



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 2월
석사학위 논문

DCU를 이용한 고저항 1선 지락사고의 고장 구간 추정 기법에 대한 연구

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

임 청 학

DCU를 이용한 고저항 1선 지락사고의 고장 구간 추정 기법에 대한 연구

A Study on Fault Location Estimation Method for High
Impedance Single Line to Ground Fault using DCU

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

임 청 학

DCU를 이용한 고저항 1선 지락사고의 고장 구간 추정 기법에 대한 연구

지도교수 황 평익

이 논문을 전기공학 석사학위신청 논문으로 제출함




2020년 10월

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

임 청 학

임청학의 석사학위논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	高必周 
위원	조선대학교	교수	金容載 
위원	조선대학교	교수	黃平益 

2020년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	xii
I. 서 론	1
A. 연구배경 및 연구내용	1
B. 논문의 구성	4
II. 이론적 배경	5
A. 선로 사고 형태 및 저항 특성	5
B. 고장 처리 프로세스	7
C. 고장 구간 추정 기법	9
1. Travelling Wave-based Method	10
2. Impedance-based Method	12
3. Fault Indicator-based Method	14
4. Smart Meter-based Method	16
5. 대표적인 고장 구간 추정 기법 비교	18
D. DCU(Data Concentrator Unit) 기능	19

III. DCU을 이용한 고장 구간 추정 기법	20
A. 제안 기법의 가정	20
B. 제안 기법의 기본 원리	22
C. 제안 기법을 이용한 추정 프로세스	29
IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰	31
A. 시뮬레이션 모델 및 모의 조건	31
B. 시뮬레이션 결과	33
1. 기존 기법 결과 및 제안 기법의 결과 비교	33
2. 제안하는 기법의 정밀도 결과	36
V. 결론	37
참 고 문 헌	39

표 목차

Table 1. ADMS의 응용 프로그램 순위(Top 10)

Table 2. Fault indicator 동작 조건

Table 3. 자동화 개폐기 설치 규정

Table 4. 고장 구간 추정 기법 비교

Table 5. 고장 전/후 선로 전류 비교

그림 목차

- Fig. 1 ADMS의 응용 프로그램
- Fig. 2 회로적인 연결 형태에 따른 사고 분류
- Fig. 3 고장 처리 프로세스
- Fig. 4 고장 구간 추정 기법의 분류
- Fig. 5 Travelling Wave 기반의 기법
- Fig. 6 Impedance 기반의 기법
- Fig. 7 Fault Indicator 기반의 기법
- Fig. 8 Smart Meter 기반의 기법
- Fig. 9 DCU 주요 기능
- Fig. 10 정전 발생 시 DCU 데이터를 이용한 전/후의 RMS Voltage 계산
- Fig. 11 1선 지락사고 발생 시 RMS 전압 프로파일
- Fig. 12 고장 전/후의 선로 전류 변화 특성
- Fig. 13 고장 후 고장 구간 전/후의 선로 전류 변화 특성
- Fig. 14 Node 3~4 사이의 선로에서 고장 발생 시 고장 영역 분리
- Fig. 15 제안 기법 고장 구간 추정 과정
- Fig. 16 제안 기법 추정 프로세스
- Fig. 17 IEEE 123 Node Test Feeder 모의 계통
- Fig. 18 부하 모델에 대한 PV 곡선
- Fig. 19 Node 52~53 사이의 선로에 고저항 고장에 대한 기존 기법 적용 결과

Fig. 20 Node 52~53 사이의 선로에 고저항 고장에 대한 제안 기법 적용 결과

Fig. 21 고장 발생 시 계통 모델의 최저 전압 분포도

ABSTRACT

A Study on Fault Location Estimation Method for High Impedance Single Line to Ground Fault using DCU

Name : Cheong-hak Leem

Advisor : Pyeong-ik Hwang

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

The distribution system has a direct relationship with the customers. Therefore, the stability and reliability of the customer's power supply mainly depend on the operation of the distribution system. However, since the distribution system is easily exposed to the surrounding environment, fault handling is an important task for stable operation. Recently, as distributed power is connected to the distribution system, the system environment has changed, and ADMS was introduced to respond to this. The distribution system operator can operate the system efficiently by using the provided application program. There are outage management and FDIR(Fault Detection, Isolation, and Recovery) related to fault handling. Among them, the importance of FDIR increases as the installation of remote control facilities increases recently. In order to improve the FDIR function, the accuracy of the fault section estimation technique should be improved. In this paper, new method to estimate the fault location is proposed, especially for the high-impedance single line to ground fault. First, conventional methods, such as travelling wave, impedance, fault indicator, and smart meter based methods, are reviewed. Then, the characteristics of the high-impedance fault is analyzed. Based on the analysis, new concept to estimate the fault location by using the variation of the line current before and after the fault is described. Because it is impossible to monitor

all line current in actual distribution systems, a method to approximate the variation of the line current by using the voltage data from data concentrate units (DCUs) is presented. Finally, the estimation method for fault location using the DCU data is proposed. It is verified that the fault location can be estimated accurately using the proposed method from various case studies.

I. 서 론

A. 연구배경 및 연구 내용

전력계통은 송전·변전·배전으로 구성되며, 배전계통은 2차 변전소에서 최종 전기를 사용하는 수용가까지의 영역이다. 배전계통은 수용가와 직접적으로 연결되어 있으므로 수용가의 안정적인 전력 공급에 밀접한 관련이 있다. 하지만 배전계통은 수용가 근방에 설치되기에 다양한 고장 위험에 노출되어 있다. 선로 사고가 발생하면 막대한 경제적 피해와 인명 피해가 발생할 수 있으므로 배전계통의 안정적인 운영을 위해 신속한 고장 처리가 중요한 업무이다[1-2].

한편 최근 배전계통에 분산전원이 연계됨에 따라 계통 환경이 변화되고 있다. 이는 역조류에 의한 전압 문제, 고장 발생 시 보호 협조 문제, 전력 품질 저하 등의 문제를 야기할 수 있다[3-4]. 이러한 변화에 대응하고자 차세대 배전 운영 시스템(ADMS, Advanced Distribution Management System)이 도입되고 있으며, ADMS는 그림 1과 같이 배전계통 운영자를 위한 다양한 응용프로그램들을 제공하여 계통을 안정적이고 효율적으로 운영할 수 있는 시스템이다[5-6].

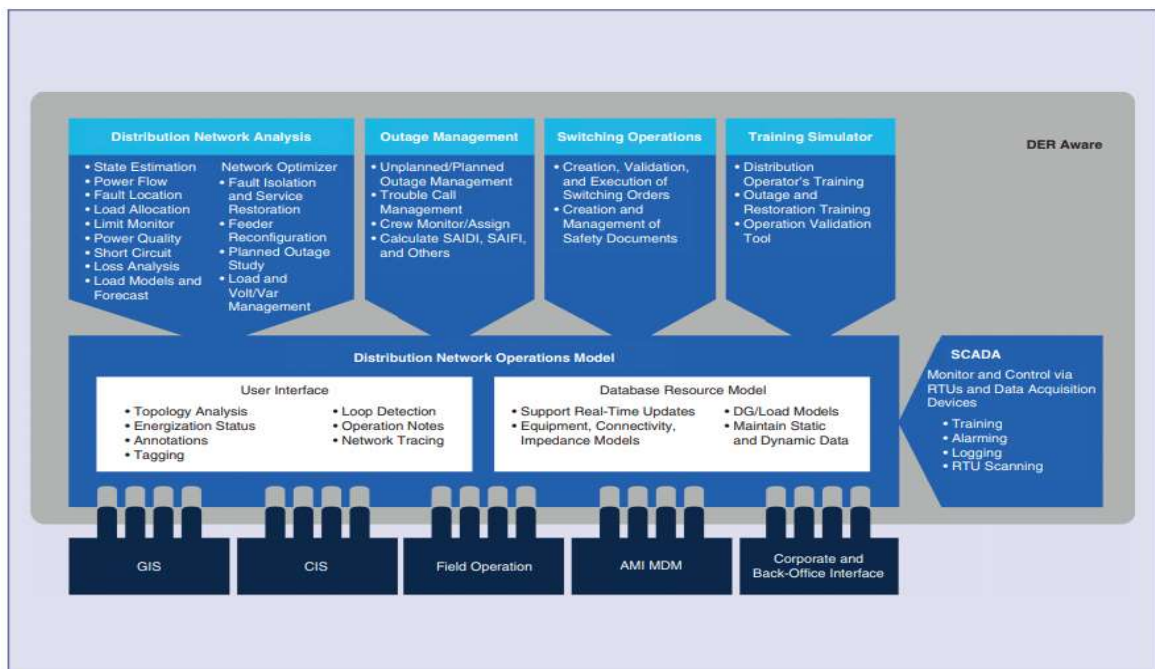


Fig. 1 ADMS의 응용 프로그램

배전계통 운영자들이 선정한 주요 응용프로그램의 순위는 표 1과 같다. Outage management와 고장 처리 프로세스(FDIR, Fault Detection, Isolation, and Recovery)와 같이 고장 처리와 관련된 응용프로그램의 순위가 높음을 확인할 수 있다. 이 중 FDIR은 원격제어가 가능하며 자동화 개폐기를 이용한 고장 처리 프로세스로, 최근 자동화 개폐기가 배전계통에 지속적으로 설치됨에 따라 그 중요도가 증가하고 있다.[7].

Table 1. ADMS의 응용 프로그램 순위(Top 10)

Application Rank	ADMS Application
1	Outage Management
2	Fault Detection, Isolation, and Recovery(FDIR)
3	Volt-VAR Optimization
4	Electronic mapping
5	On-line Power Flow
6	Switching orders
7	Permits/Tagging
8	DER management
9	Intelligent alarming
10	Optimal Network Reconfiguration

배전 선로 사고가 발생하면 보호기기 동작하여 차단기 하위 구간에 정전이 발생하게 된다. FDIR은 차단기 동작 후, 고장 구간을 계통과 분리하고 건전 구간을 복전하기 위한 일련의 절차로 고장 구간 추정(FD, Fault Detection), 고장 구간 분리(FI, Fault Isolation), 건전 구간 복전(FR, Fault Recovery)으로 구성된다[8]. FDIR 기능 향상을 위해서는 고장 구간을 추정하는 고장 구간 추정 기법의 정확도를 높일 필요가 있다. 대표적인 고장 구간 추정 기법으로는 travelling wave, impedance, 고장 표시기(Fault Indicator), smart meter 기반의 기법이 있다.

본 논문에서는 기존 기법 중 고장 구간 추정 정밀도가 가장 높은 smart meter 기반의 기법에 대한 성능을 검토하였다[9-17]. 배전계통의 고장은 고장 임피던스에 따라 고저항 고장(HIF, Hight Impedance Fault)과 저저항 고장(LIF, Low Impedance Fault)로 구분될 수 있다[18]. 검토한 결과, smart meter 기반 기법

은 저저항 1선 지락사고에 대해 고장 구간 추정 정밀도가 높은 반면에 고저항 1선 지락사고에 대해서는 고장 구간 추정 정밀도가 낮을 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 문제를 해결하고자, 본 논문에서는 최근 활발히 보급되고 있는 대표적인 원격 감시 설비인 데이터 집중 장치(DCU, Data Concentrator Unit)를 이용한 새로운 고장 구간 추정 기법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 기법은 배전계통 사고의 70% 이상을 차지하는 1선 지락사고에 대한 고장 구간 추정 기법이다[19]. 제안한 기법에서는 1선 지락사고가 발생하였을 때 고장 구간 전/후 선로들의 전류 변화가 다르다는 특성을 이용한다. 즉, 고장 구간 전단에서는 고장 전류로 인하여 선로 전류가 증가하는 반면, 고장 구간 후단에서는 선로 전류가 감소한다는 특징을 이용한다. 따라서 고장 발생 전/후의 선로 전류를 비교할 수 있으면, 고장 구간을 정확하게 추정할 수 있다. 하지만, 실제 배전계통에서 모든 선로의 전류를 계측하는 것은 불가능하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 한국전력공사에서 사용되는 DCU의 계측 정보를 이용한다. DCU에서는 주상 변압기 2차측의 전압을 계측하고 상위 시스템으로 전송한다[20]. 따라서 이를 이용하면 고장 전/후의 고압측 전압을 추정할 수 있다. 본 논문에서는 이 전압 정보를 이용하여 개별 선로의 전류 변화비를 근사적으로 계산할 수 있는 전압 강하 변동비를 제안한다. 마지막으로 제안한 방안을 이용하여 고장 구간을 탐색하는 기법을 제시한다.

B. 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다.

1장에서는 본 논문의 연구 배경과 연구 내용에 관해 기술하였다.

2장에서는 배전 선로 사고의 회로적인 연결 형태에 따라 사고 유형을 구분하고, 이 중 1선 지락사고에서 고장 임피던스 크기에 따라 나타나는 특성을 분석하였다. 또한 고장 처리 프로세서(FDIR)의 절차에 대해 기술하였으며 대표적인 기법들을 검토하고 비교하였다. 마지막으로 본 논문에서 사용되는 DCU의 주요 기능에 관해 기술하였다.

3장에서는 고장 발생 전/후 고장 구간 전/후단에 대한 선로 전류 변화를 분석하였다. 이를 바탕으로 선로 전류 변화비를 이용하면 고장 구간을 추정할 수 있음을 보였다. 또한, DCU에서 계측된 전압을 이용하면 선로 전류 변화비를 근사할 수 있는 방안을 제시하였다. 이를 이용한 고저항 1선 지락사고에 대해 고장 구간을 추정하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 또한, 제안 기법을 적용하기 위해 기본 가정들에 관해 기술하였다.

4장에서는 IEEE 123 Node Test Feeder를 이용한 모의 결과를 정리하였으며, 이를 기반으로 제안한 기법을 적용시켰을 시 고장 구간의 사용으로 추정할 수 있음을 검증하였다.

5장에서는 본 논문의 결론과 향후 연구 계획에 관해 기술하였다.

II. 이론적 배경

A. 선로 사고 형태 및 저항 특성

배전계통은 주변 환경에 쉽게 노출되어 있는 상태로 자연재해, 수목 접촉 및 교통사고 등 다양한 원인으로 고장이 발생할 수 있다. 배전 선로 사고는 그림 2와 같이 회로적인 연결 상태에 따라 1선 지락사고, 선간 단락사고, 선간 지락사고, 3상 단락사고, 3상 지락사고로 구분할 수 있다[21-23]. 이러한 선로 사고 중 배전계통에서 가장 빈번히 발생하는 사고는 수목 접촉 등으로 인한 1선 지락사고이며 전체 배전 선로 사고의 70~80%를 차지한다.

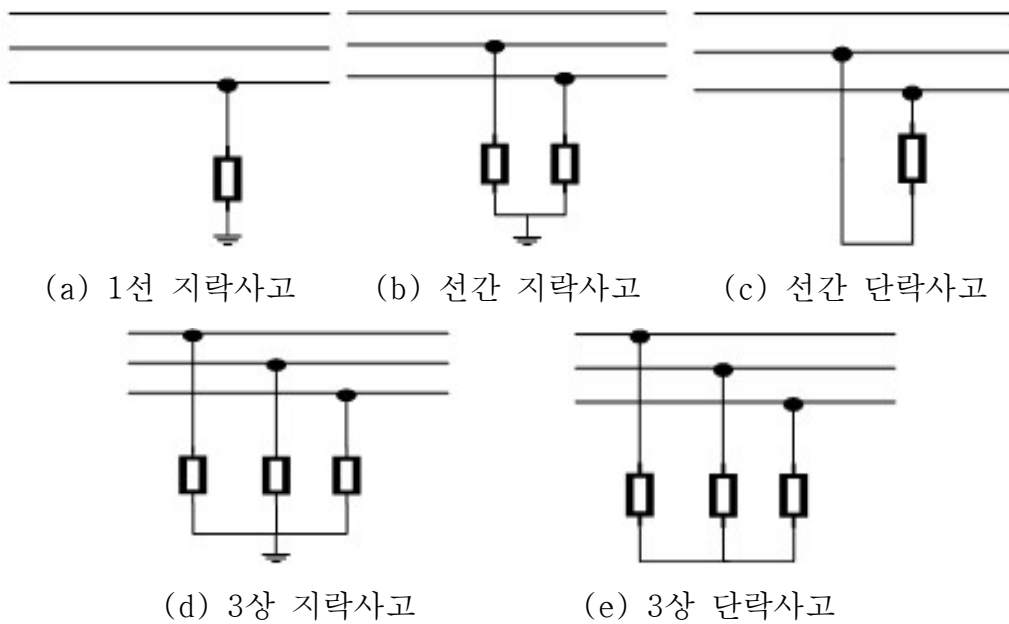


Fig. 2 회로적인 연결 형태에 따른 사고 분류

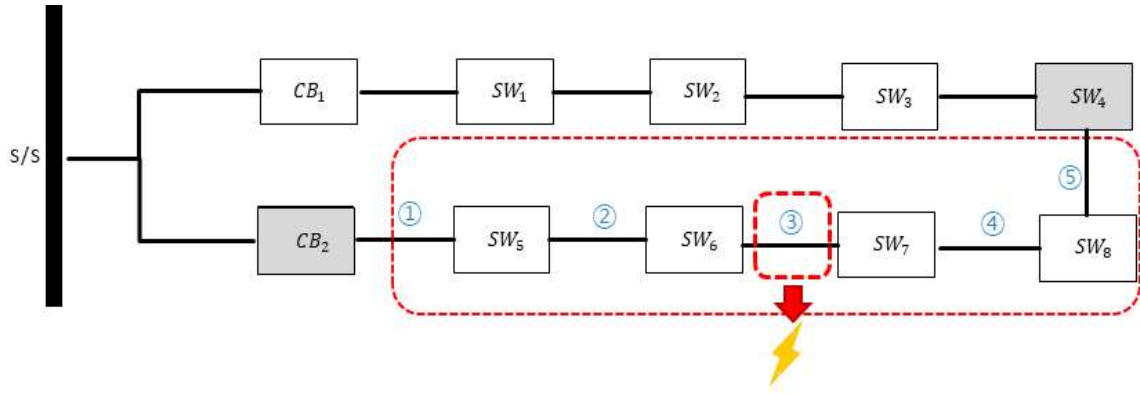
따라서 본 논문에서는 그림 2-(a)의 1선 지락사고에 대한 연구를 수행하였다. 1선 지락사고는 접지된 고장 임피던스 크기에 따라 저항 저고장과 고저항 고장으로 분류한다. 저저항 고장은 일반적인 선로 사고이며, 수목 접촉 등으로 인해 발생하는 사고이다. 접지 저항이 0.01~5[ohm]이며, 작은 고장 저항 값으로 인해 고장 구간 전단까지 큰 고장 전류가 흐르게 된다. 이로 인해 고장 구간 전단에서는 큰 고장 전류의 영향으로 전압 강하가 크게 발생하게 되고 고장 구간 후단에서는 전압이 크게 떨어져 부하 전류가 감소하기 때문에 전압 강하가 거의 발생하지 않는다. 이러한 특징으로 인해 고장 구간을 비교적 정밀한 추정할 수 있다. 한편, 고저항 고장은 특이한 선로 사고이며, 접지되는 장소가 아스팔트, 콘크리트, 잔디, 모래 등으로 높은 저항 값을 가지는 사고이다. 접지 저항이 1~800[ohm]이며, 높은 저항으로 인해 고장 전류가 적게 흘러 고장 구간 전단에서는 전압 강하가 작게 발생하게 된다. 이로 인해 고장 구간 후단에서는 전압이 일정한 값 이상으로 유지되며, 부하 전류는 저저항 고장에 비해 크게 감소하지 않아 부하 전류에 의한 전압 강하가 발생한다. 이러한 특징으로 인해 기존 기법을 사용하는 경우에는 고장 구간 추정 정밀도가 떨어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 고저항 1선 지락사고에 대해 정확하게 고장 구간을 추정할 수 있는 기법을 연구하였다.

B. 고장 처리 프로세스

배전계통에서 고장이 발생하면, 보호 기기가 동작하여 선로의 전력을 차단하게 된다. 고장 처리 프로세스인 FDIR은 차단기가 동작한 후에 수행된다. 이는 원격 제어가 가능한 자동화 개폐기를 이용하여 고장 구간을 계통과 분리하고 건전 구간을 복전하기 위한 일련의 절차로 고장 구간 추정(FD), 고장 구간 분리(FI), 건전 구간 복전(FR)까지 3단계로 나누어진다.

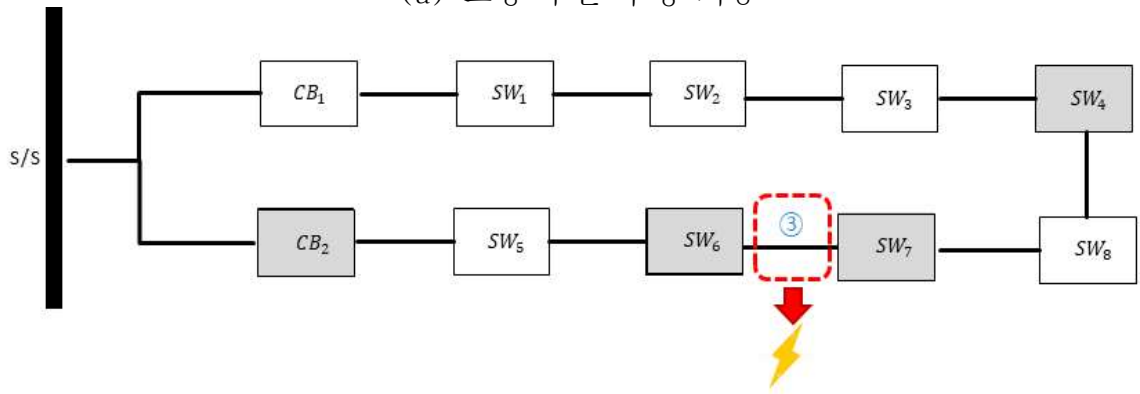
그림 3-(a)는 고장 구간 추정 기능을 설명하기 위한 그림이다. 예를 들어 고장이 구간 ①~⑤ 중에 발생하게 되면, 상위에 설치된 차단기(CB_2)가 동작하여 차단기(CB_2)의 하위 영역에 정전이 발생하게 된다. 고장 구간 추정은 정전이 발생한 구간 ①~⑤ 중에 고장이 발생했을 확률이 가장 높은 구간을 추정하는 과정이다. 이러한 대표적인 고장 구간 추정 기법으로는 travelling wave, impedance, fault indicator, smart meter 기반의 기법들이 사용될 수 있다. 예를 들어 그림 3-(a)와 같이 이 기법들을 이용하면 고장 구간을 구간 ③으로 추정할 수 있다. 그림 3-(b)는 고장 구간 분리 기능을 설명하기 위한 그림이다. 고장 구간 추정에서 고장 구간을 구간 ③으로 추정하였다면 구간 ③의 양단에 설치된 자동화 개폐기 SW_6 과 SW_7 을 개방하여 고장 구간을 계통으로부터 분리한다. 이와 같은 과정이 고장 구간 분리이다. 그림 3-(c)는 건전 구간 복전 기능을 설명하기 위한 그림이다. 고장 구간 분리 기능이 정상적으로 수행 되었다면 SW_6 과 SW_7 사이의 고장 구간을 제외한 나머지 건전 선로를 다시 계통과 연결하여 복전하기 위해 CB_2 와 SW_4 를 투입시켜 건전 구간을 복전한다. 이와 같은 과정이 건전 구간 복전 기능이다.

FDIR의 성능 향상을 위해서는 첫 단계인 고장 구간 추정 기능에서 정확한 고장 구간을 추정해주어야 한다. 만일 고장 구간 추정의 정밀도가 낮을 경우 고장 구간이 넓게 추정되어 수리 인력이 많이 요구되고, 복전까지 많은 시간이 소모된다.



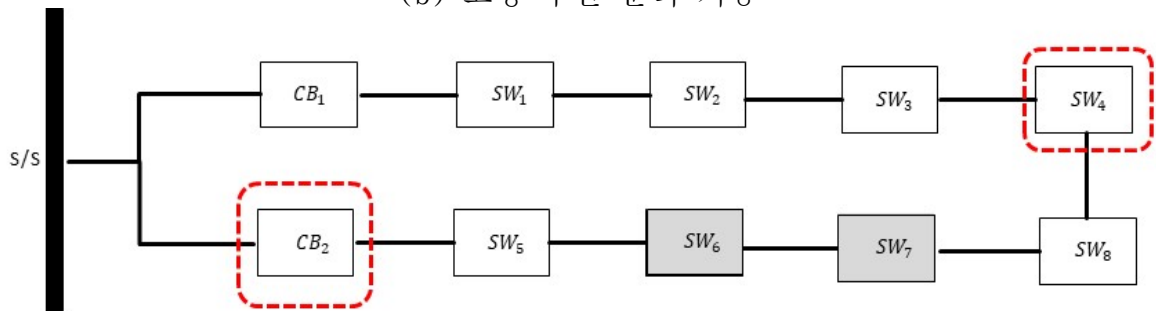
SW: 자동화개폐기, CB:차단기 : Open, : Close

(a) 고장 구간 추정 기능



SW: 자동화개폐기, CB:차단기 : Open, : Close

(b) 고장 구간 분리 기능



SW: 자동화개폐기, CB:차단기 : Open, : Close

(c) 건전 구간 복전 기능

Fig. 3 고장 처리 프로세스

C. 고장 구간 추정 기법

기존의 고장 구간 추정 기법은 그림 4와 같이 centralized method와 decentralized method로 분류할 수 있다. Centralized method는 차단기나 특정 노드에 계측된 전압 및 전류 정보를 이용하여 고장 구간을 추정하는 기법으로 travelling wave, impedance 기반의 기법이 이에 해당한다. Decentralized method는 배전계통에 설치된 다양한 원격 감시 설비들로부터 취득된 정보를 이용하여 고장 구간을 추정하는 방식으로 fault indicator, smart meter 기반의 기법이 이에 해당한다. 본 절에서는 이와 같은 대표적인 고장 구간 추정 기법들을 검토하고 그 성능을 비교한다[24].

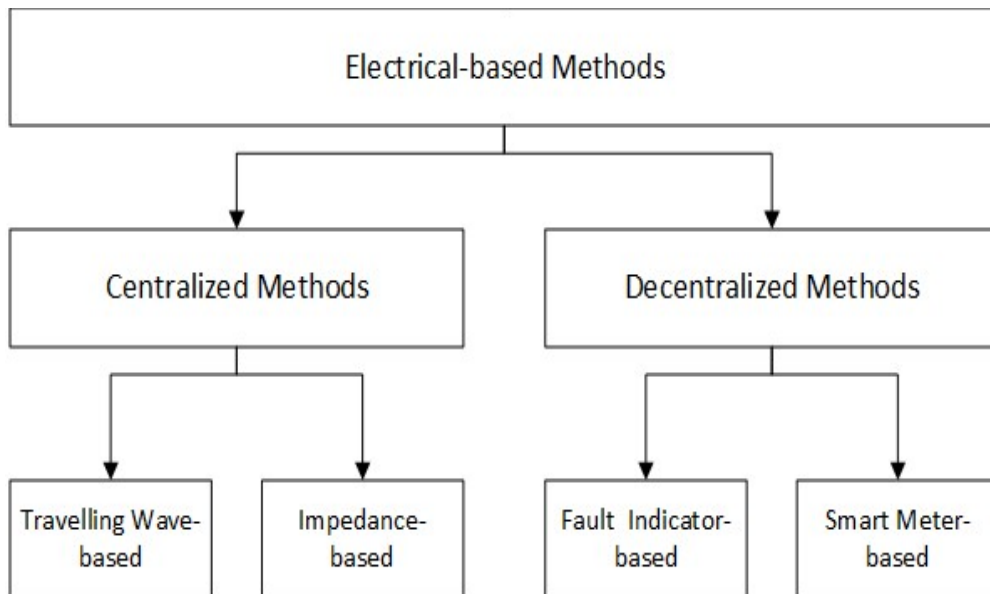
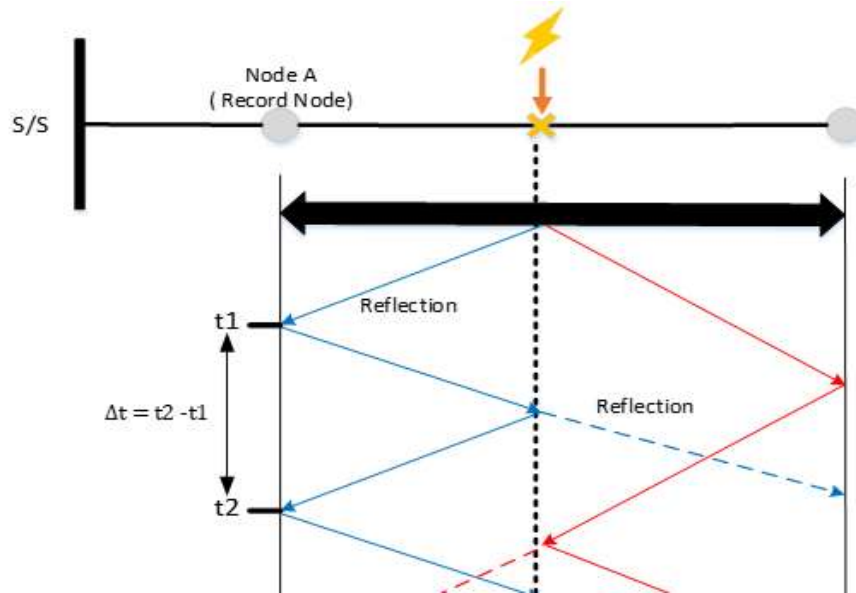


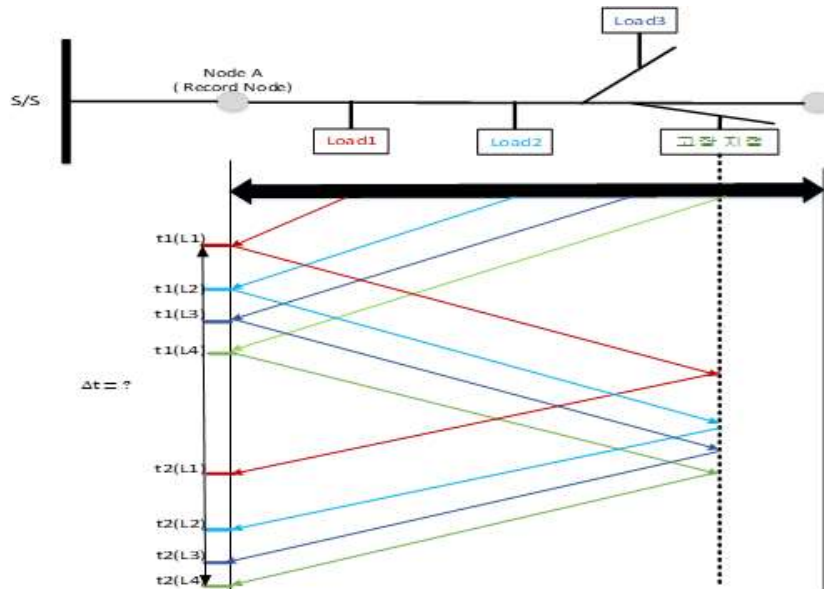
Fig. 4 고장 구간 추정 기법의 분류

1. Travelling Wave-based Method

그림 5-(a)는 travelling wave 기반 고장 구간 추정 기법의 원리를 설명하기 위한 그림이다. 본 기법은 송전계통에서 사용되는 기법으로, 고장이 발생 할 시 고장 지점을 기준으로 특성 임피던스가 변화하는 특성을 이용한다. 이를 통해 고장 지점에서 반사되는 파형의 도착 시간차를 이용하여 고장 구간을 추정하는 방식이다.



(a) 송전계통에서 Travelling Wave 기반의 원리



(b) 배전계통에 Travelling wave 기반의 적용 문제

Fig. 5 Travelling Wave 기반의 기법

그림 5-(a)와 같이 선로 중간에서 고장이 발생하면 반사되는 파형의 도착 시간을 이용하여 고장 거리를 추정할 수 있다. 이는 식 (2.1)로 나타낸다.

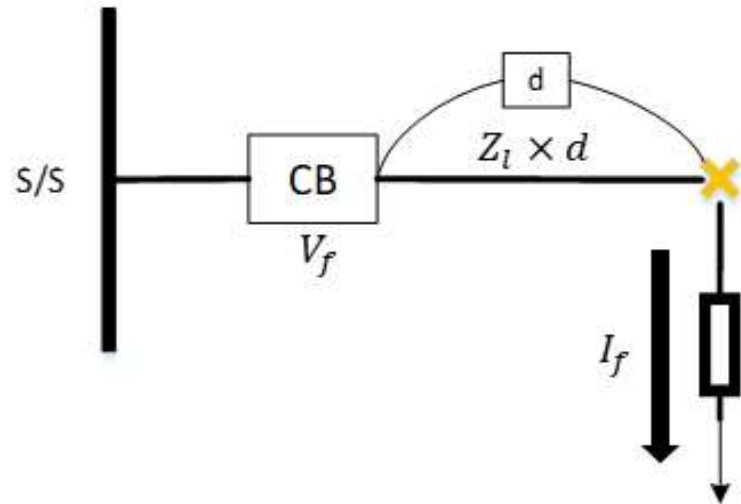
$$d = v \times \frac{\Delta t}{2} \quad (2.1)$$

여기서 d 는 고장 지점까지의 거리, v 는 진행파의 속도, Δt 는 반사파의 도착 시간 차이이다.

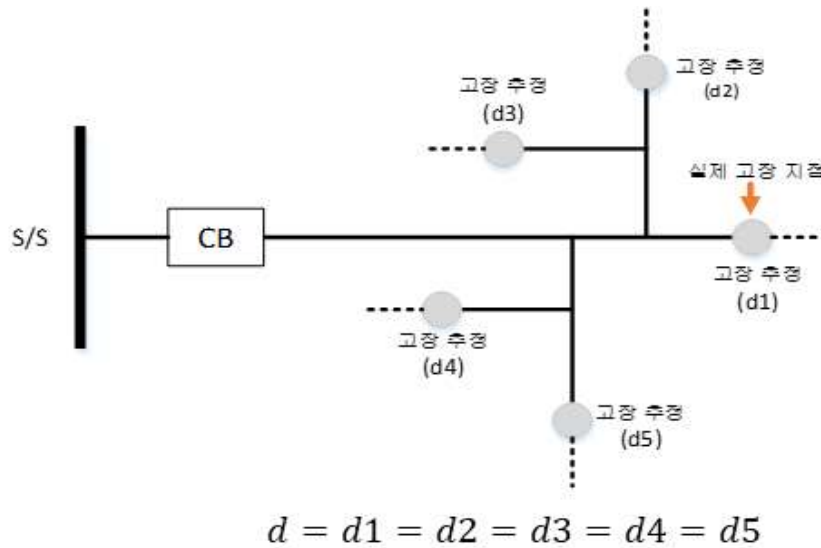
Travelling wave 기반 기법을 이용하면 빠르고 정밀하게 고장 지점을 추정할 수 있다. 하지만 그림 5-(b)와 같이 선로 중간에 부하가 연결되어 있고 분기 구간이 존재하는 배전계통에 적용하는 것에는 한계가 존재한다. 이는 다수의 지점에서 특성 임피던스가 변경되기 때문에 다수의 반사파가 존재하기 때문이다. 따라서 다수의 변경 지점에 반사되는 파형을 정확하게 분석하기 위해 비싼 고성능 기기를 부하 및 분기 구간마다 설치할 필요가 있다. 따라서 이와 같은 방식은 많은 비용이 요구되기 때문에 배전계통에 적용하기에는 적합하지 않다.

2. Impedance-based Method

그림 6-(a)는 impedance 기반 고장 구간 추정 기법의 원리를 설명하기 위한 그림이다. 본 기법은 원격 감시 설비가 없는 배전계통에서 사용되는 기법으로, 고장이 발생 할 시 주변전소에 설치된 차단기에서 측정된 고장 전압과 전류를 이용하여 고장 지점까지의 전기적 거리를 추정하는 방식이다.



(a) 배전계통에서 Impedance 기반의 원리



(b) Impedance 기반의 문제

Fig. 6 Impedance 기반의 기법

그림 5-(a)와 같이 차단기에서 계측된 고장 전압, 전류, 선로 임피던스를 이용하여 고장 지점까지의 전기적 거리를 식 (2.2)와 같이 계산할 수 있다.

$$d = \frac{V_f}{I_f \times Z_l} \quad (2.2)$$

여기서 d 는 고장 지점까지의 거리, V_f 는 고장 전압, I_f 는 고장 전류, Z_l 은 단위 길이당 선로 임피던스이다.

Impedance 기반 기법은 다른 기법들에 비해 계산 과정이 단순하여 비교적 쉽게 구현할 수 있으며 추가적인 설비를 설치할 필요 없이 고장 구간을 추정할 수 있기에 경제성이 좋다. 그러나 그림 6-(b)와 같이 배전계통에서 분기 구간이 존재할 경우에는 고장 지점까지의 전기적 거리(d)가 동일한 지점이 다수 존재할 수 있다. 즉, 본 기법을 사용하면 다수의 고장 구간을 추정하게 된다. 또한, 식 (2.2)에서 사용된 선로 임피던스 정보가 부정확하거나 고장 임피던스가 변동하는 경우에는 고장 거리 추정 정밀도가 저하될 수 있다.

3. Fault Indicator-based Method

그림 7은 fault indicator 기반 고장 구간 추정 기법의 원리를 설명하기 위한 그림이다. 본 기법은 한전에서 고장 구간을 추정하기 위해 이용하고 있는 기법으로, 고장 발생 시 자동화 개폐기에 설치된 fault indicator의 동작 여부에 따라 고장 구간을 추정하는 방식이다. Fault indicator는 고장 전류를 경험하고 일정 시간 이상 무전압을 경험하면 동작한다. 예를 들어 그림 7과 같이 자동화 개폐기 SW_3 하단에서 고장이 발생하면 SW_1 부터 SW_3 에 설치된 fault indicator는 고장 전류를 경험하고 SW_4 부터 SW_6 에 설치된 fault indicator는 고장 전류를 경험하지 않는다. 다음으로 CB_1 이 동작하여 SW_1 부터 SW_6 까지 영역에 정전이 발생하여 모든 fault indicator가 무전압을 경험하게 된다. 이를 표 2에 정리하였으며, 결과적으로 fault indicator 동작 조건에 따라 SW_1 부터 SW_3 에 설치된 fault indicator들만 동작하게 된다. 따라서 마지막에 동작한 SW_3 의 fault indicator 다음 구간에서 고장이 발생하였다고 추정할 수 있다. 이러한 fault indicator 기반 고장 구간 추정 기법은 단순한 원리를 이용하여 고장 구간을 신속하게 식별할 수 있는 큰 장점을 가진다. 또한, 한전에서 본 기법을 채택한 추가적인 이유는 자동화 개폐기가 설치 되어있는 장소에 동일하게 fault indicator를 설치할 수 있어서 구축비용면에서 경제적이기 때문이다.

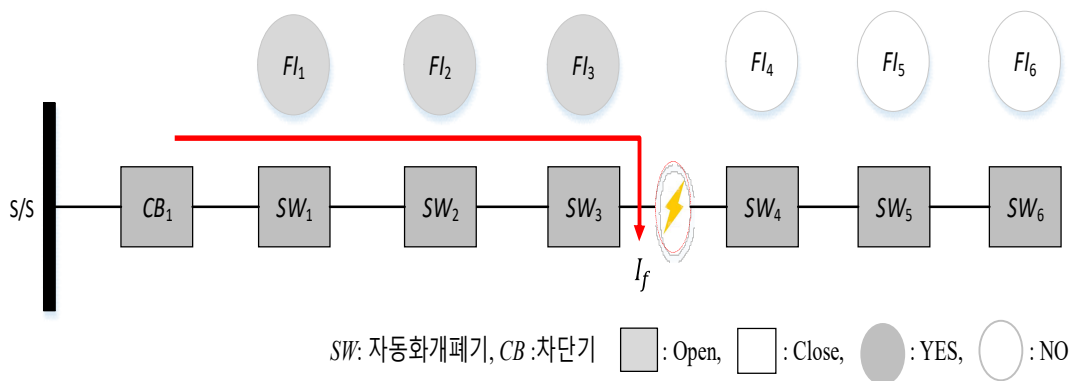


Fig. 7 Fault Indicator 기반의 기법

하지만 표 3과 같이 자동화 개폐기 설치 규정에 따라 자동화 개폐기 간의 거리가 멀다는 문제가 존재한다[25]. 이러한 설치 규정으로 인해 자동화 개폐기는 광역시, 중소도시, 기타지역 별로 설치하는 간격이 수 [km]이며, 결과적으로 고장 구간이 넓게 추정될 수밖에 없다.

Table 2. Fault indicator 동작 조건

분류	FI_1	FI_2	FI_3	FI_4	FI_5	FI_6
고장 전류	Yes	Yes	Yes	No	No	No
무전압	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Fault Indicator 동작 유/무	0	0	0	X	X	X

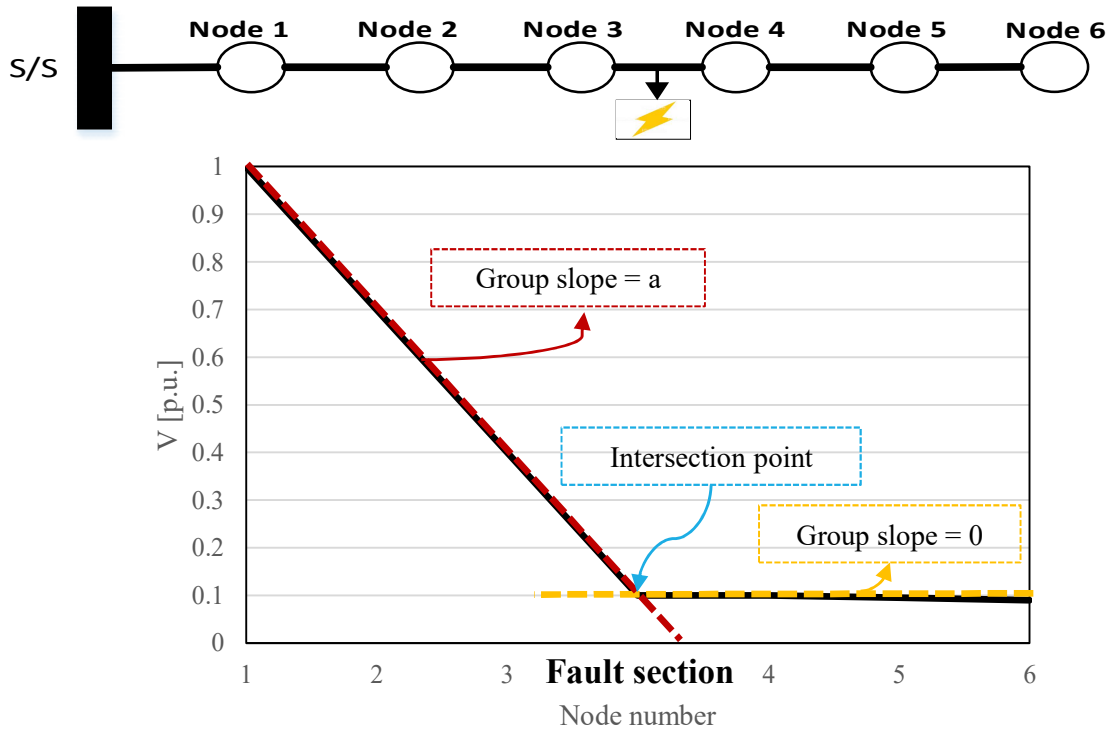
Table 3. 자동화 개폐기 설치 규정

구분	거리	경간
광역시	1.0[km/1대]	5 경간 이상
중소 도시	2.0 [km/1대]	10 경간 이상
기타 지역	4.0 [km/1대]	30 경간 이상

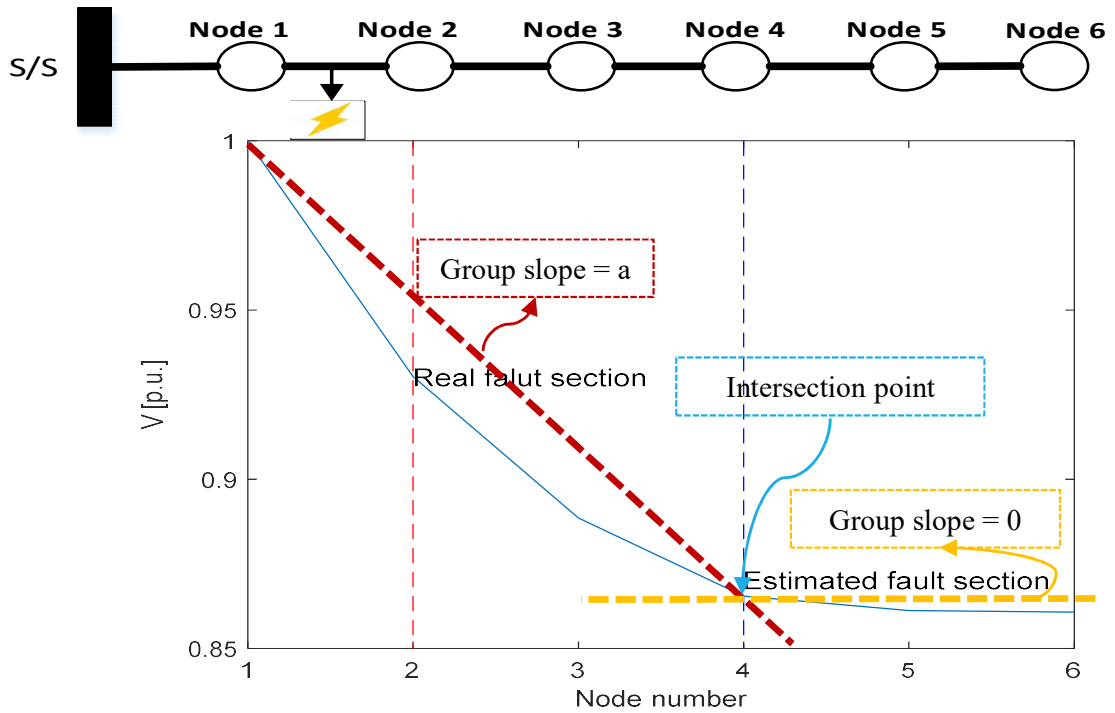
4. Smart Meter-based Method

그림 8-(a)은 smart meter 기반 고장 구간 추정 기법의 원리를 설명하기 위한 그림이다. 본 기법은 저저항 1선 지락사고의 특징인 고장 전류 및 전압 강하가 크다는 원리를 이용하여 고장 구간을 추정하는 방식이다. 그림 8-(a)와 같이 배전계통에서 저저항 고장이 발생하면 큰 고장 전류로 인해 고장 전단까지 전압이 급격하게 감소한다. 한편, 고장 구간 후단에서는 낮은 전압으로 인해 부하 소비 전류가 감소하고, 결과적으로 적은 선로 전류로 인해 전압 강하가 미비하게 발생한다. 따라서 그림 8-(a)와 같이 전압의 프로파일들을 2개의 직선으로 근사할 수 있다. 본 기법에서는 이러한 두 직선의 교차 지점을 고장 구간으로 추정하는 방식이다. 이와 같은 원리를 이용하면 저저항 고장에 대해서 고장 구간 추정이 가능하다.

하지만, 그림 8-(b)와 같이 고저항 고장에 대해서는 추정 정밀도가 저하될 수 있다. 고저항 고장이 발생하면 작은 고장 전류로 인해 고장 구간 전단까지 노드들의 전압 강하가 저저항 고장에 비해 심하게 발생하지 않는다. 결과적으로 고장 구간 후단에서 전압 또한 급격하게 감소하지 않아 고장 구간 후단에서도 부하 전류에 의한 전압 강하가 발생한다. 이로 인하여 그림 8-(b)와 같이 전압 프로파일이 다수의 직선으로 나타나게 된다. 이와 같은 경우 기존의 기법을 적용하기 위해서는 다수의 직선을 2개의 직선으로 근사할 필요가 있다. 하지만 이와 같은 근사 과정으로 인해 고장 구간이 틀리게 추정될 수 있다.



(a) 저저항 1선 지락사고에서 고장 구간 추정 기법



(b) 고저항 1선 지락사고에서 고장 구간 추정할 시 문제

Fig. 8 Smart Meter 기반의 기법

5. 대표적인 고장 구간 추정 기법 비교

배전계통에서 사용되는 대표적인 고장 구간 추정 기법들을 비교하여 표 4에 정리하였다.

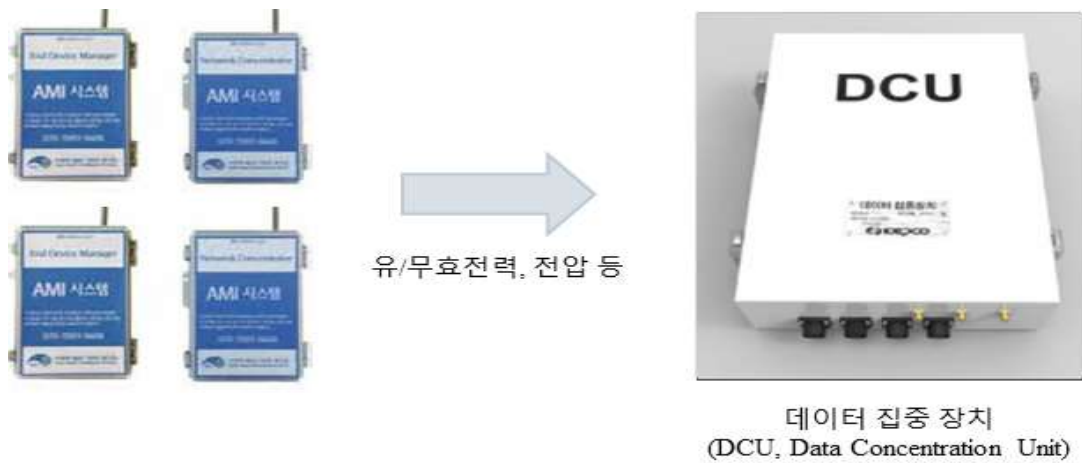
Table 4. 고장 구간 추정 기법 비교

분류		Impedance-based	Fault Indicator-based	Smart Meter-based
Impedance 정보		필요	불필요	불필요
구축비용		낮음	높음 (고장 처리 전용 FI 설치 필요)	중간 (감시용 설비에 기능 추가)
정밀도	LIF	낮음 (다구간 추정)	낮음 (넓게 추정)	높음
	HIF			낮음

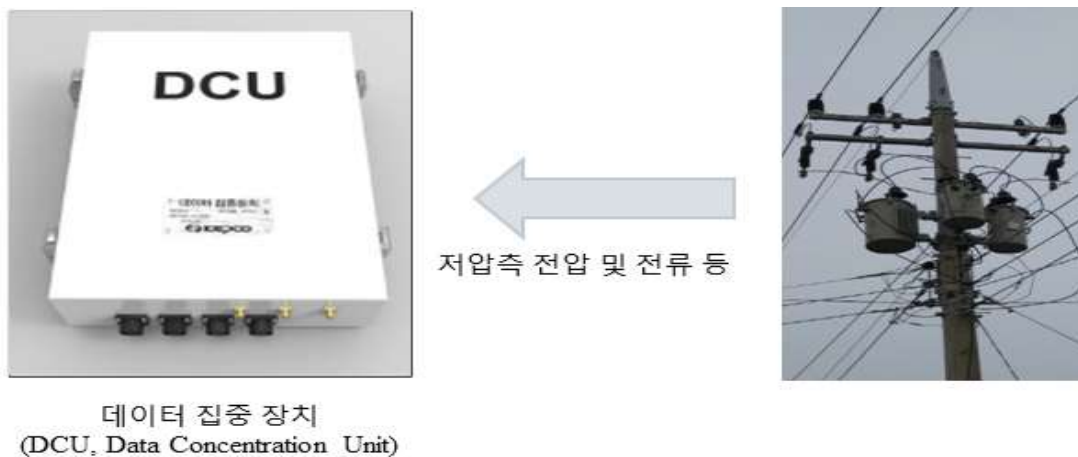
Impedance 기반 기법은 전기적 거리를 기반으로 고장 구간을 추정하기 때문에 고장 구간이 다구간으로 추정되는 문제가 있으며, fault indicator 기반 기법은 자동화 개폐기 설치 규정에 고장 구간이 넓게 추정되는 문제가 있다. Smart meter 기반 기법은 저저항 고장에 대해 고장 구간 추정 정밀도가 높으나 고저항 고장에 대해서는 추정 정밀도가 낮다는 문제가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 smart meter와 유사한 DCU를 이용하여 고저항 고장에 대해 정밀한 고장 구간을 추정하는 기법에 대해 연구하였다.

D. DCU(Data Concentration Unit) 기능

DCU는 그림 9와 같이 주상 변압기가 설치된 곳에 설치된다. DCU의 주요 기능은 그림 9-(a)와 같이 수용가에 설치된 AMI에서 계측된 전압 및 전류 정보를 수집하는 기능과 그림 9-(b)와 같이 주상 변압기 2차 측의 전압, 전류 정보를 계측하여 상위 시스템으로 전송하는 기능이다. 본 논문에서 제안하는 기법은 이 중 2번째 기능을 활용한다. 즉, DCU에서 계측된 주상 변압기 2차 측의 전압 및 전류 정보와 변압기 임피던스 정보를 이용한다. 이를 이용하여 고장 발생 전/후의 1차 측 전압을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 적용하여 고저항 1선 지락 사고에 대해 보다 높은 정확성을 갖춘 고장 구간 추정 기법을 제안하였다.



(a) AMI 데이터를 DCU에서 수집 및 전송



(b) 주상 변압기의 2차측 전압, 전류 계측

Fig. 9 DCU 주요 기능

Ⅲ. DCU를 이용한 고장 구간 추정 기법

A. 제안 기법의 가정

본 논문에서는 다음과 같은 2가지 가정을 기반으로 새로운 고장 구간 추정 기법을 제안하였다. 첫 번째 가정은 그림 10과 같이 정전이 발생하면 DCU에서 고장 전/후의 전압 및 전류 파형을 상위 시스템(AMDS)으로 전송하고, 상위 시스템에서는 파형 데이터와 변압기 임피던스를 이용하여 주상 변압기 1차 측의 고장 전/후 RMS 전압을 계산할 수 있다는 가정이다[26]. 두 번째 가정은 선행 연구에서 제안된 기법을 이용하여 고장 유형 및 고장 상판별이 가능하다는 점이다 [27]. 구체적인 가정 설명은 다음과 같다.

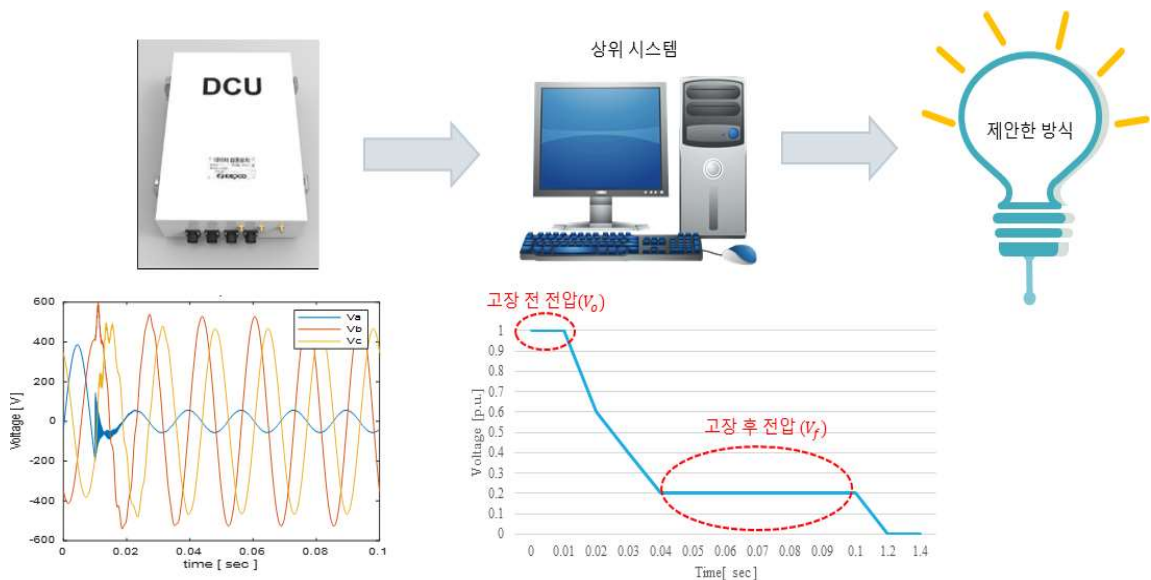


Fig. 10 정전 발생 시 DCU 데이터를 이용한 전/후의 RMS Voltage 계산

먼저 첫 번째 가정은 배전계통에 고장이 발생할 경우 그림 10과 같이 DCU는 그림 좌측 하단의 그래프와 같이 측정한 전압 및 전류 파형을 상위 시스템으로 전송한다. 상위 시스템에서는 전압 및 전류 파형과 주상 변압기의 임피던스 정보를 이용하여 주상 변압기 1차 측의 전압 파형을 추정한다. 이를 이용하여 그림 우측 하단과 같이 RMS 전압의 프로파일을 계산한다. 그림 10과 같이 RMS 전

압은 정상 상태에서 고장 전 전압(V_o)과 고장 후 전압(V_o)으로 구분할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 기법은 이와 같이 정상 상태에서 고장 전 전압과 고장 후 전압을 이용한다.

다음 두 번째 가정은 계산된 RMS 전압 프로파일을 이용하여 고장 유형 및 고장 상을 판별할 수 있다는 것이다. 본 논문에서 다루고 있는 1선 지락사고 발생 시 RMS 전압의 프로파일을 그림 11에 도시하였다. 그림과 같이 1선 지락사고가 발생하면 고장이 발생한 상의 RMS 전압은 감소하고 나머지 상의 RMS 전압은 증가한다. 따라서 이와 같은 특징을 이용하여 고장 유형 및 고장 상을 판별할 수 있다.

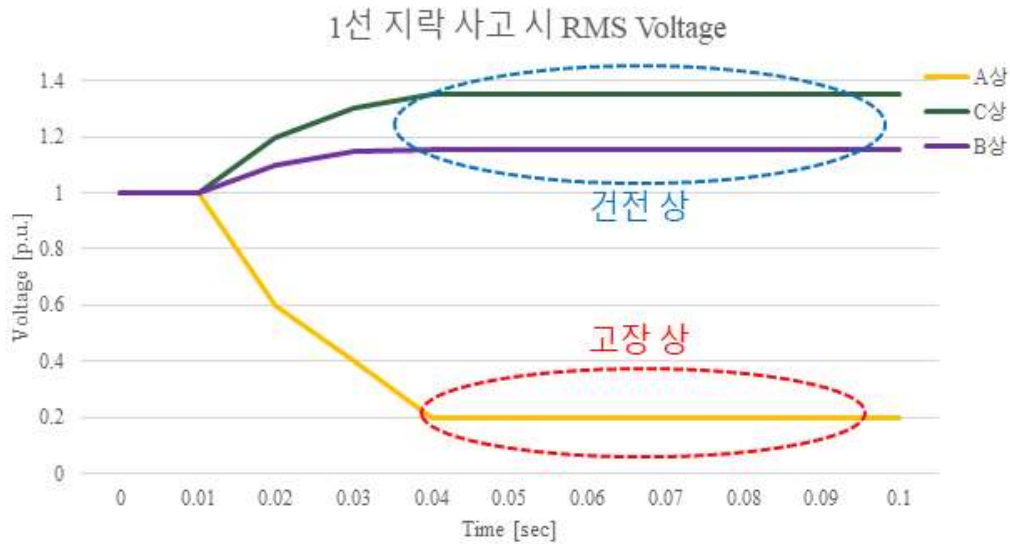


Fig. 11 1선 지락사고 발생 시 RMS 전압 프로파일

B. 제안 기법의 기본 원리

제안 기법에서는 고장이 발생할 시 고장 구간 전/후단 선로들의 전류 변화가 다르다는 특징을 이용한다. 고장이 발생하면 고장 구간 전단에 흐르는 선로 전류는 고장 전류의 영향을 받아 증가하고, 고장 구간 후단에 흐르는 선로 전류는 전단에서 발생한 큰 전압 강하로 인해 부하 전류가 감소하여 적은 전류가 흐른다. 이러한 특징으로 고장 발생 전/후의 선로 전류 변화비를 계산하면 고장 구간 전단 선로들의 전류 변화비가 1보다 큰 값을 갖고, 고장 구간 후단 선로들의 전류 변화비는 1보다 작은 값을 갖는다. 따라서 선로 전류 변화비가 1보다 큰 값이 없으면서 1보다 작아지는 최종 선로의 앞단을 고장 구간으로 추정할 수 있다. 하지만 실제 배전계통에서 모든 선로의 전류를 측정하는 것은 현실적으로 불가능하기에 본 논문에서는 상위 시스템에서 계산된 고장 전/후 RMS 전압을 이용하여 선로 전류 변화비를 근사하는 방식을 제안한다.

그림 12는 고장 전/후 선로 전류 변화를 분석하기 위한 그림이다. 그림에서 Z_{ij} 는 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이의 선로 임피던스를 의미한다. 그림 12-(a)와 같이 고장이 발생하기 전 선로 전류(I_{ij}^o)는 $Node_j$ 에 연결된 부하 전류($I_{j,ld}^o$)에 해당하며 이와 같은 관계를 식 (3.1)로 표현할 수 있다.

$$I_{ij}^o = I_{j,ld}^o \quad (3.1)$$

여기서 I_{ij}^o 는 고장 전 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이 선로에 흐르는 전류, $I_{j,ld}^o$ 는 $Node_j$ 에 연결된 부하 전류이다.

그림 12-(b)와 같이 고장이 발생한 후 선로 전류(I_{ij}^f)는 고장 저항(R_f)에 의한 고장 전류($I_{R_f}^f$)와 부하 전류($I_{j,ld}^f$)로 구성되며 이를 식 (3.2)로 표현할 수 있다.

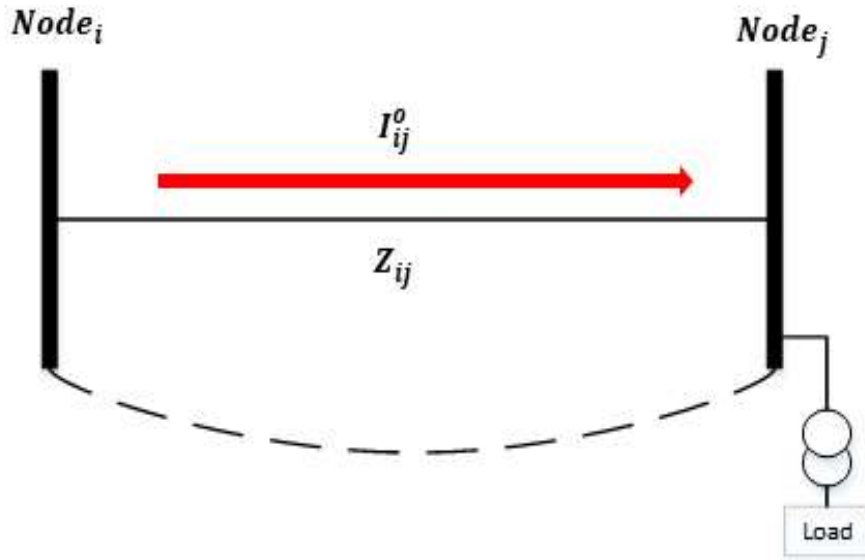
$$I_{ij}^f = I_{R_f}^f + I_{j,ld}^f \quad (3.2)$$

여기서 I_{ij}^f 는 고장 후 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이 선로에 흐르는 전류, $I_{R_f}^f$ 는 고장 저

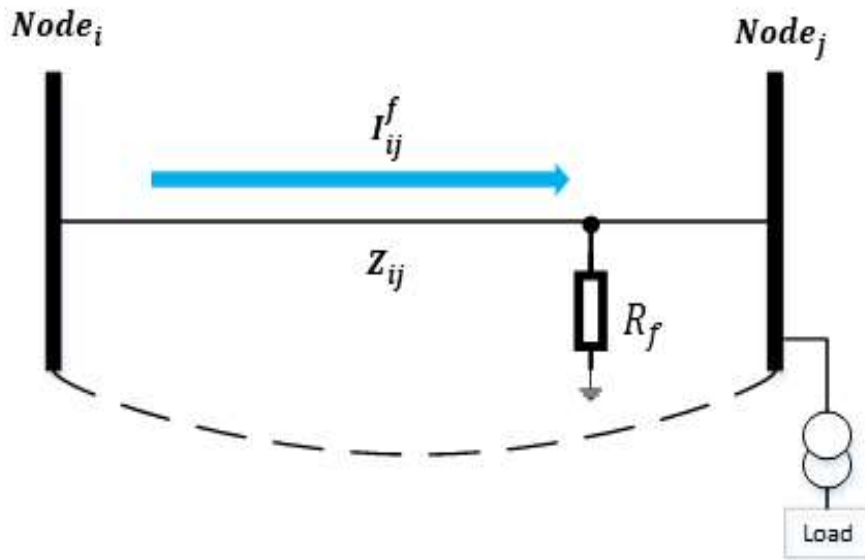
항에 의한 고장 전류, $I_{j,ld}^f$ 는 $Node_j$ 에 연결된 부하 전류이다.

이러한 고장 전류는 일반적으로 부하 전류보다 크므로 식 (3.1)과 (3.2)를 통해 고장 전/후의 선로 전류를 비교하면 식 (3.3)으로 표현할 수 있다.

$$I_{ij}^o < I_{ij}^f \quad (3.3)$$



(a) 고장 전 선로 전류



(b) 고장 발생 후의 선로 전류

Fig. 12 고장 전/후의 선로 전류 변화 특성

그림 13은 고장이 발생한 후 고장 구간 후단 선로의 전류 변화를 분석하기 위한 그림이다. 고장이 발생한 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이 구간의 특징은 12-(b)와 동일하며 식 (3.2)로 표현할 수 있다. 고장 구간 전단에서는 $Node_j$ 에 연결된 부하 전류($I_{j,ld}^f$)와 고장 저항(R_f)에 의한 고장 전류($I_{R_f}^f$)를 비교하면 식 (3.4)로 나타낼 수 있다.

$$I_{R_f}^f > I_{j,ld}^f \quad (3.4)$$

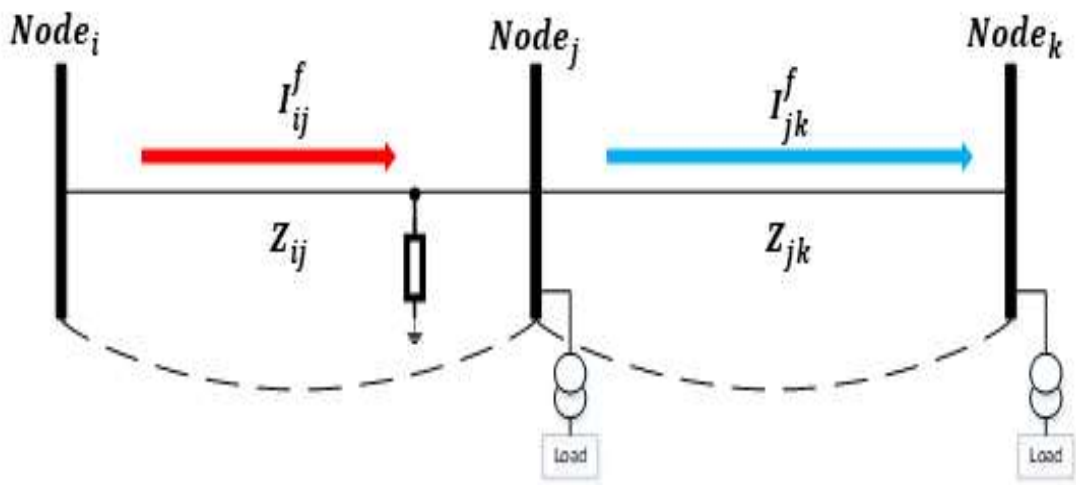


Fig. 13 고장 후 고장 구간 전/후단 선로 전류 변화 특성

고장이 발생한 후의 $Node_j$ 와 $Node_k$ 사이의 고장 구간 후단 선로에는 그림 13에서 볼 수 있듯이 $Node_k$ 에 연결된 부하 전류($I_{k,ld}^f$)가 흐른다. 여기서 고장 구간 후단에서의 고장 전 $Node_k$ 에 연결된 부하전류($I_{k,ld}^c$)와 고장 후 $Node_k$ 에 연결된 부하전류($I_{k,ld}^f$)를 비교하였을 때 고장 구간 전단에서 고장 전류로 인한 전압 강하로 $Node_k$ 에 연결된 부하 전류($I_{k,ld}^f$)가 감소한다. 이와 같은 분석을 기반으로 고장 발생 전/후 및 고장 구간 전/후단의 선로 전류 변화를 표 5와 같이 정리하였다.

Table 5. 고장 전/후 선로 전류 분석 비교

		고장 구간 구분	
		고장 구간 전단	고장 구간 후단
고장 발생	전	I_{ij}^o ($I_{ij}^o = I_{j,ld}^o$)	I_{jk}^o ($I_{jk}^o = I_{k,ld}^o$)
	후	I_{ij}^f ($I_{ij}^f = I_{R_f}^f + I_{j,ld}^f$)	I_{jk}^f ($I_{jk}^f = I_{k,ld}^f$)
고장 전/후 선로 전류 비교		$I_{ij}^o < I_{ij}^f$	$I_{jk}^o > I_{jk}^f$

표 5에서 I_{ij}^o 는 고장 발생 전 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이 선로에 흐르는 전류, I_{jk}^o 는 고장 발생 전 $Node_j$ 와 $Node_k$ 사이 선로에 흐르는 전류, I_{ij}^f 는 고장 발생 후 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이 선로에 흐르는 전류, I_{jk}^f 는 고장 발생 후 $Node_j$ 와 $Node_k$ 사이 선로에 흐르는 전류이다.

표 5를 이용하여 고장 전/후 선로 전류 변화비를 식 (3.5)로 표현할 수 있다.

$$\text{선로 전류 변화비} = \frac{|I_{ij}^f|}{|I_{ij}^o|}, \frac{|I_{jk}^f|}{|I_{jk}^o|} \quad (3.5)$$

고장이 발생하면 고장 전류의 영향을 받는 고장 구간 전단 상위 선로들의 전류 변화비는 1보다 큰 값을 갖으며 이를 식 (3.6)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{|I_{ij}^f|}{|I_{ij}^o|} > 1 \quad (3.6)$$

고장 구간 후단은 고장 전류 영향을 받지 않기 때문에 선로 전류 변화비가 1보다 작은 값을 갖으며 이를 식 (3.7)로 표현할 수 있다.

$$\frac{|I_{jk}^f|}{|I_{jk}^o|} < 1 \quad (3.7)$$

따라서 선로 전류 변화비를 이용하면 고장 구간을 추정할 수 있다. 즉, 선로 전류 변화비가 1보다 작아지는 최종 선로 앞단을 고장 구간이라고 볼 수 있다.

이러한 선로 전류 변화비를 이용하면 정확하게 고장 구간을 추정할 수 있다. 하지만 실제로 광범위한 배전계통에서 모든 선로의 전류를 계측하는 것은 현실적으로 불가능하기에 본 논문에서는 상위 시스템에서 계산된 RMS 전압을 이용하여 선로 전류 변화비를 추정할 수 있는 방식을 제안한다.

이를 위해 본 논문에서는 선로에서 발생하는 전압 강하 근사식을 사용하였다. 선로 전압 강하는 식 (3.8)과 같이 근사할 수 있다.

$$\Delta V_{ij} = V_i - V_j = |I_{ij} \times Z_{ij}| \approx |I_{ij}| \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (3.8)$$

식 (3.8)을 통해 고장 전/후의 전압 강하 변동비를 식 (3.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta V_{ij}^f}{\Delta V_{ij}^o} \approx \frac{|I_{ij}^f| \times (R \cos \theta_f + X \sin \theta_f)}{|I_{ij}^o| \times (R \cos \theta_o + X \sin \theta_o)} \quad (3.9)$$

여기서 ΔV_{ij}^f 는 고장 후 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이의 전압 강하, ΔV_{ij}^o 는 고장 전 $Node_i$ 와 $Node_j$ 사이의 전압 강하이다.

고저항 1선 지락사고에서는 고장 저항이 크기 때문에 역률각 변화가 작다고 가정할 수 있으며, 결과적으로 식 (3.9)에서 사용된 고장 전/후의 역률각(θ_o, θ_f)에 대한 변화는 무시할 수 있다. 따라서 전압 강하 변동비를 식 (3.10)으로 근사할 수 있다.

$$\frac{\Delta V_{ij}^f}{\Delta V_{ij}^o} \approx \frac{|I_{ij}^f|}{|I_{ij}^o|} \quad (3.10)$$

식 (3.10)에서와 같이 선로 전류 변화비를 추정하는데 있어 전압 강하 변동비를 근사하여 이용할 수 있다. 본 논문에서는 상위 시스템에서 계산된 고장 전/후 RMS 전압을 이용하여 선로 전류 변화비를 근사한다.

예를 들어 그림 14와 같이 배전계통에서 Node 3~4 사이 선로에 고장이 발생한 경우를 살펴보겠다. 여기서 고장 구간을 기준으로 전단은 ① 영역, 후단은 ② 영역으로 구분할 수 있게 된다.

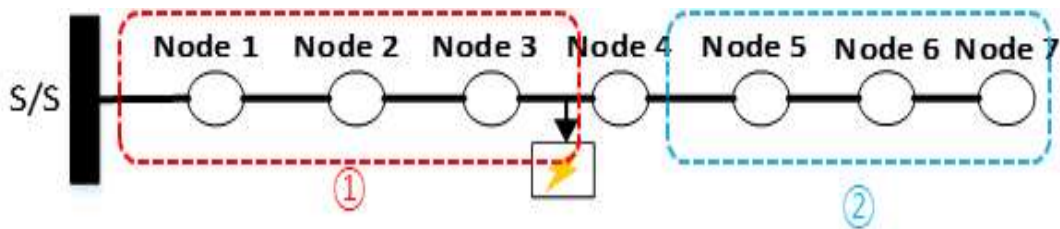


Fig. 14 Node 3~4 사이의 선로에서 고장 발생 시 고장 영역 분리

여기서 ① 영역에서는 식 (3.10)을 통해 계산한 전압 강하 변동비는 1보다 큰 값을 갖으며, 이를 식 (3.11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta V_{ij}^f}{\Delta V_{ij}^o} \approx \frac{|I_{ij}^f|}{|I_{ij}^o|} > 1 \quad (3.11)$$

한편 ② 영역에서는 전압 강하 변동비가 1보다 작은 값을 갖으며, 이를 식 (3.12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta V_{jk}^f}{\Delta V_{jk}^o} \approx \frac{|I_{jk}^f|}{|I_{jk}^o|} < 1 \quad (3.12)$$

이와 같은 특징을 이용하여 고장 구간을 추정할 수 있다. 앞서 기술한 것과 같이 고장이 발생한 선로를 포함한 고장 구간 상위 영역에서는 식 (3.11)과 같이 전압 강하 변동비가 1보다 큰 값을 갖으며, 고장 구간 하위 영역에서는 식 (3.12)와 같이 그 값이 1보다 작은 값을 갖는다. 따라서 계산된 전압 강하 변동비가 1보다 큰 값이 없으면서, 1보다 작아지는 구간을 찾으면 그 구간 앞 구간을 고장 구간으로 추정할 수 있다. 이를 위해 계통의 토폴로지를 탐색할 필요가 있으며 다음 절에서는 토폴로지 탐색을 기반으로 고장 구간을 추정할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

C. 제안 기법을 이용한 추정 프로세스

본 절에서는 앞서 기술한 제안 기법의 기본 원리를 이용하여 고장 구간을 추정하는 기법을 제안한다. 실제 배전계통에서는 분기점이 존재하기 때문에 그림 15와 같이 고장 구간 상위 영역에서도 전압 강하 변동비가 1보다 작은 선로가 존재할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 토폴로지 탐색을 이용한다. 토폴로지 탐색을 포함한 전체 고장 구간 추정 알고리즘은 3단계로 구성되며 개별 단계에서 수행하는 작업은 다음과 같다. 고장이 발생하면 1단계에서는 상위 시스템에서 계산된 고장 전/후의 RMS 전압을 이용하여 각 선로들의 전압 강하 변동비를 계산한다. 2단계에서는 그림 13의 ①에 위치한 차단기에서 시작하여 전압 강하 변동비가 1이상인 선로를 탐색하여 이동한다. 이 과정에서 전압 강하 변동비가 1보다 작은 분기선은 자연스럽게 탐색 경로에서 제외된다. 더 이상 전압 강하 변동비가 1보다 큰 선로가 없으며 탐색을 종료한다. 마지막인 3단계에서는 최종적으로 검색된 선로(전압 강하 변동비가 1보다 작은 선로의 앞에 연결된 선로)를 고장 구간으로 추정한다. 그림 15와 같이 Node 5~8 사이의 고장이 발생하였을 경우 고장 구간을 Node 5~8 사이로 정확하게 추정할 수 있다.

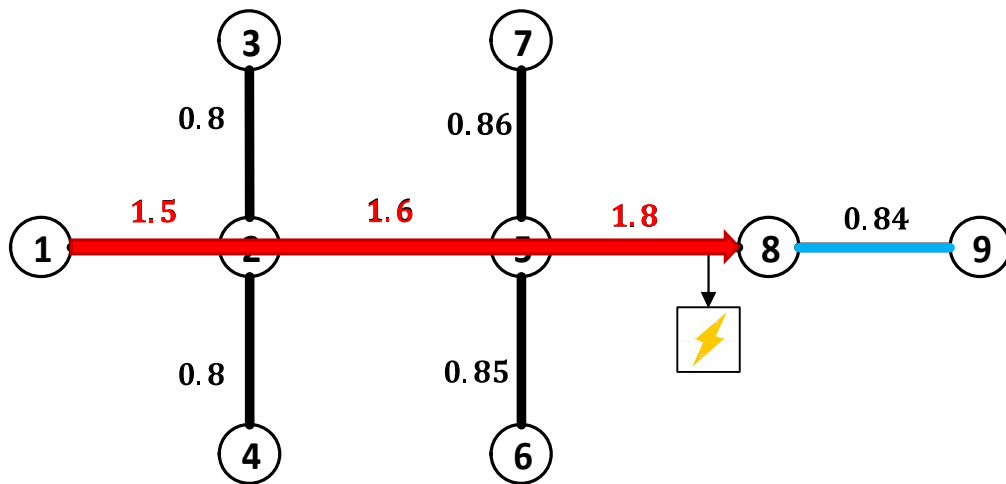
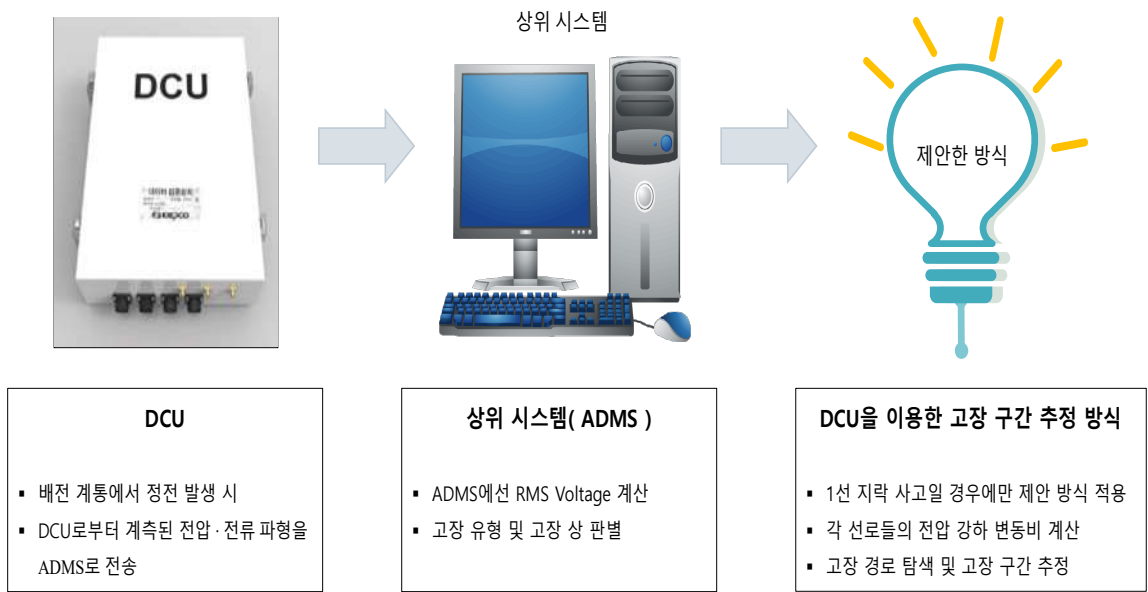
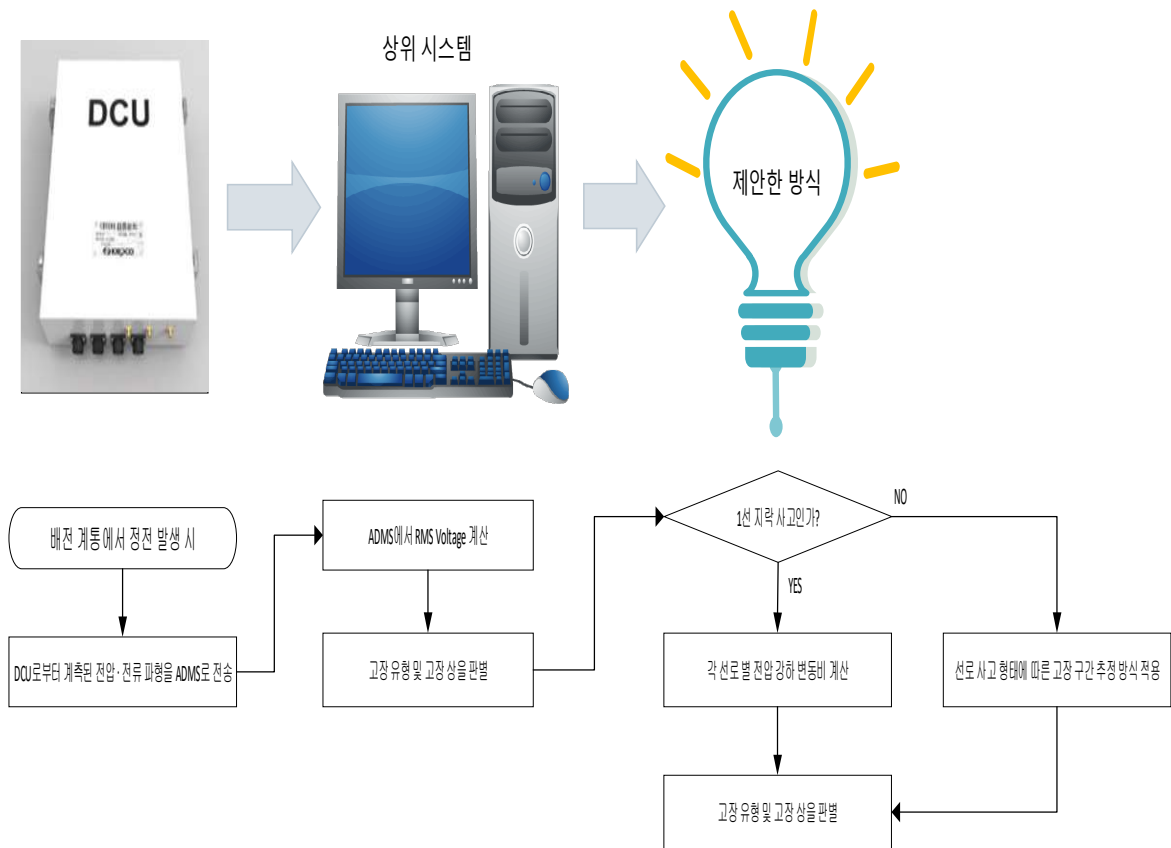


Fig. 15 제안 기법 고장 구간 추정 과정

이러한 전압 강하 변동비를 이용한 고장 구간 추정 프로세스는 그림 16과 같이 정리할 수 있다.



(a) 전압 강하 변동비를 이용한 고장 구간 추정 알고리즘(1)



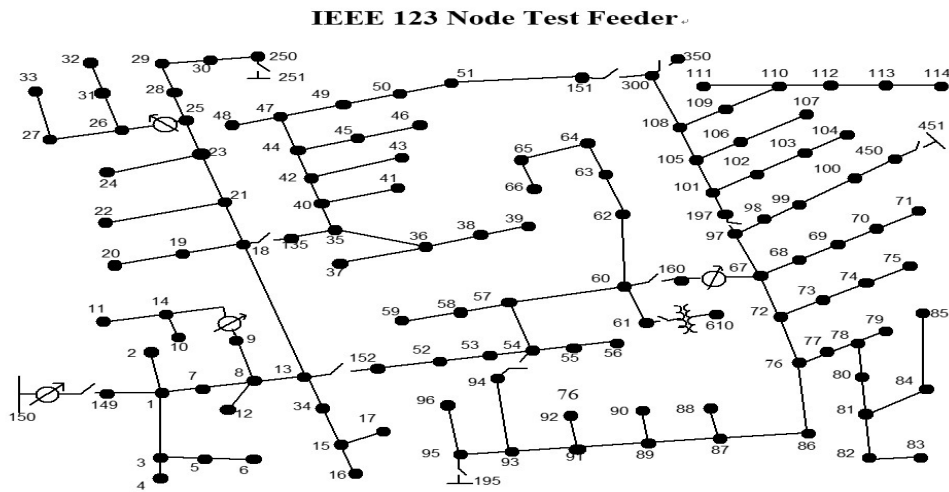
(b) 전압 강하 변동비를 이용한 고장 구간 추정 알고리즘(2)

Fig. 16 제안 기법 추정 프로세스

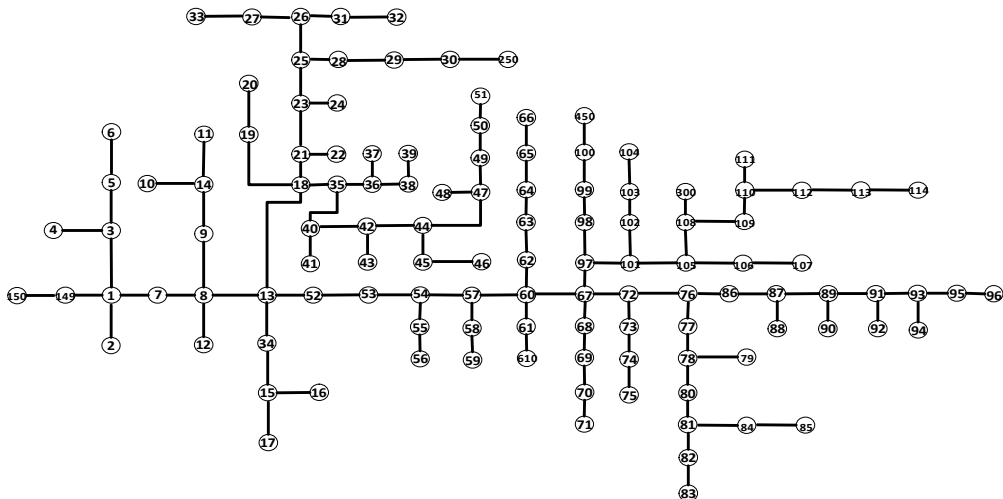
IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

A. 시뮬레이션 모델 및 모의 조건

제안한 고장 구간 추정 기법의 정밀도를 검증하기 위해 IEEE 123 node test feeder 배전계통을 사용하였다[28]. 고저항 1선 지락사고를 모의를 위해 MATLAB 프로그램을 이용하였으며 제안한 기법을 통해 고장 구간을 추정하였다.



(a) IEEE 123 Node Test Feeder 계통



(b) 변경한 IEEE 123 Node Test Feeder 계통

Fig. 17 IEEE 123 Node Test Feeder 모의 계통 형태

모의를 위해 테스트 계통(IEEE 123 node test feeder)을 다음과 같이 수정하였다.

* 실제 배전계통에서 DCU는 부하가 연결된 모선에만 존재한다. 모의 대상계통인 IEEE 123 node test feeder의 경우 A상의 부하는 40개만 존재한다. 따라서 모선 40개를 대상으로 고장 구간을 추정하게 된다. 하지만 본 논문에서 제안한 기법의 정밀도를 보다 상세하게 검증하기 위해 DCU는 IEEE 123 node test feeder에서 A상이 존재하는 모든 모선(88개)에 존재한다는 가정하에 수정하였다.

* 국내에선 배전용 콘덴서를 사용하지 않으므로 IEEE 123 node test feeder에 설치되어 있는 배전용 콘덴서를 제거하였다.

* 일반적인 고장해석에서 부하는 그림 18의 포물선 그래프와 같은 표시된 특성을 갖는 constant Z 모델로 표현한다. 따라서 고장해석에서 모든 부하를 constant Z 모델로 모델링하였다.

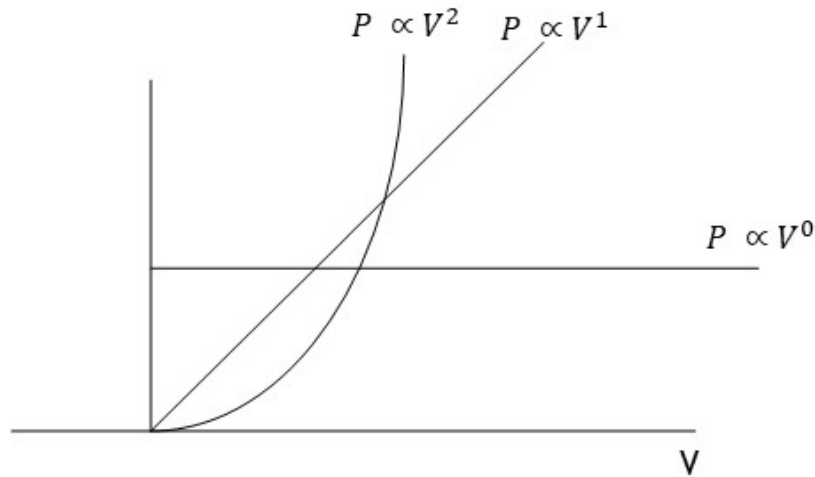


Fig. 18 부하 모델에 대한 PV 곡선

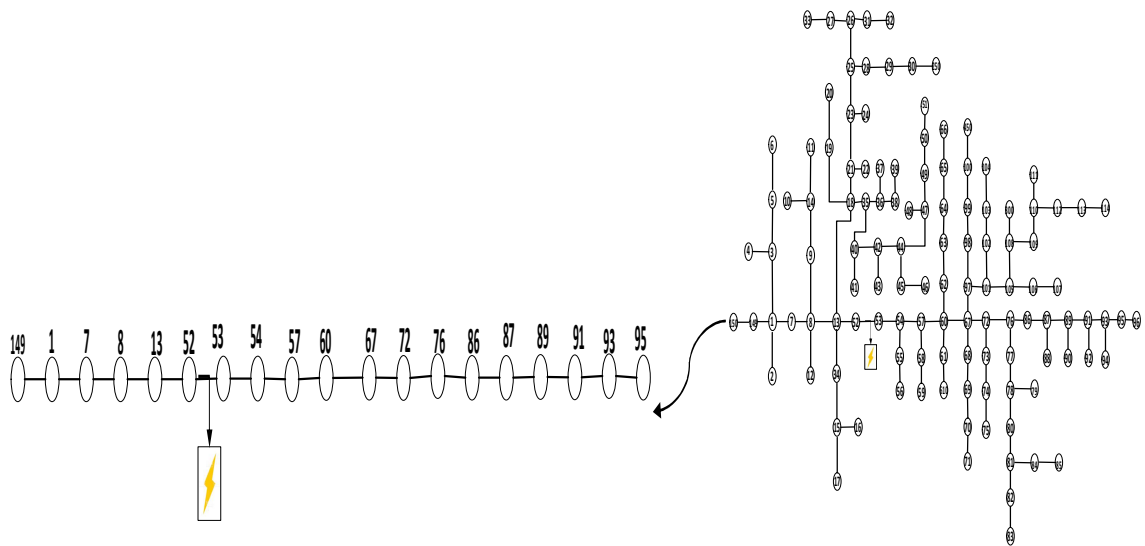
각 부하 모델에 따른 정의는 다음과 같다.

- * Constant Z : 임피던스가 일정한 부하로 소비전력이 전압의 제곱에 비례
 $(P \propto V^2)$
- * Constant I : 전류 크기와 역률각이 일정한 부하로 소비전력이 전압에 비례
 $(P \propto V^1)$
- * Constant P : 전압과 상관없이 소비전력이 일정 $(P \propto V^0)$

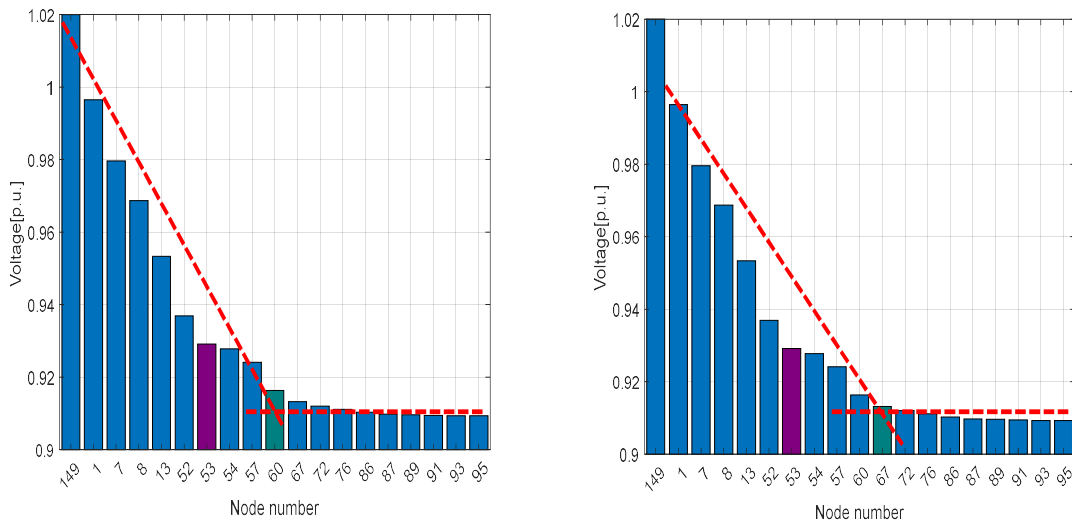
B. 시뮬레이션 결과

1. 기존 기법 및 제안 기법의 결과 비교

기존 smart meter 기반 기법과 제안한 기법의 정밀도를 비교하기 위해 그림 19-(a)와 같이 노드 52와 53 사이의 선로 A상에 고장 저항 1.5[ohm]인 고저항 1선 지락사고가 발생한 경우에 대해 모의를 수행하였다.



(a) Node 52~53 사이에 연결된 선로 A상에 고저항 고장(1.5[Ohm])



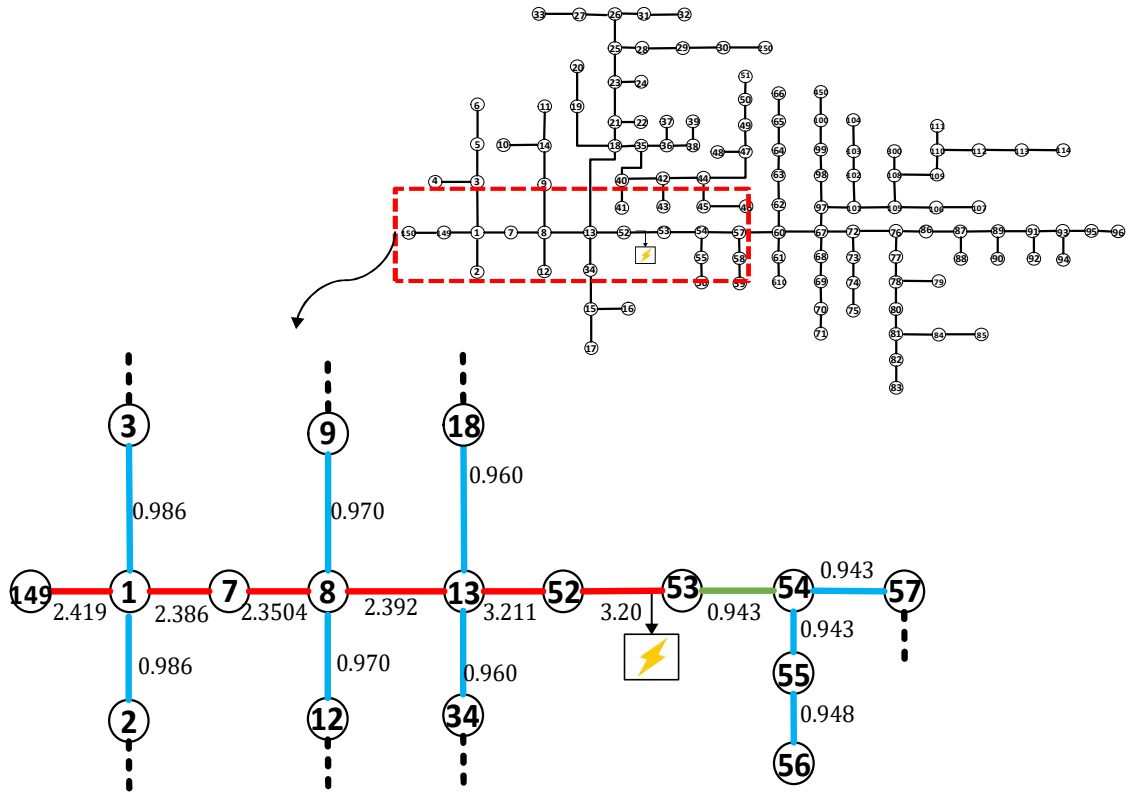
(b) 기존 Smart Meter-based Method로 추정된 결과

Fig. 19 Node 52~53 사이의 선로에 고저항 고장에 대한 기존 기법 적용 결과

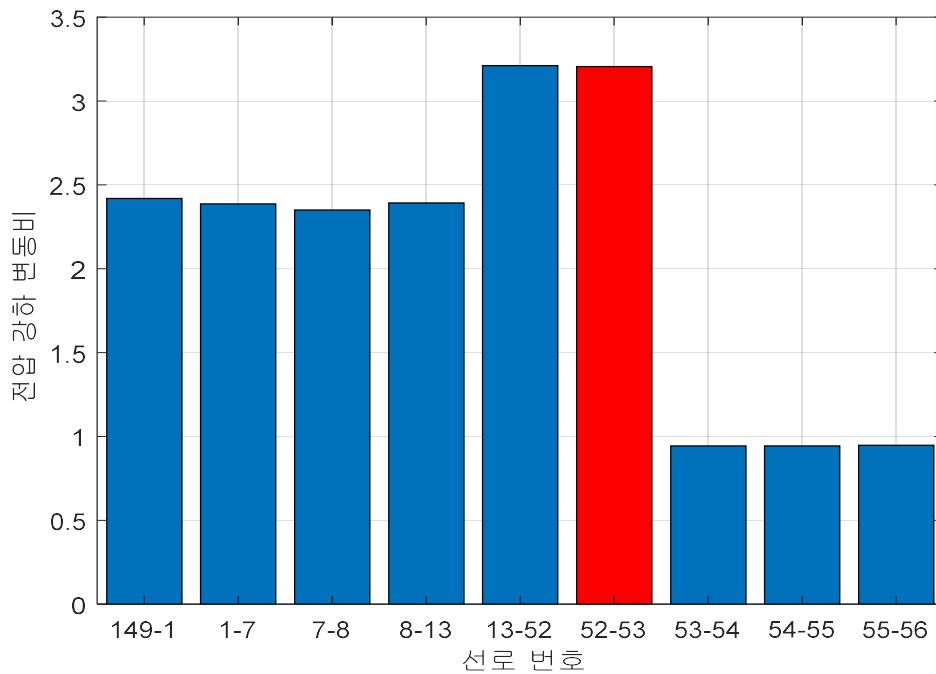
그림 19-(b)에 고장이 발생한 선로 인근 노드들의 전압을 표기하였다. 그림에서와 같이 전압 프로파일을 근사할 수 있는 직선의 조합이 다수 존재할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 기존 기법을 이용하여 고장 구간을 추정하면 실제 고장 구간은 Node 52~53의 선로이지만 직선의 교차 지점이 잘못 매칭 되어 고장 구간을 Node 60~67 부근으로 틀리게 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.

동일한 고장에 대해 제안한 기법을 적용하여 고장 구간을 추정한 결과는 다음과 같다. 그림 20-(a)와 같이 선로들의 전압 강하 변동비가 계산되었으며, 상세한 값은 그림 20-(b)에 그래프로 나타내었다. 이와 같이 전압 강하 변동비를 이용한 제안 기법에서는 고장 구간을 정확하게 추정할 수 있었다.

시뮬레이션 결과로부터 앞서 기술한 것과 같이 smart meter 기반 기법은 고저항 고장에 대해 추정 정밀도가 낮다는 것을 다시 확인할 수 있으며, 제안한 기법으로 기존 기법보다 정밀하게 고장 구간을 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 제안한 기법으로 고장 구간을 추정한 결과(1)



(b) 제안한 기법으로 고장 구간을 추정한 결과(2)

Fig. 20 Node 52~53 사이의 선로에 고저항 고장에 대한 제안 기법 적용 결과

2. 제안하는 기법의 정밀도 결과

제안한 기법의 정밀도를 추가적으로 검증하기 위해 임의의 선로 A상에 대해 임의의 고저항 고장(0~10[ohm])을 무작위로 발생 시킨 10,000개에 대한 시뮬레이션을 수행하고 제안한 기법을 적용하여 고장 구간을 추정하였다.

고장 모의 결과 계통의 최저 전압 분포는 그림 21과 같으며, 10,000개의 모든 고장이 전압 강하가 작은 고저항 고장에 해당함을 확인할 수 있었다. 제안한 기법을 적용한 결과는 모든 경우에 대해 고장 구간을 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

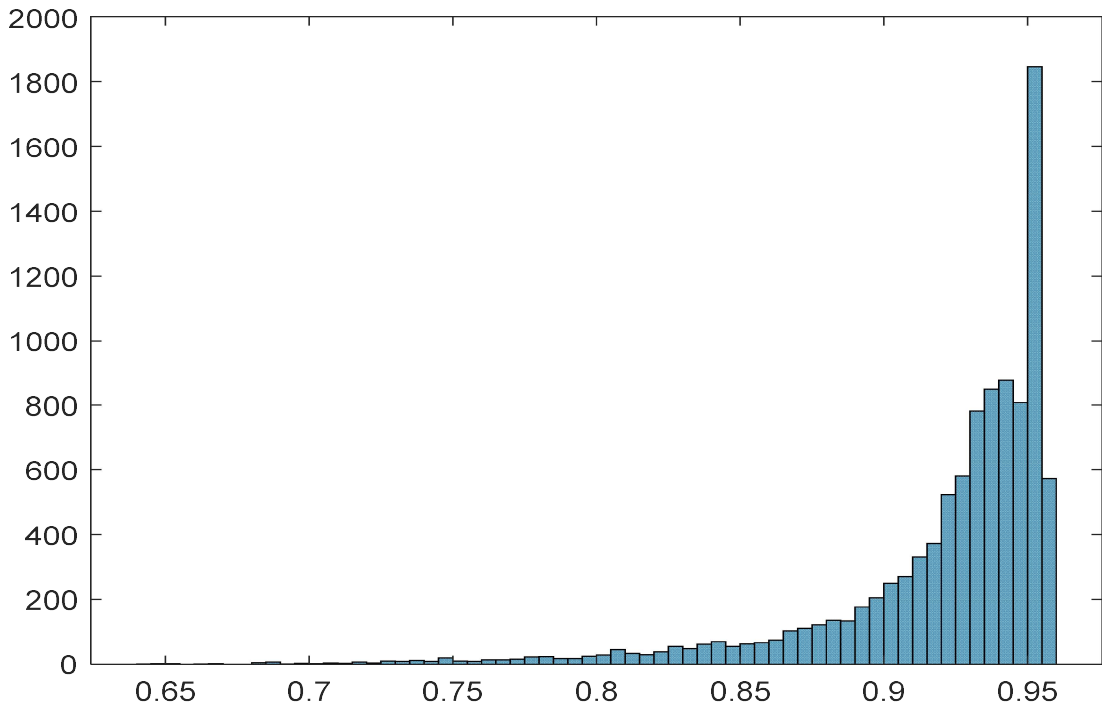


Fig. 21 고장 발생 시 계통의 최저 전압 분포도

V. 결론

본 논문에서는 배전계통에서 가장 빈번히 발생하는 1선 지락사고를 대상으로 연구를 진행하였다. 기존의 대표적인 고장 구간 추정 기법인 travelling wave, impedance, fault indicator, smart meter 기반 기법들의 성능을 분석하였다. 이 중 smart meter 기반 기법이 가장 우수한 성능을 보였으나, 고저항 고장에 대해서는 추정 정밀도가 낮을 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 고저항 1선 지락사고에 대해 정밀도가 높은 새로운 고장 구간 추정 기법을 제안하였다.

제안한 기법에서는 고장 구간 전/후단 선로들의 전류 변화 특성이 다르다는 점을 이용하였다. 고장 전류 특성을 확인하기 위해 고장 구간 전/후단 선로들의 고장 발생 전/후 선로 전류 변화 특성을 분석하였다. 이러한 분석으로부터 고장 구간 전단의 선로 전류는 고장 전과 비교했을 때보다 증가하고, 고장 구간 후단의 선로 전류는 고장 전과 비교했을 때 감소함을 확인하였다. 따라서 선로 전류의 변화비를 이용하면 고장 구간을 추정할 수 있다. 하지만 실제 배전계통에서 모든 선로의 전류를 측정하는 것은 현실적으로 불가능하기에 DCU에서 측정된 전압 프로파일을 이용하여 선로 전류 변화비를 전압 강하 변동비로 근사하는 방법을 제안하였다. 또한 계산된 전압 강하 변동비를 이용하여 토폴로지 탐색을 통해 고장 구간을 추정하는 방법을 제시하였다.

제안 기법의 성능을 검증하기 위해 IEEE 123 node test feeder를 이용하여 고장 모의를 진행하였으며 기존 기법인 smart meter 기반 기법과 제안한 기법을 적용한 결과를 비교하였다. 이를 통해 제안한 기법이 고저항 1선 지락사고에 대해서 기존 기법보다 정밀하게 고장 구간을 추정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 제안한 기법의 추정 정밀도를 검증하기 위해 임의의 선로 A상에 대해 고저항 고장을 발생시킨 10,000개의 고장에 대해 제안한 기법을 적용하여 고장 구간을 추정하였으며, 모든 고장에 대해 고장 구간을 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

실제 배전계통에 제안한 기법을 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 제안한 기법에서는 DCU에서 측정된 전압 및 전류가 매우 정확하다는 가정을 사용했으나, 실제 배전계통에서는 오차가 존재할 수 있으므로

이와 같은 오차를 고려하여 제안한 기법을 개선할 필요가 있다. 또한, 최근 배전 계통에 분산전원의 연계가 증가하고 있으므로 분산전원에 의한 고장 전류 특성 변화를 반영할 필요가 있다. 그리고 제안한 기법은 1선 지락사고를 대상으로 한 기법이므로 이를 모든 종류의 고장에 대해 적용할 수 있게 수정할 필요가 있다. 마지막으로 최근 활발하게 보급이 진행되고 있는 AMI 정보를 이용하는 방식으로 수정할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Jamali and A. Bahmanyar, "A new fault location method for distribution networks using sparse measurements," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 81, pp. 459-468, Oct. 2016.
- [2] S. Jamali, A. Bahmanyar, and E. Bompard, "Fault location method for distribution networks using smart meters," *Measurement*, vol. 102, pp. 150-157, May 2017
- [3] 김헌태, 장성수, "3020신재생에너지 정책의 성공적 달성을 위한 전력 계통 안정화 핵심기술 개발 방향", *대한전기학회논문지*, 제67권 제2호, 149-157, 2018.02
- [4] M. E. Baran and I. El-Markaby, "Fault analysis on distribution feeders with distributed generators," *WEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20 (4), pp. 1757-1764, 2005.
- [5] A. P. S. Meliopoulos, E. Polymeneas, Z. Tan, R. Huang, and D. Zhao, "Advanced distribution management system," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2109-2117, Dec. 2013.
- [6] E. Vaahedi, "Distribution Management System," Wiley-IEEE Press (BOOK), 2014
- [7] J. Wang, "Foundational report series: Advanced distribution management systems for grid modernization—DMS functions," Argonne Nat. Lab., Tech. Rep. ANL/ESD-15/17, Sep. 2015. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/scitech/biblio/1227398>

- [8] Riaz Uddin, Ali S. Alghamdi, Muhammad Hammad Uddin, Ahmed Bilal Awan & Syed Atif Naseem," Ethernet-Based Fault Diagnosis and Control in Smart Grid: A Stochastic Analysis via Markovian Model Checking", 2019
- [9] F. H. Magnago, and A. Abur, "Fault location using Wavelets," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp.1475 - 1480, 1998.
- [10] X. A. Qin, X.J. Zeng, X.L. Zhang, Z.W. Li, "Traveling Wave Based Distribution Lines Fault Location Using Hilbert-Huang Transform," IEEE Industrial Application Society, Annual Meeting, pp. 1 - 5, 2008.
- [11] K. Ramar and A. A. Eisa, "New Fault Location Algorithms for Overhead Transmission Lines," Int. J. Power and Energy Syst., vol. 28, no. 2, pp. 241 - 251, 2008
- [12] R. K. Aggarwal, Y. Aslan, and A. T. Johns, "New concept in fault location for overhead distribution systems using superimposed components," Proc. IEE Geer. Transm. Distrib. vol. 144, no. 3, pp. 309 - 316, May 1997.
- [13] 김병구, "배전자동화시스템에서 1선 지락 고장 시 고장구간 판단방법", 대한전기학회, 제26권 제5호, 34~39, 2012.05
- [14] 조휘창, 이훈, 김준호, 이태윤, 홍종일, "고장전류 및 FI 정보를 활용한 배전선로내 고장구간 판단 알고리즘 연구", 대한전기학회, 추계학술대회 논문집, 2012.11

- [15] Abouzar Estebarsari, Enrico Pons, Ettore Bompard, Alireza Bahmanyar, Sadegh Jamali “ An Improved Fault Location Method for Distribution Networks Exploiting Emerging LV Smart Meters ”,IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2016
- [16] F. C. L. Trindade and W. Freitas, “Low voltage zones to support fault location in distribution systems with smart meters,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2765-2774, Nov. 2017.
- [17] S. Jamali, A. Bahmanyar, and E. Bompard, “Fault location method for distribution networks using smart meters,” Measurement, vol. 102, pp.150-157, May 2017.
- [18] V. De Andrade and E. Sorrentino, “Typical expected values of the fault resistance in power systems,” in Proc. T&D-LA, Sao Paulo, Brazil, pp. 602-609, Nov. 2010.
- [19] J. J. Grainger and W. D. Stevenson Jr., Power System Analysis. McGraw-Hill Inc, 1994
- [20] 박배영, "iot 게이트웨이로서의 데이터 집중장치",주간기술동향 1804호, 정보통신기획평가원, 2017,07
- [21] R. H. Salim, M. Resener, A. D. Filomena, K. R. Oliveira, and A. S. Bretas, “Extended fault-location formulation for power distribution systems,” IEEE Trans. Power Del., vol. 24, no. 2, pp. 508-516, Apr. 2009.

- [22] Y. Liao, “Generalized fault–location methods for overhead electric distribution systems,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 1, pp. 53–64, Jan. 2011.
- [23] S. S. Gururajapathy, H. Mokhlis, and H. A. Illias, “Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review,” *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 949–958, 2017.”
- [24] Ahmed N. Sheta, Gabr Mohamed Abdulsalam, Abdelfattah Ali Eladl, "A Survey of Fault Location Techniques for Distribution Networks", *MEJ. Mansoura Engineering Journal(MEJ)*, VOL. 45, ISSUE 2, JUNE 2020
- [25] 한국전력공사, “배전분야 중장기 전략경영 계획” 2017
- [26] E. A. Reche, J. V. de Sousa, D. V. Coury, and R. A. S. Fernandes, “Data mining–based method to reduce multiple estimation for fault location in radial distribution systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, to be published
- [27] M. Mirzaei, M. Z. Kadir, E. Moazami, and H. Hizam, “Review of fault location methods for distribution power system,” *Austral. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 2670–2676, 2009.
- [28] IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group “IEEE 123 Node Test Feeder ”

감사의 글

석사과정 동안 쉽지 않은 길을 걸었지만 그만큼 많은 경험을 쌓을 수 있었으며 주변에서 많은 도움을 주셨기에 석사과정을 무사히 마칠 수 있었음을 생각하게 됩니다.

학부생부터 석사과정을 마치기까지의 대학원 생활하는 동안 항상 새로운 학문을 아낌없이 지도해 주시고 꾸준히 학문에 정진할 수 있도록 보살펴주신 황평익 교수님께 감사의 말씀 올립니다.

바쁘신 와중에서도 아낌없는 지도과 조언으로 본 논문 심사해 주신 김용재 교수님, 고필주 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 지식의 폭을 넓혀주시고 많은 격려와 조언을 해주신 최효상 교수님, 김남훈 교수님, 김재홍 교수님, 최연옥 교수님, 손운국 교수님께 감사의 말씀 올립니다.

대학원 생활을 하면서 저에게 많은 격려와 힘을 주신 박의중 선배님, 사소한 거 하나하나 알려주신 박상용 선배님, 부족한 영어를 가르쳐주신 김사라 선배님, 작업할 때 도와주신 뽀짝꺼얼 선배님께 감사의 말 전합니다. 그리고 항상 최선을 다해 사시는 용진이형에게 감사의 마음을 전합니다. 항상 든든하게 있어주는 창림이, 공부에 대한 열정이 가득한 성균이, 창의적인 효종이에게 감사의 마음을 전합니다.

항상 같은 공간인 스마트 그리드 연구실에서 서로의 학문에 발전을 위해 논문을 토론하고 같이 연구를 해온 동문이자 좋은 동생인 혜규가 있어서 석사과정 2년 동안 즐겁고 보람찬 시간을 보낼 수 있었기에 감사의 마음을 전합니다.

제 인생의 반 이상을 함께 막역지우처럼 지내온 동원이, 지상이, 태원이, 장욱이, 재성이에게 자주 만나지는 못하지만 항상 “꼭 성공하거다, 잘할 수 있다” 등으로 옆에서 힘을 써준 친구들에게 감사의 마음을 전합니다. 그리고 학부생 때부터 같이 옆에서 학업에 신경 써준 은석이, 중봉이에게도 감사의 마음을 전합니다.

대학원 입학에 있어서 저의 선택에 어릴 때부터 늘 잘해왔으니까 믿는다면
서 믿음과 신뢰를 주셨던 부모님께 감사드립니다. 요즘 늦게 집에 들어가서
마주할 시간이 드물었던 사랑하는 가족들에게 미안한 마음을 담아 감사를 표
합니다. 자주 할머니 댁에 찾아뵙지 못했지만 찾아뵈는 때마다 맛있는 음식 준
비해 주시면서 '건강이 우선이다.'라고 말씀해 주시는 할머니, 할아버지께 진
심으로 감사합니다.

지난 2년 동안 주변에 많은 분들께서 저에게 큰 힘이 되어주셨기에 석사과
정을 무사히 끝마칠 수 있었습니다. 마지막으로 책에선 배우지 못하는 부분
들을 시간이 되실 때마다 저에게 가르쳐주신 황평익 교수님께 다시 한번 감
사의 말씀 올립니다.

2021년 2월
임 청 학 올림.