 픽업되었지만 영상전압이 작아서 고장전류 방향 판별에 실패하게 되고, 최종적으로 차단기가 오동작 했다. 고장조류 방향성 판별에 실패하게 되면 기준 CLS차단기는 지정 시간을 대기한 후 고장이 해소되지 않으면 무조건 개방하기 때문에 Fig. 6 (a)와 같이 동시 다발적인 차단기 개방으로 광역 정전이 발생했다.

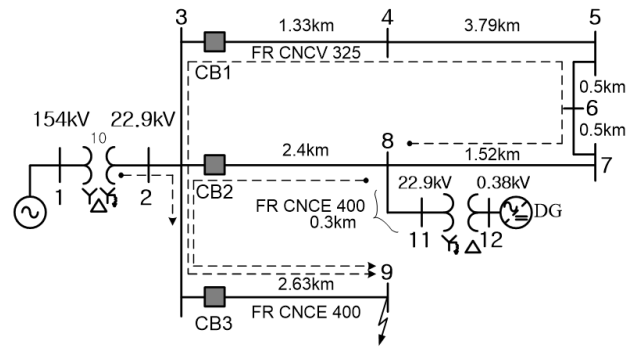
III. PROPOSED PROTECTION COORDINATION

네트워크 배전계통에서 고장처리 시 고장방향 판별 오류로 인해 발생하는 보호기기 오동작을 방지하기 위하여 다음 조건을 활용하고자 한다. 첫째, 수지상 계통과 달리 네트워크 배전계통에 고장이 발생하면 고장점의 모든 방향에서 고장조류가 공급된다. 둘째, 고장점 기준 마주보는 두 보호기기에서 측해지는 고장전류의 반주기 피크치의 극성은 서로 동일하다. 셋째, 제어단말장치(과거 FRTU, 현재 IED)는 고장 픽업 전후 10 사이클 데이터를 기록한다. 이를 활용하면, 기존 방법인 '전압 대비 전류의 위상차'를 이용하지 않아 오동작이 발생하지 않고, 기준에 분산전원 연계가 금지되어 있던 CLS에 분산전원이 도입이 가능하다.

네트워크 배전계통에서 고장이 발생할 경우, 각 차단기별로 검출된 픽업 후 고장전류의 첫 사이클을 Fig. 7에 나타내었다. 지중선로에 사용되는 CLS차단기(4회로 차단기)에는 각 회로별로 CT가 설치되어 있으며, 차단기 내부에서 외부로 나가는 전류의 방향을 정방향(Forward current)으로 지정한다. 즉, 5번 차단기 및 6번 차단기 사이에 고장 발생 시 고장조류와 무관하게 고장점 양단에서 측해지는 고장전류 첫 피크치 극성은 같고, 타 구간에서는 극성이 반대가 된



(a) 계통도



(b) 단선도

Fig. 6. 분산전원이 연계된 세종지사 CLS의 고장모의.

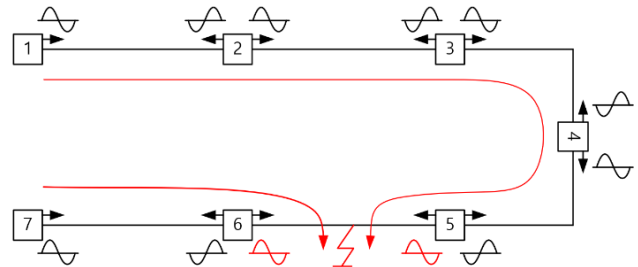


Fig. 7. 상시 다중연계 배전선로에서의 지락고장 시 동시시간대의 고장전류 파형.

다. 이러한 원리를 이용하여 기존 통신기반 보호협조에 전송 데이터를 변경하면, 고장구간을 정확하게 판단할 수 있다. 기존 수지상 선로에서는 각 차단기가 고장전류의 방향을 공유하지 않았지만, CLS 및 네트워크 배전계통에서는 각 차단기가 통신을 활용하여 고장 픽업 시 전류방향을 공유할 수 있게 된다. 제안 방법에서는 기존 방향성 판별 알고리즘과는 달리, 전압의 크기 기준으로 판단하는 것이 아니라 고장여부의 확실한 판단(무전압 및 저전압 계측)에만 사용하고 전류 데이터로만 방향성 판별을 하기 때문에, 앞서 언급한 두 문제를 해결할 수 있다.

IV. PERFORMANCE EVALUATION

제안 방법을 적용한 알고리즘은 Fig. 8과 같다. 상 전류(R,S,T) 및 중성선 전류(N) 계측을 통해 고장이 검출되면, 고장의 확실한

판별을 위해 상전압(A,B,C,N) 상태를 판단한다. 이때 고저항 고장의 경우 별도의 기술로 해결이 가능하며, 본 논문에서는 완전 고장 및 타선로 고장에 의한 오동작을 해결하는 것이 주 목적이다. 고장상태로 판별되면 주변 연계 차단기와의 통신을 통해 동일 시간대의 고장 전류 파고치의 극성을 비교한다. 이때 비교되는 값의 기준은 통신 직전 반주기의 파고치 극성으로 하며, Table 3과 같이 차단기간 연계 방향 별로 정보를 송수신한다. 극성 비교 시 부호가 반대(타 구간 고장으로 판단 시)라면 데이터를 초기화하고 상시계측 상태로 복귀한다. 고장전류 첫 파고치에서 정상적으로 픽업하지 못하더라도, 동일시간 대 다음 반주기에서 수행하면 결과는 동일하다. 책임 구간의 고장으로 판단되면 책무를 가진 차단기만 개방을 하며, 가공 및 혼재선로의 경우 필요시 설정된 재폐로를 수행한다.

제안 방법의 검증을 위해 알고리즘을 구현하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 대상 계통은 Fig. 9와 같이 2개 배전선로 말단을 연계한 루프계통이다. CLS와 달리 3회선 이상을 연계하는 네트워크 배전계통의 경우 연계점에 따라 차단기가 3개 혹은 4개가 동작 해

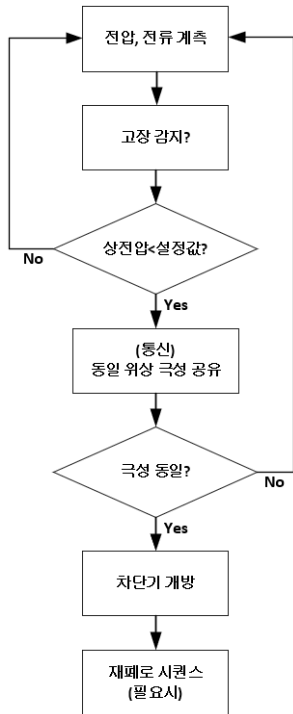


Fig. 8. 고장시 고장구간 판별 알고리즘.

야하는 경우가 발생한다. 이 경우에도 마찬가지로 연계 차단기들에 Table 3의 방식으로 데이터를 공유하면 원활히 해결이 가능하다. A 차단기 및 B차단기의 동일 책임 구간에서 고장(지락 및 단락)이 발생했을 때, 고장점 방향의 CT에서 계측된 전류파형은 Fig. 10과 같다. 동일 상(픽업 상) 기준으로 봤을 때, 고장점 방향의 양측 CT에서 계측된 고장전류 첫 주기 파고치의 극성이 동일했다. 고장발생 후 제어단말기(과거: Feeder remote terminal unit, 현재: Intelligent electronic device)에서는 전류의 실효값이 정해진 기준을 넘으면, 무·저전압을 확인 후 픽업신호(고장 검출 신호)를 발생시킨다. 픽업 신호는 일반적으로 고장 전류 반 사이클 이내에 발생하며, 통신에 의한 지연시간은 2ms미만이다. 계측된 극성과 통신으로 수신된 극성이 같다면 차단기에 개방신호를 전달하고, 극성이 다르면 보호협조 알고리즘을 초기화한다. 이때 각 차단기에서 계측된 고장전류의 크기가 서로 다른 이유는 전원으로부터 고장점에 이르는 두 선로의 임피던스가 다르기 때문이다. 제안된 방법을 활용한 보호협조 시 고장점 양단의 차단기만 정상적으로 개방하였으며, 영상전압 및 정상전압이 0V에 가깝게 강하가 발생하는 3선지락 및 3선단락 그리고 고 타선로 고장에서도 원활히 동작하였다. 시뮬레이션에서는 고장 발생 후 차단까지 총 3 cycle(50 ms) 소요되었다.

국내 배전선로에서 발생했던 B상 1선 지락 고장의 현장 단말 이력을 Fig. 11에 나타내었다. 고장 상전류 및 중성선에 의한 픽업 신호가 첫 반주기에 발생하였으며, 픽업신호는 고장전류 파형의 영점(Zero crossing)에서 5 ms(픽업 설정값에서 2~3 ms) 후에 발생했음을 알 수 있다. 아크에 의해 전류파형에 영점지연(Shoulder)이 생기거나 계측장비의 오류로 첫 주기에 픽업되지 못하더라도, 다음 사이클에서 동일 알고리즘이 진행되면 된다.

TABLE 3
제안 보호협조 방식의 방향판단 요소 및 판단식 예시

구 분	단락고장	지락고장
기준성분	$ I_A , I_B , I_C > I_{Threshold}$	$ I_N > I_{Threshold}$
작동성분	$ V_A , V_B , V_C < V_{Threshold}$	$ V_N < V_{Threshold}$
방향판단	$I_A, I_B, I_C, I_N > 0$ 이면, 차단 '1' 저장 및 연계차단기에 '1' 전송, $I_A, I_B, I_C, I_N < 0$ 이면, 차단 '-1' 저장 및 연계차단기에 '-1' 전송	
고장구간 판단	계산정보 + 수신정보 = 0이 아닌 수(연계구간 고장→개방) 계산정보 + 수신정보 = 0 (타 구간 고장→개방 억제)	

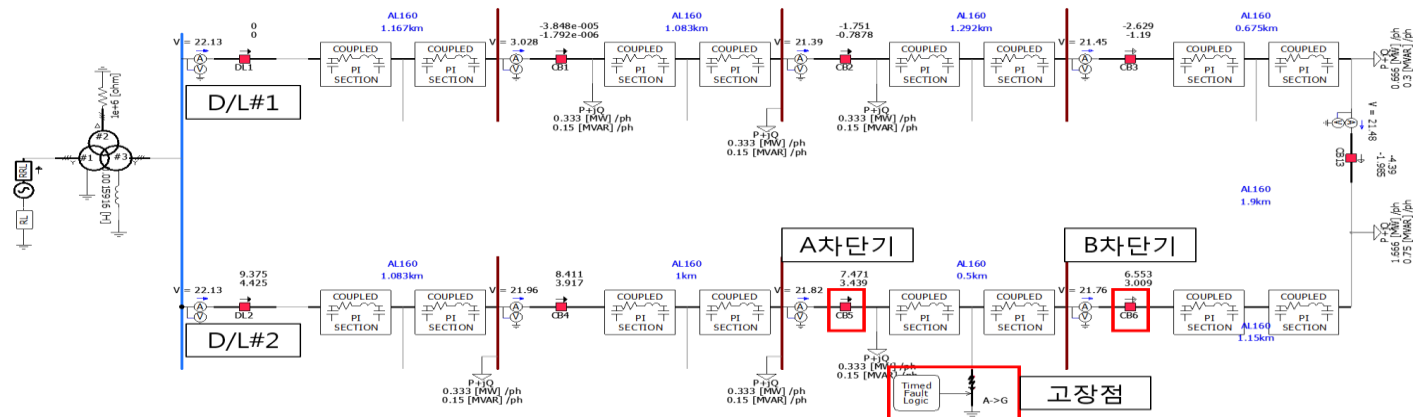


Fig. 9. 시뮬레이션 계통도 및 고장지점.

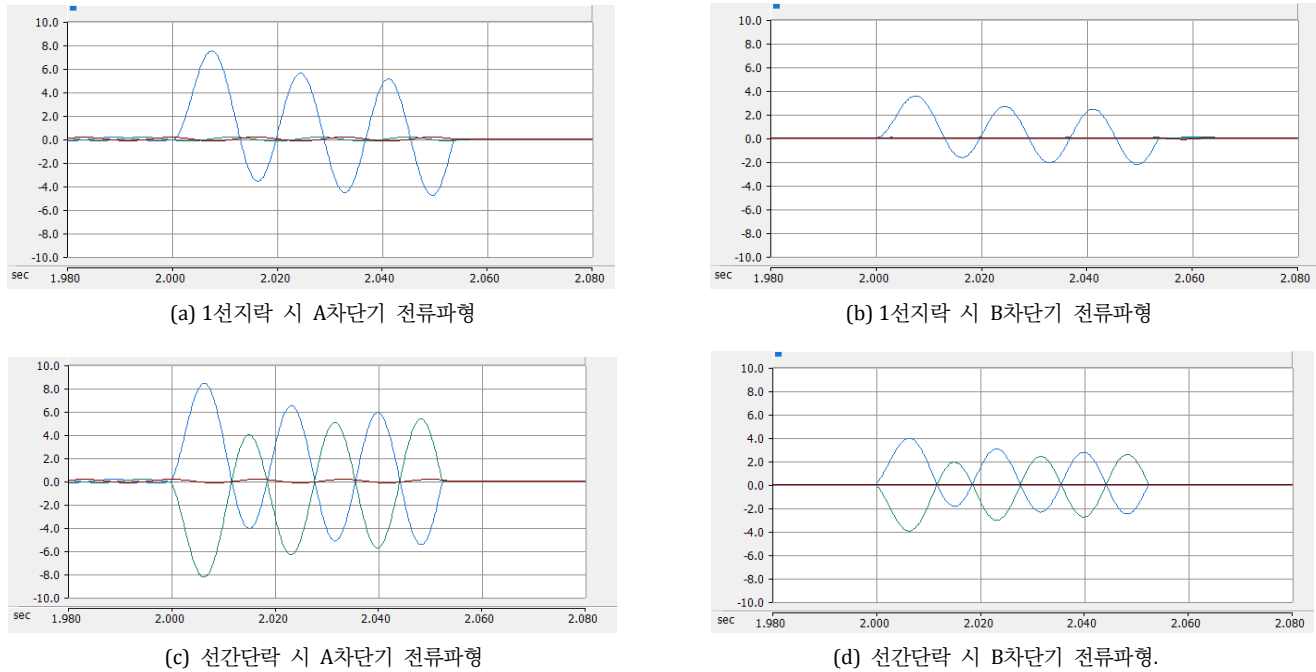


Fig. 10. 고장 발생 시 양측 차단기의 전류 파형 및 차단시간[Y scale : kA, X scale : ms].

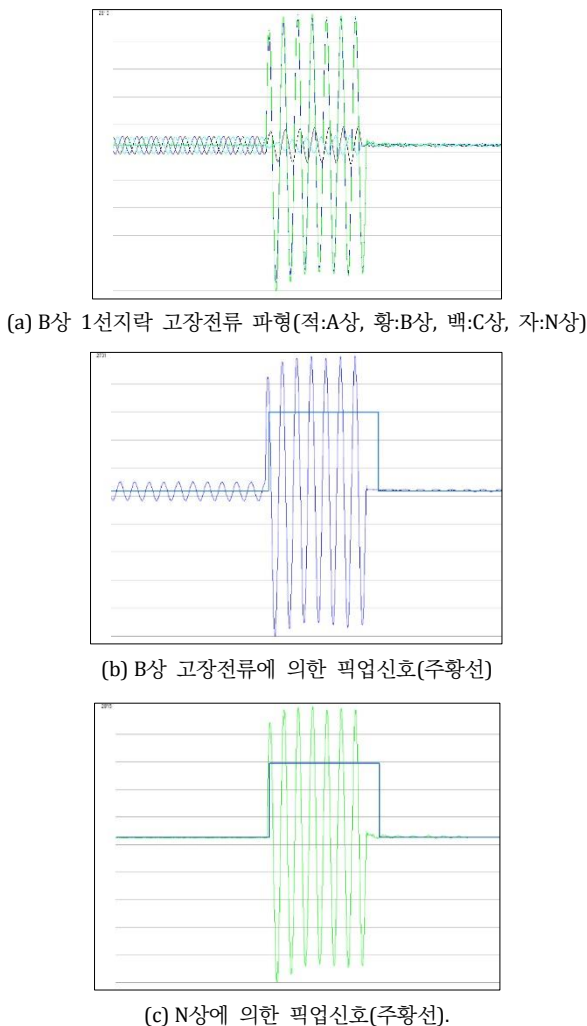


Fig. 11. 1선 지락 시 제어단말장치에서 계측된 고장파형 및 픽업신호.

V. CONCLUSION

네트워크 배전시스템의 성공적인 도입을 위해, 기존의 통신기반 보호협조 알고리즘 중 방향성 판별 방법을 개선하였다. 제안된 방법은 기존 방향성 판별과 달리 전압 대비 전류의 위상 차를 이용하지 않으므로, 전압이 극히 미소하게 검출(부싱 열화에 의한 계측 오류, 3선 지락 고장 및 3선 단락 고장, 타선로 지락 고장 등)이 되거나 검출되지 않아도 무관하다.

가공선로에 사용되는 차단기(리클로저)의 경우, CT가 일반적으로 전원측(변전소 방향)에만 설치되어 있으므로 지중선로의 차단기와 동일하게 차단기 내부로부터 나가는 방향을 정방향으로 기준을 잡고 부하측으로 데이터 통신 시 도출된 극성의 반전이 필요하다. 이를 통해 혼재선로로 구성된 네트워크 배전시스템에서도 고장전류 방향 판별 및 고장구간 분리가 가능하게 된다. 지중선로에 사용되는 차단기의 경우 1개의 제어단말장치가 3~4개의 차단기를 관장하기 때문에 차단기 내부고장도 판별이 가능하다.

본 논문에서 제안한 방법은 기존 전력설비의 기기 교체 혹은 별도 성능개선 없이 기술 구현 가능하고, 기존 기술들에 비해 구현 및 활용에 대한 제약이 없으며, CLS용 보호협조 알고리즘 대비 판별 단계를 대폭 삭제 및 축소하여 오(부)동작 요소를 제거하였다. 이를 통해 상시 다중연계 배전선로(CLS, 네트워크 배전시스템)에 분산전원을 원활히 연계 가능하며, 특히 고장 처리가 가능해진다.

ACKNOWLEDGEMENT

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

References

[1] G.H. Lee, "Development and operation of an uninterruptible power supply system (Closed-Loop System)", Journal of Electrical World

- Monthly Magazine, pp. 19-23, 2015
- [2] S.W. Yun, J.S. Jung and N.H. Cho, "Analysis of overhead high voltage distribution system with closed-loop configuration during fault", The 49th KIEE Summer Conference, Pyeongchang, Gangwon, Korea, July 2018.
- [3] KEPCO distribution planning group, "Power distribution protection statement", 2017.
- [4] S.S. Choi, J.B. Park, B.N. HA, N.H. Cho and D.S. Rho, "Operation methods of protection coordination in underground distribution system", The 47th KIEE Summer Conference, Pyeongchang, Gangwon, Korea, July 2016.