



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

석사학위논문

DCU 데이터를 이용한
Forward/Backward Sweep 기반
불평형 배전계통의
선로 파라미터 추정 방법

조선대학교 대학원

전기공학과

이 혜 규

DCU 데이터를 이용한
Forward/Backward Sweep 기반
불평형 배전계통의
선로 파라미터 추정 방법

A Method for Line Parameter Estimation of Unbalanced
Distribution System based on Forward/Backward Sweep
Using DCU Data

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

전기공학과

이혜규

DCU 데이터를 이용한
Forward/Backward Sweep 기반
불평형 배전계통의
선로 파라미터 추정 방법

지도교수 황 평 익

이 논문을 전기공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

전기공학과

이 혜 규

이혜규의 석사학위 논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	高必周	
위원	조선대학교	교수	金容載	
위원	조선대학교	교수	黃珮益	

2020년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	v
I. 서 론	1
II. 불평형 배전계통 선로 파라미터 추정 기법	5
A. 문제 정식화	5
B. Forward/Backward Sweep 기반 조류계산	6
1. Nodal Current Calculation	8
2. Backward Sweep	9
3. Forward Sweep	10
C. DCU를 이용한 Forward/Backward Sweep 기반 추정 기법 ·	11
1. DCU(Data Concentrator Unit, 데이터 집중 장치)	11
2. Forward/Backward Sweep 적용 방안	12
3. Forward Sweep 기반 선로 파라미터 및 모션 전압 위상각 갱신	14
III. 사례 연구	18
A. 시뮬레이션 설계	19
1. 입/출력 데이터 정의	19

2. 부하 및 전압 이력 생성	19
3. 시뮬레이션 대상 계통	20
a. IEEE 13 Node Test Feeder	20
b. IEEE 123 Node Test Feeder	21
B. 시뮬레이션 결과	22
1. IEEE 13 Node Test Feeder의 선로 파라미터 추정 결과	22
a. 기존 기법을 이용한 선로 파라미터 추정 결과	22
b. 계측 기간별 선로 파라미터 추정 결과	24
c. 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과	25
2. IEEE 123 Node Test Feeder의 선로 파라미터 추정 결과	27
a. 계측 기간별 선로 파라미터 추정 결과	27
b. 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과	28
C. 시뮬레이션 고찰	30
IV. 결 론	31
참 고 문 헌	33
부 록	36

List of Tables

Table 1-1 ADMS Applications	3
Table 3-1 Input data	19
Table 3-2 Output data	19
Table 3-3 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder	25
Table 3-4 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters	26
Table 3-5 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder	28
Table 3-6 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters	29

List of Figures

Fig 1-1 Renewable energy 3020 implementation plan in South Korea	1
Fig 1-2 Overvoltage caused by reverse power flow	2
Fig 1-3 Change of protection scheme when the fault occurred	2
Fig 2-1 Line model in distribution system	5
Fig 2-2 Power flow analysis based on forward/backward sweep	7
Fig 2-3 Layer and branch numbering	7
Fig 2-4 Nodal current calculation	8
Fig 2-5 Backward sweep	9
Fig 2-6 Forward sweep	10
Fig 2-7 Data concentrator unit(DCU)	11
Fig 2-8 Line parameter estimation based on forward/backward sweep	13
Fig 2-9 Line model in 3-phase unbalanced distribution system	15
Fig 2-10 Renewal of line parameters and bus voltage angles based on forward sweep	15
Fig 3-1 IEEE 13 Node Test Feeder	20
Fig 3-2 IEEE 123 Node Test Feeder	21
Fig 3-3 History of voltage and load(Phase A)	22
Fig 3-4 Line parameter estimation result using conventional method	23
Fig 3-5 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder	24
Fig 3-6 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters	26
Fig 3-7 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder	27
Fig 3-8 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters	29

ABSTRACT

A Method for Line Parameter Estimation of Unbalanced Distribution System based on Forward/Backward Sweep Using DCU Data

Lee Hye-Kyu

Advisor : Prof. Hwang Pyoeng-Ik, Ph.D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, as the technology of renewable energy has been developed and policies to support the supply of renewable energy are implemented, the supply of renewable energy is increasing. Accordingly, the connection of distributed energy resource (DER) based on renewable energy to the distribution system is increasing. DERs are installed near customers, thereby reducing transmission losses and improving reliability. However, it causes various problems, such as overvoltage due to reverse power flow and protection cooperation problems in case of failure. Therefore, advanced distribution management system(ADMS) was introduced to solve these problems. ADMS enables the stable and efficient operation of the distribution system through various applications such as real-time system analysis and facility remote monitoring and control. Most of ADMS applications are designed based on the distribution system network model. With the introduction of ADMS, the distribution system needs a more accurate network model. However, the network model of distribution system is not well built up. Therefore, methods for network model estimation using the history of voltage, active power, and reactive power acquired from remote

meter reading facilities, such as advanced metering infrastructure (AMI) or data concentrator unit (DCU), which are widely spreading in distribution systems, are being studied. There are various methods for network model estimation using a remote meter reading device installed in the distribution system. One of the methods is to utilize micro phasor measurement units (μ PMUs) for the line parameter estimation. However, the μ PMU is an expensive facility, so that it requires a lot of cost to install μ PMUs to the distribution system. Therefore, a non-PMU based method for the line parameter estimation has been recently proposed. The line parameters are estimated by using the history of active power, reactive power, and the voltage magnitude, which are measured by the remote meter reading facilities. However, the conventional non-PMU based method cannot estimate the mutual impedance, because the distribution system was modeled as a three-phase balanced system. However, the actual distribution system is an unbalanced system in which the effects of mutual impedances is not negligible. Therefore, in this dissertation, a new method to estimate the line parameters including mutual impedances is proposed. The proposed method for line parameter estimation utilizes DCU data and forward/backward sweep. We test the proposed method on IEEE 13 node test feeder and IEEE 123 node test feeder using actual load patterns. The results demonstrate that the proposed method can estimate the line parameters including mutual impedances with high accuracy.

I. 서 론

최근 태양광, 풍력과 같은 신재생에너지 기술의 발달 및 신재생에너지 지원 사업 확산 등에 따라 배전계통 내 분산전원의 연계가 증가하고 있다. 신재생에너지의 보급을 촉진하기 위해 국내에서는 그림 1-1과 같이 2030년까지 재생에너지 발전량 비중을 20[%]로 확대시키는 것을 목표로 하는 재생에너지 3020 이행계획을 수립하였다 [1]. 따라서 국내 배전계통의 신재생에너지 기반 분산전원 연계는 꾸준히 증가할 것으로 전망된다.

분산전원은 수용가 인근에 설치되어 송전 손실 감소, 공급 신뢰도 향상 등 여러 가지 이점이 있는 반면, 그림 1-2와 그림 1-3과 같이 역조류에 의한 전압 문제, 고장 전류 특성 변화에 의한 보호 협조문제 등 다양한 문제를 발생시켜 계통의 불안정을 야기하기도 한다. 따라서 분산전원 연계로 인해 발생하고 있는 위의 문제들을 해결하기 위하여 배전계통에 ADMS(Advanced Distribution Management System, 차세대 배전 지능화 시스템)가 도입 및 운영되고 있다[2-5].



그림 1-1 재생에너지 3020 이행계획

Fig 1-1 Renewable energy 3020 implementation plan in South Korea

ADMS는 조류계산, 상태추정, 고장계산 등의 다양한 응용프로그램들을 이용하여 계통 운영자가 안정적이고 효율적으로 배전계통을 운영하도록 도와준다. 이러한 ADMS의 응용프로그램들은 표 1-1과 같이 구성되어 있으며 대부분 배전계통 네트워크 모델을 기반으로 설계되어 있다[5]. 따라서 ADMS를 이용한 안정적이고 경제적인 배전계통 운영을 위해서는 배전계통 모델의 정확도 향상이 필요하다. 그러나 배전계통은 그 구조가 다양하고 넓게 분포되어 있어 정확한 네트워크 모델을 구축하는데 많은 시간과 인력이 요구된다. 따라서 배전계통에 설치되어 있는 DCU(Data Concentrator Unit, 데이터 집중 장치), AMI(Advanced Metering Infrastructure, 원격 검침 인프라)등의 원격 검침 기기를 이용하여 배전계통 네트워크 모델을 추정하는 다양한 연구들이 진행되고 있다.

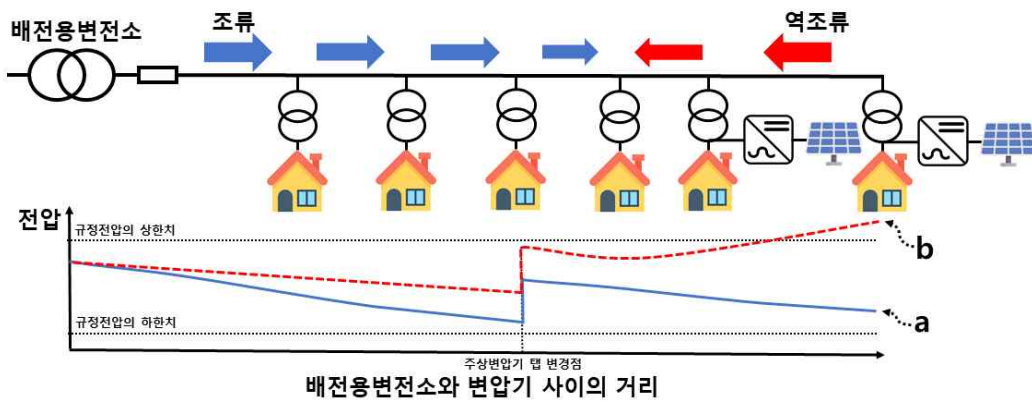


그림 1-2 역조류에 의한 과전압

Fig 1-2 Overtoltage caused by reverse power flow

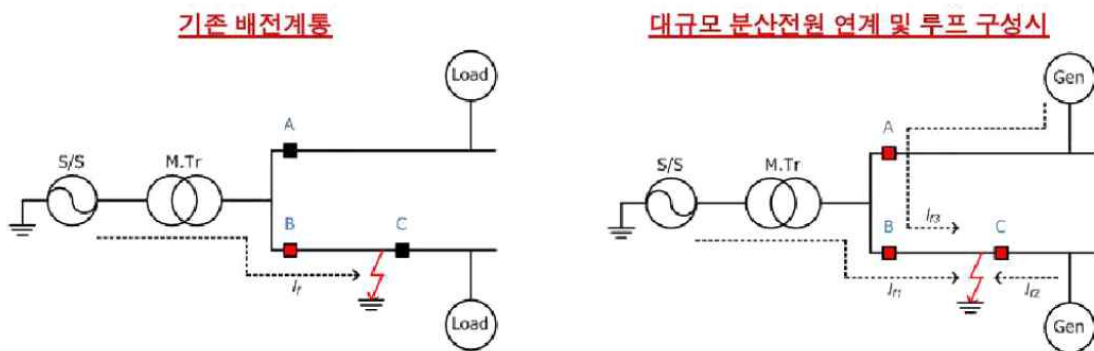


그림 1-3 고장 시 보호 방식의 변화

Fig 1-3 Change of protection scheme when the fault occurred

표 1-1 ADMS 응용프로그램
Table 1-1 ADMS applications

Solution	Function	Overview
SCADA	Distribution SCADA	· 배전계통 실시간 감시 및 제어
Outage Management System	Switch Management	· Trouble call management 및 고장예측 · 고장 데이터 관리
Network Applications	State Estimation	· 조류계산 입력 및 전압 운영 조건 결정
	Load Flow Analysis	· 미래 배전계통 검토 · 인버터 제어를 포함한 분산전원 연계 검토
	Volt-Var Optimization	· 손실 최소화를 목적으로 하는 전압 보상기기(capacitor, SVR) 제어
	Short Circuit Analysis	· 상별 단락전류 및 용량 산정
	Feeder Reconfiguration	· 손실 최소화를 목적으로 하는 최적 상시 개방점 결정
Analytics	Outage Analysis	· 고장 데이터를 통한 분석

배전계통 내 설치된 원격 검침 기기에서 취득한 데이터를 이용하여 배전계통 네트워크 모델을 추정하는 연구로는 전압 프로파일들의 k-평균 클러스터링을 이용한 상분류 기법, μ PMU를 이용한 선로 파라미터 추정 기법 그리고 뉴턴-랩슨법을 이용한 non-PMU 배전계통의 선로 파라미터 추정 기법 등이 있다[6-9]. 그러나 기존에 제안된 선로 파라미터 추정 기법들은 실제 배전계통에 적용하기에 어려움이 있다. 먼저 μ PMU를 이용한 선로 파라미터 추정 기법은 μ PMU가 고가의 측정설비이기 때문에 배전계통 전반에 설치하기에 많은 비용이 요구된다는 것이다. 이러한 한계점을 개선하기 위해 제안된 뉴턴-랩슨법을 이용한 non-PMU 선로 파라미터 추정 기법은 뉴턴-랩슨 조류계산법과 동일하게 선로의 R/X 비가 크거나 계통 구조가 방사상 구조인 경우에 반복 연산 과정에서 수렴하지 않을 수 있다[10]. 그리고 대상 계통을 3상 평형계통으로 가정하여 상호 임피던스를 추정할 수 없다. 실제 배전계통은 3상 불평형 계통이며 상호 임피던스의 영향이 큰 편이다. 상호 임피던스가 배전계통에 미치는 영향을 확인하기 위해 대표적인 배전계통 모델 중 하나인 IEEE 123 Node Test Feeder에 대하여 상호 임피던스가 존재하지 않는 경우와 상호 임피던스가 존재하는 경우의 조류계산을 시행하여 전압 차이를 비교하였다. 그 결과 상호 임피던스가 존재하는 경우와 상호 임

피턴스가 존재하지 않는 경우의 전압 차이는 평균 3.6474[%], 최대 6.0603[%]로 나타났다. 이는 배전계통에 설치되는 SVR(Step Voltage Regulator, 전압조정기)의 전압 조정률이 1탭 당 0.625[%]이므로 전압 제어 측면에서 배전계통에 미치는 상호 임피던스의 영향이 크다고 할 수 있다[11]. 따라서 배전계통에서는 상호 임피던스를 무시할 수 없으며, 상호 임피던스를 추정할 수 없는 기존 뉴턴-랩슨법 기반 선로 파라미터 추정 기법은 실제 배전계통에 적용하기에 적합하지 않다고 할 수 있다. 위와 같이 기존 배전계통 선로 파라미터 추정 기법들은 경제성, 실제 계통에 대한 적합성 문제가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 배전계통에 보급되고 있는 원격 검침 기기인 DCU를 이용하여, 이로부터 취득할 수 있는 전압 및 유/무효전력 이력과 대표적인 불평형 배전계통의 조류계산 기법인 forward/backward sweep을 응용한 방법으로 상호 임피던스를 포함한 불평형 배전계통의 선로 파라미터를 추정하는 기법을 제안하였다.

II. 불평형 배전계통 선로 파라미터 추정 기법

A. 문제 정식화

그림 2-1은 기존에 제안된 non-PMU 배전계통 선로 파라미터 추정 기법에서 정의한 배전계통의 선로 모델이다. 그림 2-1에서 모선 i 의 유입 유/무효전력(P_i, Q_i)은 모선 i 에서 다른 모선으로 흐르는 유/무효전력들의 합과 같다. 따라서 모선 n 개가 있는 계통에서 모선 i 에 유입되는 유/무효전력은 식 (2.4)와 식 (2.5)의 전력방정식으로 계산된다.

$$P_i(x) = \sum_{k=1}^n [|V_i| |V_k| (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik})] \quad (2.4)$$

$$Q_i(x) = \sum_{k=1}^n [|V_i| |V_k| (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik})] \quad (2.5)$$

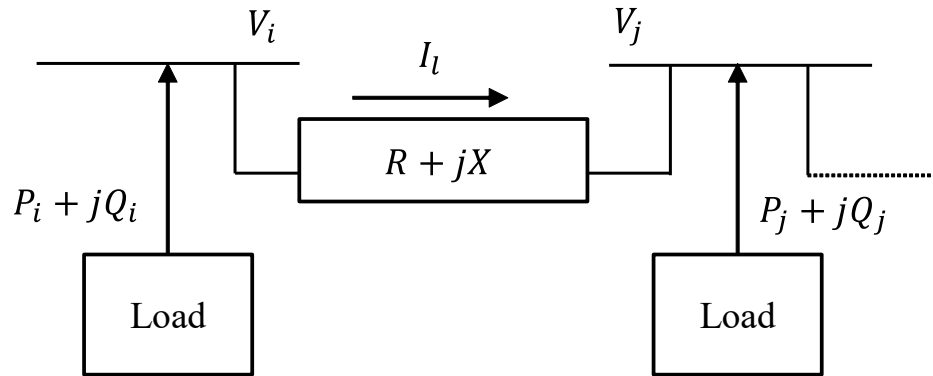


그림 2-1 배전계통의 선로 모델

Fig 2-1 Line model in distribution system

각 모선에 원격 검침 기기가 설치되어 있다면 각 모선의 전압의 크기와 각 모선에 유입되는 유/무효전력을 계측할 수 있다. 원격 검침 기기에서 각 모선의 전압과 유입 유/무효전력을 m 개 계측하였을 때, 계측된 각 시점의 모선 유입 유/무효전력과 식 (2.4), 식 (2.5)로 계산된 각 시점의 모선 유입 유/무효전력은 같아야 한다. 기존 기법에서는 이를 이용하여 선로 파라미터를 추정하기 위해 선로 파라미터(G, B)와 모선 전압 위상각(θ)을 결정변수로 하는 최적화 문제를 식 (2.6)과 같이 정의하였다.

$$\min \sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^m [(P_{k,t} - P_{k,t}(x))]^2 - [(Q_{k,t} - Q_{k,t}(x))]^2 \quad (2.6)$$

where $x = [G, B, \theta]^T$

기존에 제안된 non-PMU 배전계통 선로 파라미터 추정 기법에서는 위 식의 해를 뉴턴-랩슨법을 이용하여 추정하였다. 그러나 이 기법은 배전계통을 3상 평형으로 가정하여 상호 임피던스를 추정할 수 없고, 뉴턴-랩슨법 기반 조류계산 기법과 동일하게 계통의 구조와 선로의 R/X 비율에 따라 수렴성 문제가 발생할 가능성이 있으므로 불평형 배전계통에 적용하기에 부적합하다. 따라서 본 논문에서는 기존 기법에서 발생한 문제들을 개선하기 위해 대표적인 불평형 배전계통의 조류계산 기법인 forward/backward sweep 기법을 응용하여 상호 임피던스를 포함한 선로 파라미터를 추정하였다.

B. Forward/Backward Sweep 기반 조류계산

Forward/backward sweep 조류계산은 대표적인 불평형 배전계통의 조류계산 기법이며 계산 과정은 그림 2-2와 같다[12]. 그림 2-3은 forward/backward sweep에 사용되는 선로 번호 및 layer 번호 지정의 예를 나타낸 것이다. 각 선로의 layer는 slack 모선을 기준으로 하여 slack 모선으로부터 선로간 거리에 따라서 지정한다. Forward/backward sweep 조류계산은 모든 모선의 전압과 위상각을 slack 모선과 동일하게 설정한 후 주어진 정보(모선 유/무효전력, 계통 토폴로지, 선로 임피던스 등)를 이용한 nodal current calculation, backward sweep, forward sweep의 반복연산을 수행하여 모든 선로의 전류 및 조류 그리고 모든 모선의 전압 크기 및 위상각을 계산한다. 그리고 매 반복연산 후 계산된 전압의 변동량이 수렴 조건을 만족하면 종료한다.

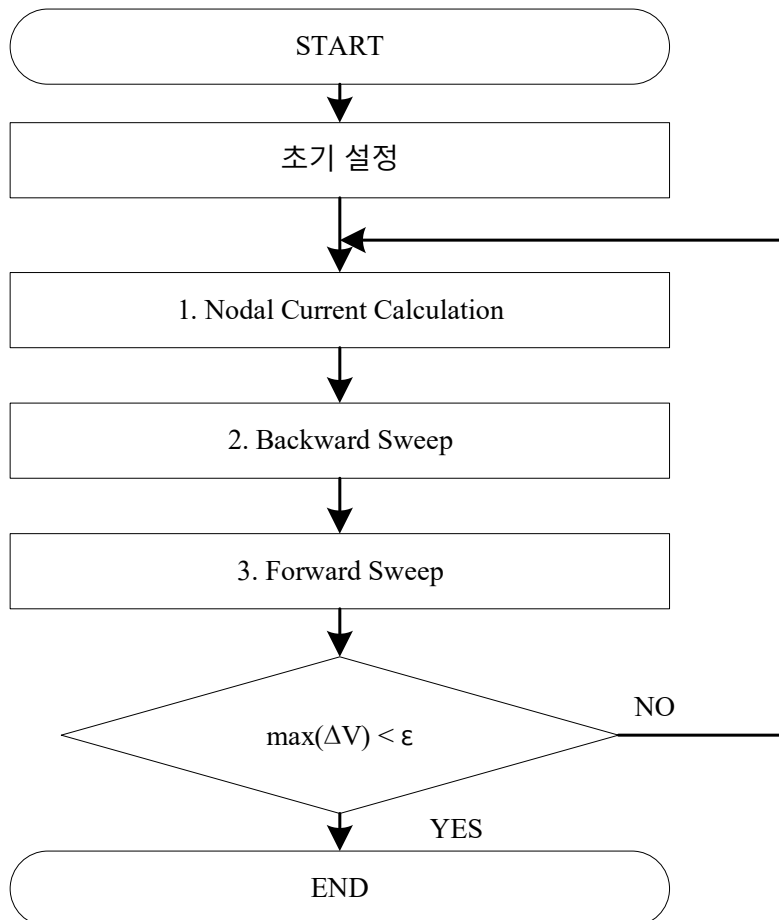


그림 2-2 Forward/backward sweep 기반 조류계산

Fig 2-2 Power flow analysis based on forward/backward sweep

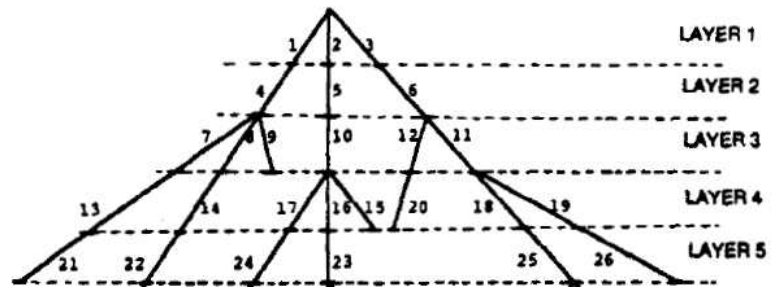


그림 2-3 Layer 및 선로 번호 지정

Fig 2-3 Layer and branch numbering

1. Nodal Current Calculation

Nodal current calculation은 부하 및 발전설비 등의 네트워크 외부 설비로부터 각 모선에 유입되는 전류를 계산하는 과정이다. 그림 2-3의 좌측과 같이 모선에 유입되는 전류(I_{inj})는 부하 전류(I_{load}), 발전 전류(I_{gen}), 모선 병렬 어드미턴스로 흐르는 전류(I_Y)로 구성되어 있다. 모선의 유입 전력(S_{inj})은 모선에 연결된 발전기에서 공급되는 전력(S_{gen})과 부하로 공급되는 전력(S_{load})의 차로 계산되며 이는 식 (2.7)과 같다.

$$S_{inj} = S_{gen} - S_{load} \quad (2.7)$$

그리고 모선 i 에 유입되는 전류 $I_{i,inj}$ 은 모선 i 의 전압이 V_i , 모선 i 의 유입 전력이 $S_{i,inj}$, 모선 병렬 어드미턴스가 Y_i 일 때, 식 (2.8)을 통해 계산된다.

$$I_{i,inj}^{(k)} = \left(\frac{S_{i,inj}^{(k)}}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i V_i^{(k-1)} \quad (2.8)$$

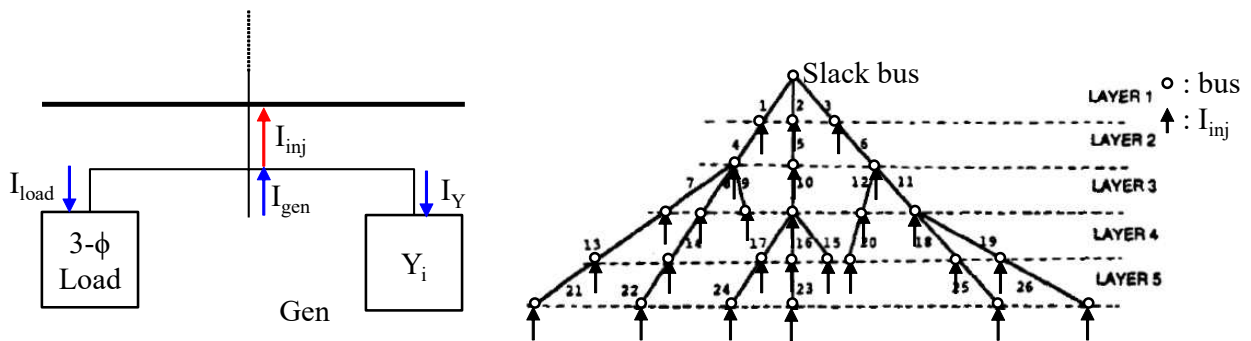


그림 2-4 Nodal current calculation

Fig 2-4 Nodal current calculation

2. Backward Sweep

그림 2-5는 backward sweep의 예시를 나타낸 것이다. 그림 2-5 우측의 선로 l 에 흐르는 전류는 KCL(Kirchhoff's Current Laws, 키르히호프의 전류법칙)에 의하여 계산된다. 따라서 선로 l 에 흐르는 전류 I_l 은 모선 유입 전류가 I_{inj} , 선로 l 의 하위에 연결된 선로들의 집합이 M 일 때, 식 (2.9)로 계산된다.

$$I_l^{(k)} = -I_{inj}^{(k)} + \sum_{m \in M} I_{l,m}^{(k)} \quad (2.9)$$

그러나 그림 2-5의 예시와 같이 선로 l 의 전류를 계산하기 위해서는 하위에 연결된 선로들의 전류를 알아야한다. 따라서 backward sweep은 그림 2-5의 좌측과 같이 최하위 layer의 선로부터 차례로 각 선로의 전류를 식 (2.9)로 계산하여 모든 선로의 전류를 갱신하는 과정이다.

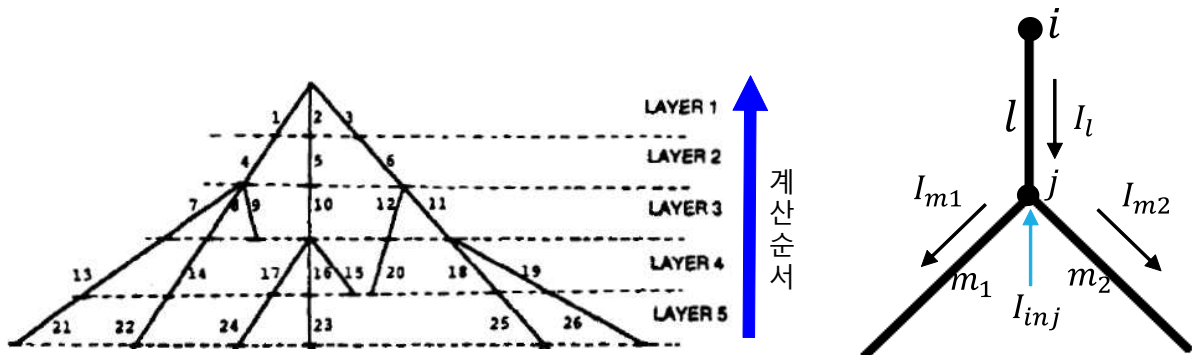


그림 2-5 Backward sweep
Fig 2-5 Backward sweep

3. Forward Sweep

그림 2-6의 우측에서 선로 하위 모선 j 의 3상 전압 $V_{j,abc}$ 는 선로 상위 모선 i 의 3상 전압이 $V_{i,abc}$, 선로 3상 임피던스가 $Z_{l,abc}$, 선로 3상 전류가 $I_{l,abc}$ 일 때, 식 (2.10)으로 계산된다.

$$V_{j,abc}^{(k)} = V_{i,abc}^{(k)} - Z_{l,abc} I_{l,abc}^{(k)} \quad (2.10)$$

$$\text{where } Z_{l,abc} = \begin{bmatrix} R_a + jX_a & R_{ab} + jX_{ab} & R_{ac} + jX_{ac} \\ R_{ab} + jX_{ab} & R_b + jX_b & R_{bc} + jX_{bc} \\ R_{ac} + jX_{ac} & R_{bc} + jX_{bc} & R_c + jX_c \end{bmatrix}$$

Forward sweep은 식 (2.10)을 이용하여 그림 2-6의 좌측과 같이 최상위 layer의 모선부터 차례로 각 모선의 전압을 계산하는 과정이다.

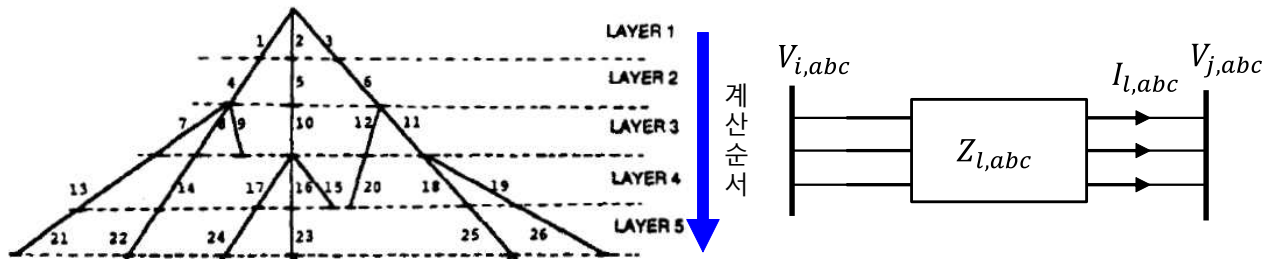


그림 2-6 Forward sweep

Fig 2-6 Forward sweep

C. DCU를 이용한 Forward/Backward Sweep 기반 추정 기법

1. DCU(Data Concentrator Unit, 데이터 집중 장치)

그림 2-7의 DCU(Data Concentrator Unit, 데이터 집중 장치)는 일반적으로 배전용 변압기에 설치되며 전력선 통신(PLC), LTE 등을 이용하여 수용가 측 스마트 미터에서 일정 주기마다 계측된 전압, 전류, 유효전력, 무효전력 등의 검침 정보를 수집 및 저장하고 이를 전력 공급자 측으로 전송하는 역할을 한다. 그리고 내장된 TDU(Transformer Diagnostic Unit, 3상 변압 감시 모듈) 회로를 통해 변압기의 전압, 전류, 역률 등을 일정 주기마다 계측 및 저장하고 서버로 전송한다[13].



그림 2-7 데이터 집중 장치(DCU)

Fig 2-7 Data concentrator unit(DCU)

2. Forward/Backward Sweep 적용 방안

본 논문에서 제안하는 forward/backward sweep 기반 선로 파라미터 추정 기법은 토폴로지를 알고 있는 배전계통의 각 모선에 설치된 DCU에서 취득한 전압 크기, 유/무효전력 이력과 forward/backward sweep 기법을 이용하여 그림 2-8의 순서로 선로 파라미터와 모선 전압의 위상각을 추정하는 기법이다. 기존 조류계산에서는 초기 모선 전압을 slack 모선과 동일하게 설정하였으나, 본 기법에서는 초기 모선 전압의 크기는 DCU에서 측정한 전압 이력으로 설정하고 초기 위상각만을 slack 모선과 동일한 3상 평형으로 설정한다. 그리고 DCU에서 측정한 유/무효전력 이력을 이용하여 기존 조류계산 기법과 동일한 방법으로 측정한 전체 이력에 대하여 nodal current calculation과 backward sweep을 수행하여 선로 전류를 갱신하고 forward sweep의 계산 순서대로 최상위 layer부터 하위 layer 순으로 선로 파라미터와 모선 전압 위상각을 갱신한다. 위 반복연산 중 계산된 선로 파라미터에 대한 잔차(residual, γ)의 변동량이 수렴 조건을 만족하면 반복연산을 종료한다.

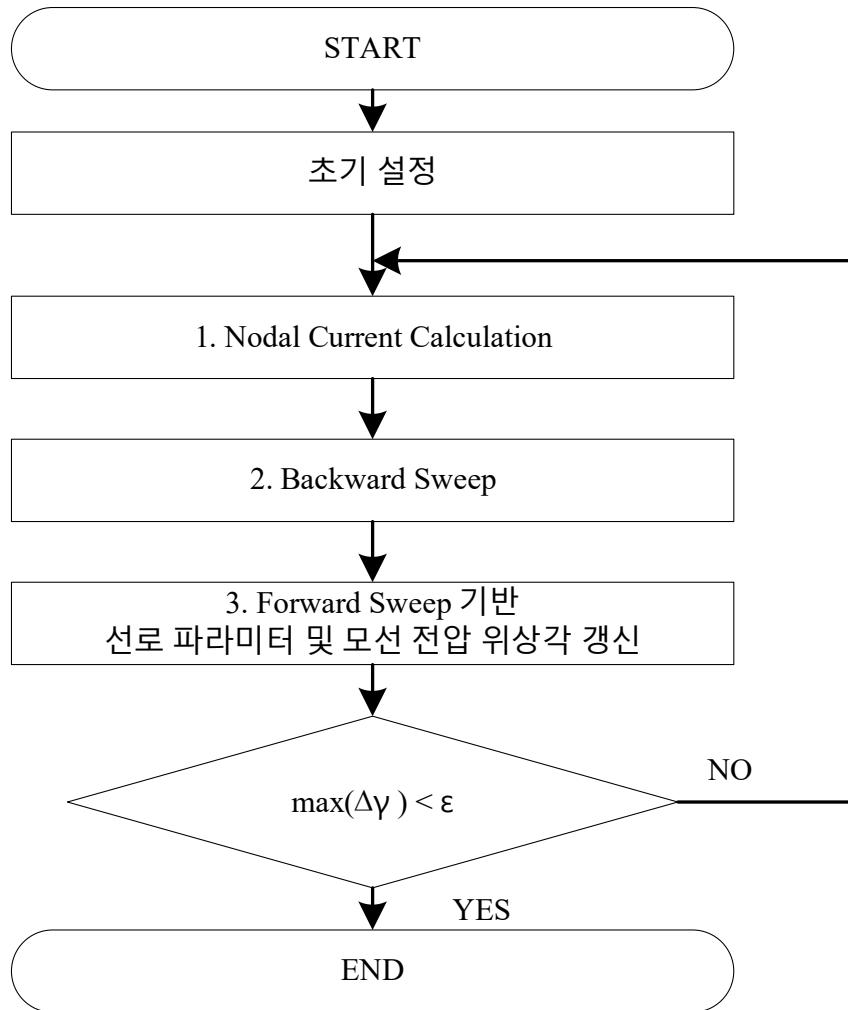


그림 2-8 Forward/backward sweep 기반 선로 파라미터 추정 기법

Fig 2-8 Line parameter estimation based on forward/backward sweep

3. Forward Sweep 기반 선로 파라미터 및 모선 전압 위상각 갱신

그림 2-9는 3상 불평형 배전계통의 선로 모델이다. π 등가 회로 모델에서는 선로 직렬 임피던스와 모선 병렬 어드미턴스가 존재한다. 그러나 배전계통의 모선 병렬 어드미턴스는 매우 작기 때문에 이를 무시할 수 있다[14]. 따라서 본 논문에서는 배전계통의 선로 모델을 그림 2-9로 정의하였다. 기존의 forward sweep에서는 계산된 상위 모선 전압과 선로 전류를 이용해 하위 모선 전압을 갱신했다. 그러나 선로 파라미터 추정 문제에서 주어진 정보는 각 모선에 설치되어진 DCU에서 측정한 모선의 전압 크기 및 유효/무효전력이다. 이를 이용하여 그림 2-9의 계통에서 선로 파라미터를 추정하기 위해 상위 모선을 slack 모선으로 가정하였다. 그리고 상위 모선 전압 크기 및 위상각, DCU에서 측정한 하위 모선 전압 크기 그리고 nodal current calculation 및 backward sweep으로 계산한 선로 전류를 이용하여 하위 모선 전압의 위상각($\theta_{V_{j,abc}}$)과 선로 파라미터(Z_{abc})를 변수로 하는 방정식을 식 (2.11)으로 정의하였다.

$$|V_{j,abc}| \angle \theta_{V_{j,abc}} = |V_{i,abc}| \angle \theta_{V_{i,abc}} - Z_{abc} |I_{abc}| \angle \theta_{I_{abc}} \quad (2.11)$$

그러나 식 (2.11)은 측정 이력의 개수가 n 개 일 때, 방정식의 개수는 $3n$ 개이며 변수의 개수는 하위 모선 전압의 위상각 이력의 개수와 선로 파라미터 구성요소 개수의 합인 $3n+6$ 개이므로 변수의 개수가 방정식의 개수보다 항상 많다. 이는 항상 과소결정계(underdetermined) 문제이므로 해를 추정하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 제안하는 기법에서는 선로 파라미터 추정 문제와 하위 모선 전압 위상각 추정 문제를 그림 2-10과 같이 분리하여 선로 파라미터와 모선 전압 위상각을 추정하였다.

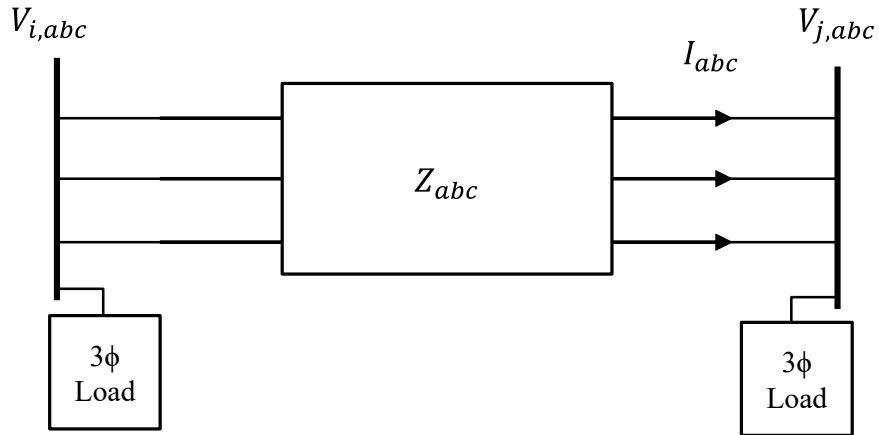


그림 2-9 3상 불평형 배전계통 선로 모델

Fig 2-9 Line model in 3-phase unbalanced distribution system

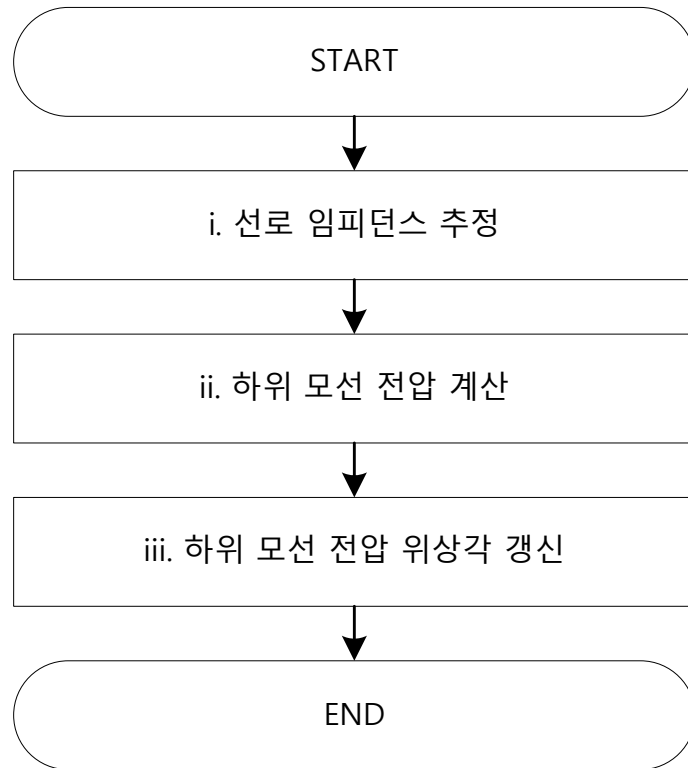


그림 2-10 Forward sweep 기반 선로 파라미터 및 모선 전압 위상각 갱신

Fig 2-10 Renewal of line parameters and bus voltage angles based on forward sweep

선로 파라미터를 추정하기 위해서는 식 (2.11)에서 선로 파라미터와 하위 모션 전압 위상각 추정 문제를 분리하여야 한다. 따라서 하위 모션 전압의 크기는 상위 모션 전압에서 선로 전압강하를 뺀 값의 크기와 같다는 것을 이용하여 식 (2.12)와 같은 방정식을 정의하였다.

$$|V_{j,abc}^{(k)}| = |V_{i,abc}^{(k)} - Z_{abc}^{(k)} I_{abc}^{(k)}| \quad (2.12)$$

where $V_{i,abc}^{(k)} = [V_{i,abc,1}^{(k)}, V_{i,abc,2}^{(k)}, \dots, V_{i,abc,n}^{(k)}]^T$, $V_{j,abc}^{(k)} = [V_{j,abc,1}^{(k)}, V_{j,abc,2}^{(k)}, \dots, V_{j,abc,n}^{(k)}]^T$,

$$I_{abc}^{(k)} = [I_{abc,1}^{(k)}, I_{abc,2}^{(k)}, \dots, I_{abc,n}^{(k)}]^T$$

위와 같이 식 (2.11)의 선로 파라미터 및 하위 모션 전압 위상각 추정 문제에서 선로 파라미터 문제를 분리하였다. 식 (2.12)의 방정식 개수는 계측 이력의 개수가 n 개 일 때 $3n$ 개 이며 변수의 개수는 선로 파라미터 구성 요소의 개수인 6개이다. 따라서 계측 이력의 개수가 3개 이상일 때 식 (2.12)는 방정식의 개수가 변수의 개수보다 많은 과도결정계(overdetermined) 문제이므로 비선형 최소제곱법(Nonlinear least squares)을 이용하여 근사해를 추정할 수 있다[15]. 따라서 식 (2.12)의 해를 추정하기 위해 선로 파라미터를 결정변수로 하는 목적함수를 다음의 식 (2.13)으로 정의하였다.

$$\min f(Z_{abc}^{(k)}) = \min \sum_{t=1}^n (|V_{i,abc,t}^{(k)} - Z_{abc}^{(k)} I_{abc,t}^{(k)}| - |V_{j,abc,t}^{(k)}|)^2 \quad (2.13)$$

식 (2.13)을 이용하여 선로 파라미터를 추정하였으므로 식 (2.14)를 이용하여 하위 모션 j 의 전압($v_{j,abc}$)을 계산할 수 있다.

$$v_{j,abc} = V_{i,abc}^{(k)} - Z_{l,abc}^{(k)} I_{l,abc}^{(k)} \quad (2.14)$$

where $v_{j,abc} = [v_{j,abc,1}, v_{j,abc,2}, \dots, v_{j,abc,n}]^T$, $V_{i,abc}^{(k)} = [V_{i,abc,1}^{(k)}, V_{i,abc,2}^{(k)}, \dots, V_{i,abc,n}^{(k)}]^T$,

$$I_{l,abc}^{(k)} = [I_{l,abc,1}^{(k)}, I_{l,abc,2}^{(k)}, \dots, I_{l,abc,n}^{(k)}]^T$$

그러나 하위 모션 j 의 전압 크기는 DCU를 통해 계측하였으므로 식 (2.14)로 계산

된 하위 모션 전압의 위상각($\theta_{v_j,abc}$)을 이용하여 식 (2.15)를 통해 하위 모션 전압의 위상각을 갱신한다.

$$V_{j,abc}^{(k)} = |V_{j,abc,mea}| \angle \theta_{v_j,abc} \quad (2.15)$$

$$\text{where } V_{j,abc}^{(k)} = [V_{j,abc,1}^{(k)}, V_{j,abc,2}^{(k)}, \dots, V_{j,abc,n}^{(k)}]^T,$$

$$|V_{j,abc,mea}| = [|V_{j,abc,mea,1}|, |V_{j,abc,mea,2}|, \dots, |V_{j,abc,mea,n}|]^T, \quad \theta_{v_j} = [\theta_{v_j,1}, \theta_{v_j,2}, \dots, \theta_{v_j,n}]^T$$

위 과정을 forward sweep의 계산 순서와 동일하게 최상위 layer부터 하위 layer 순으로 수행하여 계통 내 모든 선로 파라미터와 하위 모션 전압 위상각을 추정한다.

Ⅲ. 사례 연구

본 장에서는 앞 장에서 제안한 forward/backward sweep 기반 불평형 배전계통 선로 파라미터 추정 기법을 MATLAB을 이용하여 구현하였고 제안 기법의 성능 검증을 위해 제안 기법을 이용하여 대표적인 배전계통 예제 계통인 IEEE 13 Node Test Feeder와 IEEE 123 Node Test Feeder의 선로 파라미터를 추정하였다[16-17]. 그리고 본 논문에서 제안하는 기법을 이용하여 추정한 선로 파라미터의 정확도를 분석하기 위해 대상 계통의 전압 및 부하 이력의 계측 기간에 따라 추정된 선로 파라미터 (R_{esti} , X_{esti})와 실제 선로 파라미터(R_{real} , X_{real})간 오차율을 식 (3.1)과 식 (3.2)를 이용하여 계산하였고, 각 계측 기간별 계산한 선로 파라미터 오차율을 통해 계측 기간이 선로 파라미터 추정 결과에 미치는 영향을 확인하였다.

$$R_{error,\%} = \left| \frac{R_{real} - R_{esti}}{R_{real}} \right| \times 100[\%] \quad (3.1)$$

$$X_{error,\%} = \left| \frac{X_{real} - X_{esti}}{X_{real}} \right| \times 100[\%] \quad (3.2)$$

또한 이력 계측 기간 별 추정된 선로 파라미터를 이용한 계통 해석의 정확도를 분석하기 위해 추정된 선로 파라미터와 실제 선로 파라미터를 이용하여 각각 조류계산을 시행하였다. 그리고 조류계산을 통해 계산된 모선 전압을 비교하기 위해 식 (3.3)과 식 (3.4)를 통해 모선 전압 크기 및 모선 전압 위상각 오차를 계산하였다.

$$V_{mag,error,\%} = \left| \frac{|V_{real}| - |V_{esti}|}{|V_{real}|} \right| \times 100[\%] \quad (3.3)$$

$$\theta_{v,error} = |\theta_{v,real} - \theta_{v,esti}|[^\circ] \quad (3.4)$$

A. 시뮬레이션 설계

1. 입/출력 데이터 정의

a. 입력 데이터

입력 데이터는 DCU에서 취득할 수 있는 모선 전압 및 유/무효전력 이력, 그리고 대상 계통의 모선 및 토폴로지 정보이며 표 3-1과 같다.

표 3-1 입력 데이터

Table 3-1 Input Data

번호	데이터 명
1	모선 전압 이력(measured)
2	유효전력 이력(measured)
3	무효전력 이력(measured)
4	계통 토폴로지 정보
5	모선 정보

b. 출력 데이터

출력 데이터는 추정된 선로 임피던스와 갱신된 모선 전압 이력이며 표 3-2와 같다.

표 3-2 출력 데이터

Table 3-2 Output Data

번호	데이터 명
1	선로 3상 임피던스
2	모선 전압 이력(updated)

2. 부하 및 전압 이력 생성

먼저, 실제 계측된 1일~336일간의 부하 패턴을 대상 계통의 부하에 무작위로 적용하여 10개 case의 유효전력 이력을 생성하였다. 그리고 무작위로 생성되어진 유효전력

에 대해 역률 95~99[%]를 갖도록 각 case별 무효전력 이력을 무작위로 생성하였다. 대상 계통의 슬랙 모션(Slack bus) 전압 이력은 각 case별로 모든 시구간에 대해 0.95 ~ 1.05 [p.u] 이내의 값을 갖는 무작위의 패턴을 생성하여 이를 적용하였다. 슬랙 모션을 제외한 각 모션의 전압 이력은 대상 계통의 생성된 부하 이력 및 슬랙 모션 전압 이력, 선로 및 노드 정보를 입력데이터로 forward/backward sweep 조류계산을 시행하여 생성하였다. 그리고 생성한 전압 및 부하 이력은 계측 오차를 고려하지 않았다.

3. 시뮬레이션 대상 계통

a. IEEE 13 Node Test Feeder

그림 3-1은 IEEE 13 Node Test Feeder의 계통도이다. 기준 전압은 4.16 [kV], 기준 전력은 5,000 [kVA]이며, 총 12개의 선로와 13개의 모션으로 구성되어 있다 [16].

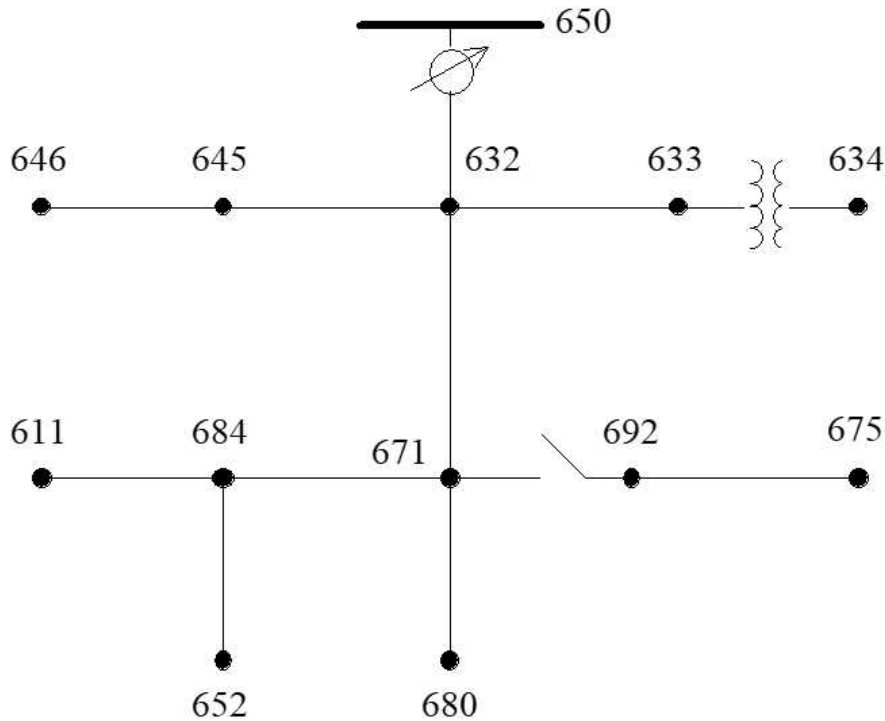


그림 3-1 IEEE 13 모션 계통

Fig 3-1 IEEE 13 Node Test Feeder

b. IEEE 123 Node Test Feeder

그림 3-2는 IEEE 123 Node Test Feeder의 계통도이다. 기준 전압은 4.16 [kV], 기준 전력은 5,000 [kVA]이며, 총 118개의 선로와 119개의 모션으로 구성되어 있다 [17].

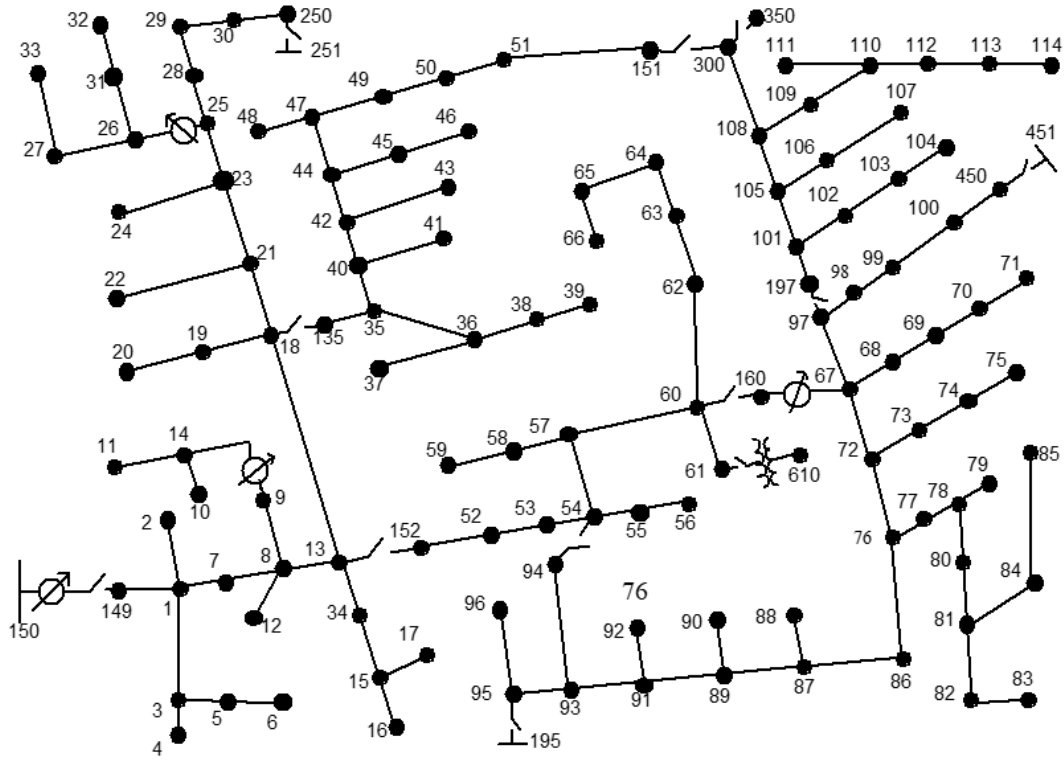


그림 3-2 IEEE 123 모션 계통

Fig 3-2 IEEE 123 Node Test Feeder

B. 시뮬레이션 결과

1. IEEE 13 Node Test Feeder의 선로 파라미터 추정 결과

a. 기존 기법을 이용한 선로 파라미터 추정 결과

그림 3-3은 선로 파라미터를 추정하기 위해 무작위로 생성한 A상 전압 및 유/무효전력 이력의 예시이다. 그림 3-4는 기존에 제안된 non-PMU 배전계통 선로 파라미터 추정 기법을 이용하여 선로 파라미터를 추정하였을 때, 매 반복연산 마다 계산된 수렴 판단 지표 $\sum(\Delta M^2)$ 의 값을 나타낸 것이다. 기존 기법을 이용하여 선로 파라미터를 추정한 결과, 그림 3-4와 같이 수렴 판단 지표($\sum(\Delta M^2)$)가 모든 case에서 수렴하지 못하고 진동하거나 발산한 것을 확인하였다.

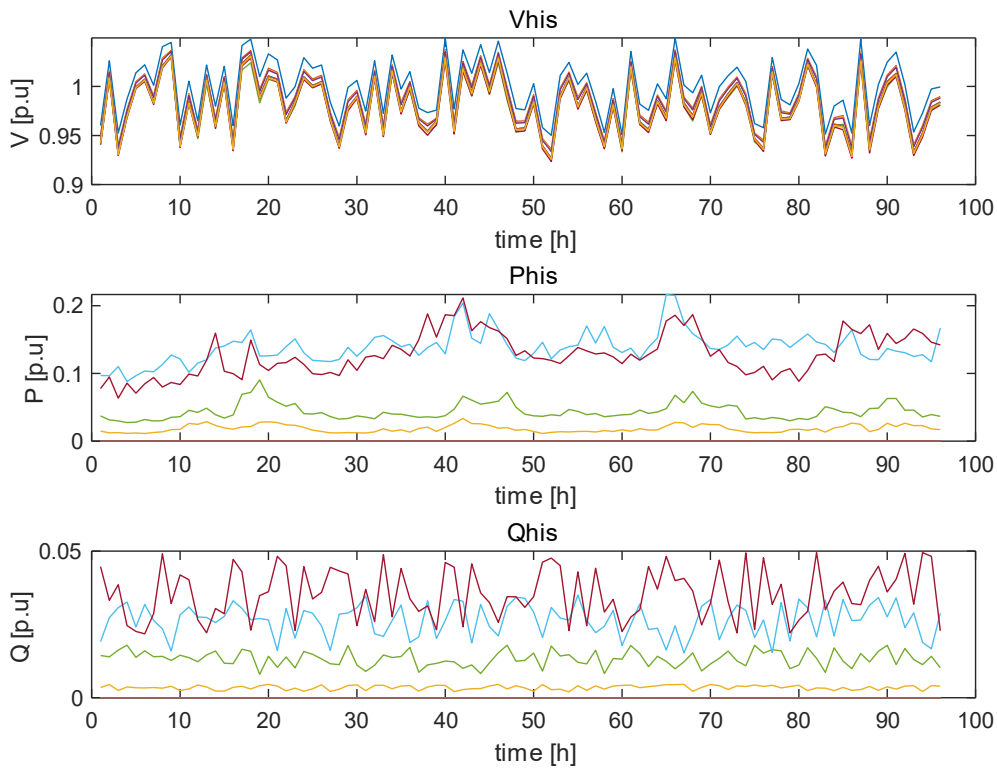


그림 3-3 전압 및 부하 이력(A상)

Fig 3-3 History of voltage and load(Phase A)

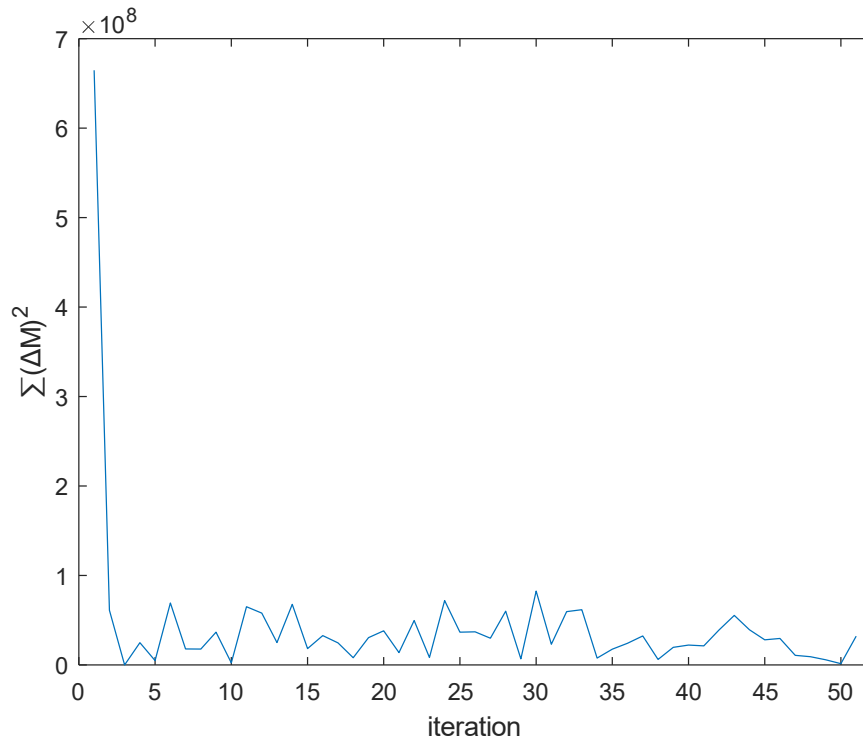


그림 3-4 기존 기법을 이용한 선로 파라미터 추정 결과

Fig 3-4 Line parameter estimation result using conventional method

b. 계측 기간별 선로 파라미터 추정 결과

IEEE 13 node test feeder의 개별 모선 부하 패턴을 무작위로 선정하여 10개 case의 전압 및 유/무효전력 이력을 생성하고 모든 case에 대해 계측 기간에 따라 선로 파라미터를 제안한 기법을 이용하여 추정된 결과를 그림 3-5와 표 3-3으로 나타내었다.

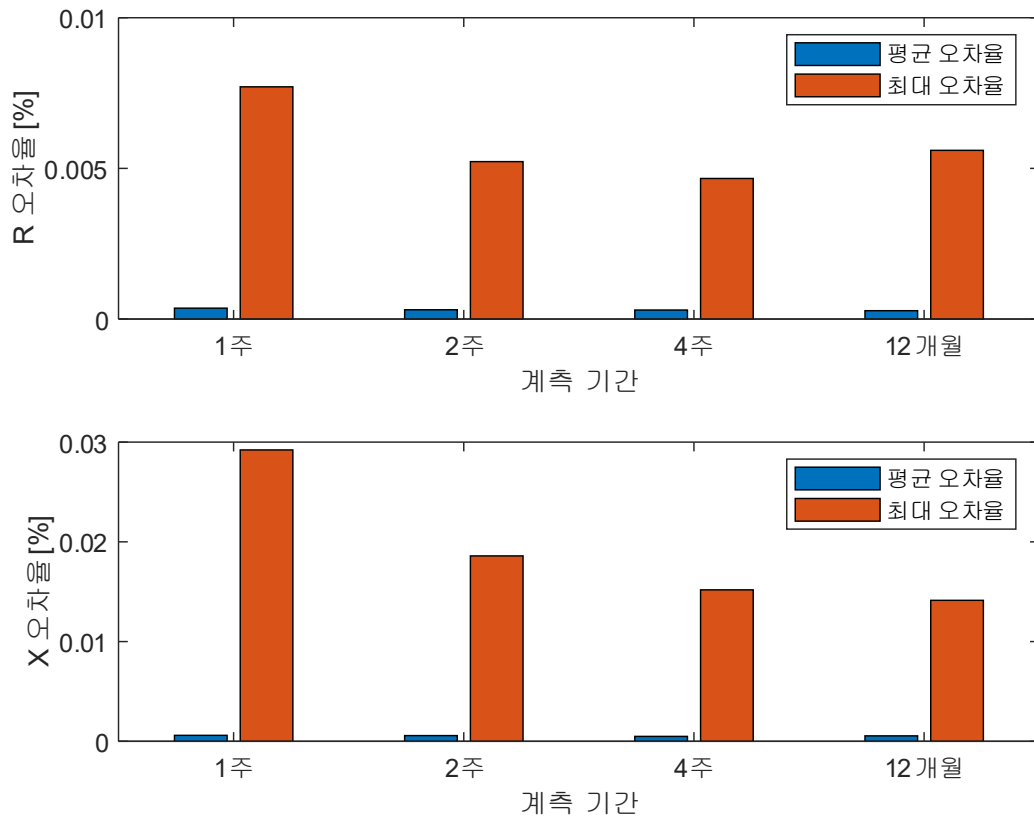


그림 3-5 IEEE 13 모선 계통의 선로 파라미터 추정 결과

Fig 3-5 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder

표 3-3 IEEE 13 모선 계통의 선로 파라미터 추정 결과

Table 3-3 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder

계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
	평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
168(1주)	3.63×10^{-4}	7.71×10^{-3}	6.11×10^{-4}	2.92×10^{-2}
336(2주)	3.08×10^{-4}	5.23×10^{-3}	5.72×10^{-4}	1.86×10^{-2}
672(4주)	3.01×10^{-4}	4.67×10^{-3}	4.96×10^{-4}	1.52×10^{-2}
8064(12개월)	2.81×10^{-4}	5.60×10^{-3}	5.58×10^{-4}	1.41×10^{-2}

계측 기간별 IEEE 13 node test feeder의 선로 파라미터를 추정한 결과 모든 계측 기간과 모든 case에 대해 저항 오차 7.71×10^{-3} [%], 리액턴스 오차 2.92×10^{-2} [%] 이 내로 선로 파라미터를 추정할 수 있었다. 각 case별 선로 파라미터 추정 결과는 부록에 기재하였다.

c. 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과

IEEE 13 node test feeder의 계측 기간별 추정된 선로 파라미터를 이용한 계통 해석의 정확도를 분석하기 위하여 실제 선로 파라미터와 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산을 시행하였고 그 결과를 비교하였다. 이는 그림 3-5와 표 3-4에 나타내었다.

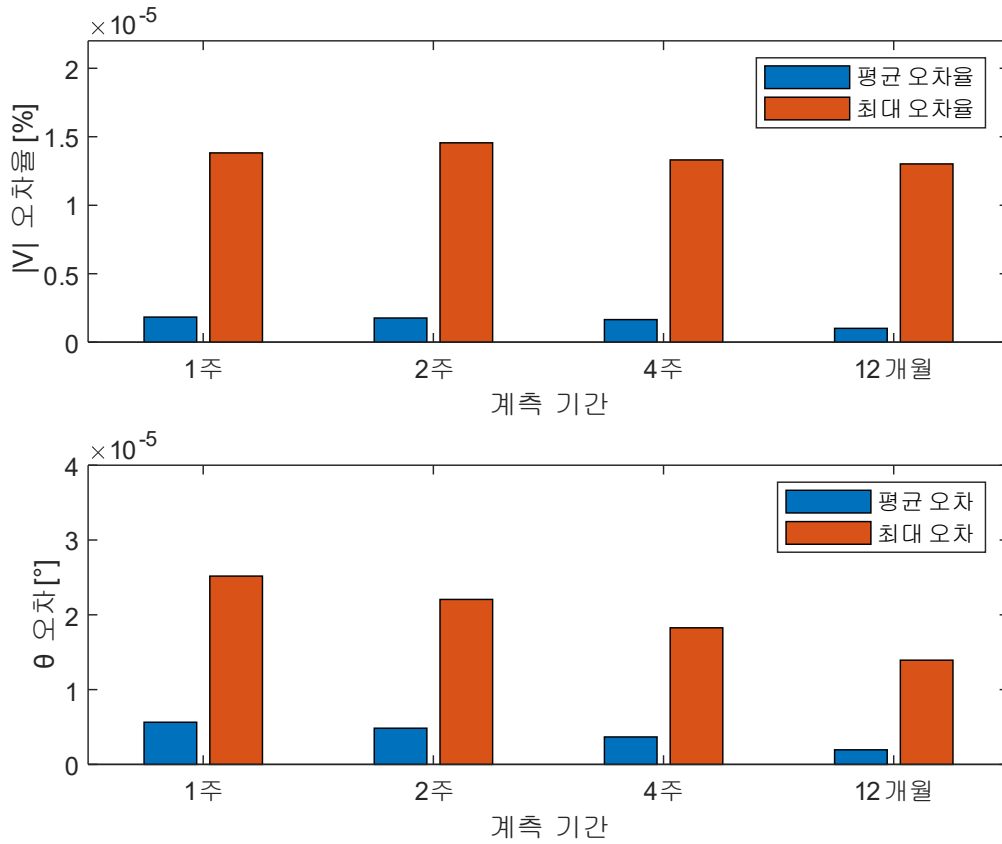


그림 3-6 IEEE 13 모선 계통의 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과
 Fig 3-6 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters

표 3-4 IEEE 13 모선 계통의 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과
 Table 3-4 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters

계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
	평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
168(1주)	1.84×10^{-6}	1.38×10^{-5}	5.65×10^{-6}	2.52×10^{-5}
336(2주)	1.77×10^{-6}	1.46×10^{-5}	4.85×10^{-6}	2.21×10^{-5}
672(4주)	1.65×10^{-6}	1.33×10^{-5}	3.67×10^{-6}	1.83×10^{-5}
8064(12개월)	1.02×10^{-7}	1.30×10^{-5}	1.96×10^{-6}	1.39×10^{-5}

계측 기간별로 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산을 시행하여 계통 해석의 정확도를 분석한 결과 모든 계측 기간과 모든 case에 대해 전압 크기 오차 $1.46 \times 10^{-5}[\%]$, 전압 위상각 오차 $2.52 \times 10^{-5}[^\circ]$ 이내로 나타났다. 각 case별 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과는 부록에 기재하였다.

2. IEEE 123 Node Test Feeder의 선로 파라미터 추정 결과

a. 계측 기간별 선로 파라미터 추정 결과

IEEE 123 node test feeder의 개별 모선 부하 패턴을 무작위로 선정하여 10개 case의 전압 및 유/무효전력 이력을 생성하고 모든 case에 대해 계측 기간에 따라 선로 파라미터를 추정한 결과를 그림 3-7과 표 3-5로 나타내었다.

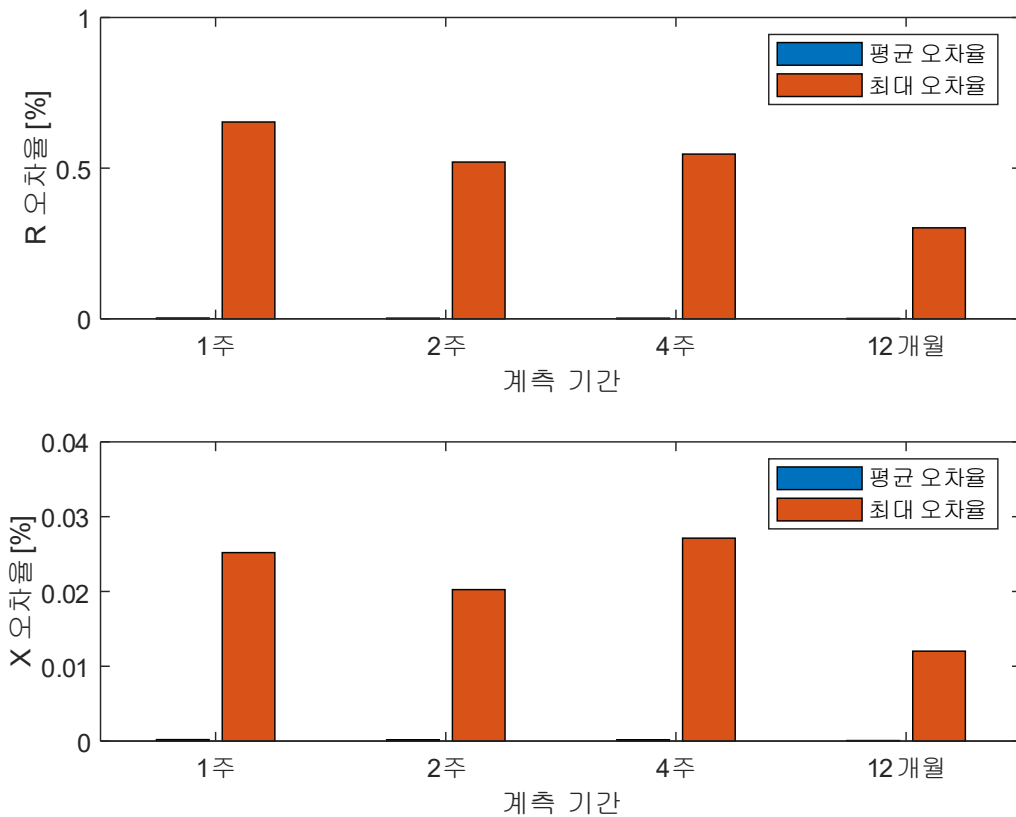


그림 3-7 IEEE 123 모선 계통의 선로 파라미터 추정 결과

Fig 3-7 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder

표 3-5 IEEE 123 모선 계통의 선로 파라미터 추정 결과

Table 3-5 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder

계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
	평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
168(1주)	2.67×10^{-3}	0.6532	2.10×10^{-4}	2.52×10^{-2}
336(2주)	2.25×10^{-3}	0.5205	1.81×10^{-4}	2.02×10^{-2}
672(4주)	2.43×10^{-3}	0.5469	1.79×10^{-4}	2.71×10^{-2}
8064(12개월)	1.31×10^{-3}	0.3020	8.10×10^{-5}	1.20×10^{-2}

계측 기간별 IEEE 123 node test feeder의 선로 파라미터를 추정한 결과 모든 계측 기간과 모든 case에 대해 저항 오차 0.6532[%], 리액턴스 오차 2.71×10^{-2} [%] 이내로 선로 파라미터를 추정할 수 있었다. 각 case별 선로 파라미터 추정 결과는 부록에 기재하였다.

b. 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과

IEEE 123 node test feeder의 계측 기간별 추정된 선로 파라미터를 이용한 계통 해석의 정확도를 분석하기 위하여 실제 선로 파라미터와 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산을 시행하였고 그 결과를 비교하였다. 이는 그림 3-8과 표 3-6에 나타내었다.

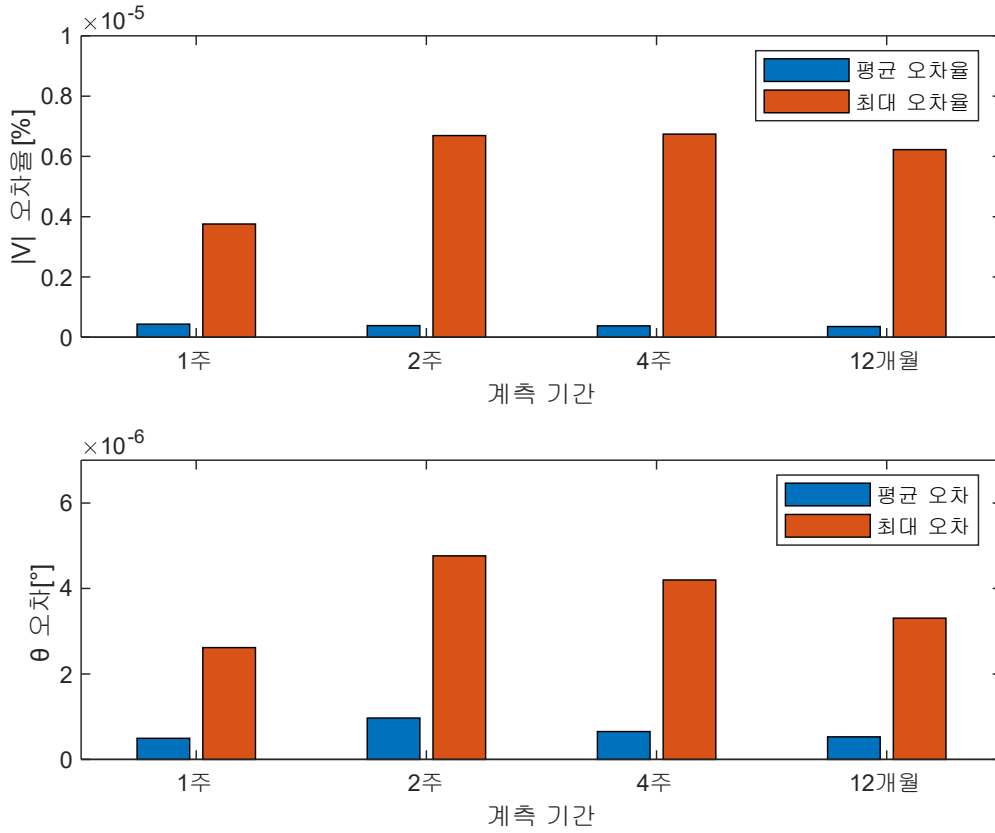


그림 3-8 IEEE 123 모선 계통의 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과
Fig 3-8 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters

표 3-6 IEEE 123 모선 계통의 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과
Table 3-6 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters

계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
	평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
168(1주)	2.04×10^{-6}	1.18×10^{-5}	5.57×10^{-6}	2.29×10^{-5}
336(2주)	1.79×10^{-6}	1.28×10^{-5}	4.50×10^{-6}	1.93×10^{-5}
672(4주)	1.62×10^{-6}	1.17×10^{-5}	3.35×10^{-6}	1.54×10^{-5}
8064(12개월)	8.57×10^{-7}	1.10×10^{-5}	1.50×10^{-6}	1.02×10^{-5}

계측 기간별로 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산을 시행하여 계통 해석의 정확도를 분석한 결과 모든 계측 기간과 모든 case에 대해 전압 크기 오차 $1.28 \times 10^{-5} [\%]$, 전압 위상각 오차 $2.29 \times 10^{-5} [^\circ]$ 이내로 나타났다. 각 case별 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과는 부록에 기재하였다.

C. 시뮬레이션 고찰

본 논문에서 제안하는 기법의 성능을 검증하기 위해 IEEE 13 node test feeder와 IEEE 123 node test feeder에 대해 전압 이력 및 유/무효전력 이력의 계측 기간에 따라 선로 파라미터를 추정하였다. 그리고 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과를 통해 계측 기간별 계통 해석의 정확도를 확인하였다. 먼저, 기존 기법을 이용하여 선로 파라미터를 추정한 결과 모든 case에서 수렴 판단 지표가 진동하거나 발산하여 수렴하지 않았고 오차 또한 크게 발생하였다. 이를 통해 기존 기법은 불평형 계통에 부적합하다는 것을 확인하였다. 그리고 본 논문에서 제안한 기법으로 각 계통의 선로 파라미터를 추정하였을 때, 공통적으로 전압 이력 및 유/무효전력의 계측 기간이 길어질수록 선로 파라미터의 평균 오차율이 낮아지는 것을 확인했다. 반면 일부 case에서 계측 기간이 길어질수록 선로 파라미터의 최대 오차율은 증가 또는 감소하였다. 선로 파라미터의 최대 오차율이 평균 오차율에 비해 크게 발생하였던 IEEE 123 node test feeder의 경우, 실제 선로 파라미터의 값이 매우 작은 선로가 존재하여 해당 선로의 오차율이 크게 계산되었다. 이는 다른 선로 파라미터 추정 결과의 평균 오차율에 비해 다소 큰 수치이지만 실제 값은 계통에 영향을 미치지 않는 수준임을 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산 결과를 통해 확인하였다. 추정된 선로 파라미터를 이용한 조류계산을 통해 계산된 모션 전압 크기 및 모션 전압 위상각 평균 오차는 모든 case에서 계측 기간이 길어질수록 감소하였다. 일부 case에서 선로 파라미터와 모션 전압 크기 및 위상각 최대 오차가 계측 기간이 길어질수록 오히려 커지는 경우도 있었으나 증가 폭이 매우 작아 계통 해석 결과에 영향을 주지 않는 수준이었다. 따라서 DCU에서 계측한 전압 크기 및 유/무효전력의 계측 기간이 길어질수록 선로 파라미터 추정 정확도가 향상되는 경향이 있다고 할 수 있다.

IV. 결 론

최근 ADMS의 도입 및 운영에 따라 배전계통 네트워크 모델의 중요성이 대두되었다. 이에 따라 AMI, DCU와 같은 원격 검침 설비를 이용하여 배전계통 네트워크 모델을 추정하는 기법들의 연구가 진행되었다. 그러나 기존 기법은 배전계통을 3상 평형 계통으로 가정하였다. 따라서 기존 기법을 이용하여 선로 파라미터를 추정하는 경우 상호 임피던스를 추정할 수 없다. 또한 기존 기법은 뉴턴-랩슨법을 기반으로 하여 뉴턴-랩슨법 기반 조류계산 기법과 동일하게 계통 구조 및 선로 R/X의 비율에 따라 수렴성 문제가 발생할 수 있다. 따라서 기존 기법은 3상 불평형이며 선로 R/X 비율이 크고 방사상 구조인 실제 배전계통에 적합하지 않다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 DCU를 이용한 forward/backward sweep 기반 불평형 배전계통의 선로 파라미터 추정 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 기법은 DCU에서 취득한 전압 크기 및 유/무효전력 이력과 배전계통에서 일반적으로 사용되는 forward/backward sweep 조류계산 기법을 응용하여 상호 임피던스를 포함한 선로 3상 임피던스를 추정하는 기법이다. 그리고 본 기법의 검증을 위해 IEEE 13 node test feeder와 IEEE 123 node test feeder에 대해 각각 총 12개월의 전압 및 유/무효전력 이력을 생성하여 선로 파라미터를 추정하였다.

기존 기법을 이용하여 IEEE 13 node test feeder의 선로 파라미터를 추정한 결과 모든 case에서 진동하거나 발산하였고 오차 또한 크게 발생하였다. 이를 통해 기존 기법은 불평형 배전계통에 부적합하다는 것을 확인하였다. 그리고 본 논문에서 제안한 기법을 이용하여 선로 파라미터를 추정한 결과 계측 기간이 길어질수록 추정된 선로 파라미터의 평균 오차율이 감소하였다. 추정된 선로 파라미터를 이용한 계통 해석의 정확도를 분석하기 위해 계측 기간별 추정된 선로 파라미터를 이용하여 조류계산을 시행하였다. 그 결과 계측 기간이 길어질수록 모선 전압 평균 오차율 및 위상각 오차가 감소하였다. 마찬가지로 IEEE 123 node test feeder의 선로 파라미터 추정 결과 계측 기간이 길어질수록 선로 파라미터의 평균 오차율이 감소하였으며 최대 오차율은 증가 또는 감소하였다. 그리고 추정된 파라미터를 이용하여 조류계산을 시행한 결과, 계측 기간이 길어질수록 모선 전압 및 위상각의 평균 오차가 감소하였다. 계측 기간에 따라 추정된 선로 파라미터의 오차율 및 전압의 최대 오차율이 증가하는 경우도 있으나, 실제 선로 파라미터 값과 추정된 선로 파라미터 값의 차이가 계측 결과에 영향을 주지 않을 정도로 매우 작고 최대 오차율의 증가 폭 매우 작아 실제 계통에 미치는 영향은 미미하며 선로 파라미터 및

모선 전압의 평균 오차율이 감소하였기 때문에 계측 기간이 길어질수록 추정된 선로 파라미터의 정확도 및 계통 해석의 정확도가 향상되는 경향이 있다고 할 수 있다.

위와 같은 사례연구를 통해 본 논문에서 제안하는 DCU를 이용한 forward/backward sweep 기반 불평형 배전계통 선로 파라미터 추정 방법으로 상호 임피던스를 포함한 불평형 배전계통의 선로 파라미터를 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다. 그러나 본 논문에서 제안한 기법은 DCU와 같은 원격 검침 기기에서 계측한 전압 및 유/무효전력 이력의 계측 오차를 고려하지 않았다. 따라서 실제 배전계통에 적용하기 위해서는 원격 검침 기기의 계측 오차가 추정 결과에 미치는 영향에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 산업통상자원부, “재생에너지 3020 이행계획(안)”, 2017.
- [2] R. J. Bravo, R. Salas, T. Bialek and C. Sun, “Distributed energy resources challenges for utilities,” 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans, LA, 2015, pp. 1–5
- [3] A. P. S. Meliopoulos, E. Polymeneas, Z. Tan, R. Huang and D. Zhao, “Advanced Distribution Management System,” in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 4, pp. 2109–2117, Dec. 2013
- [4] Yang-Hyun Nam, Sung-Sik Choi, Min-Kwan Kang, Hu-Dong Lee, Ji-Hyun Park, Dae-Seok Rho, “A Study on the Large-scale Adoption Method of Distribution System Interconnected with PV System by Energy Storage System,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers KIEE Vol. 67, No.8, p.1031–1039, May 2018
- [5] 한국전력공사 전력연구원, “차세대 DMS 구축방안 연구”, Dec 2016
- [6] W. Wang, N. Yu, B. Foggo, J. Davis and J. Li, "Phase Identification in Electric Power Distribution Systems by Clustering of Smart Meter Data," 2016 15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Anaheim, CA, pp. 259–265, 2016
- [7] B. Das, "Estimation of Parameters of a Three-Phase Distribution Feeder," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 4, pp. 2267–2276, Oct. 2011

- [8] P. A. Pegoraro, K. Brady, P. Castello, C. Muscas and A. von Meier, "Line Impedance Estimation Based on Synchrophasor Measurements for Power Distribution Systems," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 4, pp. 1002–1013, April 2019
- [9] J. Zhang, Y. Wang, Y. Weng and N. Zhang, "Topology Identification and Line Parameter Estimation for Non-PMU Distribution Network: A Numerical Method," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 5, pp. 4440–4453, Sept. 2020.
- [10] S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik and G. S. Hope, "Load-Flow Solutions for Ill-Conditioned Power Systems by a Newton-Like Method," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3648–3657, Oct. 1982
- [11] Hyun-Ok Lee, Jae-Sun Huh, Byung-Ki Kim, Dae-Seok Rho, Jae-Chul Kim, "Improvement Method of SVR Control in Power Distribution System Interconnected Distributed Generator," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 2, pp. 224–229, Feb. 2014
- [12] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 671–679, May 1995.
- [13] 정보통신기획평가원, "주간 기술 동향" vol. 1804, pp. 2–14, July 2017
- [14] William H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis" CRC Press, pp. 122, 2002

- [15] Dennis, J. E. Jr. “Nonlinear Least–Squares.” State of the Art in Numerical Analysis, ed. D. Jacobs, Academic Press, pp. 269–312.
- [16] IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group, “IEEE 13 Node Test Feeder,”
- [17] IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group, “IEEE 123 Node Test Feeder,”

부 록

A. IEEE 13 Node Test Feeder 선로 파라미터 추정 결과

Table A-1 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 1)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
1	168(1주)	2.2903×10^{-4}	0.0010	2.7429×10^{-4}	0.0026
	336(2주)	2.5256×10^{-4}	0.0017	4.6811×10^{-4}	0.0055
	672(4주)	1.8441×10^{-4}	0.0018	3.1975×10^{-4}	0.0049
	8064(12개월)	2.5722×10^{-4}	0.0046	6.6150×10^{-4}	0.0094

Table A-2 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 1)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
1	168(1주)	2.0441×10^{-6}	1.1810×10^{-5}	5.5701×10^{-6}	2.2957×10^{-5}
	336(2주)	1.7900×10^{-6}	1.2871×10^{-5}	4.5012×10^{-6}	1.9347×10^{-5}
	672(4주)	1.6284×10^{-6}	1.1722×10^{-5}	3.3551×10^{-6}	1.5414×10^{-5}
	8064(12개월)	8.5729×10^{-7}	1.1061×10^{-5}	1.5031×10^{-6}	1.0279×10^{-5}

Table A-3 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 2)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
2	168(1주)	3.5685×10^{-4}	0.0049	6.0301×10^{-4}	0.0128
	336(2주)	3.6497×10^{-4}	0.0040	5.0230×10^{-4}	0.0105
	672(4주)	4.2655×10^{-4}	0.0047	6.1904×10^{-4}	0.0141
	8064(12개월)	3.3481×10^{-4}	0.0056	6.9525×10^{-4}	0.0141

Table A-4 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 2)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
2	168(1주)	1.6200×10^{-6}	9.8943×10^{-6}	5.2935×10^{-6}	2.0716×10^{-5}
	336(2주)	1.6557×10^{-6}	1.1618×10^{-5}	4.6396×10^{-6}	2.1196×10^{-5}
	672(4주)	1.5551×10^{-6}	1.0525×10^{-5}	3.5124×10^{-6}	1.7354×10^{-5}
	8064(12개월)	1.0591×10^{-6}	1.2208×10^{-5}	2.1051×10^{-6}	1.3938×10^{-5}

Table A-5 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 3)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
3	168(1주)	2.5307×10^{-4}	0.0012	2.5772×10^{-4}	0.0020
	336(2주)	2.4029×10^{-4}	0.0013	2.4012×10^{-4}	0.0030
	672(4주)	2.1119×10^{-4}	7.1539×10^{-4}	2.1041×10^{-4}	0.0028
	8064(12개월)	2.4485×10^{-4}	0.0024	2.8414×10^{-4}	0.0073

Table A-6 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 3)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
3	168(1주)	1.7746×10^{-6}	1.1210×10^{-5}	6.0539×10^{-6}	2.3229×10^{-5}
	336(2주)	1.7925×10^{-6}	1.2000×10^{-5}	5.3765×10^{-6}	2.0083×10^{-5}
	672(4주)	1.7332×10^{-6}	1.1213×10^{-5}	4.0040×10^{-6}	1.5870×10^{-5}
	8064(12개월)	1.1343×10^{-6}	1.1506×10^{-5}	2.1594×10^{-6}	1.0689×10^{-5}

Table A-7 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 4)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
4	168(1주)	5.3098×10^{-4}	0.0077	0.0017	0.0292
	336(2주)	2.7322×10^{-4}	0.0052	9.2344×10^{-4}	0.0091
	672(4주)	2.8207×10^{-4}	0.0032	7.1500×10^{-4}	0.0078
	8064(12개월)	2.8329×10^{-4}	0.0053	8.0339×10^{-4}	0.0098

Table A-8 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 5)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
4	168(1주)	1.3584×10^{-6}	7.9508×10^{-6}	3.8468×10^{-6}	2.0177×10^{-5}
	336(2주)	1.2014×10^{-6}	8.5401×10^{-6}	3.0908×10^{-6}	1.7459×10^{-5}
	672(4주)	1.0301×10^{-6}	7.7435×10^{-6}	2.3487×10^{-6}	1.4146×10^{-5}
	8064(12개월)	8.3355×10^{-7}	1.1185×10^{-5}	1.6899×10^{-6}	1.2690×10^{-5}

Table A-9 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 5)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
5	168(1주)	2.0909×10^{-4}	0.0016	4.5495×10^{-4}	0.0050
	336(2주)	1.8832×10^{-4}	0.0022	4.8403×10^{-4}	0.0049
	672(4주)	1.9010×10^{-4}	0.0027	5.1836×10^{-4}	0.0054
	8064(12개월)	2.9501×10^{-4}	0.0050	6.4960×10^{-4}	0.0108

Table A-10 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 5)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
5	168(1주)	1.4919×10^{-6}	8.0787×10^{-6}	4.6898×10^{-6}	2.0132×10^{-5}
	336(2주)	1.5862×10^{-6}	1.1701×10^{-5}	4.2100×10^{-6}	1.9448×10^{-5}
	672(4주)	1.4207×10^{-6}	1.1458×10^{-5}	3.2373×10^{-6}	1.5806×10^{-5}
	8064(12개월)	9.1508×10^{-7}	1.0959×10^{-5}	1.8876×10^{-6}	1.2079×10^{-5}

Table A-11 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 6)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
6	168(1주)	5.2922×10^{-4}	0.0045	6.9019×10^{-4}	0.0162
	336(2주)	5.0010×10^{-4}	0.0048	7.8775×10^{-4}	0.0186
	672(4주)	4.5724×10^{-4}	0.0036	6.2734×10^{-4}	0.0152
	8064(12개월)	2.4307×10^{-4}	0.0010	5.0057×10^{-4}	0.0080

Table A-12 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 6)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
6	168(1주)	2.6270×10^{-6}	1.3355×10^{-5}	6.7132×10^{-6}	2.5178×10^{-5}
	336(2주)	2.5963×10^{-6}	1.4556×10^{-5}	6.2883×10^{-6}	2.2057×10^{-5}
	672(4주)	2.4645×10^{-6}	1.2954×10^{-5}	4.8836×10^{-6}	1.8268×10^{-5}
	8064(12개월)	1.1002×10^{-6}	1.2423×10^{-5}	1.8947×10^{-6}	1.3553×10^{-5}

Table A-13 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 6)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
7	168(1주)	1.5766×10^{-4}	5.6001×10^{-4}	2.0664×10^{-4}	0.0028
	336(2주)	1.9876×10^{-4}	0.0014	5.2424×10^{-4}	0.0072
	672(4주)	1.4889×10^{-4}	5.9365×10^{-4}	3.6128×10^{-4}	0.0046
	8064(12개월)	2.4018×10^{-4}	0.0026	3.2961×10^{-4}	0.0079

Table A-14 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 6)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
7	168(1주)	2.2098×10^{-6}	1.3824×10^{-5}	7.1087×10^{-6}	2.4001×10^{-5}
	336(2주)	2.0716×10^{-6}	1.3815×10^{-5}	5.7333×10^{-6}	2.0563×10^{-5}
	672(4주)	1.9311×10^{-6}	1.3310×10^{-5}	4.2825×10^{-6}	1.5947×10^{-5}
	8064(12개월)	9.9908×10^{-7}	1.3020×10^{-5}	1.9371×10^{-6}	1.1406×10^{-5}

Table A-15 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 8)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
8	168(1주)	3.5975×10^{-4}	0.0015	5.1199×10^{-4}	0.0062
	336(2주)	3.1481×10^{-4}	0.0015	5.6216×10^{-4}	0.0068
	672(4주)	2.5764×10^{-4}	0.0014	4.7001×10^{-4}	0.0066
	8064(12개월)	2.6841×10^{-4}	0.0035	4.3540×10^{-4}	0.0093

Table A-16 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 8)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
8	168(1주)	1.6294×10^{-6}	1.2521×10^{-5}	5.5085×10^{-6}	2.3872×10^{-5}
	336(2주)	1.6124×10^{-6}	1.2994×10^{-5}	4.7918×10^{-6}	2.0746×10^{-5}
	672(4주)	1.5204×10^{-6}	1.2342×10^{-5}	3.5970×10^{-6}	1.6784×10^{-5}
	8064(12개월)	1.0583×10^{-6}	1.1722×10^{-5}	2.0809×10^{-6}	1.3399×10^{-5}

Table A-17 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 9)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
9	168(1주)	6.5827×10^{-4}	0.0052	6.1878×10^{-4}	0.0087
	336(2주)	3.6913×10^{-4}	0.0029	4.9896×10^{-4}	0.0097
	672(4주)	5.0387×10^{-4}	0.0031	5.5430×10^{-4}	0.0094
	8064(12개월)	2.9242×10^{-4}	0.0043	5.6144×10^{-4}	0.0110

Table A-18 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 9)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
9	168(1주)	1.7451×10^{-6}	1.2212×10^{-5}	5.7481×10^{-6}	2.2874×10^{-5}
	336(2주)	1.6461×10^{-6}	1.2971×10^{-5}	4.9126×10^{-6}	2.0552×10^{-5}
	672(4주)	1.5928×10^{-6}	1.2294×10^{-5}	3.7157×10^{-6}	1.6747×10^{-5}
	8064(12개월)	1.0339×10^{-6}	1.1822×10^{-5}	2.0715×10^{-6}	1.3189×10^{-5}

Table A-19 Line parameter estimation result of IEEE 13 Node Test Feeder(Case 10)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
10	168(1주)	3.5068×10^{-4}	0.0013	8.0454×10^{-4}	0.0101
	336(2주)	3.7837×10^{-4}	0.0040	7.3265×10^{-4}	0.0133
	672(4주)	3.5100×10^{-4}	0.0043	5.6149×10^{-4}	0.0128
	8064(12개월)	3.4895×10^{-4}	0.0051	6.5531×10^{-4}	0.0140

Table A-20 Power flow analysis result of IEEE 13 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 10)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
10	168(1주)	1.8750×10^{-6}	1.1390×10^{-5}	6.0103×10^{-6}	2.4033×10^{-5}
	336(2주)	1.7190×10^{-6}	1.1921×10^{-5}	4.9931×10^{-6}	2.0081×10^{-5}
	672(4주)	1.6327×10^{-6}	1.0888×10^{-5}	3.7931×10^{-6}	1.5850×10^{-5}
	8064(12개월)	1.1631×10^{-6}	1.0718×10^{-5}	2.2339×10^{-6}	1.2955×10^{-5}

㉔

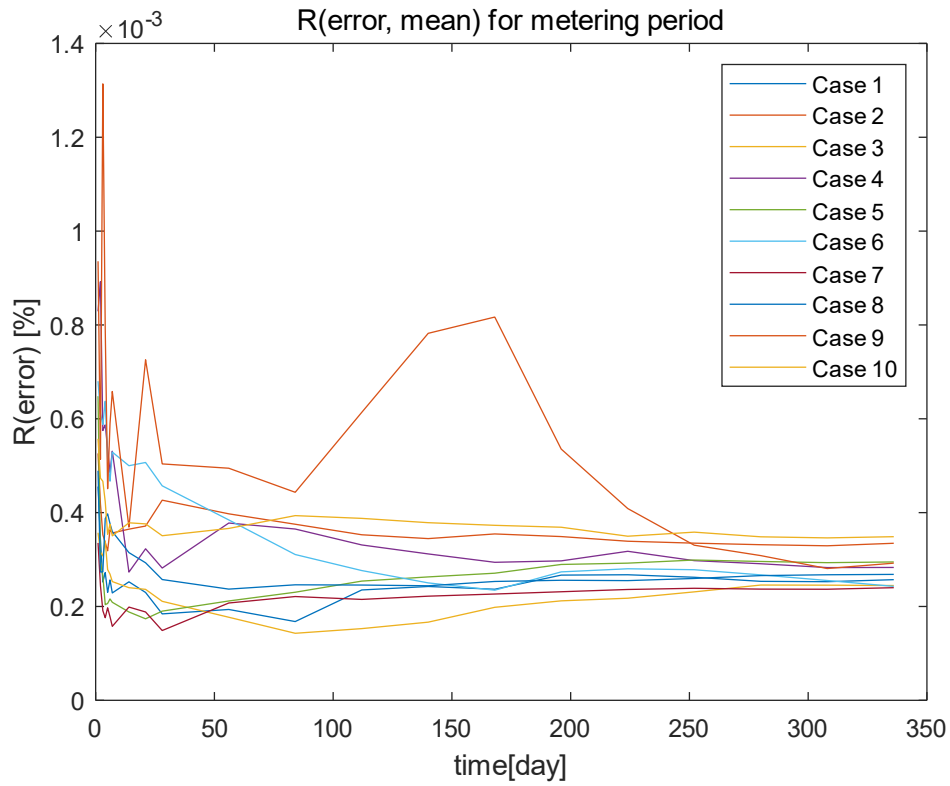


Fig A-1 Resistance mean estimation error for 12 months

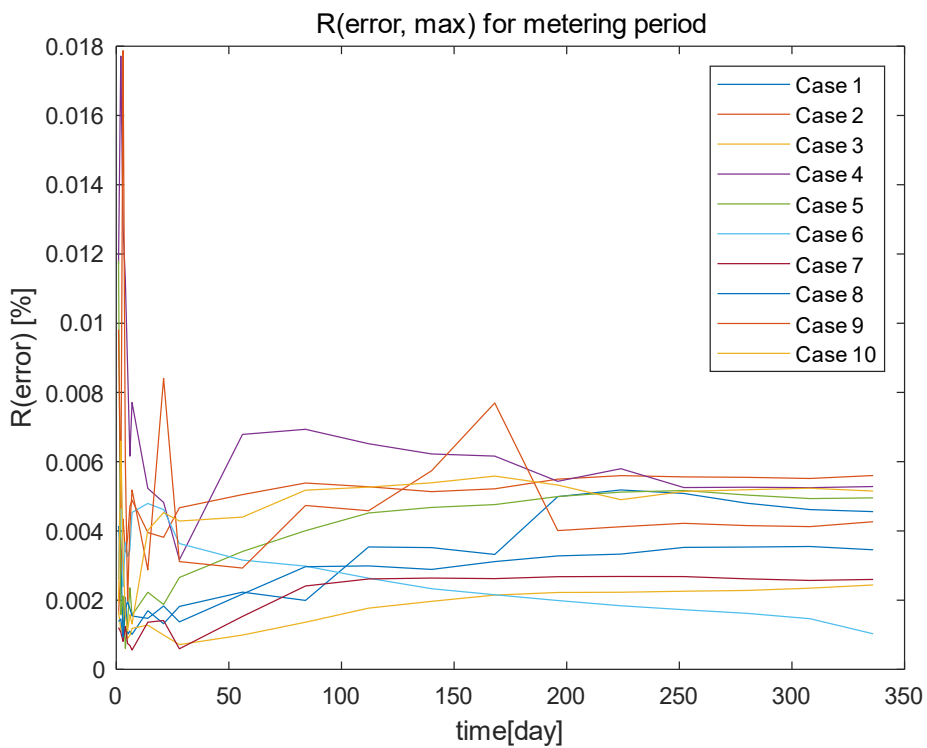


Fig A-2 Resistance max estimation error for 12 months

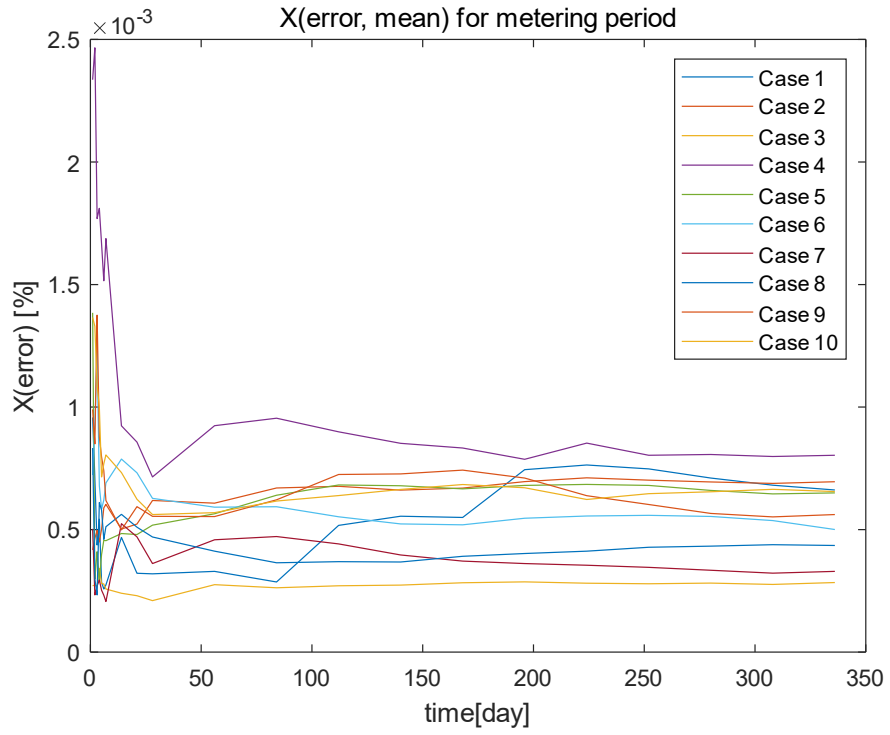


Fig A-3 Reactance mean estimation error for 12 months

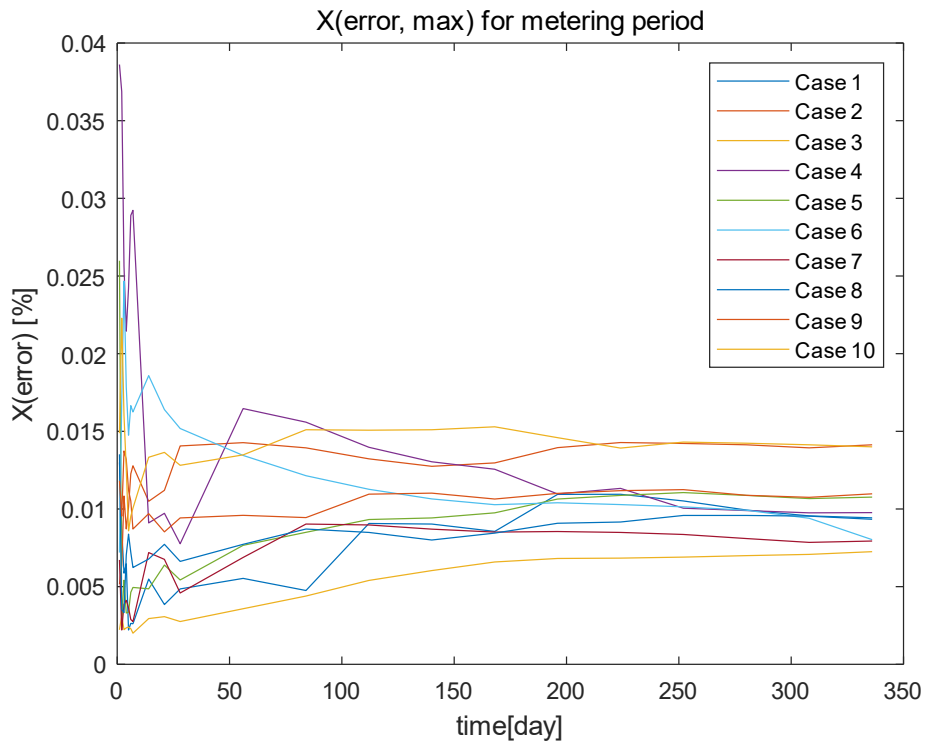


Fig A-4 Reactance max estimation error for 12 months

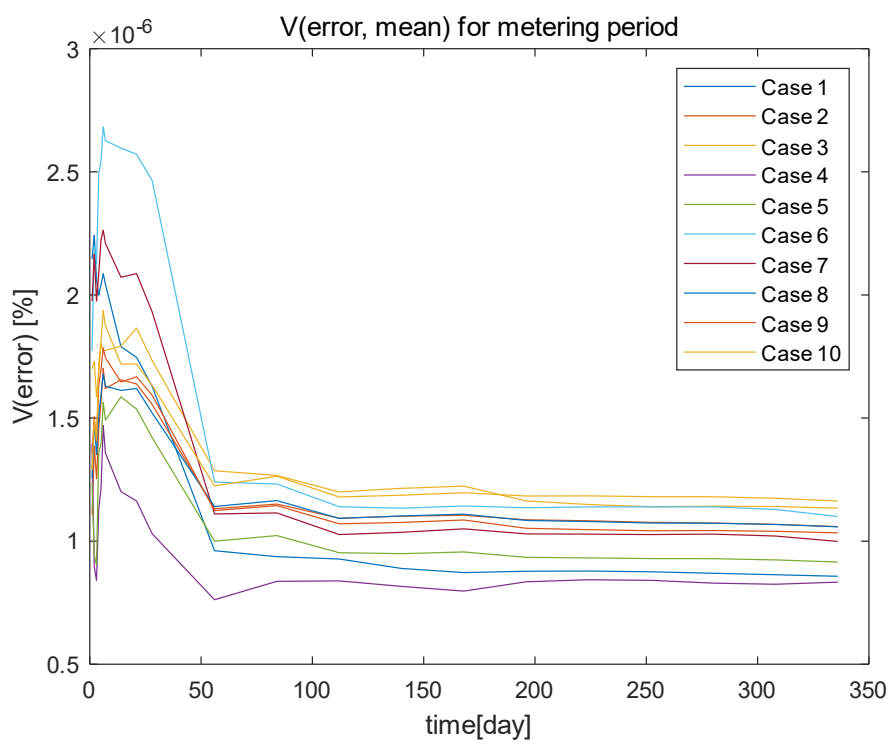


Fig A-5 Voltage magnitude mean error for 12 months

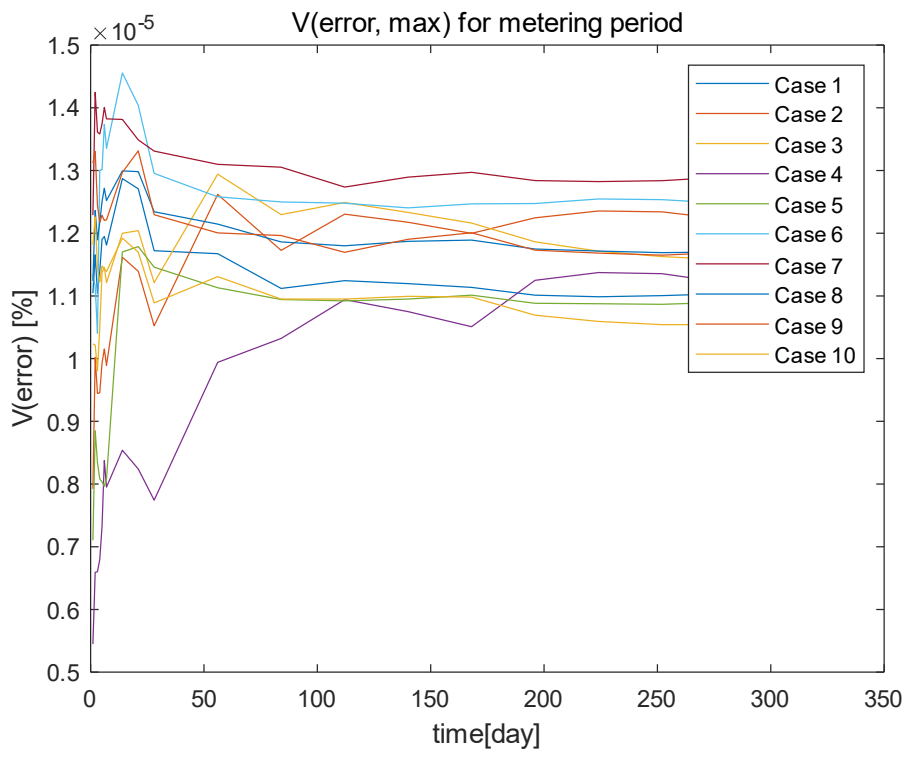


Fig A-6 Voltage magnitude max error for 12 months

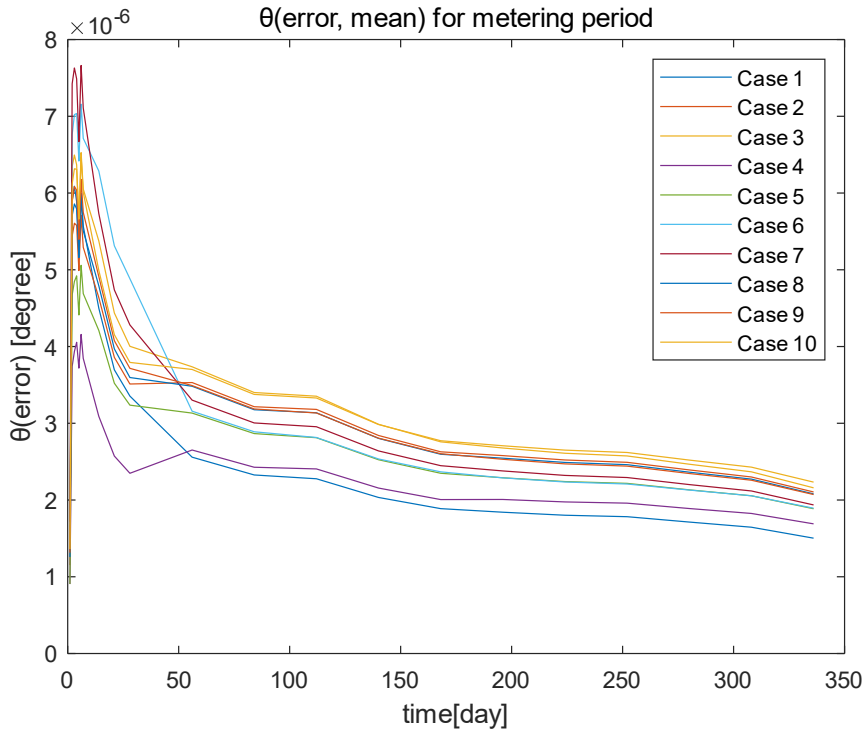


Fig A-7 Voltage angle mean error for 12 months

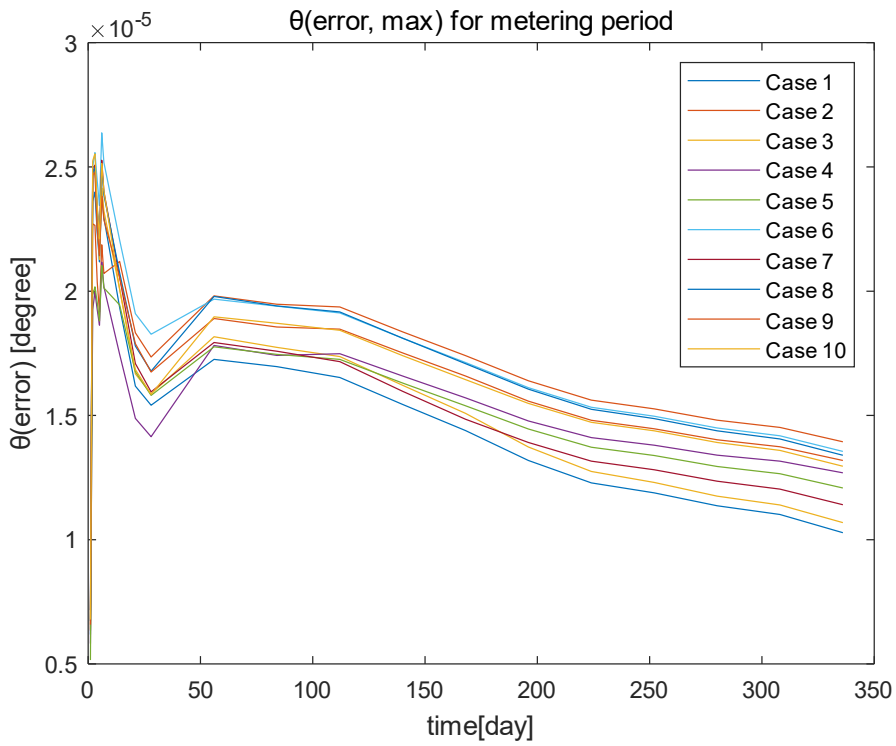


Fig A-8 Voltage angle max error for 12 months

B. IEEE 123 Node Test Feeder 선로 파라미터 추정 결과

Table B-1 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 1)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
1	168(1주)	0.0012	0.1669	1.4421×10^{-4}	0.0122
	336(2주)	0.0011	0.1457	1.4030×10^{-4}	0.0122
	672(4주)	0.0013	0.1573	1.2260×10^{-4}	0.0071
	8064(12개월)	0.0012	0.3011	8.3490×10^{-5}	0.0083

Table B-2 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 1)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
1	168(1주)	4.2413×10^{-7}	2.8896×10^{-6}	4.4564×10^{-7}	2.5201×10^{-6}
	336(2주)	4.1619×10^{-7}	3.6282×10^{-6}	9.0113×10^{-7}	3.3364×10^{-6}
	672(4주)	4.0369×10^{-7}	3.7550×10^{-6}	6.3576×10^{-7}	2.5266×10^{-6}
	8064(12개월)	3.7293×10^{-7}	4.8626×10^{-6}	5.2174×10^{-7}	2.9772×10^{-6}

Table B-3 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 2)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
2	168(1주)	0.0032	0.3423	2.2676×10^{-4}	0.0120
	336(2주)	0.0028	0.2678	2.3525×10^{-4}	0.0175
	672(4주)	0.0026	0.4113	2.4311×10^{-4}	0.0271
	8064(12개월)	0.0015	0.0462	9.8429×10^{-5}	0.0120

Table B-4 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 2)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
2	168(1주)	4.4055×10^{-7}	3.7586×10^{-6}	5.0769×10^{-7}	2.3606×10^{-6}
	336(2주)	3.9833×10^{-7}	6.6928×10^{-6}	9.7372×10^{-7}	3.2855×10^{-6}
	672(4주)	3.9191×10^{-7}	6.7420×10^{-6}	6.6644×10^{-7}	2.4612×10^{-6}
	8064(12개월)	3.3688×10^{-7}	6.2271×10^{-6}	5.2842×10^{-7}	2.9020×10^{-6}

Table B-5 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 3)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
3	168(1주)	0.0033	0.4401	1.9776×10^{-4}	0.0083
	336(2주)	0.0025	0.3060	1.7514×10^{-4}	0.0078
	672(4주)	0.0023	0.4008	1.4567×10^{-4}	0.0105
	8064(12개월)	0.0015	0.3020	7.5531×10^{-5}	0.0065

Table B-6 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 3)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
3	168(1주)	4.4293×10^{-7}	3.3596×10^{-6}	4.9314×10^{-7}	2.2839×10^{-6}
	336(2주)	3.8932×10^{-7}	3.0833×10^{-6}	9.7467×10^{-7}	3.0389×10^{-6}
	672(4주)	3.7609×10^{-7}	3.1632×10^{-6}	6.4042×10^{-7}	2.2642×10^{-6}
	8064(12개월)	3.6337×10^{-7}	3.7023×10^{-6}	5.2022×10^{-7}	2.8367×10^{-6}

Table B-7 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 4)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
4	168(1주)	0.0027	0.4999	2.6645×10^{-4}	0.0174
	336(2주)	0.0025	0.4383	1.9579×10^{-4}	0.0134
	672(4주)	0.0029	0.4764	2.3329×10^{-4}	0.0150
	8064(12개월)	0.0012	0.2143	6.8398×10^{-5}	0.0062

Table B-8 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 5)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
4	168(1주)	3.8813×10^{-7}	2.8259×10^{-6}	5.1506×10^{-7}	2.4302×10^{-6}
	336(2주)	3.7991×10^{-7}	3.8229×10^{-6}	1.0108×10^{-6}	3.2855×10^{-6}
	672(4주)	3.8226×10^{-7}	3.8982×10^{-6}	6.5196×10^{-7}	2.7304×10^{-6}
	8064(12개월)	3.2820×10^{-7}	3.4155×10^{-6}	5.3697×10^{-7}	2.9162×10^{-6}

Table B-9 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 5)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
5	168(1주)	0.0031	0.6533	1.8590×10^{-4}	0.0102
	336(2주)	0.0025	0.5205	1.5528×10^{-4}	0.0100
	672(4주)	0.0026	0.4400	1.7176×10^{-4}	0.0109
	8064(12개월)	9.0059×10^{-4}	0.1175	7.3475×10^{-5}	0.0047

Table B-10 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 5)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
5	168(1주)	4.4650×10^{-7}	3.1492×10^{-6}	5.0031×10^{-7}	2.2620×10^{-6}
	336(2주)	3.9535×10^{-7}	4.0787×10^{-6}	9.6808×10^{-7}	3.2477×10^{-6}
	672(4주)	3.9697×10^{-7}	4.1933×10^{-6}	6.6871×10^{-7}	2.3867×10^{-6}
	8064(12개월)	3.4331×10^{-7}	3.8988×10^{-6}	5.2114×10^{-7}	2.9107×10^{-6}

Table B-11 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 6)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
6	168(1주)	0.0029	0.2359	2.6115×10^{-4}	0.0252
	336(2주)	0.0024	0.2100	2.1992×10^{-4}	0.0203
	672(4주)	0.0026	0.2430	1.5559×10^{-4}	0.0127
	8064(12개월)	0.0015	0.2505	8.5459×10^{-5}	0.0080

Table B-12 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 6)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
6	168(1주)	4.9212×10^{-7}	3.1746×10^{-6}	5.0400×10^{-7}	2.6159×10^{-6}
	336(2주)	3.9882×10^{-7}	3.6731×10^{-6}	9.5555×10^{-7}	3.5273×10^{-6}
	672(4주)	3.8780×10^{-7}	3.8071×10^{-6}	6.5837×10^{-7}	2.8730×10^{-6}
	8064(12개월)	3.7241×10^{-7}	4.0093×10^{-6}	5.3520×10^{-7}	3.3109×10^{-6}

Table B-13 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 6)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
7	168(1주)	0.0032	0.5230	2.1349×10^{-4}	0.0115
	336(2주)	0.0025	0.3443	1.2407×10^{-4}	0.0064
	672(4주)	0.0031	0.5052	1.8447×10^{-4}	0.0140
	8064(12개월)	0.0013	0.1830	7.5360×10^{-5}	0.0040

Table B-14 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 6)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
7	168(1주)	4.4679×10^{-7}	3.4949×10^{-6}	4.7619×10^{-7}	2.3634×10^{-6}
	336(2주)	3.7011×10^{-7}	3.7518×10^{-6}	9.7464×10^{-7}	3.2505×10^{-6}
	672(4주)	3.5460×10^{-7}	3.9289×10^{-6}	6.5082×10^{-7}	2.6483×10^{-6}
	8064(12개월)	3.6244×10^{-7}	3.5267×10^{-6}	5.1647×10^{-7}	3.2976×10^{-6}

Table B-15 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 8)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
8	168(1주)	0.0030	0.4262	2.6313×10^{-4}	0.0154
	336(2주)	0.0023	0.3570	2.2285×10^{-4}	0.0154
	672(4주)	0.0025	0.3628	2.1445×10^{-4}	0.0155
	8064(12개월)	0.0016	0.2224	9.3771×10^{-5}	0.0078

Table B-16 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 8)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
8	168(1주)	4.6373×10^{-7}	3.3804×10^{-6}	5.1888×10^{-7}	2.4846×10^{-6}
	336(2주)	3.9051×10^{-7}	4.8497×10^{-6}	1.0160×10^{-6}	4.7648×10^{-6}
	672(4주)	3.8729×10^{-7}	5.0269×10^{-6}	6.9943×10^{-7}	4.2004×10^{-6}
	8064(12개월)	3.5125×10^{-7}	4.5526×10^{-6}	5.3509×10^{-7}	3.3050×10^{-6}

Table B-17 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 9)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
9	168(1주)	0.0017	0.2876	1.4622×10^{-4}	0.0044
	336(2주)	0.0020	0.4899	1.6634×10^{-4}	0.0186
	672(4주)	0.0022	0.5469	1.6073×10^{-4}	0.0200
	8064(12개월)	0.0012	0.1360	9.2768×10^{-5}	0.0086

Table B-18 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 9)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
9	168(1주)	3.7371×10^{-7}	2.5215×10^{-6}	4.6957×10^{-7}	2.1313×10^{-6}
	336(2주)	3.3156×10^{-7}	3.0094×10^{-6}	9.1407×10^{-7}	2.9475×10^{-6}
	672(4주)	3.2371×10^{-7}	3.0494×10^{-6}	5.7951×10^{-7}	1.8408×10^{-6}
	8064(12개월)	3.4612×10^{-7}	3.8816×10^{-6}	5.2478×10^{-7}	3.2171×10^{-6}

Table B-19 Line parameter estimation result of IEEE 123 Node Test Feeder(Case 10)

Case	계측 기간[h]	저항 오차[%]		리액턴스 오차[%]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
10	168(1주)	0.0024	0.2760	1.9049×10^{-4}	0.0170
	336(2주)	0.0019	0.2299	1.7098×10^{-4}	0.0183
	672(4주)	0.0022	0.3373	1.6074×10^{-4}	0.0114
	8064(12개월)	0.0014	0.0014	6.3714×10^{-4}	0.0020

Table B-20 Power flow analysis result of IEEE 123 Node Test Feeder using estimated line parameters(Case 10)

Case	계측 기간[h]	전압 크기 오차[%]		전압 위상각 오차[°]	
		평균 오차	최대 오차	평균 오차	최대 오차
10	168(1주)	4.2667×10^{-7}	2.7289×10^{-6}	5.0611×10^{-7}	2.5270×10^{-6}
	336(2주)	3.7156×10^{-7}	4.2119×10^{-6}	9.9479×10^{-7}	3.4396×10^{-6}
	672(4주)	3.5691×10^{-7}	4.4428×10^{-6}	6.7370×10^{-7}	2.8638×10^{-6}
	8064(12개월)	3.7760×10^{-7}	3.8212×10^{-6}	5.3835×10^{-7}	3.1281×10^{-6}

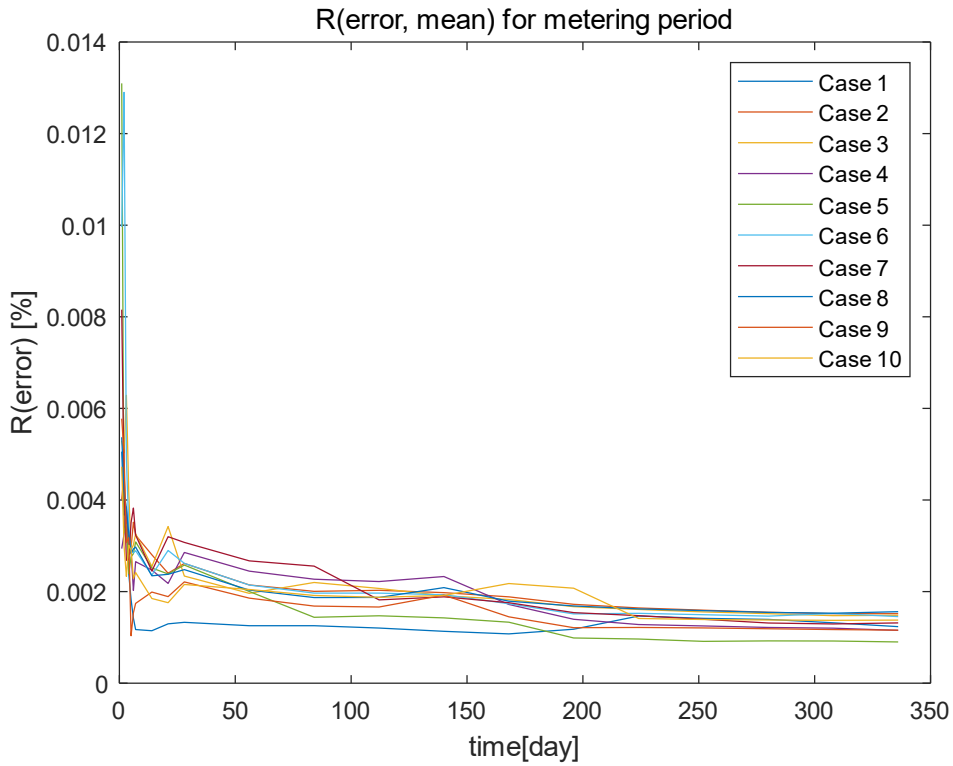


Fig B-1 Resistance mean estimation error for 12 months

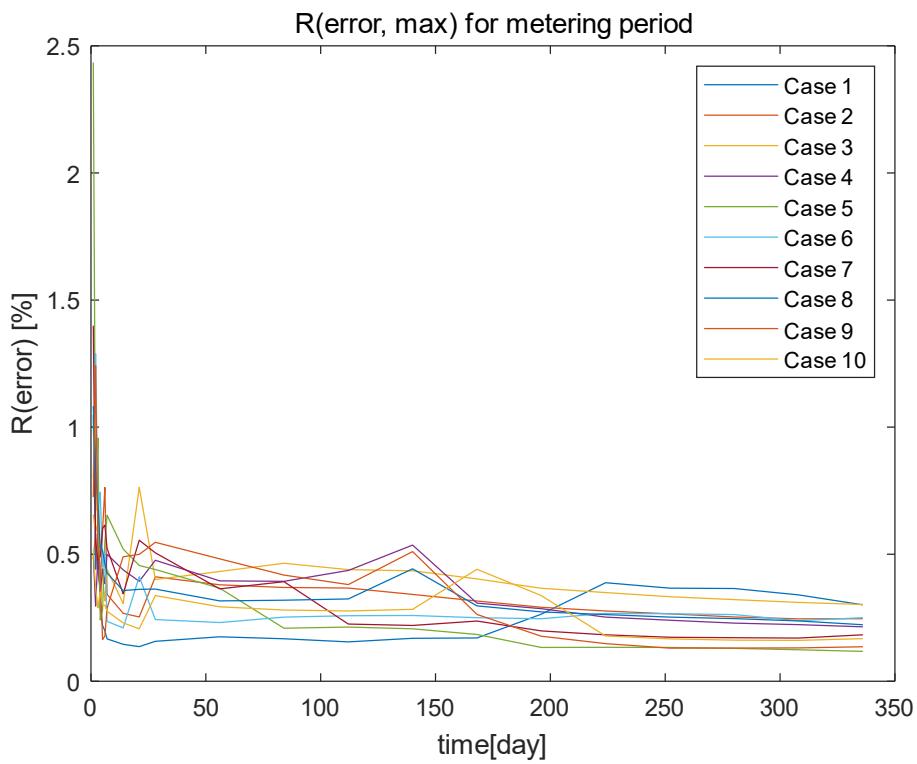


Fig B-2 Resistance max estimation error for 12 months

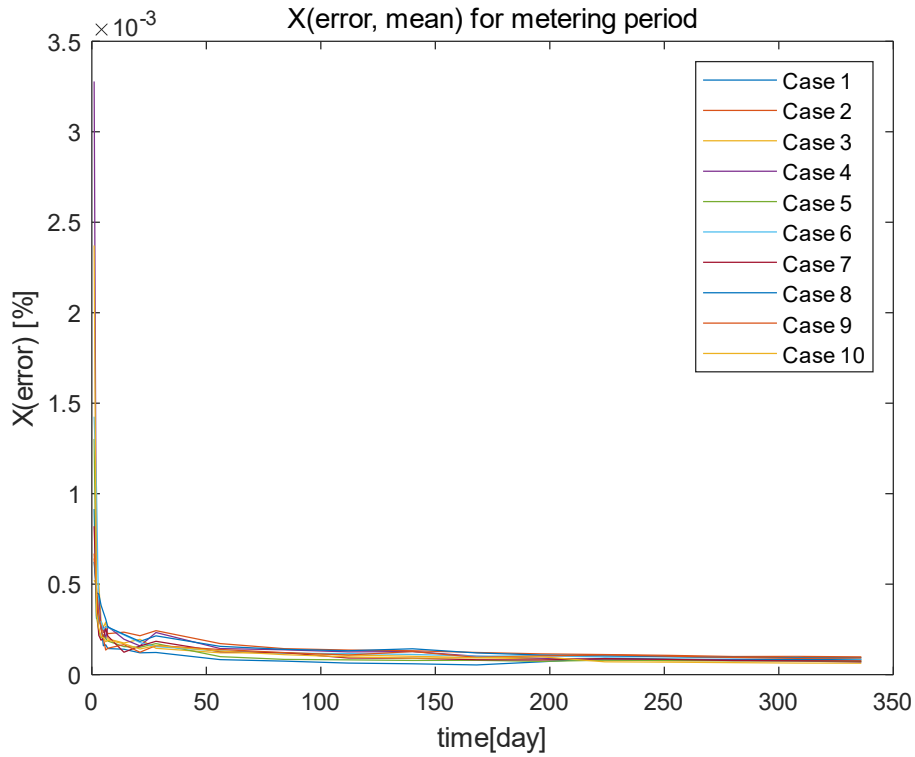


Fig B-3 Reactance mean estimation error for 12 months

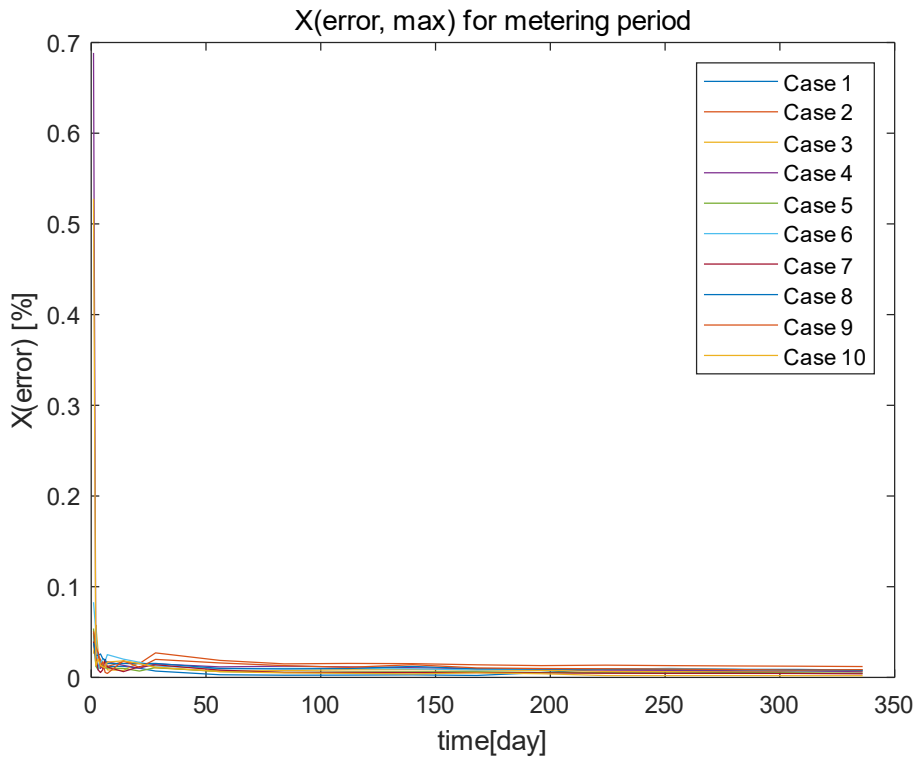


Fig B-4 Reactance max estimation error for 12 months

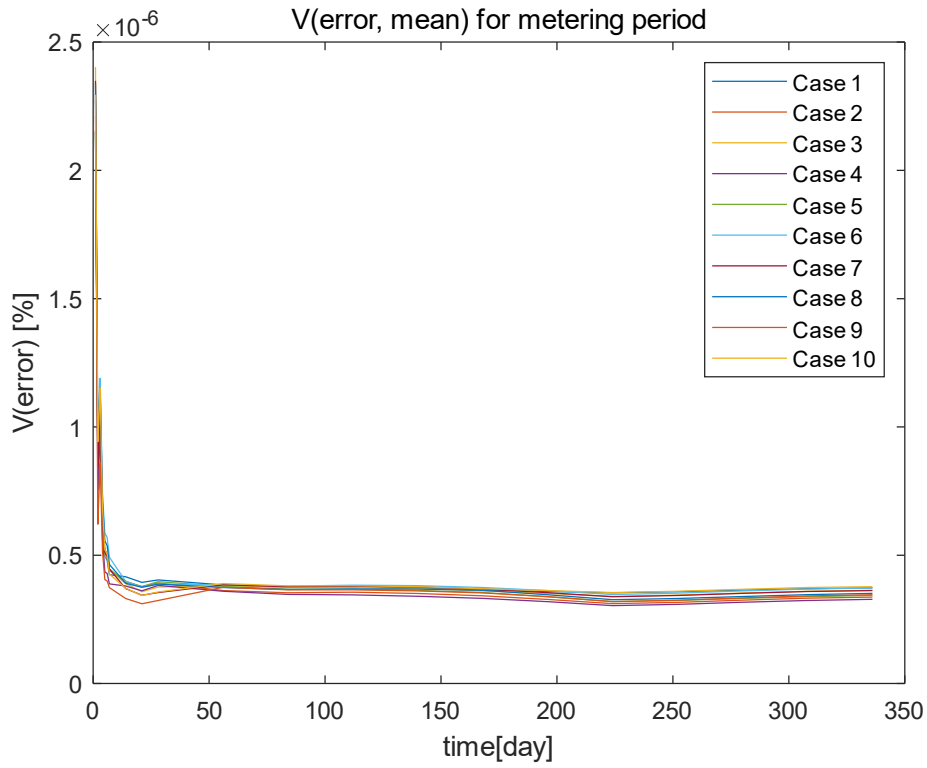


Fig B-5 Voltage magnitude mean error for 12 months

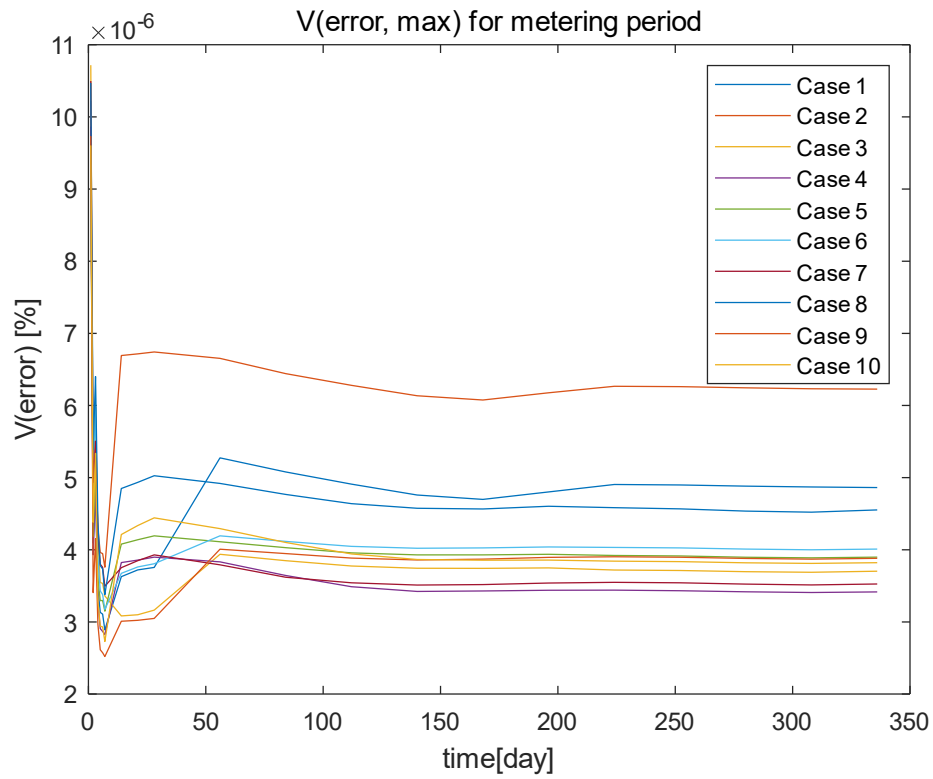


Fig B-6 Voltage magnitude max error for 12 months

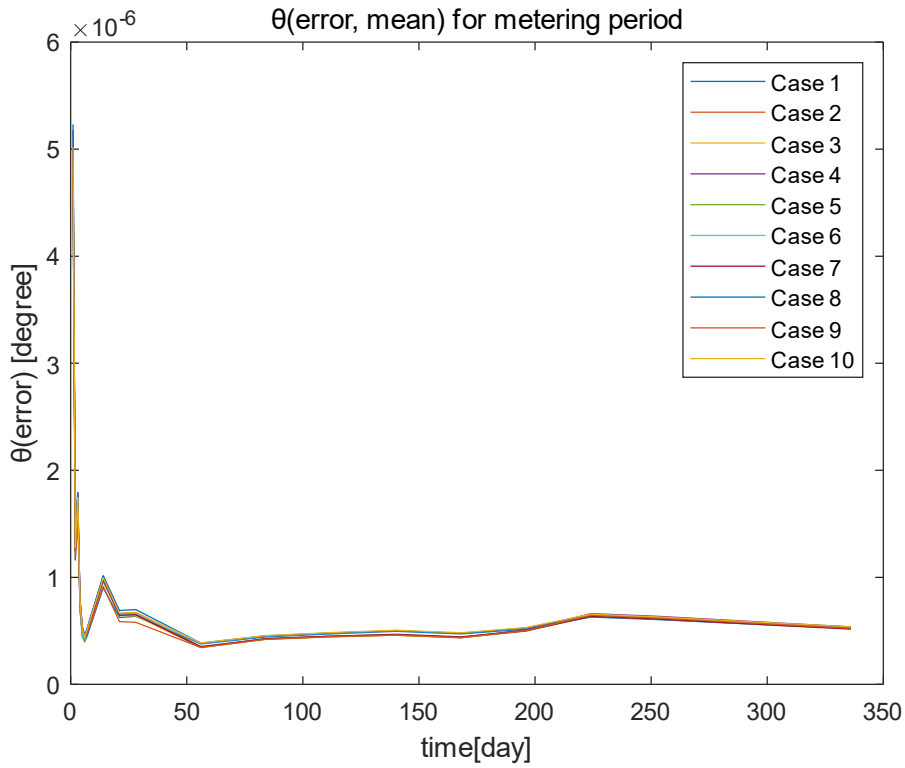


Fig B-7 Voltage angle mean error for 12 months

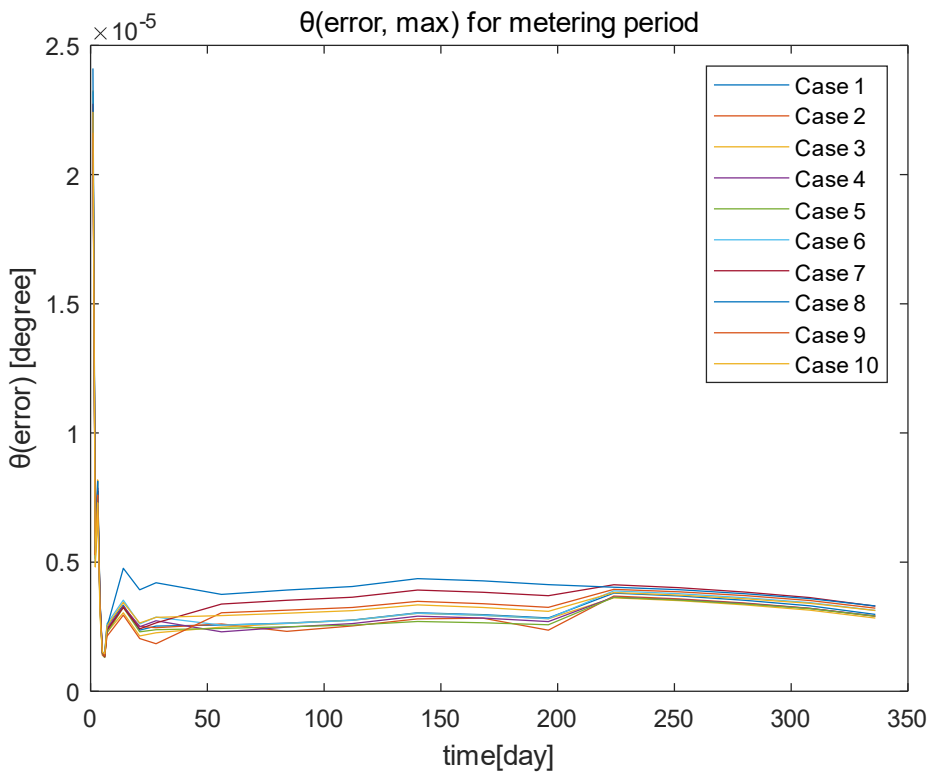


Fig B-8 Voltage angle max error for 12 months

감사(感謝)의 글

본 논문이 완성되기까지, 그리고 석사과정 2년여의 시간동안 각별한 지도와 배려를 아끼지 않으신 황평익 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 그리고 충실한 논문이 되도록 세심하게 구체적인 부분까지 지적과 조언을 해 주시며 심사·검토하여 주신 고필주 교수님, 김용재 교수님께 감사드립니다.

처음 대학원 생활을 시작하였을 때, 같은 실험실에 조언을 구할 선배도 없었고, 모든 것이 낯설어 기대보다 걱정이 많이 앞섰습니다. 걱정이 가득했던 대학원 생활을 부족한 제가 잘 적응할 수 있도록 많은 조언과 격려를 아끼지 않으시고 사소한 일도 마다 않고 도와주신 전력계통실험실의 박상용 선배님, 구희석 선배님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 재미있는 대학원 생활이 될 수 있도록 도와준 우사마, 창림이, 성균이, 대학원에 같이 입학하여 고충을 함께 나누고 저에게 많은 도움을 준 청학이형에게 감사드립니다. 또한, 지난 몇 년 동안 잦은 진로 고민으로 힘들 때 마다 항상 먼저 찾아와 싫은 기색 없이 진심으로 고민을 들어주고 위로해준 윤재, 호연이, 규철이, 재원이, 유민이에게 진심으로 고맙고 앞으로도 잘 부탁한다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 오늘 이 자리에 있기까지 흔들림 없이 학업에 정진할 수 있도록 모자란 저를 항상 믿고 지지해주시고, 변함없이 따뜻한 마음으로 염려와 격려를 아끼지 않으신 부모님, 누나와 매형께도 깊은 감사를 드립니다.

지금까지 많은 격려와 도움을 주신 모든 분들께 다시 한 번 감사의 말씀을 드리며, 늘 건강하시고 가내 행복과 행운이 가득하길 기원합니다.

2021년 02월

이 혜 규