



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](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

배전계통에서의 고조파 왜곡에 대한
고조파원의 기여도 평가 방법



2024년 2월

국립부경대학교 대학원

전기공학과

박종일

공 학 박 사 학 위 논 문

배전계통에서의 고조파 왜곡에 대한 고조파원의 기여도 평가 방법

A Method to Evaluate the Contribution of Harmonic Sources
to Harmonic Distortion in a Distribution System

지도교수 박 창 현

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2024년 2월

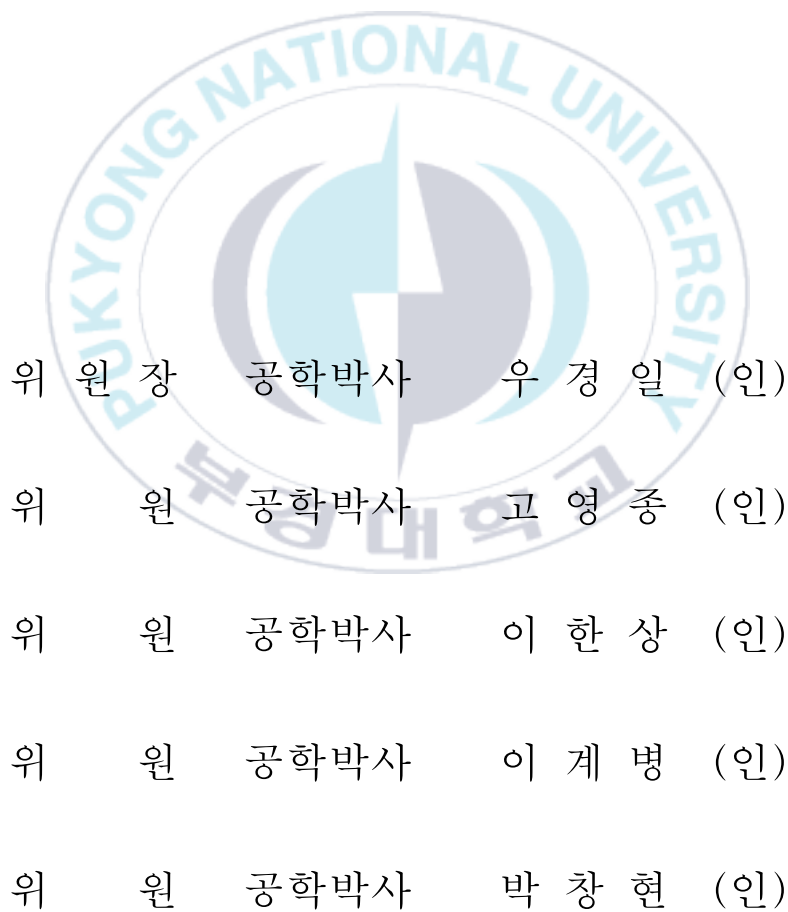
국 립 부 경 대 학 교 대 학 원

전 기 공 학 과

박 종 일

박종일의 공학박사 학위논문을 인준함.

2024年 2月 16日



목 차

목차	i
그림 목차	iii
표 목차	v
Abstract	vii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 선행연구의 검토 및 고찰	3
1.3 연구 목표와 논문 구성	6
제 2 장 고조파 관리 지수 및 기여도 평가	8
2.1 기존의 고조파 왜곡 지수	8
2.2 국내외 고조파 관리기준 현황	9
2.3 고조파 기여도 평가 기술	16
제 3 장 고조파 등가 전압원 모델 추정	18
3.1 순환최소자승법을 이용한 파라미터 추정	18
3.2 고조파 등가 파라미터 추정을 위한 제약 조건	23
3.3 파라미터 변화 감지와 가변 망각인자 RLS 알고리즘 기반의 등가 모델 추정 방법	25
3.4 RANSAC 알고리즘을 이용한 이상점 제거	29

3.5 제안 알고리즘의 추정 절차	31
3.6 다양한 고조파원의 동작 특성	34
3.6.1 신재생 에너지원의 특성	35
3.6.2 비선형 부하의 특성	37
제 4 장 고조파 기여도 평가 및 왜곡 지도	45
4.1 고조파 전압 기여도 및 기여율	45
4.2 총 고조파 기여도 및 기여율	49
4.3 고조파 왜곡 지도	50
4.4 고조파 기여도 평가 절차 및 왜곡 지도 구축	51
4.5 불평형 조건에서의 고조파 기여도 평가	53
제 5 장 사례연구	58
5.1 모의계통 및 조건	58
5.2 제안 방법을 이용한 등가 파라미터 추정결과	63
5.3 고조파 전압 기여도 및 기여율 평가	72
5.4 총 고조파 기여도 및 고조파 왜곡 지도 구축	77
제 6 장 결론	80
참고문헌	83

그림 목차

그림 2.1 고조파 기여도 평가 예	16
그림 3.1 LS 알고리즘을 이용한 선형 모델 추정 예	19
그림 3.2 유틸리티와 한 수용가에 대한 등가 전압 모델	23
그림 3.3 파라미터 변화감지에 기반한 RLS 추정 예	28
그림 3.4 RANSAC 알고리즘에 기반한 데이터 이상점 결정 및 제거 방법	30
그림 3.5 제안 등가 파라미터 추정 방법의 절차	31
그림 3.6 가변 T 범위에 따른 유효점 데이터 결정 예	32
그림 3.7 전압 및 전류에 대한 데이터 재구성 예	34
그림 3.8 신재생에너지 시스템 모델	35
그림 3.9 풍력발전기 연계계통에서의 차수별 고조파 전압	36
그림 3.10 태양광발전기 연계계통에서의 차수별 고조파 전압	37
그림 3.11 일반적인 TV 부하에 대한 PSCAD/EMTDC 모델	38
그림 3.12 TV 부하 모델에서의 전압 및 전류 파형 측정	39
그림 3.13 TV 부하 모델에서의 전류 FFT 분석	40
그림 3.14 PSCAD/EMTDC의 12V, 4A 배터리 충전기 모델	40
그림 3.15 배터리 충전기 사용에 따른 전압 및 전류 파형 측정	41
그림 3.16 배터리 부하의 충전에 따른 전류 FFT 분석	42
그림 3.17 ASD에 대한 PSCAD/EMTDC 모델	43
그림 3.18 ASD 부하 모델에서의 전압 및 전류 파형 측정	44
그림 3.19 ASD 부하 모델에서의 전류 FFT 분석	44

그림 4.1 PCC에 연결된 n -피더의 배전계통	45
그림 4.2 중첩의 원리를 이용한 PCC전압	46
그림 4.3 PCC전압에 대한 유틸리티와 한 수용가 전압의 스칼라 투영 ...	48
그림 4.4 고조파 왜곡 지도 예	50
그림 4.5 고조파 왜곡 지도 및 기여도 평가의 전체적인 절차	52
그림 5.1 고조파 기여도 평가를 위한 PSCAD/EMTDC 모의계통	58
그림 5.2 각 PCC에서 측정된 전압과 전류 파형	62
그림 5.3 수용가 1에 대한 3 rd 고조파 등가 파라미터 추정결과	65
그림 5.4 수용가 5에 대한 3 rd 고조파 등가 파라미터 추정결과	69
그림 5.5 PCC ₂ 에 대한 7 th HVC 및 HCR	73
그림 5.6 PCC ₃ 에 대한 7 th HVC 및 HCR	74
그림 5.7 PCC ₂ 에서의 THC 평가 결과	78
그림 5.8 THC와 THCR에 기반한 고조파 왜곡 지도 구축 결과	79

표 목차

표 2.1 전압고조파 허용 기준(66kV 이상)	10
표 2.2 전압고조파 허용 기준(22.9kV 이하)	10
표 2.3 전류 고조파 측정 기준	11
표 2.4 계통 규모별 고조파 전류제한 기준	12
표 2.5 전압 레벨별 전압 관리기준	12
표 2.6 120~69,000V 전압 계통에서의 전류 관리기준	13
표 2.7 69,001~161,000V 전압 계통에서의 전류 관리기준	13
표 2.8 161,000V 이상 전압 계통에서의 전류 관리기준	14
표 2.9 국가별 고조파 관리현황	15
표 3.1 비선형 부하 정격	38
표 5.1 유틸리티와 5개 수용가의 등가 파라미터	59
표 5.2 두 수용가 1과 5에 대한 등가 파라미터 변화 조건	60
표 5.3 T1 구간에 대한 수용가 1의 등가 파라미터 추정결과 비교	66
표 5.4 T2 구간에 대한 수용가 1의 등가 파라미터 추정결과 비교	66
표 5.5 T3 구간에 대한 수용가 1의 등가 파라미터 추정결과 비교	67
표 5.6 T1 구간에 대한 수용가 5의 등가 파라미터 추정결과 비교	70
표 5.7 T2 구간에 대한 수용가 5의 등가 파라미터 추정결과 비교	70
표 5.8 T3 구간에 대한 수용가 5의 등가 파라미터 추정결과 비교	71
표 5.9 3 rd 고조파 성분에 대한 HVC 및 HCR 평가 결과	75

표 5.10 5 th 고조파 성분에 대한 HVC 및 HCR 평가 결과	76
표 5.11 7 th 고조파 성분에 대한 HVC 및 HCR 평가 결과	76



A Method to Evaluate the Contribution of Harmonic Sources to Harmonic
Distortion in a Distribution System

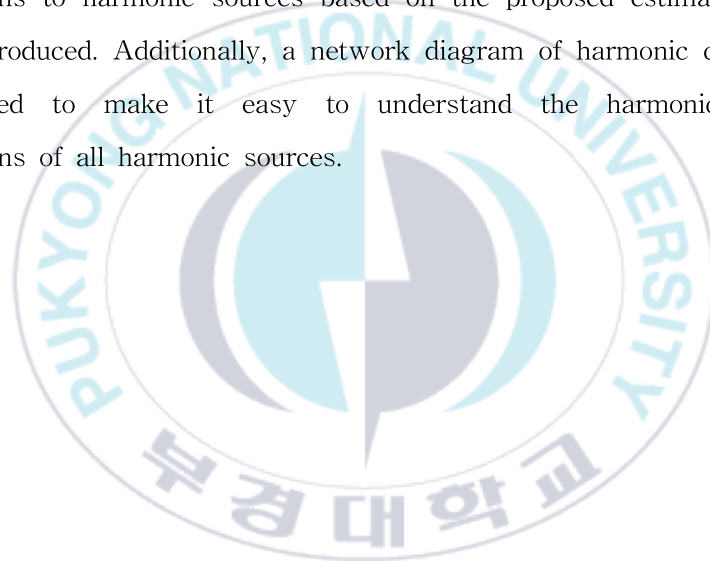
Jong-Il Park

Department of Electrical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

This dissertation deals with a method for evaluating the harmonic contributions of each harmonic source to system voltage distortion. To mitigate and manage system harmonic levels, it is essential to assess the contribution of individual harmonic source to the PCC(point of common coupling) voltage distortion. The result of contribution assessment heavily depends on the accuracy of equivalent model parameter. In general, the parameters are estimated using the recursive least square (RLS) algorithm and measured voltage and current at the PCC. However, the previous method based on RLS algorithm has the drawback of deteriorating estimation performance depending on the conditions of the measurement data. The constant forgetting factor RLS algorithm have potential 'wind-up' problem. The problem refers to an exponential increase in the covariance matrix, which makes the parameter estimation extremely sensitive and causes large errors. Also, previous methods may lead to significant errors due to the measured data contains outliers. Outlier is a data point that differs significantly from other measured data due to various causes such as

measurement errors. To overcome the problems, this dissertation proposes a method of equivalent parameter estimation based on the random sample consensus (RANSAC) and RLS with a variable forgetting factor. The variable forgetting factor RLS can estimate stable equivalent parameters by limiting the increase of the covariance matrix. Also, the RANSAC algorithm can enhance estimation accuracy by removing outliers from the measurement data. The proposed estimation method ensure the accuracy of harmonic contribution assessment result. The entire procedure for quantifying contributions to harmonic sources based on the proposed estimation method is also introduced. Additionally, a network diagram of harmonic contributions is proposed to make it easy to understand the harmonic distortion contributions of all harmonic sources.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

세계 각국은 지구 온난화 및 기후위기 대응을 위해 저탄소 녹색 성장 기조와 함께 친환경 에너지 전환정책을 시행하고 있다. 우리나라에서도 RE3020 및 2050 장기저탄소발전전략(LEDs)과 같은 정책을 시행하고 있으며, 신재생에너지, ESS, EV 충전 등의 친환경 에너지 기기 사용을 권장하고 있다. 그러나 이러한 기기들은 전력변환장치 기반으로 구성되어 있으며, 이들 장치로 인해 다양한 고조파 문제가 발생할 수 있다.

일반적으로 고조파 전압은 고조파원으로부터 전류가 계통에 유입되면 전류 경로의 계통 임피던스에 의해 발생한다. 이러한 고조파 전압은 PCC(point of common coupling) 전압 왜곡과 함께 계전기 오동작, 역률 저하, 계측 오류, 기기 손상 및 과열 등 다양한 문제를 일으킨다[1]~[6]. 또한, PCC 전압 왜곡은 주변 계통 및 인접 수용가에도 악영향을 미칠 수 있으며, 계통 전체로 확대될 수 있다. 계통의 고조파 문제는 유발원의 동작 중에 지속적으로 계통에 영향을 미치므로 그 피해는 장기적으로 나타날 것이다. 이러한 고조파 문제를 관리하기 위해 국내에서도 IEC 기준을 바탕으로 국내 환경에 맞는 고조파 관리기준을 수립하여 관리하고 있다[7]. 그러나 해당 기준은 측정 위치에서의 고조파 왜곡 지수가 기준에 부합하는지를 평가하는 것이 핵심으로 고조파원에 대한 식별과 직접적인 관리는 현실적으로 어려운 실정이다. 계통에서의 고조파 왜곡에 대해 효과적인 관리를

위해서는 고조파 왜곡 기여가 높은 고조파원에 대해 보상 기기를 설치 운영하거나 페널티(penalty)를 부과하는 등 다양한 대책이 필요하다. 이러한 대책들을 적용하기 위해서는 PCC와 같은 수용가 연계점에서의 고조파 기여도 평가(harmonic contribution assessment)가 선행되어야 한다. 고조파 기여도 평가란 PCC 전압 왜곡에 대한 모든 고조파원들의 기여 정도를 정량적으로 나타내는 기술이다.

신뢰도 높은 고조파 평가를 위해서는 정확한 고조파원의 등가 모델 정보가 필수적이나 현실적으로 변동성이 심한 배전계통에서의 정확한 파라미터 확보는 매우 어렵다. 따라서 계통 데이터와 수치해석 방법 등을 이용하여 등가 모델의 파라미터를 추정하게 된다. 고조파원의 등가 파라미터는 고조파 기여도 평가의 신뢰도에 큰 영향을 미치기 때문에 고도의 수치해석 방법을 이용하여 정확한 추정이 필요하다. 그러나 수치해석에 기반한 추정 방법들은 측정 데이터에 이상점(outlier)이 존재하는 경우 성능이 현저하게 떨어지는 근본적인 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 측정 데이터에 포함된 이상점 검출 및 제거가 필요하다.

또한, 고정 망각인자의 RLS(recursive least square)에 기반한 등가 파라미터 추정 방법은 일정한 크기의 망각인자로 인해 성능이 불안정해지는 단점이 있다. 따라서 일정한 크기의 망각인자를 가변하여 안정적인 추정이 가능하도록 개선이 필요하다.

1.2 선행연구의 검토 및 고찰

고조파 관리 및 저감 대책 마련을 위해서는 계통의 전압 왜곡에 대한 고조파원 식별 및 기여 정도를 정량적으로 파악할 필요가 있다. 그러나 THD(total harmonic distortion) 및 TDD(total demand distortion)와 같은 전통적인 지수는 계측 지점에 한정된 고조파 왜곡 정도만 평가할 뿐 고조파원 식별이나 기여 정도는 나타내지 못한다. 많은 연구들에서는 계통의 고조파 왜곡에 원인이 되는 고조파원 식별과 기여도를 추산하기 위해 실험적(experimental) 및 비실험적(non-experimental) 접근법에 기반한 평가들이 제안되어 왔다[8-14].

먼저 참고문헌 [9]와 [10]에서는 고조파 전류 주입 및 스위칭 커패시터를 이용한 실험적 접근법이 제안되었다. 해당 방법들은 의도적으로 계통에 단기 교란을 일으켜 과도 고조파 전압 및 전류의 변화를 측정하여 기여도를 산출한다. 그러나 이러한 방법들은 전력 시스템에 악영향을 미칠 수 있으며, 시간과 비용이 높아질 수 있는 단점이 존재한다.

반면 비실험적 접근법은 측정된 데이터와 수치해석을 이용하여 고조파원의 등가 모델을 추정하기 때문에 실험적 접근법에 비해 시간과 비용이 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 비실험적 접근법은 등가 모델의 파라미터 추정결과에 영향을 받기 때문에 측정 데이터에 심한 노이즈 및 이상점이 포함될 경우 추정 오차가 크게 발생할 수 있어 평가의 정확도가 떨어질 수 있다. 참고문헌 [11]과 [12]에서는 THP (total harmonic power)계산을 이용한 고조파원 위치 판별법을 제안하였다. 해당 방법은 방사상 계통에만 적용 가능하며 고차 고조파에 대해서는 결과의 정확도가 떨어지는

단점이 있다. 참고문헌 [13]과 [14]에서 소개된 방법은 수용가의 부하 임피던스 정보가 요구되고 계통 운전 조건마다 차수별 고조파 등가 모델 추정에 계산량이 많은 단점이 있다.

또한, 몇몇 연구들에서는 계통의 PCC 측정 데이터와 선형 회귀(linear regression) 방법을 이용한 고조파원 등가 모델의 파라미터 추정 방법을 제안하였다[15]–[22]. 초기 방법들은 고조파원의 등가 전압 및 임피던스가 일정하다고 가정하였다[15]–[17]. 그러나 실제 전력 시스템의 경우 계통 운전 조건에 따라 등가 파라미터는 일정하지 않기 때문에 해당 방법의 적용에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 RLS 알고리즘을 이용한 파라미터 추정 방법이 소개되었다 [18–20]. RLS 알고리즘은 비교적 간단하고 수렴 특성이 우수하여 계통의 등가 모델 추정에 활용되고 있다. 그러나 이들 방법은 망각인자와 측정 데이터 조건에 따라 추정성능이 저하되는 문제점이 있다. 먼저 고정 망각 인자(constant forgetting factor)를 사용하는 RLS의 경우 잠재적인 ‘wind-up’ 문제가 발생할 수 있다. wind-up이란 고정된 망각인자로 인해 공분산 행렬이 기하급수적으로 증가하게 되는 현상으로 파라미터 추정이 극도로 민감하게 되어 큰 오차가 발생하는 것을 말한다. 이러한 문제점 해결을 위해 가변 망각인자(variable forgetting factor)를 갖는 RLS에 기반한 등가 모델 추정 방법을 제안하였다. 제안 방법은 망각인자의 가변을 통해 wind-up문제를 해결할 수 있으며, 안정적인 추정이 가능하다. 또한, 파라미터 변화 감지 기법을 적용하여 추정의 수렴속도를 향상시켰다. 다음으로 RLS와 같은 선형회귀법들에 있어 측정 데이터에 이상점이 다수 존재할 경우 추정성능이 현저히 떨어지는 근본적인 문제가 있다. 계통에서 측정된 전압과 전류 등은 환경적 요인과 같은 다양한 원인에 의해 정상적이지 못한 데이터가 기록될 수 있으며 이러한 이상점이 포함된 데이터에 기반한 파라미터 추정결

과는 오차가 크게 나타날 수밖에 없다. 따라서 RLS를 이용한 파라미터 추정성능 향상을 위해서는 측정 데이터에 대한 이상점 검출 및 제거가 필요하다. 이에 RANSAC을 이용하여 측정 원시 데이터의 이상점을 제거하였으며, RLS 적용을 위해 유효점 데이터만으로 구성된 데이터 재구성 방법을 제안하였다. 마지막으로 개선된 등가 파라미터 추정 방법을 포함한 고조파 기여도 평가기술을 개발하였다. 제안 기술의 성능을 검증하기 위해 전자기 과도해석 모의를 바탕으로 다양한 사례연구를 수행하였으며, 기존 방법과의 비교분석을 통해 결과의 우수성을 입증하였다.



1.3 연구 목표와 논문 구성

본 논문은 배전계통에서의 효과적인 고조파 관리 및 대책 마련을 위해 고조파원의 등가 모델 추정에 기반한 고조파 기여도 평가기술 개발을 목표로 한다. 제안 기술은 등가 모델의 파라미터 추정을 위해 가변 망각인자 기반의 RLS, 파라미터 변화감지 및 RANSAC 알고리즘 등 복합 수치해석 기법으로 구현하였으며, 추정된 등가 모델과 중첩의 원리를 이용하여 고조파 기여도를 산출하는 방법이다. 기존의 방법은 측정 데이터에 이상점이 포함된 경우 평가의 정확도가 떨어지는 문제점이 있었으나 제안 방법은 RANSAC 알고리즘을 이용하여 효과적으로 이상점 제거를 통해 추정의 정확도를 향상시켰다. 또한, 제안 방법은 가변 망각인자 RLS추정을 통해 등가 파라미터 실제값에 빠르게 수렴하는 특성이 있어 향상된 고조파 기여도 평가 성능을 기대할 수 있다. 학위 과정에서 수행한 평가기술 개발의 핵심적인 연구내용과 결과를 효과적으로 전달하기 위해 다음과 같이 총 6개의 장으로 구성하였다.

먼저 제1장에서는 고조파 기여도 평가기술 개발의 연구 배경과 선행연구에 대한 검토 및 고찰이 기술되었다.

제2장에서는 국내외 고조파 관리기준을 분석하였으며, 효과적인 고조파 관리를 위한 고조파 기여도 평가기술을 소개하였다.

제3장에서는 가변 망각인자의 RLS와 RANSAC 알고리즘을 기반으로 한 고조파 등가 모델 추정 방법을 제안하였다. 가변 망각인자의 RLS는 고정 망각인자의 RLS에서 나타나는 문제점을 극복할 수 있으며, RANSAC은 데이터의 이상점을 제거하여 안정적인 추정이 가능하다. 본 장에서는 이러한 알고리즘을 포함한 전체 등가 모델 추정 방법을 소개하였으며, 이해를

돕기 위해 전체 추정 방법의 절차도와 함께 상세한 설명을 나타내었다.

제4장에서는 개별 고조파 차수에 대한 고조파 전압 기여도 및 기여율 계산 방법을 소개하고 전체 고조파 차수를 포함한 총 고조파 기여도 평가방법을 제안하였다. 마지막으로 총 고조파 기여도와 기여율을 포함하여 고조파 왜곡 정도를 직관적으로 파악이 가능한 고조파 왜곡 지도 구축 방법을 소개하였다.

제5장에서는 PSCAD/EMTDC 모의계통을 이용하여 다양한 조건의 사례 연구를 수행하였으며, 결과를 통해 제안 방법의 우수한 성능을 검증하였다. 이상점이 포함된 측정 데이터에 대해 기존의 방법들과 제안 방법의 등가 파라미터 추정결과를 비교 분석하였다. 또한, 추정된 파라미터에 기반하여 전체 및 차수별 고조파 기여도를 산출한 후 모의계통에 대한 고조파 왜곡 지도를 나타내었다.

마지막 제6장은 본 논문의 결론으로 제안된 개발 기술의 핵심내용 전반을 요약 정리하였으며, 활용성 및 향후 연구에 대한 계획을 기술하였다.

제 2 장 고조파 관리 지수 및 기여도 평가

2.1 기존의 고조파 왜곡 지수

비선형 부하와 같은 고조파원으로부터 생성된 고조파 전류가 계통으로 유입될 경우 계통 손실, 변압기 과열, 역률 저하, 계전기 오동작 등 다양한 문제가 발생된다. 장기적인 관점에서는 고조파 문제가 지속적으로 나타나기 때문에 경제적 손실이 크게 발생할 수 있다. 따라서 고조파 전류의 계통 유입을 일정 범위로 제한해야 하며 전력회사는 모선의 전압이 일정 수준 이상 왜곡되지 않도록 관리를 해야 한다. 계통의 고조파 관리를 위해서 전통적으로 전압과 전류의 THD를 사용하고 있으며, 식 2.1과 같이 산출할 수 있다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} X_h^2}}{X_1} \times 100 \quad (2.1)$$

여기서 X_1 와 X_h 는 전압 또는 전류 파형의 기본파 성분과 h 차 고조파 성분을 나타내며, h_{max} 는 가장 높은 고조파 차수를 나타낸다.

해당 지수는 전압과 전류의 고조파 왜곡 정도를 나타내기 위해 사용할 수 있으나 전류의 경우 기본파 성분의 크기에 따라 값이 크게 달라질 수 있어 절대적인 평가 지표로 사용하기에 무리가 있다. 따라서 전류의 경우

고조파 왜곡 정도를 정량화하기 위해 THD 보다 TDD 지수를 많이 사용하고 있으며, TDD 지수의 계산은 식 2.2와 같다.

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} I_n^2}}{I_L} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_{n_{max}}^2}}{I_L} \quad (2.2)$$

여기서, I_L 은 PCC에서 측정된 기본 주파수 성분에서 공급되는 부하 전류의 최댓값이다.

2.2 국내외 고조파 관리기준 현황

현재 우리나라의 전압 고조파 관리기준은 표 2.1과 2.2와 같다. 과거의 고조파 관리기준과 비교해 고조파 차수별 세분화된 제한 기준을 명시하고 있다. 표 2.1은 공급 전압 기준 66kV 이상인 계통에 대한 전압 고조파 허용 기준이며 표 2.2는 22.9kV이하 계통에 대한 허용 기준을 나타낸다 [23]. 이러한 기준은 수용가의 고조파 전류 유출에 대한 허용 정도를 결정하며, 기준을 초과할 경우 고조파 저감 대책 요구의 근거로 활용할 수 있다. 기존고객의 고조파 측정은 주관부서에서 매년 12월 중에 익년도 측정 계획을 자체수립하여 순차적으로 시행하며 2년마다 유효성 평가를 실시한다.

표 2.1 전압고조파 허용 기준(66kV 이상)

공급 전압이 66kV 이상인 경우					
홀수 고조파 (비 3배수)		홀수 고조파 (3배수)		짝수 고조파	
차수	고조파 전압(%)	차수	고조파 전압(%)	차수	고조파 전압(%)
5	1.8	3	1.5	2	0.6
7	1.5	9	0.5	4	0.3
11	1.1	$h \geq 15$	0.1	6	0.2
13	0.9			8	0.2
17	0.6			$h \geq 10$	0.1
19	0.5				
23	0.4				
25	0.4				
29	0.3				
31	0.3				
$h \geq 35$	0.2				

표 2.2 전압고조파 허용 기준(22.9kV 이하)

공급 전압이 22.9kV 이하인 경우					
홀수 고조파 (비 3배수)		홀수 고조파 (3배수)		짝수 고조파	
차수	고조파 전압(%)	차수	고조파 전압(%)	차수	고조파 전압(%)
5	3.8	3	3.1	2	1.3
7	3.1	9	0.9	4	0.6
11	2.2	21	0.2	6	0.3
13	1.9	>21	0.2	8	0.3
$h \geq 17$	$\{1.36 \times (17/h)\}$ - 0.16			$h > 8$	$\{0.15 \times (10/h)\}$ - 0.15

주) 종합 고조파 왜형률(THD): 배전계통에서 5%

신규고객은 전력공급 후 고객이 계통으로 유출하는 고조파 전류를 표 2.3의 기준으로 측정 및 분석하여 “TSHARP(송전계통 고조파 검토 프로그램)”에 의해 산정된 고조파 전류 유출 제한값을 초과할 경우 해당 고객에 고조파 저감 대책을 요구하게 된다[24]. 측정은 표 2.3과 같이 3가지 기준으로 시행하며, 일반적으로 부하량과 부하 패턴은 주중과 주말에 서로 다르게 나타나기 때문에 각각의 고객들의 고조파 전류는 PCC에서 IEC 기준(61000-3-6, 61000-4-7, 61000-4-30)에 의거 최소 일주일 동안 측정하도록되어 있다.

표 2.3 전류 고조파 측정기준

구분	측정 기간	측정값	내역
기준 1	1일	3초	누적확률 95%값이 차수별 유출 제한값 이하
기준 2	1주일	10분	차수별 최댓값이 유출 제한값 이하
기준 3	1주일	3초	차수별 최댓값이 유출 제한값의 1.5배 이하

해외에서는 고조파 관리를 위해 IEEE std. 519, IEEE std. 1531, IEC 61000 Series와 같은 대표적인 국제 표준과 규정을 수정 보완하여 각 나라의 상황에 맞게 기준을 채택하고 있다. 표 2.4~표 2.9는 IEEE Std. 519에서 제안된 고조파 전압 및 전류 제한치를 보여준다[25]. 표 2.4는 계통 규모에 따른 고조파 전류 기준치를 나타낸 것으로 대규모 부하의 경우 계통에 미치는 영향을 고려하여 상대적으로 높은 제한치가 적용된 것을 알 수 있다.

표 2.4 계통 규모별 고조파 전류 관리기준

SCR at PCC	Maximum Individual Frequency Voltage Harmonic (%)	Related Assumption
10	2.5-3.0	Dedicated system
20	2.0-2.5	1-2 large customer
50	1.0-1.5	A few relatively large customer
100	0.5-1.0	5-20 medium size customers
1000	0.05-0.10	Many small customers

표 2.5는 전압 크기에 따른 고조파 전압 관리기준을 나타내며, 아래와 같은 제한 규정을 두고 있다.

- 3초 측정치로 얻은 일일 99% 확률값이 제한치의 1.5배 미만이어야 한다.
- 10분 측정치로 얻은 주간 95% 확률값이 제한치 미만이어야 한다.

표 2.5 전압 레벨별 전압 관리기준

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%) $h \leq 50$	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

*High-voltage systems are allowed to have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects are found to be attenuated at points in the network where future users may be connected.

일반적인 배전계통에서의 전류 왜곡 한계값은 표 2.6~2.8과 같으며, 각 전압 레벨 120~69,000V, 69,001~161,000V, 161,000V 이상의 계통에 대한 관리기준을 나타낸다.

표 2.6 120~69,000V 전압 계통에서의 전류 관리기준

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order ^b						
I_{SC}/I_L	$2 \leq h < 11^a$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

^a For $h \leq 6$, even harmonics are limited to 50% of the harmonic limits shown in the table.

^b Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

^c Power generation facilities are limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{SC}/I_L unless covered by other standards with applicable scope.

where:

I_{SC} = maximum short-circuit current at PCC

I_L = maximum demand load current at PCC under normal load operating conditions

표 2.7 69,001~161,000V 전압 계통에서의 전류 관리기준

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order						
I_{SC}/I_L	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

표 2.8 161,000V 이상 전압 계통에서의 전류 관리기준

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order						
I_{SC}/I_L	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 25	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

- 3초 측정치로 얻은 일일 99% 확률값이 제한치의 2배 미만이어야 한다.
- 10분 측정치로 얻은 주간 99% 확률값이 제한치의 1.5배 미만이어야 한다.
- 10분 측정치로 얻은 주간 95% 확률값이 제한치 미만이어야 한다.

상기 표에서 I_{SC} 는 PCC에서 최대 단락 전류이며, I_L 은 PCC에서 요구되는 최대 부하 전류의 기본파 성분 전류를 나타낸다. 기타 국가들에서는 표 2.10과 같이 고조파 관리기준 및 현황이 보고된 바 있다.

표 2.9 국가별 고조파 관리현황 [26]

일본	1. 정부주도로 산업체, 전력회사 전문가로 위원회를 구성하여 국가 차원의 고조파 가이드라인 설정 운영 중 -고조파 측정 자료를 제출하여 허용 기준치 준수 여부 확인 -고조파 전류 발생량 감소를 위한 수전 전압별 억제목표치 설정 -저압 가전기기 고조파 전류 발생량 25% 감소를 위해 기기별 고조파 억제 가이드라인 제정('05) 2. 계통 고조파 관리기준: 3%(7kV 초과) 또는 5%(7kV 이하) 이하 3. 신규고객 고조파 관리절차 - 신규신청 고객이 보유설비에 따른 고조파 차수별 전류 예상치 (전기공사체 검토 대행)를 전력회사에 제출 - 전력회사에서 고조파 기준 부합여부를 검토 후 기준 위반 시 고객에게 보완 대책 시행안내 및 재심사 4. 고조파 발생고객 관리현황 - 고객설비 고조파 유출 기준 값 초과 시 고조파 필터 등 저감 장치를 고객 부담으로 시설토록 유도 - 별도의 정기 측정기준은 없으며, 필요시 또는 고객 요청시 고조파 측정 시행
유럽	1. 영국, 독일 등 대부분의 유럽 국가는 IEC 기준에 의거 전압레벨에 따라 송배전 계통에서 허용되는 고조파 관리 목표치 부여 - 전력회사는 계통의 고조파 관리목표를 준수하기 위하여 개별 고객에서 방출되는 전류를 일정수준 이하로 제한하고 있음
미국	1. 기존에는 강제적 효력이 없는 IEEE 기준을 적용하였으나, 현재 국제 표준인 IEC 기준을 준용하는 방향으로 기준 개정
싱가폴	1. 고조파 기준은 IEEE 기준을 채택하고 있으며, 배전선로의 경우 4% 이하로 관리하고 있음
홍콩	1. 유럽 표준인 EN 50160을 근거로 하여 고조파 관리기준을 전기 공급약관에 명시하여 관리하고 있음 - 배전계통(11 kV)의 고조파 전압왜형율은 5%이며 고조파 전류는 고객 계약 전력에 따라서 5~12%의 왜형률 제한을 두고 있음 - 고조파 유출 제한 값을 초과하는 고객은 전기 공급을 중지할 수 있다고 약관에 명시하고 있으나, 실제 적용된 사례는 거의 없음

2.3 고조파 기여도 평가 기술

계통의 전압 왜곡은 고조파원들에서 유입되는 전류의 상호작용에 의해 나타나게 된다. 따라서 계측 지점에서의 전압 왜곡이 심할 경우 측정 데이터만으로 전압 왜곡의 원인을 파악할 수 없다. 기존의 THD와 TDD와 같은 전통적인 고조파 평가 지수 또한 측정 지점에서의 고조파 왜곡 정도만 파악할 수 있으며, 고조파원 식별이나 기여 정도는 나타내지 못한다. 따라서 계통에서의 고조파 관리를 위해서는 PCC 전압 왜곡에 기여가 높은 고조파원을 찾아 직접적인 고조파 유출 제약 등 저감 대책이 필요하다. 이러한 대책 마련을 위해서는 PCC와 같은 수용가 연계점에서의 고조파 기여도 평가(harmonic contribution assessment)가 필요하다. 고조파 기여도 평가는 PCC 전압 왜곡에 기여가 높은 고조파원을 직관적으로 파악할 수 있어 다양한 대책 마련에 효과적이다. 그림 2.1 고조파 기여도 평가 예를 나타낸 것이다.

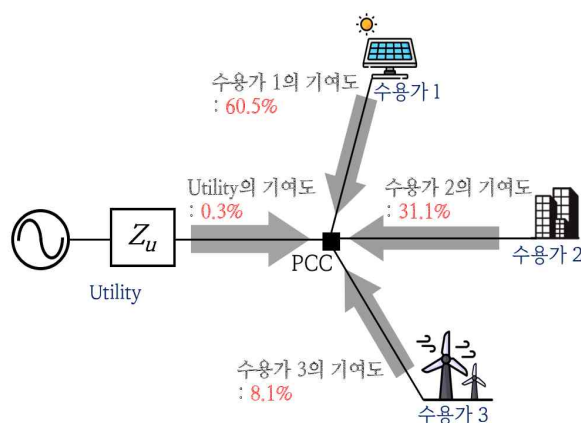


그림 2.1 고조파 기여도 평가 예

해당 계통은 하나의 유틸리티와 3개의 수용가로 구성되었으며, PCC 전압 왜곡에 수용가 1, 2, 3의 기여도가 각각 60.5%, 31.1%, 8.1%인 것을 직관적으로 알 수 있다. 또한, 유틸리티의 기여도는 0.3%로 수용가들에 비해 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이에 따라 수용가 1과 2는 유틸리티와 수용가 3에 비해 상대적으로 고조파 기여도가 높기 때문에 저감 대책이나 직접적인 고조파 유출 제약 조건 등을 적용할 수 있다. 이러한 고조파 기여도 평가를 위해서는 계통의 모든 고조파원들에 대해 직접적으로 측정하여 등가 모델의 상세한 파라미터 정보를 획득해야 한다. 그러나 배전계통의 경우 변동성이 매우 크며, 측정 개소가 많아 실제로 데이터 획득이 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 PCC에서의 측정 데이터와 수치 해석을 이용하여 각 고조파원의 등가 모델을 추정한다. 추정된 등가 모델과 중첩의 원리를 이용하여 전체 및 차수별 고조파 기여도를 산출하게 된다. 본 논문에서는 이러한 평가 과정에 대해 상세히 기술하였으며, 사례연구를 통해 개발 기술의 성능을 검증하였다.

제 3 장 고조파 등가 전압원 모델 추정

계통 PCC 전압 왜곡에 대한 기여도는 기본적으로 전체 고조파원의 등가 전압원에 대한 중첩의 원리(principle of superposition)를 적용하기 때문에 해당 고조파원들의 등가 파라미터 정보가 필요하다. 그러나 배전계통은 고조파원의 운전 조건에 의해 변동성이 커 등가 모델의 파라미터들은 직접적으로 측정하기가 어렵다. 이에 본 연구에서는 PCC에서의 계측 데이터와 순환최소자승법(RLS: recursive least square)에 기반한 파라미터 추정 방법을 제안하였다.

3.1 순환최소자승법을 이용한 파라미터 추정

계통에는 신재생에너지 및 비선형 부하와 같은 다양한 고조파원이 존재하며, 이와 같은 고조파원들은 등가 전압원과 전류원 모델로 나타낼 수 있다. 등가 전압원과 전류원 모델은 노튼 및 테브닌 법칙에 의해 쉽게 상호 변환이 가능하며, 모델 정보가 제공될 경우 고조파 전압 및 전류원에 대한 기여도를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 고조파원 등가 전압원 모델을 기반으로 한 고조파 기여도 평가방법을 제안하였으며, 제안 방법은 필요에 따라 전류원으로 변환하여 해석할 수 있다. 등가 전압원 모델은 PCC에서 측정된 전압 및 전류 데이터와 RLS를 이용하여 추정하게 된다. RLS는 비교적 간단하고 수렴 특성이 우수하여 불확실한 시스템에 대한 근사해를 찾는 데 선호되는 기술로 일반적인 최소자승(LS: least square) 알고리즘의 응용형태이다. 시변 파라미터 추정에 많이 사용되는 적응형

필터 알고리즘으로서, PCC에서 측정된 전압과 전류로부터 고조파 등가 파라미터 추정에 적합한 알고리즘이다 [20]. 기본적으로 LS 알고리즘은 측정값과 추정값의 차이의 제곱이 최소가 되도록 하는 선형 파라미터 추정 방법으로 식 3.1과 같이 일반화할 수 있다.

$$\min \sum_{i=1}^N \text{Residual}^2(t_i) = \sum_{i=1}^N (Y(t_i) - f(a(t_i)))^2 \quad (3.1)$$

여기서, *Residual*은 측정값과 추정값의 차를 나타내며, 추정 오차 또는 잔차라고 한다. 시간 t_i 에 대해 *Residual*은 $\text{Residual}(t_i) = Y(t_i) - f(a(t_i))$ 가 되며, $Y(t_i)$ 은 측정값이고, $f(a(t_i))$ 은 추정값이다. 그림 3.1은 최소자승법을 이용한 선형 파라미터 추정 예를 보여준다.

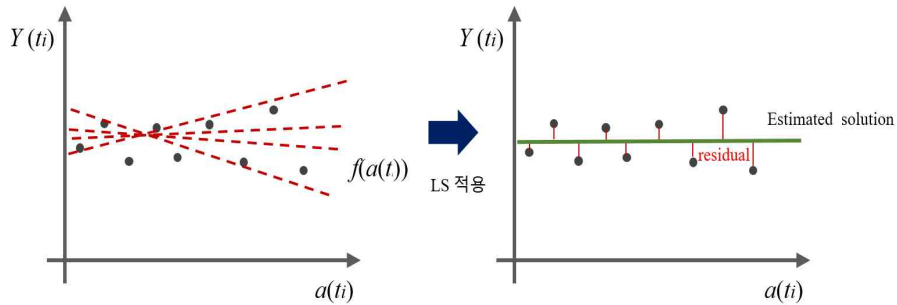


그림 3.1 LS 알고리즘을 이용한 선형 모델 추정 예

LS 알고리즘으로부터 $Y = A\theta$ 의 선형 방정식에 대한 추정 해 $\hat{\theta}(t)$ 는 식 3.2와 같이 정리할 수 있다[27].

$$\hat{\theta}(t) = (A^T(t)A(t))^{-1}A^T(t)Y(t) \quad (3.2)$$

여기서 $A(t_N) = [a^T(t_1) a^T(t_2) \cdots a^T(t_N)]^T$, $Y(t_N) = [y(t_1) y(t_2) \cdots y(t_N)]$ 이고 각각 입력과 출력 신호를 나타낸다.

식 3.2의 LS 알고리즘의 일반식으로부터 RLS 알고리즘은 다음과 같이 유도된다. 먼저 t_N 에서 t_{N+1} 로 새로운 데이터가 입력될 경우 식 3.3과 같이 입력과 출력이 업데이트되고 이에 따른 새로운 추정 해는 식 3.4와 같이 나타낼 수 있다.

$$A(t_{N+1}) = \begin{bmatrix} a^T(t_1) \\ a^T(t_2) \\ \vdots \\ a^T(t_N) \\ a^T(t_{N+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(t_N) \\ a^T(t_{N+1}) \end{bmatrix}, \quad Y(t_{N+1}) = \begin{bmatrix} y(t_1) \\ y(t_2) \\ \vdots \\ y(t_N) \\ y(t_{N+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(t_N) \\ y(t_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\hat{\theta}(t_{N+1}) = [A^T(t_{N+1})A(t_{N+1})]^{-1} A^T(t_{N+1})Y(t_{N+1}) \quad (3.4)$$

식 3.4의 우변의 각 항은 다음과 같이 정리된다.

$$A^T(t_{N+1})A(t_{N+1}) \quad (3.5)$$

$$= [A^T(t_N)a(t_{N+1})] \begin{bmatrix} A(t_N) \\ a^T(t_{N+1}) \end{bmatrix} = A^T(t_N)A(t_N) + a(t_{N+1})a^T(t_{N+1})$$

$$A^T(t_{N+1})Y(t_{N+1}) \quad (3.6)$$

$$= [A^T(t_N)a(t_{N+1})] \begin{bmatrix} Y(t_N) \\ y(t_{N+1}) \end{bmatrix} = A^T(t_N)Y(t_N) + a(t_{N+1})y(t_{N+1})$$

여기서, $P(t_N) = [A^T(t_N)A(t_N)]^{-1}$, $B(t_N) = A^T(t_N)Y(t_N)$ 라고 두면, $\hat{\theta}(t_N) = P(t_N)B(t_N)$ 로 나타낼 수 있으며, t_{N+1} 의 추정해는 $\hat{\theta}(t_{N+1}) = P(t_{N+1})B(t_{N+1})$ 로 나타낼 수 있다. 또한, 식 3.5와 3.6은 식 3.7과 3.8로 각각 정리된다.

$$P^{-1}(t_{N+1}) = P^{-1}(t_N) + a(t_{N+1})a^T(t_{N+1}) \quad (3.7)$$

$$B(t_{N+1}) = B(t_N) + a(t_{N+1})y(t_{N+1}) \quad (3.8)$$

여기서 식 3.8의 Matrix Inversion Lemma를 적용하면 $P(t_N)$ 을 $P(t_{N+1})$ 로 바로 업데이트할 수 있다.

$$(A + BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(C^{-1} + DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \quad (3.9)$$

식 3.9를 식 3.7에 적용하면 식 3.10과 같다. 단, $A = P^{-1}(t)$, $B = a(t_{N+1})$, $C = 1$, $D = a^T(t_{N+1})$ 이다.

$$P(t_{N+1}) = P(t_N) \left[I_m - a(t_{N+1})(1 + a^T(t_{N+1})P(t)a(t_{N+1}))^{-1}a^T(t_{N+1})P(t) \right] \quad (3.10)$$

또한, t_{N+1} 에서의 추정해 $\hat{\theta}(t_{N+1})$ 에 대한 error (ε)는 식 3.11과 같다.

$$\varepsilon(t_{N+1}) = y(t_{N+1}) - a^T(t_{N+1})\hat{\theta}(t_N) \quad (3.11)$$

그리고 식 3.8에 식 3.11을 적용하여 정리하면 식 3.12와 같다.

$$B(t_{N+1}) = B(t_N) + a(t_{N+1})a^T(t_{N+1})\hat{\theta}(t_N) + a(t_{N+1})\varepsilon(t_{N+1}) \quad (3.12)$$

최종적으로 t_{N+1} 에 대한 새로운 추정해 $\hat{\theta}(t_{N+1}) = P(t_{N+1})B(t_{N+1})$ 에 식 3.12를 대입하여 정리하면 식 3.13과 같은 RLS 알고리즘이 도출된다.

$$\begin{aligned}
P^{-1}(t_{N+1})\hat{\theta}(t_{N+1}) &= P^{-1}(t_N)\hat{\theta}(t_N) + a(t_{N+1})a^T(t_{N+1})\hat{\theta}(t_N) + a(t_{N+1})\varepsilon(t_{N+1}) \\
P^{-1}(t_{N+1})\hat{\theta}(t_{N+1}) &= P^{-1}(t_{N+1})\hat{\theta}(t_N) + a(t_{N+1})\varepsilon(t_{N+1}) \\
\hat{\theta}(t_{N+1}) &= \hat{\theta}(t_N) + P(t_{N+1})a(t_{N+1})\varepsilon(t_{N+1})
\end{aligned} \tag{3.13}$$

식 3.13의 기본적인 RLS 알고리즘은 과거와 현재 데이터의 반영 비중이 동일하여 시변 파라미터에 대한 추정 성능이 떨어지기 때문에 일반적으로 망각인자(forgetting factor) λ 를 포함하는 RLS가 널리 사용되고 있다. 망각인자를 포함하는 RLS 알고리즘에서는 식 3.10이 식 3.14와 같이 수정된다.

$$\begin{aligned}
P(t_{N+1}) &= P(t_N) \left[\lambda^{-1} - a(t_{N+1})(\lambda + a^T(t_{N+1})P(t_N)a(t_{N+1}))^{-1}a^T(t_{N+1})\lambda^{-1}P(t_N) \right]
\end{aligned} \tag{3.14}$$

이상의 전개로부터 망각인자를 갖는 RLS 알고리즘은 식 3.15~3.17과 같이 정리된다.

$$G(t_{N+1}) = P(t_N)A^T(t_{N+1})(\lambda + A(t_{N+1})P(t_N)A^T(t_{N+1}))^{-1} \tag{3.15}$$

$$\hat{\theta}(t_{N+1}) = \hat{\theta}(t_N) + G(t_{N+1})(Y(t_{N+1}) - A(t_{N+1})\hat{\theta}(t_N)) \tag{3.16}$$

$$P(t_{N+1}) = \lambda^{-1}(I - G(t_{N+1})A(t_{N+1}))P(t_N) \tag{3.17}$$

여기서 $\hat{\theta}$ 는 추정 해이며, G 는 이득 행렬, P 는 공분산 행렬, λ 는 망각인자, I 는 단위행렬을 나타낸다.

3.2 고조파 등가 파라미터 추정을 위한 제약 조건

고조파원의 등가 전압원 모델을 추정하기 위해서는 PCC 측정 데이터와 등가 파라미터에 대한 선형 회로 방정식 수립이 필요하다. 수립된 회로 방정식의 해는 등가 파라미터를 의미하며, RLS를 이용하여 추정하게 된다. 추정의 정확도 향상을 위해서는 회로 방정식의 최적 해를 만족하는 제약 조건을 둘 수 있다. 그림 3.2는 PCC를 기준으로 유틸리티와 하나의 고조파 수용가를 포함하는 등가회로를 나타낸다. 이 등가회로에서 PCC 전압에 대한 회로 방정식을 수립하면 식 3.18과 같고 이 선형 방정식에 대해 RLS 알고리즘과 PCC에서 측정되는 전압 및 전류를 이용하여 고조파원의 등가 파라미터를 추정하게 된다.

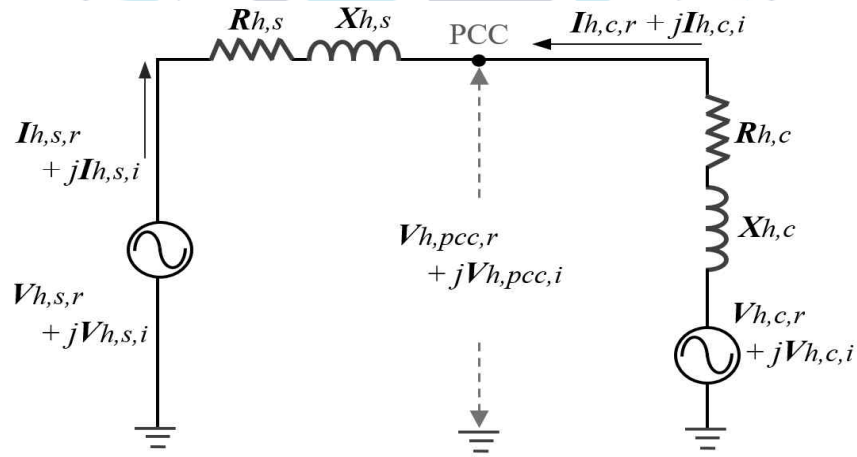


그림 3.2 유틸리티와 한 수용가에 대한 등가 전압 모델

$$V_{h,pcc,r} + jV_{h,pcc,i} = (R_{h,c} + jX_{h,c})(I_{h,c,r} + jI_{h,c,i}) + V_{h,c,r} + jV_{h,c,i} \quad (3.18)$$

여기서 h 는 고조파 차수, r 은 실수부 및 i 는 허수부를 각각 나타낸다.
식 3.18의 선형 방정식을 행렬의 형태로 정리하면 식 3.20~식 3.22와 같
이 나타낼 수 있다.

$$Y(t) = A(t)\Theta \quad (3.19)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} V_{h,pcc,r}(t) & V_{h,pcc,i}(t) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} I_{h,c,r}(t) & I_{h,c,i}(t) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} R_1 & X_2 \\ X_1 & R_2 \\ V_{h,c,r} & V_{h,c,i} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

여기서 $R_1 = R_2 = R_{h,c}$ 와 $X_2 = -X_1 = X_{h,c}$ 는 수용가의 고조파 임피던스
를 나타내며, $V_{h,c,r}$ 와 $V_{h,c,i}$ 는 고조파 전압원의 실수부와 허수부를 나타낸
다. 상기 선형 방정식에 대해 PCC에서의 전압 및 전류가 측정될 때마다
식 3.15~식 3.17의 RLS 알고리즘을 적용하여 등가 파라미터 Θ 를 추정한
다. 여기서 최종적인 등가 파라미터는 식 3.23의 제약 조건을 만족해야 한
다. 따라서 식 3.24의 목적함수에 대한 최적 해를 Lagrange Multiplier를
이용하여 계산함으로써 식 3.29와 같은 최종 해 $\hat{\Theta}$ 를 구하게 된다 [28]. 여
기서 $\hat{\Theta} = [\hat{\Theta}_1 \ \hat{\Theta}_2]$ 의 $\hat{\Theta}_1$ 와 $\hat{\Theta}_2$ 는 3열의 행렬이며, $Y = [Y_1 \ Y_2]$ 의 Y_1 와
 Y_2 는 각 1열의 행렬이다.

$$\begin{aligned} R_1 - R_2 &= 0 \\ X_1 + X_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\min_{\hat{\Theta}} J(\hat{\Theta}) \quad (3.24)$$

$$\mathcal{J}(\hat{\Theta}) \equiv \varepsilon_1^T \varepsilon_1 + \varepsilon_2^T \varepsilon_2 \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_2 \end{bmatrix} = Y - A\hat{\Theta} = \begin{bmatrix} Y_1 - A\hat{\Theta}_1 & Y_2 - A\hat{\Theta}_2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y^T(t_1) & \dots & y^T(t_N) \end{bmatrix}^T \quad (3.27)$$

$$A = \begin{bmatrix} a^T(t_1) & \dots & a^T(t_N) \end{bmatrix}^T \quad (3.28)$$

$$\hat{\Theta} = \Theta - \frac{P}{p_{11} + p_{22}} \begin{bmatrix} R_2 - R_1 & X_2 + X_1 \\ X_1 + X_2 & R_1 - R_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

여기서 p_{11} 과 p_{22} 는 공분산 행렬 P 의 요소이다.

3.3 파라미터 변화 감지와 가변 망각인자 RLS 알고리즘 기반의 등가 모델 추정 방법

RLS 알고리즘에서 망각인자는 과거와 현재 데이터 비중을 결정하는 중요한 요소이다. 망각인자가 없는 RLS 알고리즘은 시간이 지남에 따라 공분산 행렬이 0에 수렴하기 때문에 파라미터 추정 능력이 떨어질 수 있다 [29], [30]. 따라서 망각인자를 갖는 RLS 알고리즘을 일반적으로 이용하며, 망각인자 값의 범위는 $0 < \lambda \leq 1$ 이다. 망각인자 값이 1에 가까우면 과거 데이터의 가중치가 커지므로 파라미터 추정이 상대적으로 안정적이거나 수렴속도는 매우 느리다. 반면 망각인자의 값이 작으면 수렴속도는 빠르지만 추정 성능이 떨어지며, 일반적으로 많은 연구에서 0.9~1사이의 망각인자를 사용한다[21], [31]. 기존의 고조파 기여도 평가방법에서는 고정 망각인자를 갖는 RLS 알고리즘을 이용하여 고조파원의 등가 파라미터 추정을

수행하였다. 고정 망각인자의 경우 식 3.17에서 공분산 행렬을 동일한 가중치로 계속 나누게 되어 시스템의 정상상태 운전 조건이 지속될 경우 공분산 행렬이 계속 증가하는 효과를 가져온다. 이 상태에서 시스템의 운전 조건이 갑자기 변화하게 되면 큰 공분산 행렬로 인해 “wind-up”문제가 발생한다. wind-up 문제는 공분산 행렬의 기하급수적인 증가로 인해 파라미터 추정이 매우 민감하게 되어 시스템 변화에 대해 큰 오차를 발생시키는 현상을 의미한다. 이러한 wind-up 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 가변 망각인자를 갖는 RLS 알고리즘을 이용한 등가 파라미터 추정 방법을 제안한다. 가변 망각인자를 사용할 경우 공분산 행렬의 증가를 제한할 수가 있어 시변 파라미터 추정성능을 향상시킬 수가 있다. 가변 망각인자 기반의 RLS는 식 3.30~3.33과 같으며, 여기서 α 는 가변 망각인자의 가중치를 나타낸다[21].

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n \alpha + (1-\alpha) \quad (3.30)$$

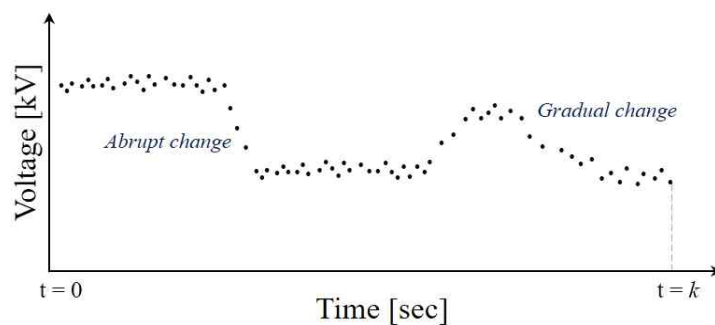
$$G_{n+1} = P_n A_{n+1}^T (I \lambda_{n+1} + A_{n+1} P_n A_{n+1}^T)^{-1} \quad (3.31)$$

$$\Theta_{n+1} = \Theta_n + G_{n+1} (Y_{n+1} - A_{n+1} \Theta_n) \quad (3.32)$$

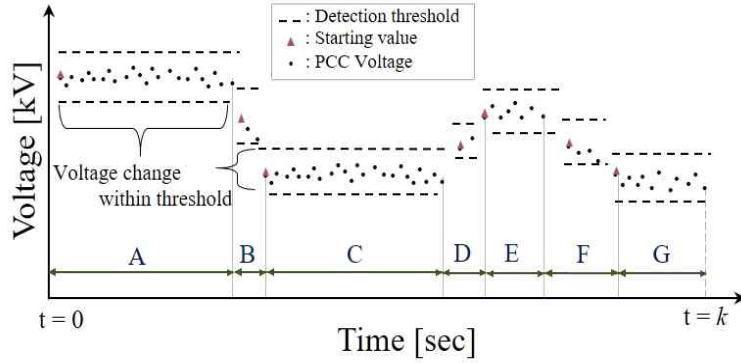
$$P_{n+1} = (I - G_{n+1} A_{n+1}^T) P_n / \lambda_{n+1} \quad (3.33)$$

고조파원의 등가 파라미터가 변화하는 경우 RLS 알고리즘에서의 과거 데이터는 현재의 변화된 파라미터 추정이 저장될 수 있다. 고조파원의 등가 파라미터 변화에도 과거 측정 데이터가 추정에 지속적으로 반영되면 추정 오차가 증가하고 수렴하는 데 오랜 시간이 걸린다. 따라서 등가 파라미터가 변화하는 경우 RLS 추정에 있어 과거 데이터는 무시하고 새로운 데이터만을 이용하여 파라미터를 추정할 필요가 있다. 본 연구에서는

고조파 등가 파라미터 추정성능을 향상시키기 위해 PCC의 전압 변화에 따른 파라미터 변화 검출 방식을 제안한다. 기본적으로 고조파 등가 파라미터의 변화는 PCC 전압에 영향을 주기 때문에 PCC 전압이 일정 수준 이상 변화할 경우 RLS 알고리즘에 있어 과거 데이터의 반영 여부를 결정하여 추정성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 PCC 전압의 작은 변화에도 빈번하게 과거 데이터를 배제하여 RLS 알고리즘을 적용하게 되면 오히려 추정의 안정성이 저하될 수 있으므로 PCC 전압이 특정 기준 범위를 벗어나는 경우에만 새로운 추정을 시작하는 것이 효과적이다. PCC 전압의 변화가 기준 범위 내에 있을 때 정상상태 운전 조건으로 간주하며 기준 범위 내에서의 노이즈 및 전압 변동은 파라미터 추정 및 장기 기여도 평가에 큰 영향을 미치지 않는다. 그림 3.3은 PCC 전압의 변화에 따른 파라미터 변화 감지 및 추정 방법을 보여준다. 그림 3.3 (a)는 고조파원의 등가 파라미터 변화에 따른 PCC 전압의 다양한 변화를 나타낸다. 이러한 경우 파라미터 변화를 고려하지 않고 계속적으로 과거 데이터를 반영하여 추정할 경우 정확한 파라미터 추정을 기대하기 어렵다. 파라미터 변화를 고려한 추정을 위해서는 PCC 전압 변화율을 산출할 필요가 있으며 이 변화율이 주어진 임계값을 벗어나는지를 지속적으로 평가해야 한다.



(a) 파라미터 변화에 따른 PCC 전압의 변화



(b) 각 데이터 변화 구간에 대한 파라미터 추정

그림 3.3 파라미터 변화감지에 기반한 RLS 추정 예

PCC 전압의 변화율은 식 3.34와 같이 계산되며 이 값이 임계값을 초과할 경우 모든 과거 데이터는 무시되고 새로운 측정 데이터만을 이용하여 RLS 알고리즘에 적용한다. 실제 응용에 있어서는 과도 조건과 같은 단기간에 갑작스러운 변화가 있거나 그림 3.3 (b)의 B, D, F와 같은 추정 구간에 데이터의 수가 충분하지 않는 경우에는 RLS 알고리즘을 이용한 추정의 신뢰도가 떨어지기 때문에 고조파 기여도 평가에서 무시할 수 있다. 따라서 그림 3.3 (b)와 같은 경우에는 구간 A, C, E, G에 대해서 유효한 파라미터 추정이 가능하다.

$$\Delta V_{pcc} = \left| \frac{V_{pcc}^{start} - V_{pcc}^{(N)}}{V_{pcc}^{start}} \right| \times 100 (\%) \quad (3.34)$$

ΔV_{pcc} 는 PCC 전압의 변화율, V_{pcc}^{start} 는 알고리즘 적용을 위한 PCC 전압의 시작값으로 파라미터 변화 감지 기준값이다. 또한 $V_{pcc}^{(N)}$ 는 V_{pcc}^{start} 이후 순차적인 전압값이다.

3.4 RANSAC 알고리즘을 이용한 이상점 제거

최근 PMU, AMI, 스마트미터 등 측정기기가 확대 보급되면서 계통의 다양한 위치에서 측정 데이터를 획득할 수 있게 되었다. 그러나 측정 데이터에는 통신 오류, 정전, 센서 고장 등의 다양한 원인으로 인해 이상점이 포함될 수 있다[32]~[35]. 이상점은 데이터의 정규 분포에서 크게 벗어나는 데이터이다. 측정 데이터에 이상점이 존재할 경우 RLS의 추정 성능이 크게 저하되는 근본적인 문제가 있다. 따라서 RLS 추정의 정확도를 높이려면 측정 데이터에서 이상점을 검출하여 제거해야 한다. 이에 따라 본 논문에서는 RANSAC (random sample consensus) 알고리즘을 이용하여 raw data의 이상점을 제거하고 RLS 적용을 위한 유효점(inlier) 데이터 선택 방법을 제안하였다. 유효점은 데이터 블록(DB : data block)에 대해 RANSAC 알고리즘을 이용하여 이상점을 제거한 나머지 데이터로서 신뢰할 수 있는 데이터이다. DB 는 이상점 검출을 위한 데이터 셋의 최소 단위이다. RANSAC 알고리즘은 측정 데이터 세트에서 심한 노이즈를 포함한 이상점을 제거하여 보다 안정적인 데이터 모델을 결정하는 방법이다[36]~[40]. 이상점과 유효점 데이터는 가장 신뢰할 수 있는 수학적 모델을 도출한 후 모델과 임계범위에 따라 결정된다. 그림 3.4는 RANSAC 알고리즘을 기반으로 이상점을 감지하고 제거하는 기본 절차를 보여준다. 먼저, 주어진 DB 로부터 무작위로 선택된 두 개의 데이터 $(t_{i,1}, d_{i,1})$ 와 $(t_{i,2}, d_{i,2})$ 를 통과하는 N 개의 선형 함수 $F_1(t), F_2(t), \dots, F_N(t)$ 가 도출된다. N 은 RANSAC 알고리즘에서 유효점을 가장 많이 포함되는 선형 함수를 결정하기 위한 이론적 최대 반복횟수를 나타내며 식 3.35와 같이 계산된다[38]. 그러나 실제 측정에서는 정확한 N 계산을 위한 파라미터 값을 알기

어려우므로 일반적으로 측정 데이터의 수를 고려하여 충분히 큰 값으로 N 을 결정한다.

$$N_{\max} = \frac{\log \alpha}{\log(1-\gamma^m)} \quad (3.35)$$

여기서 m 은 측정 데이터 수, γ 와 α 는 각각 측정 데이터의 유효점 비율과 유효점을 뽑지 못할 확률을 의미한다.

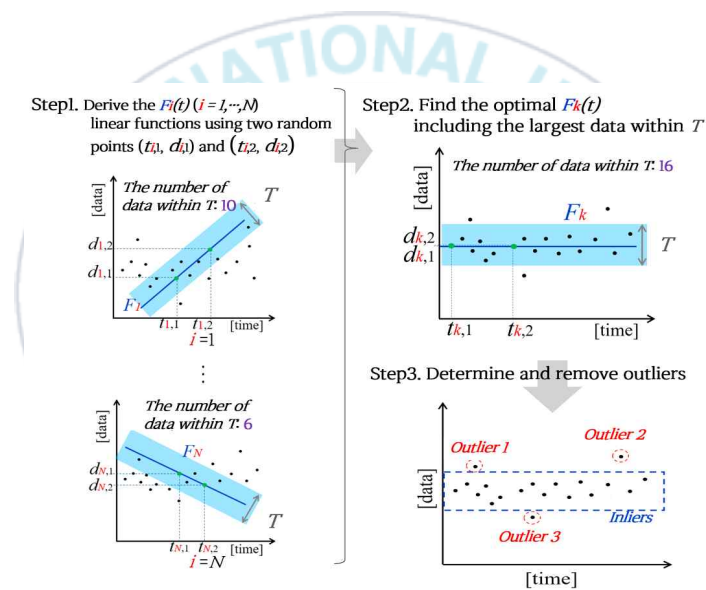


그림 3.4 RANSAC 알고리즘에 기반한 데이터 이상점 결정 및 제거 방법

다음으로 선형 함수 중 임계범위 T 내에서 가장 많은 데이터를 포함하는 선형 함수 $F_K(t)$ 를 DB의 최적 모델로 결정한다. T 는 선형 함수 모델에서 이상점을 결정하기 위한 임계범위이다. 마지막으로 선형 모델 $F_K(t)$ 의 T 범위를 벗어난 데이터는 이상점으로 간주하여 제거되고 T 범위 내의 유효점만으로 새로운 데이터셋을 구성한다.

3.5 제안 알고리즘의 추정 절차

그림 3.5는 제안된 RANSAC 및 RLS 알고리즘을 기반으로 한 등가 파라미터 추정 방법의 전체적인 절차를 나타낸 것이다. 먼저 RANSAC 및 RLS 알고리즘의 필수 인자값을 초기화한다. 다음으로 RANSAC 알고리즘을 이용하여 측정된 전압 및 전류에서 이상점을 제거한다.

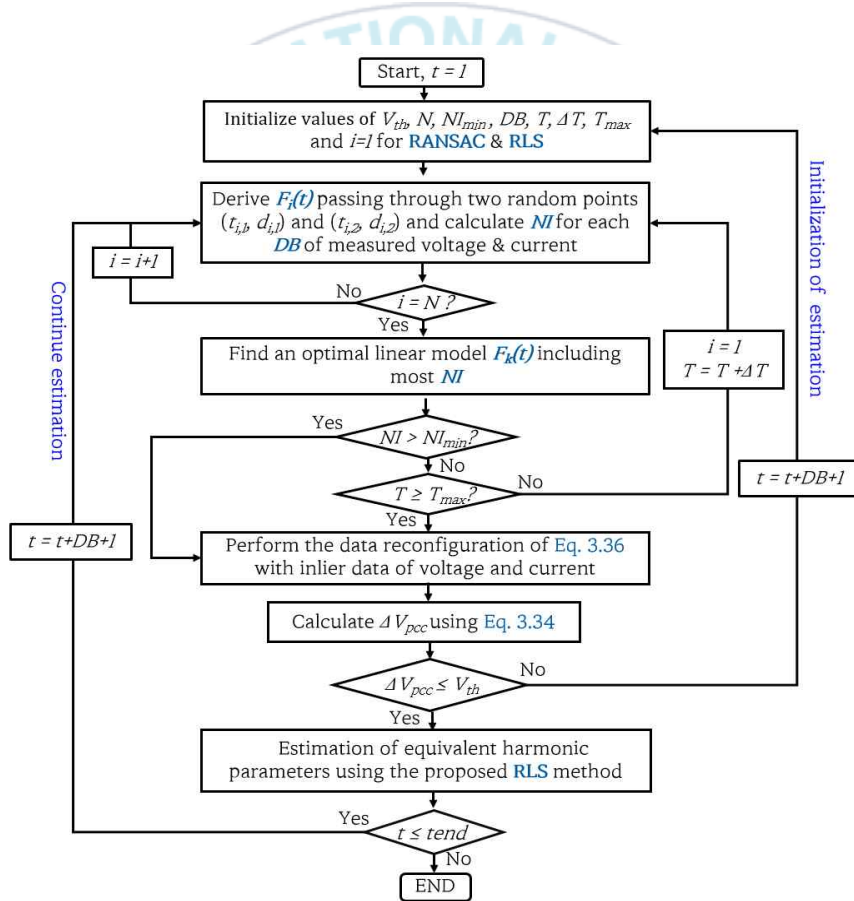


그림 3.5 제안 등가 파라미터 추정 방법의 절차

선형 함수 $F_i(t)$ 는 주어진 DB 에서 무작위로 선택된 두 점($t_{i,1}, d_{i,1}$)와 ($t_{i,2}, d_{i,2}$)를 이용하여 얻게 된다. T 범위에 대해 N 개의 선형 함수 $F_1(t), F_2(t), \dots, F_N(t)$ 이 도출한다. 그런 다음 각 선형 함수 모델에 대해 NI 를 계산한다. T 범위 내의 가장 많은 NI 를 포함하는 선형 모델 $F_K(t)$ 를 결정한다. 그림 3.6은 가변 T 범위에 따른 NI 결정 방법을 나타낸 것이다. T 범위가 너무 큰 경우에는 정확한 이상점 감지 및 제거가 어렵게 된다. 또한, T 범위가 너무 작으면 이상점과 유효점 모두 제거할 수 있다. 따라서 효과적인 T 범위 결정을 위해 그림 3.6과 같이 가변 임계범위를 제안한다.

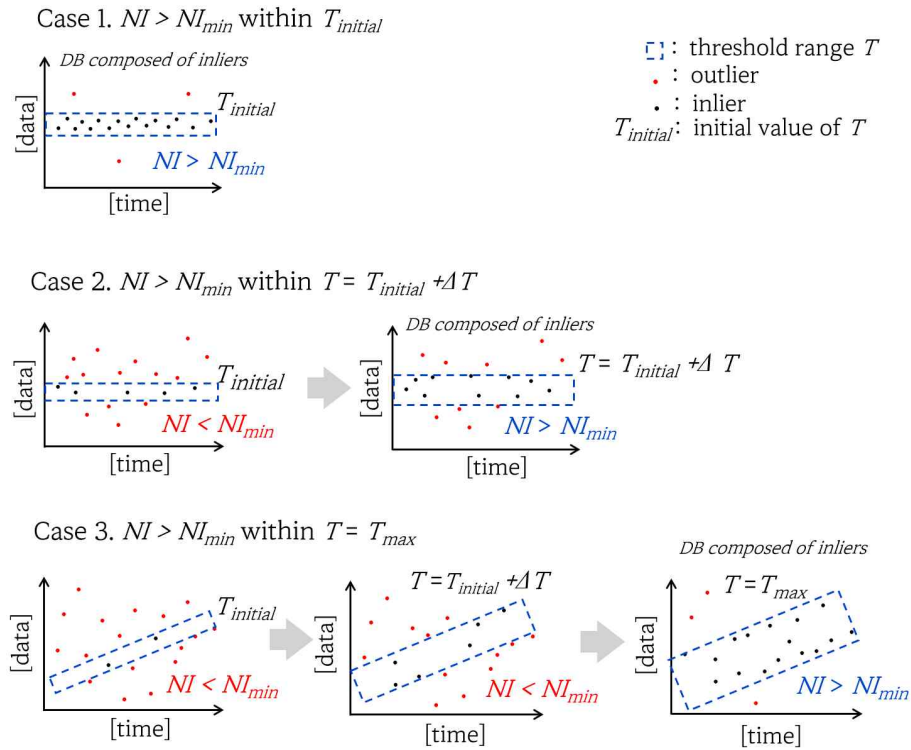


그림 3.6 가변 T 범위에 따른 유효점 데이터 결정 예

각 선형 모델로부터 결정된 NI 와 NI_{min} 을 비교하여 NI 가 NI_{min} 보다 큰 경우 선형 모델 $F_K(t)$ 를 최종 모델로 결정한다. 여기서 NI_{min} 은 RLS 추정을 위해 주어진 DB 의 최소 유효점의 수이다. 반면에 NI 가 NI_{min} 보다 작으면 T 범위는 ΔT 만큼 증가하고 NI 가 NI_{min} 보다 클 때까지 반복하여 최적의 선형 모델을 찾는다. 만약 T 값이 T_{max} 를 초과하거나 NI_{min} 을 만족하는 모델이 없으면 신뢰할 수 있는 RLS 추정을 위해 DB 의 전체 데이터를 제거한다. 이와같이 제안된 RANSAC 방법을 이용하여 PCC에서 측정된 전압 및 전류에 대한 RLS 추정성능을 저하시키는 이상점을 감지한 후 제거할 수 있다. 그러나 이러한 이상점 제거를 한 전압과 전류 데이터는 서로 크기가 다르거나 동일 시간에 제거된 데이터가 발생할 경우 식 3.18의 전압 방정식을 만족하지 않을 수 있다. 따라서 전압 및 전류 유효점 데이터셋만을 이용한 데이터 재구성(data reconfiguration)이 필요하다. 그림 3.7은 수용가 k 의 PCC 전압과 전류에 대한 데이터 재구성의 예를 나타낸 것이다. PCC 전압 실수부에서 시간 t_1, t_2, t_3 에 포함된 이상점을 제거하게 되면 해당 시간의 전압 허수부와 수용가 k 의 전류 데이터도 제거해야 한다. 식 3.36과 같이 공통 시간에 대한 PCC 전압과 모든 수용가의 전류 유효점 데이터만을 이용하여 RLS 알고리즘에 적용 가능한 데이터셋을 결정한다.

$$t_{inlier} = \{t_{V_{pcc},r}^* \cap t_{V_{pcc},i}^*\} \cap \{t_{I_{\Lambda},r}^* \cap t_{I_{\Lambda},i}^*\} \cap \dots \{t_{I_{n,r}}^* \cap t_{I_{n,i}}^*\} \quad (3.36)$$

여기서 $t_{V_{pcc},r}^*$ 와 $t_{V_{pcc},i}^*$ 는 이상점이 제거된 PCC전압 실수부 및 허수부의 유효점 시간 데이터이다. 또한, $t_{I_{\Lambda},r}^*, t_{I_{\Lambda},i}^*, \dots, t_{I_{n,r}}^*, t_{I_{n,i}}^*$ 는 n 개의 수용가 전류에 대한 유효점 시간 데이터 세트이다.

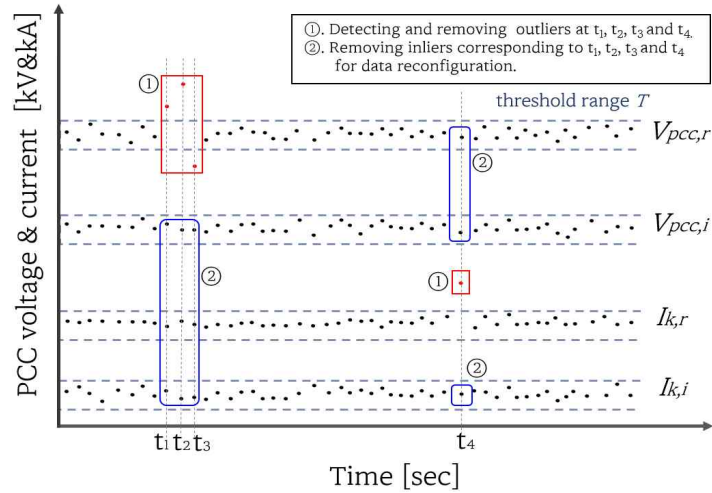


그림 3.7 전압 및 전류에 대한 데이터 재구성 예

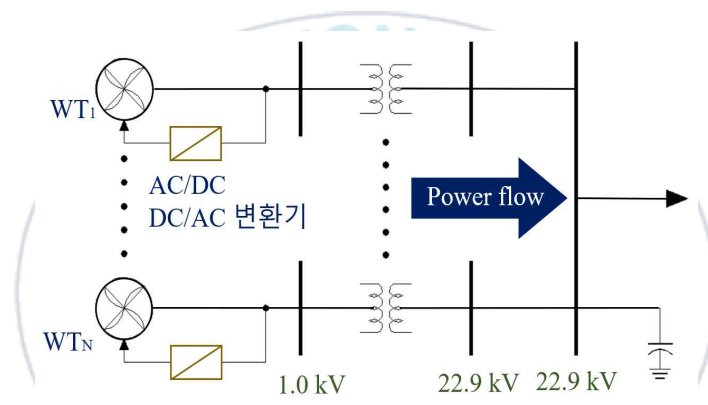
다음으로 데이터 재구성을 수행한 후 식 3.34를 이용하여 전압 변화율 (ΔV_{PCC})을 계산한다. ΔV_{PCC} 가 임계값 V_{th} 보다 작으면 RLS 알고리즘을 이용하여 등가 파라미터를 추정한다. 반면 V_{th} 보다 크면 RLS 알고리즘을 초기화하고 새로운 추정을 수행한다. 이 절차는 마지막 측정 데이터(t_{end})까지 반복한다.

3.6 다양한 고조파원의 동작 특성

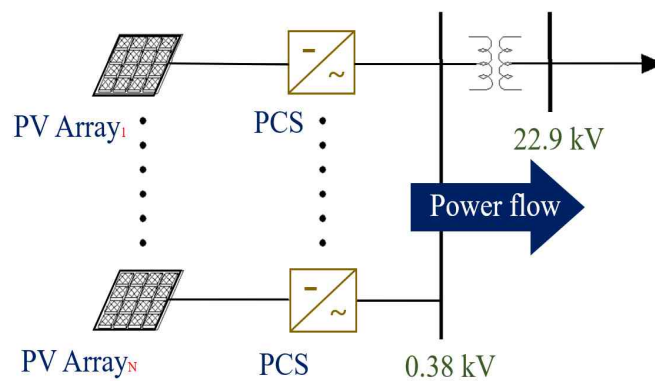
계통의 고조파원들은 전력전자소자를 비롯해 다양한 비선형 부하로 구성되어 있으며, 동작 특성에 따라 고조파 성분과 정도가 상이하다. 본 장에서는 신재생에너지원 및 비선형 부하에 대한 동작 특성과 고조파 모델을 분석하였으며, 사례연구에서는 이러한 특성을 반영한 고조파원 모델을 구성하였다.

3.6.1 신재생 에너지원의 특성

태양광 및 풍력 에너지원의 경우 컨버터와 인버터 등의 비선형 전력전자소자로 구성되어 있다. 이러한 비선형 소자는 고조파를 생성하여 전원측으로 유입될 수 있으며, 인접 계통으로 확대되어 심각한 고조파 문제를 초래할 수 있다. 그림 3.8은 태양광 및 풍력발전시스템 모델을 나타낸다.



(a) 풍력발전 시스템



(b) 태양광발전 시스템

그림 3.8 신재생에너지 시스템 모델 [41]

풍력발전시스템은 DFIG(doubly-fed induction generator)형태의 발전기(비동기)가 일반적이며, 해당 시스템은 전력전자변환기 장치가 전체 발전기 용량의 약 30% 정도를 차지한다 [42].

DFIG 풍력발전기는 회전자계를 조정하여 쉽게 역률과 전압의 적정값을 얻을 수 있는 장점이 있으나 전력전자변환기 장치로 인하여 고조파 문제가 발생할 수 있는 단점이 있다. 그림 3.9는 풍력발전기가 연결된 22.9kV 계통에서 실측된 차수별 고조파 전압 크기를 나타낸다.

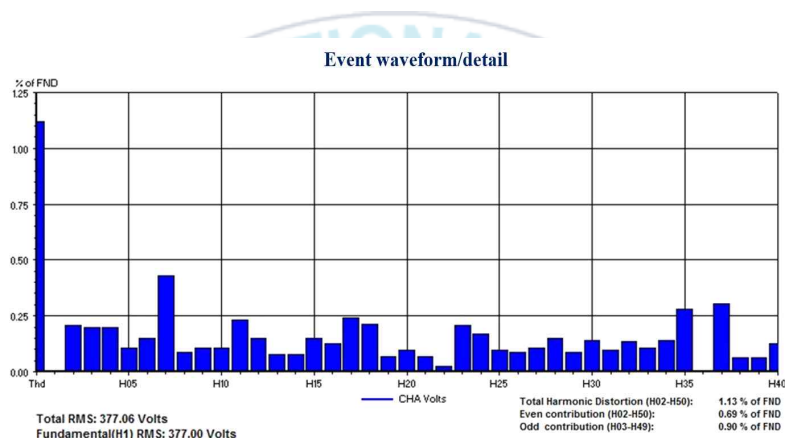


그림 3.9 풍력발전기 연계계통에서의 차수별 고조파 전압

태양광발전시스템은 태양전지 모듈 및 어레이에서 직류전력이 생성되며, PCS (power conditioning system)의 인버터에서 교류전력으로 변환하게 된다. 변환 과정에서 고조파 전력이 생성될 수 있으며, 연계계통으로 유입되어 전압 왜곡에 영향을 줄 수 있다. 그림 3.10은 태양광발전기가 연결된 계통에서의 차수별 고조파 전압을 나타낸다.

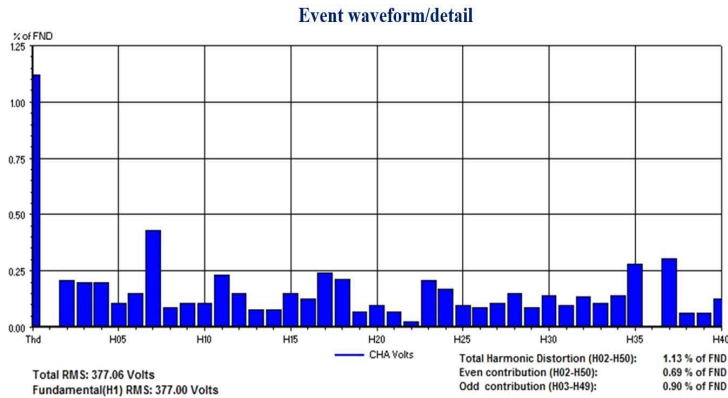


그림 3.10 태양광발전기 연계계통에서의 차수별 고조파 전압

태양광발전은 풍력발전에 비해 단위용량이 적기 때문에 계통 연계시 전용선로를 사용하지 않고 일반 수용가에 전력을 공급하는 22.9kV 배전선로를 이용한다. 태양광발전은 전용선로를 사용하지 않기 때문에 다른 인접 전력수용가에 고조파 영향을 줄 가능성이 더 크다. 따라서 적정 고조파 억제 대책을 갖도록 하여 허용하는 고조파 규제치 이내로 저감시키는 것이 필요하다.

3.6.2 비선형 부하의 특성

참고문헌 [43]에서는 다양한 비선형 부하의 특성 분석 및 PSCAD/EMTDC 모델링 방법을 소개하였다. 표 3.1은 PSCAD/EMTDC 모델링을 위한 임의의 비선형 부하 정격을 예시로 나타낸 것이다. 제안 방법을 통해 고조파를 많이 유발하는 텔레비전, 배터리 충전기, ASD 부하에 대해 모델링을 수행하였으며 각 고조파원에 대한 분석을 실시하였다.

표 3.1 비선형 부하 정격

No	Domestic load	Ratings
1	Television set	50[W]
2	CPU & Monitor	100[W]
3	Battery Charger	12[V]; 3[A]
4	Fan with electronic regulator	80[W]
5	CFL lamp	2X 55[W]
6	Air conditioner	cooling/heating 5/5 [A] 1P = 1,100/1,100 [W]
7	Refrigerator	190[L]; 1 door; 4.4 [A]
8	Washing machine	500 [W]; 2.8 [A]
9	Water lifting pump	1HP; 4[A]
10	Hot water system	1000 [W]; 5[A]
11	Adjustable speed drive	3-phase, 400 [V], 10HP

A. 텔레비전 & 컴퓨터 모니터 모델링

일반적인 텔레비전과 컴퓨터 모니터는 그림과 같이 PSCAD/EMTDC로 모델링이 가능하다. 그림 3.11과 같이 단상 커패시터 필터링 브리지 정류기로 구성되며, 전원은 변압기를 통해 공급받는 형태이다.

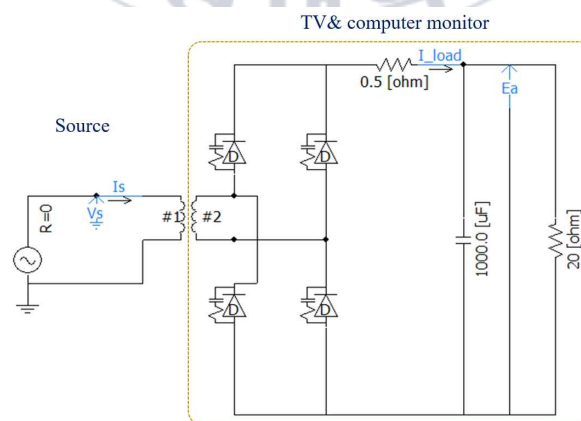
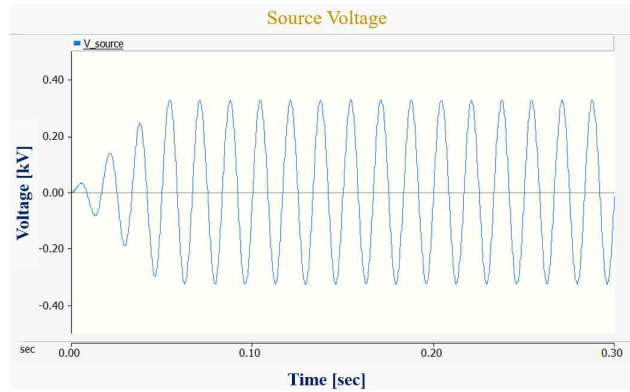
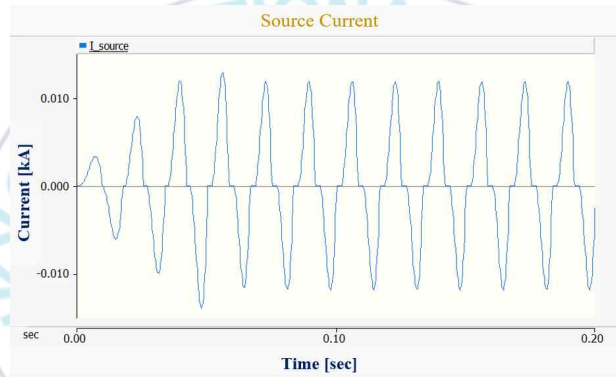


그림 3.11 일반적인 TV 부하에 대한 PSCAD/EMTDC 모델



(a) 공급 전압 파형



(b) 전류 파형

그림 3.12 TV 부하 모델에서의 전압 및 전류 파형 측정

그림 3.12에서 TV 부하로 인해 공급측의 전류 파형에 고조파 전류가 유입된 것을 알 수 있다. 조정되지 않은 전파 정류기는 입력 전압의 피크 값에 직접 비례하는 DC전압을 생성하므로 고조파가 기본 전압에 중첩되면 DC 전압이 달라질 수 있다. 그림 3.13은 전원측의 전압 및 전류 FFT 분석을 수행한 것이다. 해당 모델의 경우 3rd 고조파 전류 성분 많이 유입됨을 확인할 수 있다.

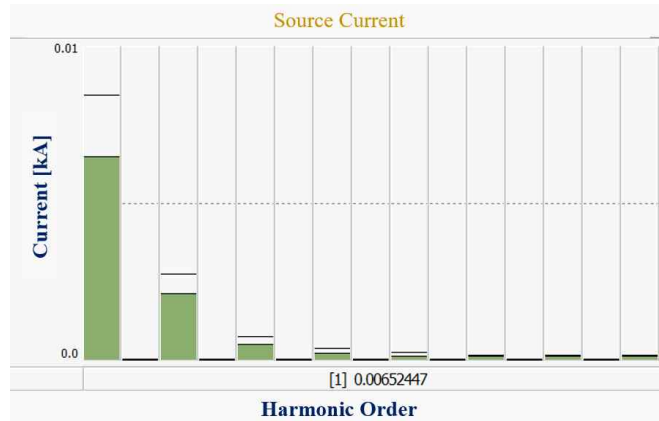


그림 3.13 TV 부하 모델에서의 전류 FFT 분석

B. 배터리 충전기

그림 3.14는 220V, 60 Hz 주파수의 AC 전원이 있는 간단한 배터리 충전기 회로이다. 12V DC 배터리와 저항이 직렬 연결되어 있으며, 4A의 전류가 흐르는 회로이다. 배터리는 DC로 충전되기 때문에 일정한 전압 크기이며, 회로도의 전류는 다이오드에 의해 정류된 파형인 것을 알 수 있다.

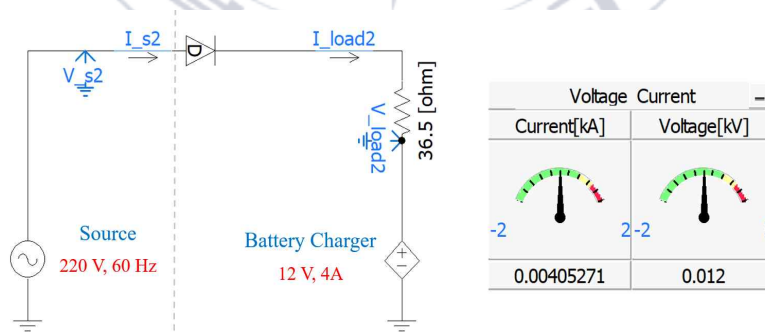
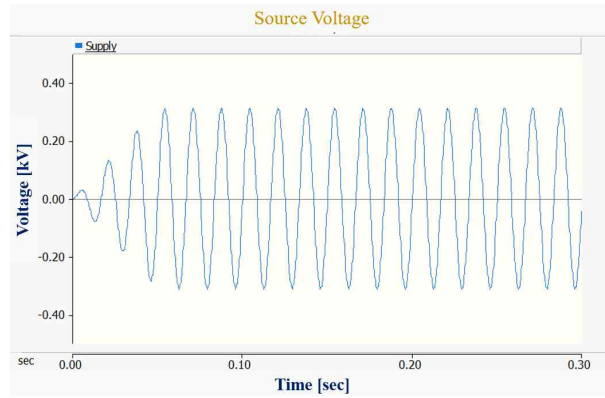
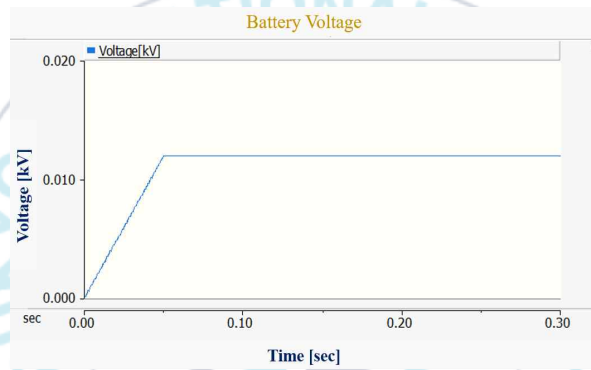


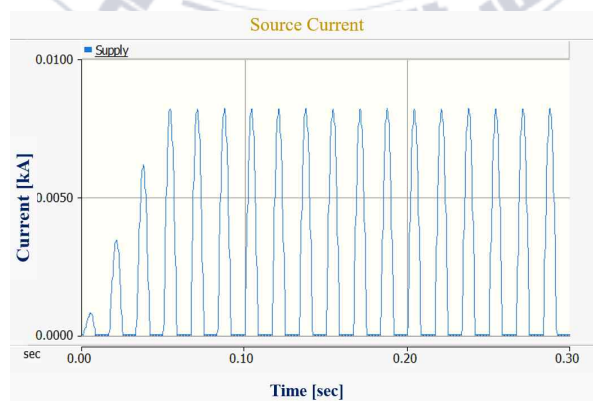
그림 3.14 PSCAD/EMTDC의 12V, 4A 배터리 충전기 모델



(a) 공급 전압 파형



(b) 배터리 충전 전압 파형



(c) 전류 파형

그림 3.15 배터리 충전기 사용에 따른 전압 및 전류 파형 측정

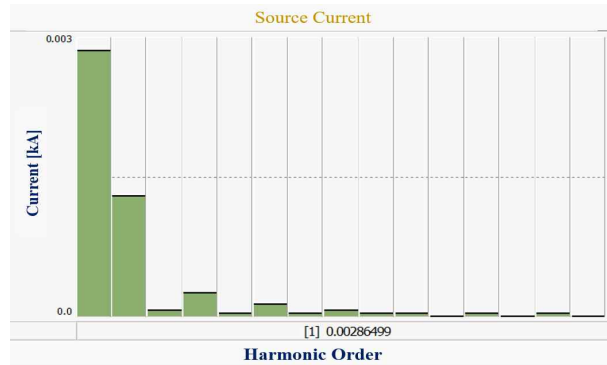
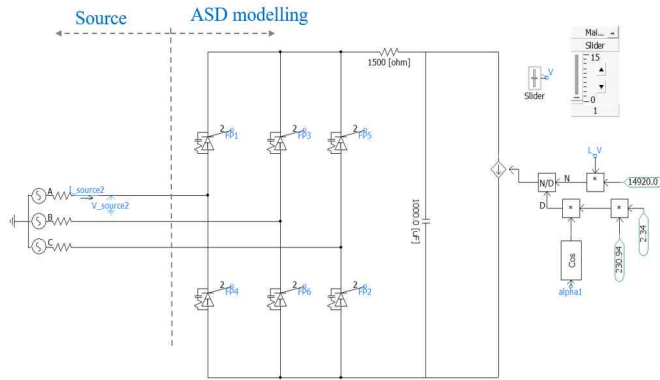


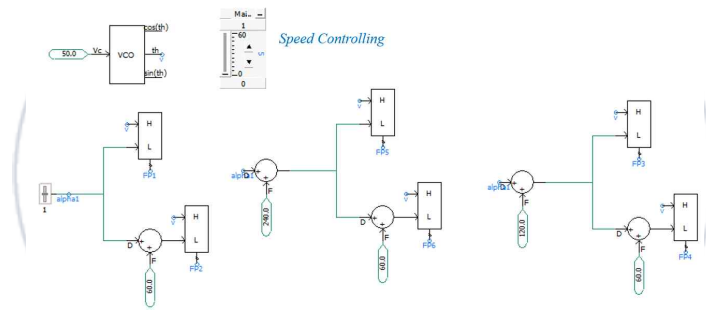
그림 3.16 배터리 부하의 충전에 따른 전류 FFT 분석

C. ASD 모델링

ASD 모델은 컨버터 및 인버터 작동하지만 일반적으로 그림 3.17과 같이 3상 브리지 컨버터 회로로 나타낸다. 컨버터 회로는 공급 시스템에 고조파 전류를 주입할 수 있으며, 모델링을 위한 이론적으로 인버터와 모터는 고조파 전류 소스로 표시된다. ASD는 크기 및 위상각은 인버터 설계 및 모터 작동 조건에 따라 결정된다. 그림 3.18은 속도제어에 따라 전원 측 전압 및 전류 파형을 측정한 것이다. 공급 전압은 양호 하나 전류는 속도제어에 따라 고조파가 유입되는 것을 알 수 있다. 이러한 고조파 전류가 PCC에 유입되어 전압 왜곡될 경우 다른 수용가 및 전원 측에도 고조파로 인한 영향을 줄 수 있다. 그림 3.19는 ASD 부하 운전에 따른 전류의 FFT분석을 나타내었다. 특히 다른 차수에 비해 5th, 7th 고조파 전류가 크게 나타났다.

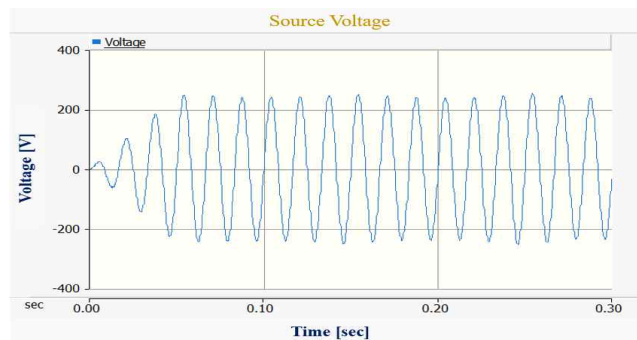


(a) ASD 모델링

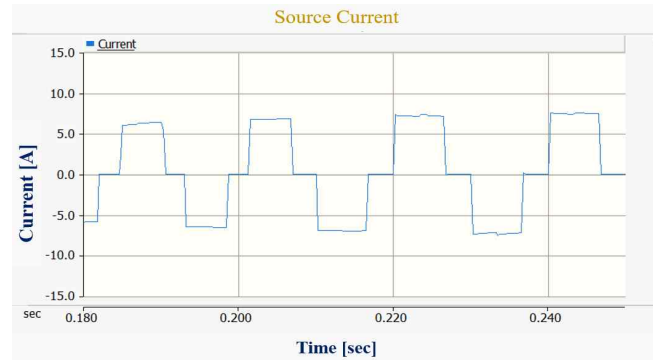


(b) ASD 모델의 속도 제어장치

그림 3.17 ASD에 대한 PSCAD/EMTDC 모델



(a) 공급 전압 파형



(b) 전류 파형

그림 3.18 ASD 부하 모델에서의 전압 및 전류 파형 측정

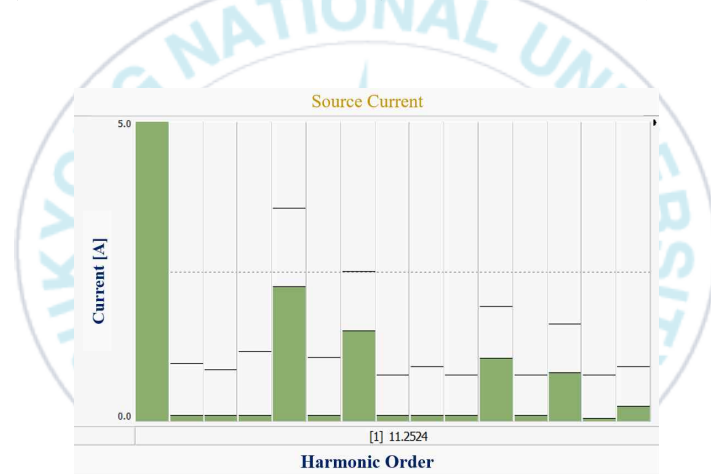


그림 3.19 ASD 부하 모델에서의 전류 FFT 분석

비선형 부하의 모델링 분석 결과 부하의 특성에 따라 고조파 전류 성분이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. TV 및 모니터는 3rd, 5th 고조파가 큰 반면 배터리 충전기는 2nd 고조파 성분이 크게 나타났다. ASD 부하는 5th, 7th 고조파 성분이 크게 나타났다.

제 4 장 고조파 기여도 평가 및 왜곡 지도

4.1 고조파 전압 기여도 및 기여율

배전계통은 일반적으로 PCC를 기준으로 유틸리티와 그 이하의 다중 수용가들로 그림 4.1과 같은 구성을 가진다. PCC전압은 유틸리티와 수용가의 고조파 전류에 의해 왜곡되며 각 고조파원들의 PCC 전압 왜곡에 대한 기여 정도는 고조파원에 대한 등가 전압 모델 추정과 중첩의 원리 (principle of superposition)에 기반하여 평가가 가능하다. 또한, 고조파원의 등가 전압원 모델은 제안된 RANSAC 및 RLS 알고리즘을 이용하여 추정할 수 있다.

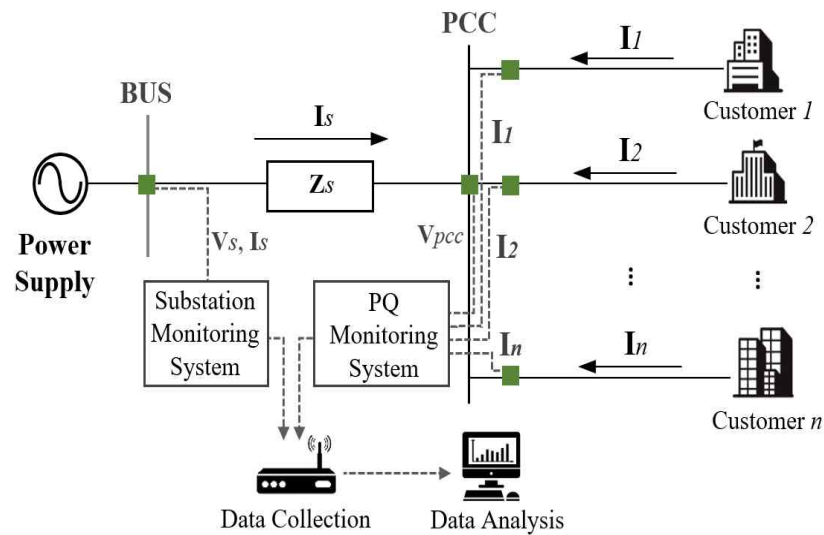


그림 4.1 PCC에 연결된 n -피더의 배전계통

유틸리티 측의 등가 모델은 전원측 측정을 통해 취득 가능하며 전압을 측정할 수 없는 경우 단락 분석 프로그램을 사용하여 유틸리티 네트워크의 임피던스를 대략 계산할 수 있다. 최근 다양한 측정 장치들의 확대 보급으로 인해 계통의 많은 지점에서 데이터 수집이 가능하게 되었으며 이에 본 논문에서는 유틸리티 측의 전압 및 전류 측정이 가능하다고 가정한다[44-46]. 고조파 기여도는 중첩의 원리를 이용하기 때문에 유틸리티 및 각 수용가의 등가 전압 및 임피던스 파라미터가 필요하며, 유틸리티의 임피던스는 식 4.1과 같이 계산될 수 있다.

$$Z_{h,u} = \frac{V_{h,u} - V_{h,pcc}}{I_{h,u}} \quad (4.1)$$

여기서 $V_{h,u}$ 및 $I_{h,u}$ 는 h 차에 대한 유틸리티 측의 전압 및 전류를 나타낸다. PCC전압은 유틸리티 및 각 수용가의 추정된 등가 파라미터와 중첩 원리를 이용하여 나타낼 수 있다. 그림 4.2와 같이 PCC전압은 $V_{h,pcc}^{*1}$ 과 $V_{h,pcc}^{*2}$ 의 벡터 합으로 나타나며 유틸리티와 수용가($k = 1, 2, \dots, N$)의 전압과 임피던스 사이의 관계는 식 4.2~식 4.6에 따른다[20].

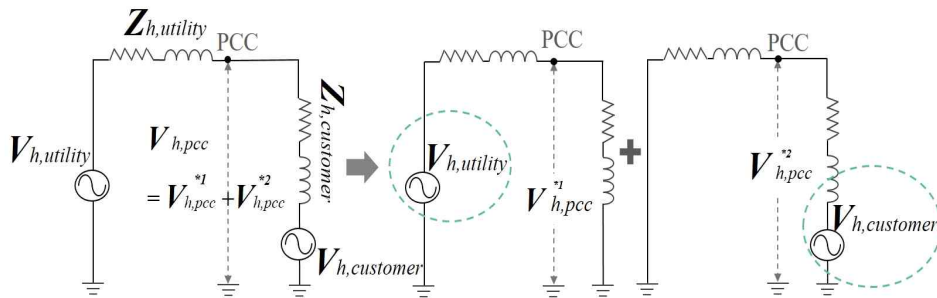


그림 4.2 중첩의 원리를 이용한 PCC 전압

$$V_{h, customer\ k}^{superposition} = \frac{Z_{h, customer\ k}^T}{Z_{h, utility} + Z_{h, customer\ k}^T} \times V_{h, customer\ k} \quad (4.2)$$

$$V_{h, utility}^{superposition} = \frac{Z_{h, utility}^T}{Z_{h, utility} + Z_{h, utility}^T} \times V_{h, utility} \quad (4.3)$$

$$V_{h, pcc} = V_{h, utility}^{superposition} + \sum_{k=1}^N V_{h, customer\ k}^{superposition} \quad (4.4)$$

$$Z_{h, customer\ k}^T = \left[(Z_{h, utility})^{-1} + \sum_{i=1, i \neq k}^N (Z_{h, customer\ i})^{-1} \right]^{-1} \quad (4.5)$$

$$Z_{h, utility}^T = \left[\sum_{i=1}^N (Z_{h, customer\ i})^{-1} \right]^{-1} \quad (4.6)$$

여기서 $V_{h, utility}^{superposition}$ 는 유틸리티 측이 PCC 전압에 기여한 고조파 전압이고, $V_{h, customer\ k}^{superposition}$ 는 수용가 k 에 고조파 기여도 전압이다. $Z_{h, utility}$ 및 $Z_{h, customer\ k}$ 는 h^{th} 고조파 주파수에서의 유틸리티 네트워크와 수용가 k 의 등가 임피던스이고, $V_{h, utility}$ 와 $V_{h, customer\ k}$ 는 h^{th} 고조파에서의 유틸리티와 수용가 k 의 전압원이다. $Z_{h, utility}^T$ 및 $Z_{h, customer\ k}^T$ 는 각각 h^{th} 고조파 주파수에서 유틸리티 네트워크 및 수용가 k 로부터 본 등가 임피던스를 나타낸다. PCC 전압은 중첩 원리로 표현할 수 있지만 유틸리티 네트워크 및 수용가의 모든 전압은 복잡한 벡터이므로 유틸리티 및 수용가의 전압 기여도를 단일 값으로 정량화하는 효과적인 방법이 필요하다. 참고문헌 [20]에서는 PCC 전압 왜곡에 대한 유틸리티와 수용가의 고조파 기여를 정량적으로 나타내기 위해 스칼라 투영법에 기반한 방법을 소개하였다. 그림 4.2는 PCC 전압에 대한 유틸리티와 한 수용가의 전압에 대한 스칼라 투영예를 보여준다. PCC 전압에 대한 유틸리티 및 수용가 k 의 고조파 전압 기여도 (HVC: harmonic voltage contribution)는 식 4.7과 4.8 같이 정량화할 수 있다.

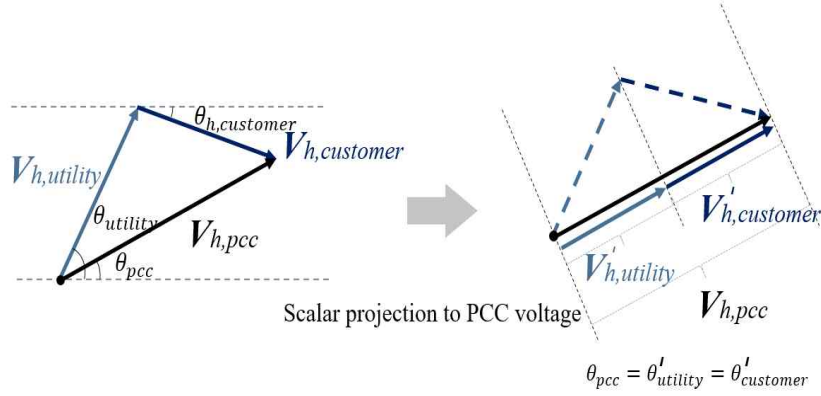


그림 4.3 PCC전압에 대한 유틸리티와 한 수용가 전압의 스칼라 투영

$$HVC_{h,utility} = \frac{V_{h,utility}^{superposition} \cdot V_{h,pcc}}{|V_{h,pcc}|} \quad (4.7)$$

$$HVC_{h,customer k} = \frac{V_{h,customer k}^{superposition} \cdot V_{h,pcc}}{|V_{h,pcc}|} \quad (4.8)$$

여기서, $\cdot$ 는 벡터의 내적을 의미하며, $| |$ 는 절대값을 의미한다.

또한, PCC 전압에 대한 기여 전압의 비율은 식 4.9로 표현될 수 있다. 고조파 기여율 (HCR: harmonic contribution ratio)은 전압 왜곡에 대한 각 고조파 소스의 상대적 기여를 직관적으로 나타낸다.

$$HCR_h = \frac{HVC_{h,S}}{\sum HVC_{h,S}} \times 100\% \quad (4.9)$$

여기서, HCR_h 는 h^{th} 고조파에 대한 상대적인 기여 비율을 나타내고, $HVC_{h,S}$ 는 h^{th} 고조파에 대한 고조파원 S 의 전압 기여도를 나타낸다.

4.2 총 고조파 기여도 및 기여율

개별 고조파 차수에 대한 고조파 기여는 중첩 및 스칼라 투영 원리를 이용하여 평가할 수 있지만 모든 고조파 차수를 고려한 포괄적인 평가방법도 필요하다. 참고문헌 [20]과 [47]에서는 THD와 유사한 개념을 도입하여 총 고조파 기여도(THC: total harmonic contribution)를 정의하였다. THC는 전압의 기본 성분에 대한 전체 고조파 전압 기여도 성분의 합에 대한 비율로 정의되며, 식 4.10과 식 4.11을 이용하여 산출할 수 있다. THC는 모든 고조파 차수에 대한 각 고조파원이 PCC 전압 왜곡에 얼마나 많이 관여하는지를 나타내는 지수가 된다.

$$THC_S = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{end}} (HVC_{h,S})^2}}{|V_{1,pcc}|} \times 100\% \quad (4.10)$$

$$THCR_S = \frac{THC_S}{|V_{1,pcc}|} \times 100\% \quad (4.11)$$

여기서 h_{end} 는 최고 고조파 차수이고 아래 첨자 S 는 각 PCC에 연결된 유틸리티 u 와 수용가 i 의 개별 고조파원을 나타낸다. 또한, THC_S 와 $|V_{1,pcc}|$ 는 고조파원 S 에 대한 총 고조파 기여도와 PCC의 기본파 전압 크기를 나타낸다. $THCR_S$ 는 고조파원 S 에 대한 상대적 THC 비율을 나타낸다.

4.3 고조파 왜곡 지도

고조파 왜곡 지도는 각 고조파원들의 전압 왜곡 기여도를 직관적으로 이해할 수 있도록 계산된 THC 및 THCR와 함께 나타낸 계통 다이어그램이다 [47]. 고조파 왜곡 지도는 계통의 고조파원 식별 및 고조파 수준을 쉽게 파악하여 효과적인 대책 및 관리에 활용할 수 있다. 왜곡 지도는 계통의 모든 PCC에 대해 제안 방법을 이용하여 순차적으로 다이어그램을 구성할 수 있다. 그림 4.4는 4개의 PCC와 6개의 수용가로 구성된 배전계통에 대한 고조파 왜곡 지도의 예를 나타낸 것이다.

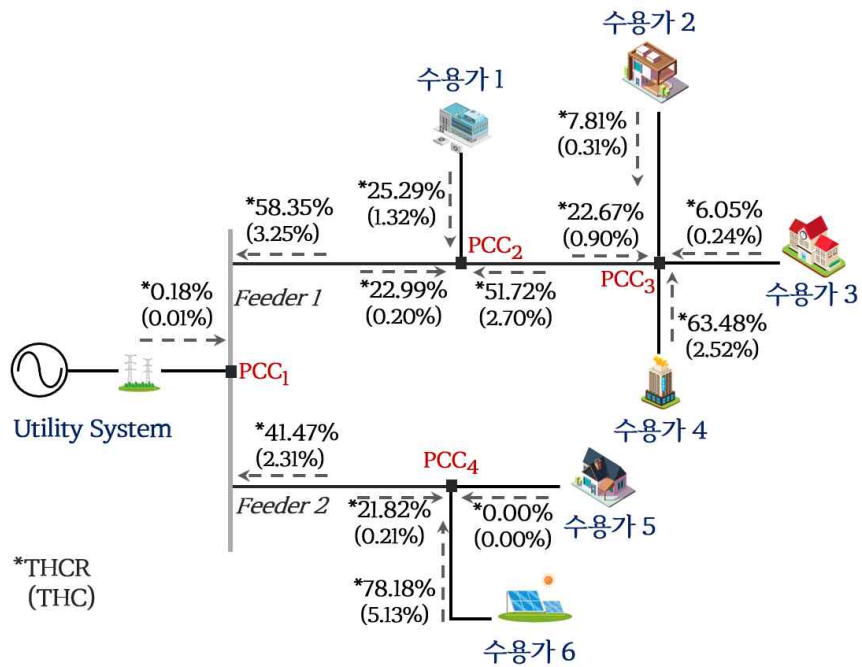


그림 4.4 고조파 왜곡 지도 예

PCC₁의 경우 유틸리티, 피더 1 및 피더 2의 THC는 각각 0.01%, 3.25%, 2.31%였으며, 피더 1이 유틸리티와 피더 2보다 PCC₁ 전압 왜곡에 대해 58.35%(THCR)로 가장 크게 기여하는 것을 알 수 있다. 또한, PCC₄의 경우 PCC₁, 수용가 5 및 수용가 6의 THC는 각각 0.21%, 0%와 5.13%로 나타났다. 수용가 5는 PCC₄ 전압 왜곡에 기여하지 않는 것을 알 수 있으며, 수용가 6은 전압 왜곡에 78.18%(THCR)로 매우 큰 기여를 하는 것을 알 수 있다.

4.4 고조파 기여도 평가 절차 및 왜곡 지도 구축

본 논문에서 제안하는 고조파 왜곡 지도 구축 및 기여도 평가의 전체적인 절차는 그림 4.5와 같다. 먼저 PCC에서 측정된 전압과 전류에 대해 FFT 분석을 수행하고 각 고조파 차수 성분으로 분해해야 한다. 3상 계통의 불평형 조건에 대한 고조파 기여도 평가를 위해서는 대칭성분법을 이용하여 전압 및 전류를 정상, 역상, 영상 성분으로 분해해야 한다. 다음으로 제안된 RANSAC 알고리즘을 이용하여 전압과 전류에 포함된 이상점 데이터를 제거한다. 해당 방법은 특정 데이터 블록(DB)의 전압과 전류에 대해 가변 임계범위에 따라 최적의 선형 모델을 결정한다. 결정된 모델에 대해 이상점을 제거하고 유효점만으로 DB를 재구성하게 된다. 그런 다음 전압 및 전류의 유효점 데이터셋에 대해 식 3.36의 데이터 재구성을 수행하여 RLS 추정 입력 데이터셋을 완성한다. 다음으로, 식 3.34의 PCC 전압의 변화율 ΔV_{PCC} 를 계산한 후 임계값 V_{th} 와 비교하여 RLS 알고리즘을 초기화하거나 계속적인 파라미터 추정을 수행한다. RLS 알고리즘을 이용하여 모든 고조파원의 등가 전압 모델을 추정한 후 각 고조파원에 대한

HVC 및 HCR를 계산한다. 모든 고조파 차수에 대해 HVC 평가를 수행한 후 식 4.10과 식 4.11을 이용하여 THC 및 THCR을 계산한다. 상기 절차는 계통의 모든 PCC에 대해 수행된다. 마지막으로 평가된 THC 및 THCR을 이용하여 고조파 왜곡 지도를 구축한다.

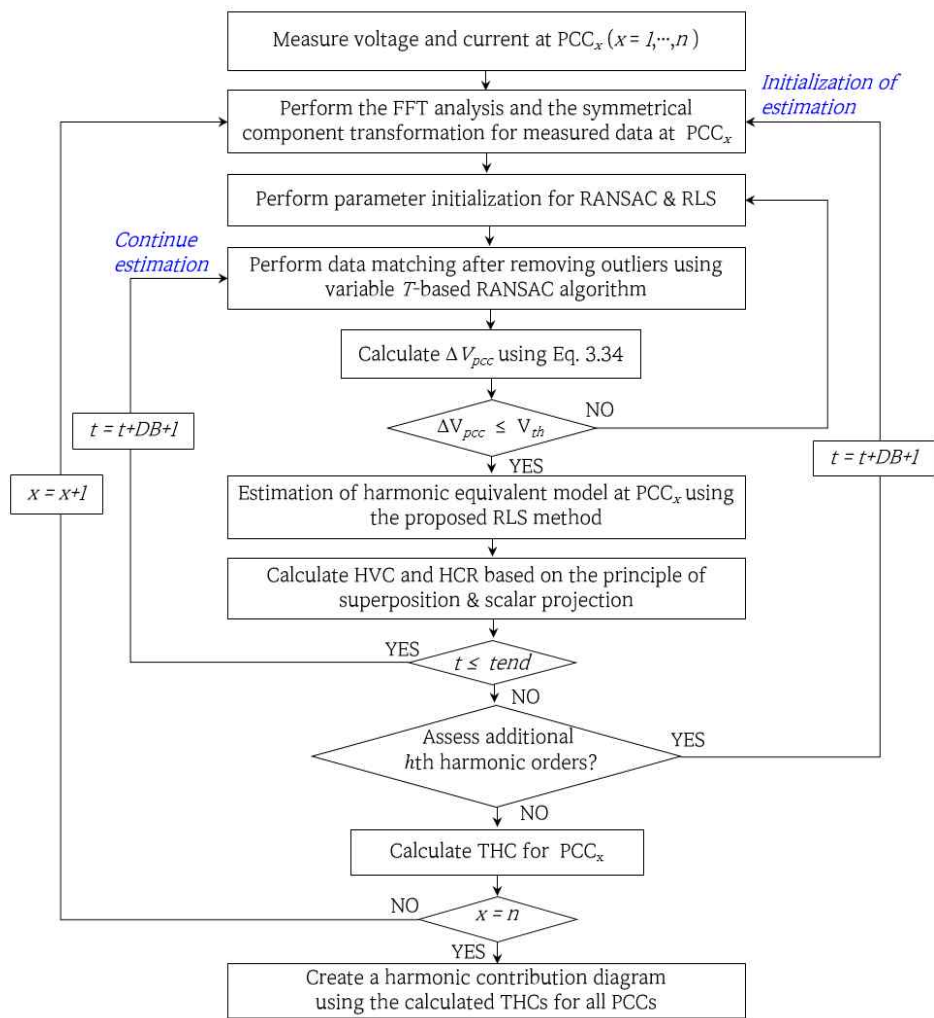


그림 4.5 고조파 왜곡 지도 및 기여도 평가의 전체적인 절차

4.5 불평형 조건에서의 고조파 기여도 평가

3상 불평형에 대한 고조파 차수별 기여도 평가를 위해서는 PCC 전압 및 각 수용가 전류를 식 4.12와 식 4.13과 같이 대칭성분변환(symmetrical component transformation)을 이용하여 정상, 역상, 영상 성분으로 변환해야 한다.

$$\begin{bmatrix} V_{h,pcc,r}^P + j V_{h,pcc,i}^P \\ V_{h,pcc,r}^N + j V_{h,pcc,i}^N \\ V_{h,pcc,r}^Z + j V_{h,pcc,i}^Z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{h,pcc,r}^A + j V_{h,pcc,i}^A \\ V_{h,pcc,r}^B + j V_{h,pcc,i}^B \\ V_{h,pcc,r}^C + j V_{h,pcc,i}^C \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} I_{h,k,r}^P + j I_{h,k,i}^P \\ I_{h,k,r}^N + j I_{h,k,i}^N \\ I_{h,k,r}^Z + j I_{h,k,i}^Z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{h,k,r}^A + j I_{h,k,i}^A \\ I_{h,k,r}^B + j I_{h,k,i}^B \\ I_{h,k,r}^C + j I_{h,k,i}^C \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

여기서 $a = e^{j120}$ 이며, $V_{h,pcc,r}^A + j V_{h,pcc,i}^A$, $V_{h,pcc,r}^B + j V_{h,pcc,i}^B$, $V_{h,pcc,r}^C + j V_{h,pcc,i}^C$ 는 PCC에서의 A, B, C상 전압이며, $I_{h,k,r}^A + j I_{h,k,i}^A$, $I_{h,k,r}^B + j I_{h,k,i}^B$, $I_{h,k,r}^C + j I_{h,k,i}^C$ 는 수용가 k 의 각 상 전류이다. 또한, $V_{h,pcc,r}^P + j V_{h,pcc,i}^P$, $V_{h,pcc,r}^N + j V_{h,pcc,i}^N$, $V_{h,pcc,r}^Z + j V_{h,pcc,i}^Z$ 는 대칭 좌표 변환을 통한 정상, 역상, 영상 전압이며, $I_{h,k,r}^P + j I_{h,k,i}^P$, $I_{h,k,r}^N + j I_{h,k,i}^N$, $I_{h,k,r}^Z + j I_{h,k,i}^Z$ 는 수용가 k 의 정상, 역상, 영상 전류이다. 각 시퀀스 회로에서의 고조파 기여도 추정을 위해 변환 전압 및 전류를 이용하여 시퀀스 등가 파라미터를 추정한다. PCC를 기준으로 한 각 시퀀스 회로에서의 선형 방정식은 식 4.14~4.16과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{h,pcc,r}^P & V_{h,pcc,i}^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{h,k,r}^P & I_{h,k,i}^P & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{h,k,1}^P & X_{h,k,2}^P \\ X_{h,k,1}^P & R_{h,k,2}^P \\ V_{h,k,r}^P & V_{h,k,i}^P \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\begin{bmatrix} V_{h,pcc,r}^N & V_{h,pcc,i}^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{h,k,r}^N & I_{h,k,i}^N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{h,k,1}^N & X_{h,k,2}^N \\ X_{h,k,1}^N & R_{h,k,2}^N \\ V_{h,k,r}^N & V_{h,k,i}^N \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} V_{h,pcc,r}^Z & V_{h,pcc,i}^Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{h,k,r}^Z & I_{h,k,i}^Z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{h,k,1}^Z & X_{h,k,2}^Z \\ X_{h,k,1}^Z & R_{h,k,2}^Z \\ V_{h,k,r}^Z & V_{h,k,i}^Z \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

여기서, $R_{h,k,1}^P = R_{h,k,2}^P = R_{h,k}^P$, $R_{h,k,1}^N = R_{h,k,2}^N = R_{h,k}^N$, $R_{h,k,1}^Z = R_{h,k,2}^Z = R_{h,k}^Z$ 이고, $-X_{h,k,1}^P = X_{h,k,2}^P = X_{h,k}^P$, $-X_{h,k,1}^N = X_{h,k,2}^N = X_{h,k}^N$, $-X_{h,k,1}^Z = X_{h,k,2}^Z = X_{h,k}^Z$ 이다.

먼저 식 4.17과 식 4.18을 이용하여 각 시퀀스 PCC 전압의 변화율을 계산한다.

$$\Delta V_{pcc,r}^{(P,N,Z)} = \left| \frac{V_{pcc,r}^{(P,N,Z),start} - V_{pcc,r}^{(P,N,Z),(n)}}{V_{pcc,r}^{(P,N,Z),start}} \right| \times 100 (\%) \quad (4.17)$$

$$\Delta V_{pcc,i}^{(P,N,Z)} = \left| \frac{V_{pcc,i}^{(P,N,Z),start} - V_{pcc,i}^{(P,N,Z),(n)}}{V_{pcc,i}^{(P,N,Z),start}} \right| \times 100 (\%) \quad (4.18)$$

$\Delta V_{pcc}^{(P,N,Z)}$ 는 PCC 시퀀스 전압의 변화율, $V_{pcc}^{(P,N,Z), start}$ 는 각 구간에서 PCC 시퀀스 전압의 시작값으로 파라미터 변화감지를 위한 기준 값이다. 또한, $V_{pcc}^{(P,N,Z), (n)}$ 는 $V_{pcc}^{(P,N,Z), start}$ 이후 순차적인 시퀀스 전압값이다. 이 변화율이 임계값을 초과할 경우 모든 과거 데이터를 초기화하고 새로운 측정 데이터들과 식 4.19~4.23을 이용하여 각 시퀀스 등가 임피던스 및 전압원을 추정한다.

$$\lambda_{n+1}^{(P,N,Z)} = \lambda_n^{(P,N,Z)} \alpha^{(P,N,Z)} + (1 - \alpha^{(P,N,Z)}) \quad (4.19)$$

$$G_{n+1}^{(P,N,Z)} = P_n^{(P,N,Z)} \left(A_{n+1}^{(P,N,Z)} \right)^T \left(I \lambda_{n+1}^{(P,N,Z)} + A_{n+1}^{(P,N,Z)} P_n^{(P,N,Z)} \left(A_{n+1}^{(P,N,Z)} \right)^T \right)^{-1} \quad (4.20)$$

$$\Theta_{n+1}^{(P,N,Z)} = \Theta_n^{(P,N,Z)} + G_{n+1}^{(P,N,Z)} \left(Y_{n+1}^{(P,N,Z)} - A_{n+1}^{(P,N,Z)} \Theta_n^{(P,N,Z)} \right) \quad (4.21)$$

$$P_{n+1}^{(P,N,Z)} = \left(I - G_{n+1}^{(P,N,Z)} A_{n+1}^{(P,N,Z)} \right) P_n^{(P,N,Z)} / \lambda_{n+1}^{(P,N,Z)} \quad (4.22)$$

$$\hat{\Theta}^{(P,N,Z)} = \Theta_{n+1}^{(P,N,Z)} - \frac{P^{(P,N,Z)}}{p_{11}^{(P,N,Z)} + p_{22}^{(P,N,Z)}} \begin{bmatrix} R_2 - R_1 & X_2 + X_1 \\ X_1 + X_2 & R_1 - R_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{(P,N,Z)} \quad (4.23)$$

여기서 $\hat{\Theta}^{(P,N,Z)}$ 는 시퀀스 추정 해이며, $G^{(P,N,Z)}$ 는 시퀀스 이득 행렬, $P^{(P,N,Z)}$ 는 시퀀스 공분산 행렬, $\lambda^{(P,N,Z)}$ 는 시퀀스 망각인자, $\alpha^{(P,N,Z)}$ 는 시퀀스 가중치를 나타낸다.

다음으로 시퀀스 파라미터 추정결과와 식 4.24~4.28을 이용하여 시퀀스 기여전압을 계산한다.

$$V_{h, customer k}^{superposition (P,N,Z)} = \frac{Z_{h, customer k}^{T (P,N,Z)}}{Z_{h, utility}^{(P,N,Z)} + Z_{h, customer k}^{T (P,N,Z)}} \times V_{h, customer k}^{(P,N,Z)} \quad (4.24)$$

$$V_{h,utility}^{superposition(P,N,Z)} = \frac{Z_{h,utility}^{T(P,N,Z)}}{Z_{h,utility}^{(P,N,Z)} + Z_{h,utility}^{T(P,N,Z)}} \times V_{h,utility}^{(P,N,Z)} \quad (4.25)$$

$$V_{h,pcc}^{(P,N,Z)} = V_{h,utility}^{superposition(P,N,Z)} + \sum_{k=1}^N V_{h,customer k}^{superposition(P,N,Z)} \quad (4.26)$$

$$Z_{h,customer k}^{T(P,N,Z)} = \left[\left(Z_{h,utility}^{(P,N,Z)} \right)^{-1} + \sum_{i=1, i \neq k}^N \left(Z_{h,customer i}^{(P,N,Z)} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (4.27)$$

$$Z_{h,utility}^{T(P,N,Z)} = \left[\sum_{i=1}^N \left(Z_{h,customer i}^{(P,N,Z)} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (4.28)$$

각 상에 대한 불평형 조건에 대한 각 상의 고조파 기여도를 계산하기 위해서는 각 시퀀스 기여전압에 대해 대칭 성분의 역변환을 수행해야 한다. PCC 전압을 기준으로 유틸리티와 수용가 k 의 A, B, C상 고조파 전압 기여도를 식 4.29 및 식 4.30과 같이 스칼라 투영을 이용하여 계산한다.

$$HVC_{h,utility}^{(A,B,C)} = \frac{V_{h,utility}^{superposition(A,B,C)} \cdot V_{h,pcc}^{(A,B,C)}}{|V_{h,pcc}^{(A,B,C)}|} \quad (4.29)$$

$$HVC_{h,customer k}^{(A,B,C)} = \frac{V_{h,customer k}^{superposition(A,B,C)} \cdot V_{h,pcc}^{(A,B,C)}}{|V_{h,pcc}^{(A,B,C)}|} \quad (4.30)$$

여기서 $HVC_{h,utility}^{(A,B,C)}$ 와 $HVC_{h,customer k}^{(A,B,C)}$ 는 유틸리티와 수용가 k 의 A, B, C상 고조파 전압 기여도를 의미한다. 또한, $\cdot$ 는 벡터의 내적을 의미하며, $||$ 는 절대값을 의미한다.

또한, 각 상의 고조파 전압 기여도로부터 PCC 전압에 대한 각 상별 고조파 기여율을 식 4.31과 같이 산출할 수 있다. 이 기여율을 통해 PCC 전압 왜곡에 대한 각 고조파 소스의 기여 정도를 직관적으로 파악할 수 있다.

$$HCR_h^{(A,B,C)} = \frac{HVC_h^{(A,B,C)}}{|V_{h,pcc}^{(A,B,C)}|} \times 100\% \quad (4.31)$$

여기서, $HCR_h^{(A,B,C)}$ 는 h^{th} 고조파에 대한 3상의 상대적인 기여 비율을 나타내고, $HVC_h^{(A,B,C)}$ 는 h^{th} 고조파에 대한 3상의 고조파 전압 기여도를 나타낸다. 불평형 고조파 기여도 평가의 전체적인 절차는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- ①. 3상 전압과 전류 측정 데이터에 대해 대칭좌표법을 이용하여 시퀀스 변환 수행
- ②. 각 시퀀스 데이터와 제안 방법을 이용하여 시퀀스 등가 모델의 파라미터를 추정
- ③. 추정된 시퀀스 등가 파라미터로부터 각 시퀀스 기여전압을 계산
- ④. 각 시퀀스 기여전압을 대칭 성분의 역변환을 통해 3상에 대한 고조파 전압 기여도를 계산함
- ⑤. 고조파 기여율 산출

제 5 장 사례연구

5.1 모의계통 및 조건

사례연구에서는 그림 5.1과 같은 PSCAD/EMTDC 모의계통에 대해 제안 방법을 이용한 각 수용가의 고조파 등가 파라미터 추정 및 기여도 평가를 수행하였다. 모의계통은 3상 60Hz, 22.9kV 계통으로 유틸리티와 5개의 수용가로 구성되었다. 수용가 1, 2, 3은 PCC₂에 연결되어 있고 수용가 4, 5는 PCC₃에 연결되어 있다. 유틸리티 및 수용가의 상세한 등가 파라미터는 표 5.1에 요약되어 있다.

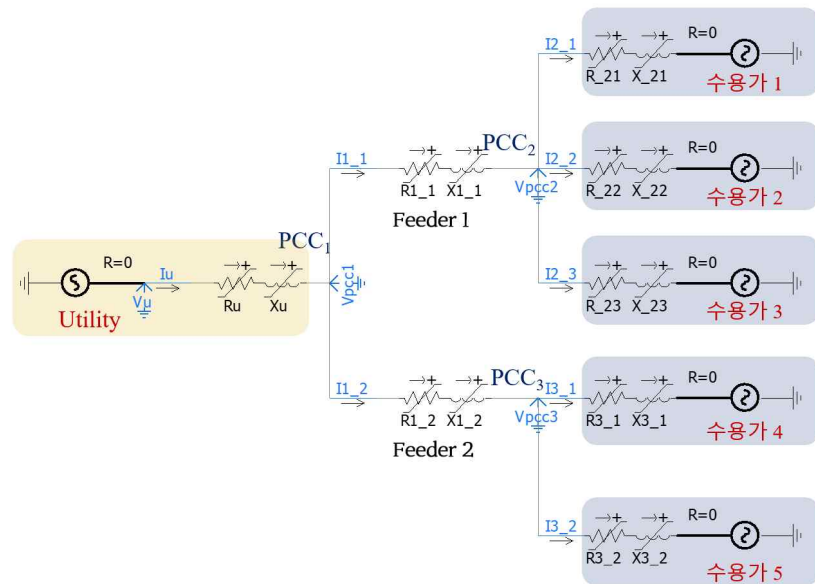


그림 5.1 고조파 기여도 평가를 위한 PSCAD/EMTDC 모의계통

수용가 1, 2 및 5는 고조파 유발원으로 전압과 임피던스 모델로 구성되었으며, 수용가 3과 4는 선형 부하로 임피던스 모델만으로 구성되었다. 전체 시뮬레이션 시간은 5초이며, 전압과 전류는 초당 10,000 sample로 측정되었다. 측정 데이터의 이상점 제거를 위해 DB 의 크기는 40 sample로 설정하였다.

표 5.1 유틸리티와 5개 수용가의 등가 파라미터

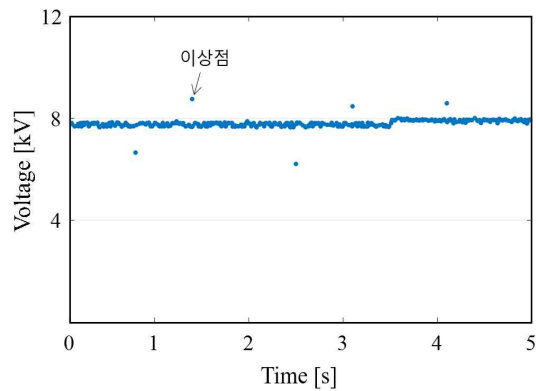
		고조파 차수			
		1 st	3 rd	5 th	7 th
전압 [kV]	utility	12.999+j2.292	0.001+j0.001	0.001+j0.001	0.001+j0.001
	수용가 1	0.000+j0.000	1.201+j0.212	0.709+j0.125	0.807+j0.142
	수용가 2	0.000+j0.000	1.398+j0.247	0.935+j0.165	0.542+j0.095
	수용가 3	0.000+j0.000	0.000+j0.000	0.000+j0.000	0.000+j0.000
	수용가 4	0.000+j0.000	0.000+j0.000	0.000+j0.000	0.000+j0.000
	수용가 5	0.000+j0.000	1.753+j0.309	0.738+j0.130	0.345+j0.061
임피 던스 [Ω]	utility	1.000+j0.377	1.000+j1.131	1.000+j1.885	1.000+j2.639
	수용가 1	4.000+j3.770	4.000+j11.310	4.000+j18.850	4.000+j26.389
	수용가 2	3.000+j1.131	3.000+j3.393	3.000+j5.655	3.000+j7.917
	수용가 3	2.000+j0.754	2.000+j2.262	2.000+j3.770	2.000+j5.278
	수용가 4	3.000+j0.754	3.000+j2.262	3.000+j3.770	3.000+j5.278
	수용가 5	2.000+j1.131	2.000+j3.393	2.000+j5.655	2.000+j7.917

또한, 표 5.2와 같이 수용가 1은 2초에 조건에 따라 전압이 변화하고
수용가 5는 3.5초에 임피던스가 변한다고 가정하였다.

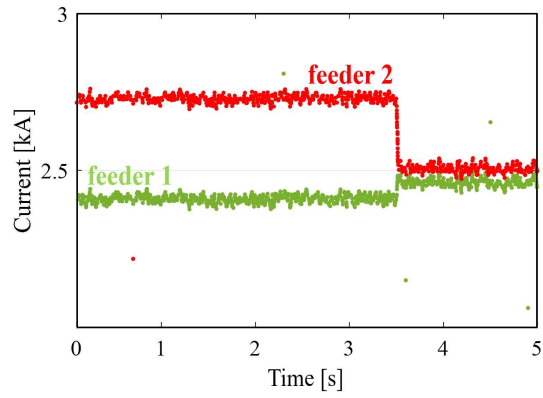
표 5.2 수용가 1과 5에 대한 등가 파라미터 변화 조건

		수용가 1		수용가 5	
		0~2s	2~5s	0~3.5s	3.5~5s
전압 [kV]	3 rd	1.201+j0.212	0.847+j0.149	1.753+j0.309	
	5 th	0.709+j0.125	1.104+j0.195	0.738+j0.130	
	7 th	0.807+j0.142	0.551+j0.097	0.345+j0.061	
임피 던스 [Ω]	3 rd	4.000+j11.310		2.000+j3.393	6.000+j6.786
	5 th	4.000+j18.850		2.000+j5.655	6.000+j11.310
	7 th	4.000+j26.389		2.000+j7.917	6.000+j15.834

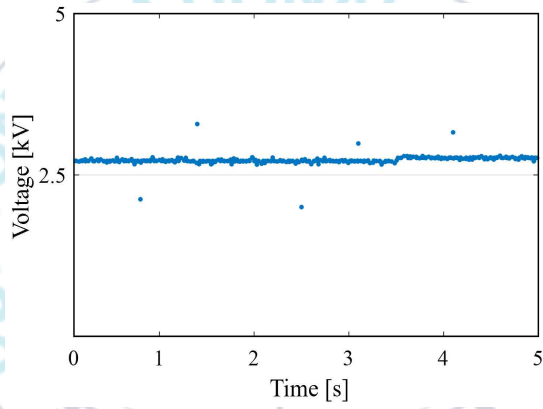
그림 5.2는 PCC₁, PCC₂, PCC₃에서 측정된 전압과 전류 파형을 나타낸
것이다. 현실성을 반영하기 위해 임의의 노이즈와 이상점을 측정 데이터
에 포함시켰다.



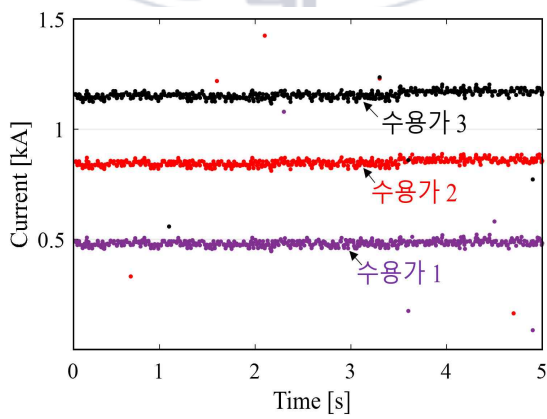
(a) PCC₁에서 측정된 전압



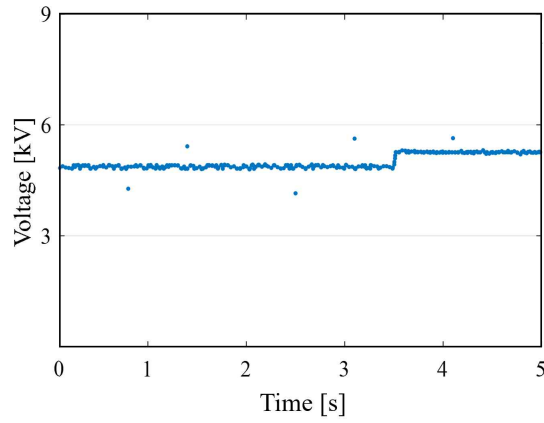
(b) feeder 1과 feeder 2에 흐르는 전류



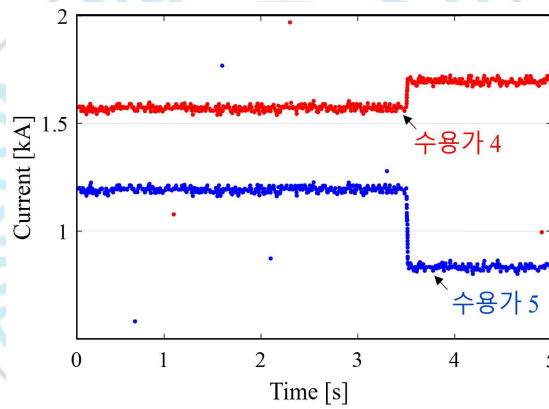
(c) PCC₂에서 측정된 전압



(d) 수용가 1, 2, 3에 흐르는 전류



(e) PCC₃에서 측정된 전압



(d) 수용가 4와 5에 흐르는 전류

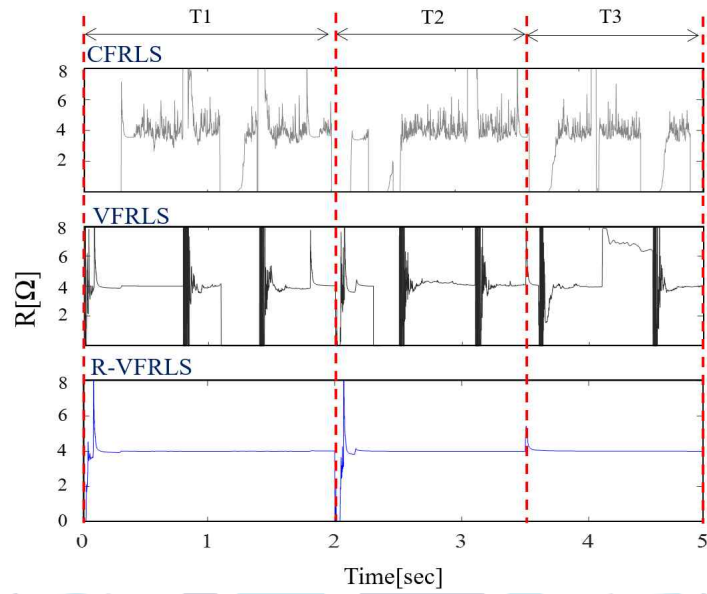
그림 5.2 각 PCC에서 측정된 전압과 전류 파형

이상점이 포함된 전압과 전류 측정 데이터를 이용하여 3개의 PCC에서의 전압 왜곡에 대한 고조파 기여도를 평가하였다. 먼저 RANSAC 알고리즘을 이용하여 측정 데이터에 포함된 이상점을 제거하였으며, 모든 고조파원에 대한 등가 전압 모델을 추정하였다. 다음으로 HVC 및 HCR 계산을 통해 각 차수별 고조파원의 고조파 기여도를 계산하였다. 마지막으로 모든 고조파 차수를 고려하여 THC와 THCR을 평가하였다.

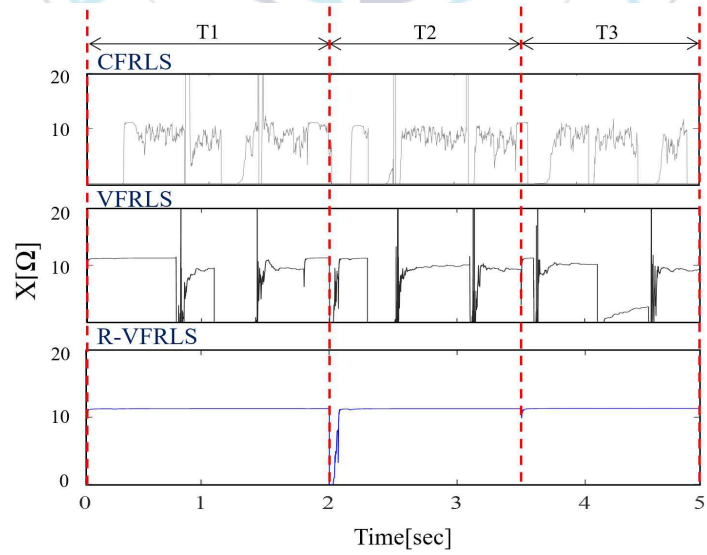
5.2 제안 방법을 이용한 등가 파라미터 추정결과

고조파원의 등가 파라미터는 고조파 기여도 평가의 신뢰도에 큰 영향을 미치기 때문에 정확하고 효과적인 추정 방법이 요구된다. 제안 방법은 파라미터 변화 및 데이터에 이상점이 포함된 경우에 대해 정확한 추정 성능을 기대할 수 있으며, 사례연구를 통해 검증하였다. 먼저 하나의 예로 수용가 1과 수용가 5의 3차 고조파 등가 모델에 대한 파라미터 추정결과를 분석하였다. 제안 방법의 추정 성능을 검증하기 위해 고정 망각인자 RLS (CFRLS)[19]와 가변 망각인자 RLS(VFRLS)[21] 추정 방법과 비교 분석을 수행하였다. CFRLS방법의 λ 값은 0.9944로 설정하였으며, VFRLS 방법의 초기 망각인자 λ_0 와 가중치 α 는 각각 0.1과 0.9911로 설정하였다. 해당 설정값은 추정 오차가 가장 작은 경우의 값을 나타내며, 제안 방법은 VFRLS와 같은 값으로 설정하였다. 제안 방법의 RANSAC 알고리즘을 이용하여 수용가 1과 수용가 5의 측정된 전류에 포함된 5개의 이상점을 검출하여 제거하였다. 수용가 1의 등가 파라미터 추정에 있어 PCC_2 전압과 수용가 2, 3의 전류에 포함된 이상점을 제거하였으며 식 3.36의 데이터 재구성을 통해 총 15개의 공통 시간에 대한 데이터가 추정에서 제외하였다. 또한, 수용가 5의 등가 파라미터 추정을 위해 PCC_3 전압과 수용가 4의 전류에 포함된 이상점을 제거하였으며 공통 시간에 대한 이상점이 15개로 집계되어 추정에서 제외하였다. 수용가 1의 등가 파라미터는 유효점으로 구성된 PCC_2 전압 및 수용가 1 전류 데이터와 제안된 RLS 알고리즘을 이용하여 추정되었으며, 수용가 5의 등가 파라미터는 PCC_3 전압 및 수용가 5 전류 데이터를 이용하여 추정하였다. 그림 5.3은 세 가지 방법을 이용하여 수용가 1의 등가 파라미터 추정결과를 나타낸 것이다. 식 3.34의

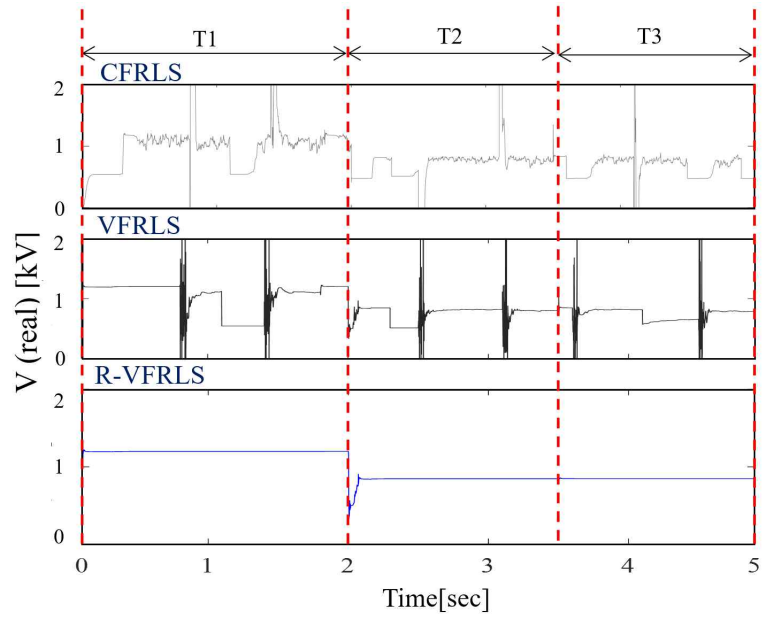
파라미터 변화감지에 따라 전체 시뮬레이션 시간에 대해 3개의 구간 T1, T2, T3으로 나누어 파라미터 추정결과를 분석하였다.



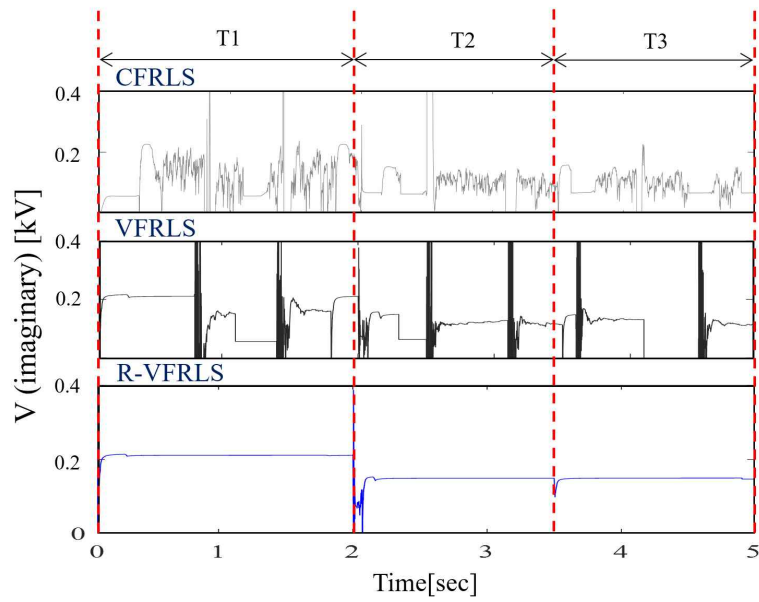
(a) 저항 추정



(b) 리액턴스 추정



(c) 전압 실수부 추정



(d) 전압 허수부 추정

그림 5.3 수용가 1에 대한 3rd 고조파 등가 파라미터 추정결과

표 5.3 T1 구간에 대한 수용가 1의 등가 파라미터 추정결과 비교

파라미터	추정 방법	추정값	실제값	오차(%)
R[Ω]	CFRLS	9.074	4.000	126.85
	VFRLS	3.426		14.35
	Proposed	4.002		0.05
X[Ω]	CFRLS	9.616	11.310	14.98
	VFRLS	7.066		37.52
	Proposed	11.282		0.25
V[kV] (real)	CFRLS	1.276	1.201	6.24
	VFRLS	0.983		18.15
	Proposed	1.200		0.08
V[kV] (imaginary)	CFRLS	-0.080	0.212	137.74
	VFRLS	0.110		48.11
	Proposed	0.211		0.47

표 5.4 T2 구간에 대한 수용가 1의 등가 파라미터 추정결과 비교

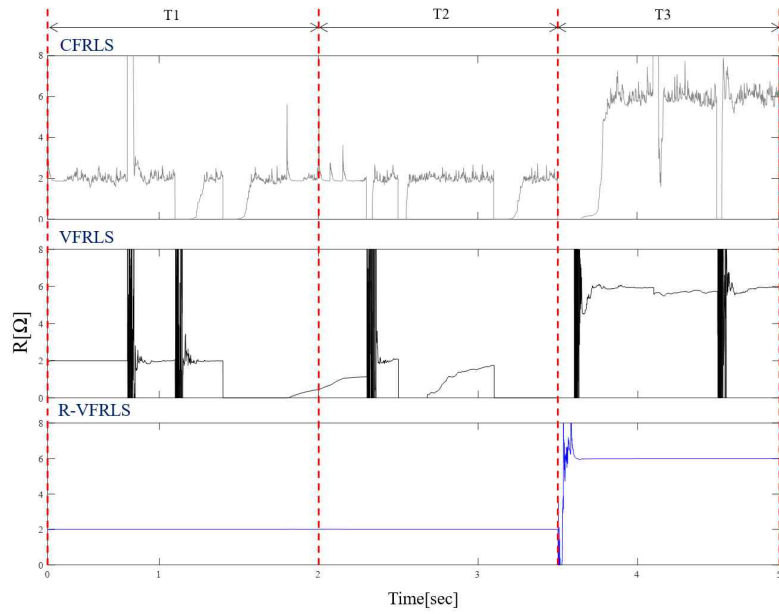
파라미터	추정 방법	추정값	실제값	오차(%)
R[Ω]	CFRLS	7.092	4.000	77.30
	VFRLS	3.502		12.45
	Proposed	3.996		0.10
X[Ω]	CFRLS	8.194	11.310	27.55
	VFRLS	7.576		33.01
	Proposed	11.285		0.22
V[kV] (real)	CFRLS	0.822	0.847	2.95
	VFRLS	0.749		11.57
	Proposed	0.846		0.12
V[kV] (imaginary)	CFRLS	0.025	0.149	83.22
	VFRLS	0.101		32.21
	Proposed	0.148		0.67

표 5.5 T3 구간에 대한 수용가 1의 등가 파라미터 추정결과 비교

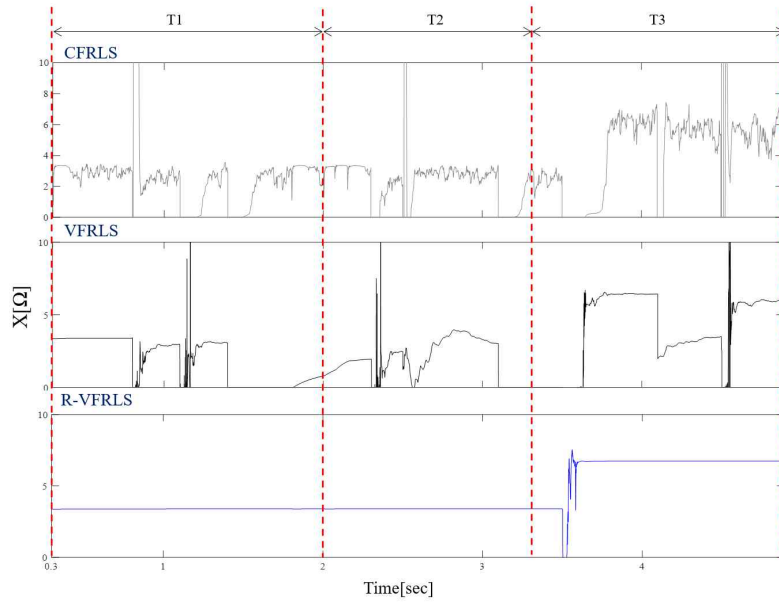
파라미터	추정 방법	추정값	실제값	오차(%)
R[Ω]	CFRLS	14.505	4.000	262.63
	VFRLS	5.281		32.03
	Proposed	4.005		0.12
X[Ω]	CFRLS	-3.699	11.310	132.71
	VFRLS	6.317		44.15
	Proposed	11.305		0.04
V[kV] (real)	CFRLS	0.620	0.847	26.80
	VFRLS	0.734		13.34
	Proposed	0.847		0.01
V[kV] (imaginary)	CFRLS	-0.387	0.149	359.73
	VFRLS	0.031		79.19
	Proposed	0.149		0.01

CFRLS와 VFRLS 방법은 측정 데이터에 포함된 이상점으로 인해 모든 구간에서 매우 불안정한 추정성능을 보인 반면, 제안 방법은 파라미터 변화에도 불구하고 전체적으로 안정적인 추정성능을 보였다. 표 5.3~표 5.5는 세 가지 방법의 추정결과의 평균값을 요약한 것이다. CFRLS와 VFRLS 방법은 추정값과 실제값의 오차가 큰 반면, 제안하는 방법은 파라미터 추정 오차율이 1% 미만으로 매우 정확한 결과를 보였다. 모든 고조파원에 대한 등가 모델은 제안된 방법을 이용하여 추정되었다.

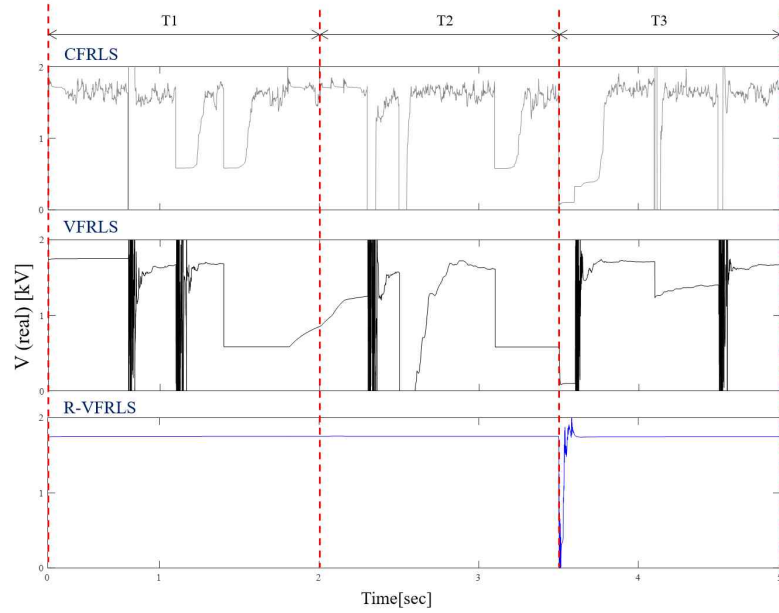
다음으로 그림 5.4는 수용가 5에 대한 등가 파라미터 추정결과를 나타낸 것이다. 해당 결과 또한 제안 방법이 가장 추정성능이 우수한 것을 확인할 수 있으며, 표 5.6~표 5.8과 같이 각 추정 방법의 평균값을 통해 오차를 확인할 수 있다. 제안 방법은 오차율이 모두 1% 미만으로 추정성능이 매우 우수하게 나타났다.



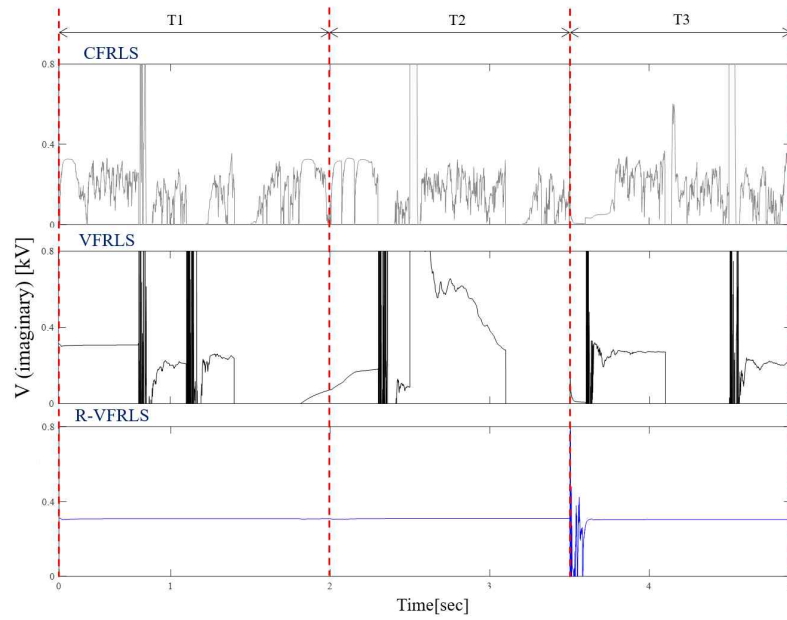
(a) 저항 추정



(b) 리액턴스 추정



(c) 전압 실수부 추정



(d) 전압 허수부 추정

그림 5.4 수용가 5에 대한 3rd 고조파 등가 파라미터 추정결과

표 5.6 T1 구간에 대한 수용가 5의 등가 파라미터 추정결과 비교

파라미터	추정 방법	추정값	실제값	오차(%)
R[Ω]	CFRLS	2.048	2.000	2.40
	VFRLS	1.418		29.10
	Proposed	2.005		0.25
X[Ω]	CFRLS	2.25	3.393	33.69
	VFRLS	2.014		40.64
	Proposed	3.390		0.09
V[kV] (real)	CFRLS	1.516	1.753	13.52
	VFRLS	1.328		24.24
	Proposed	1.751		0.11
V[kV] (imaginary)	CFRLS	0.048	0.309	84.47
	VFRLS	0.133		56.96
	Proposed	0.307		0.65

표 5.7 T2 구간에 대한 수용가 5의 등가 파라미터 추정결과 비교

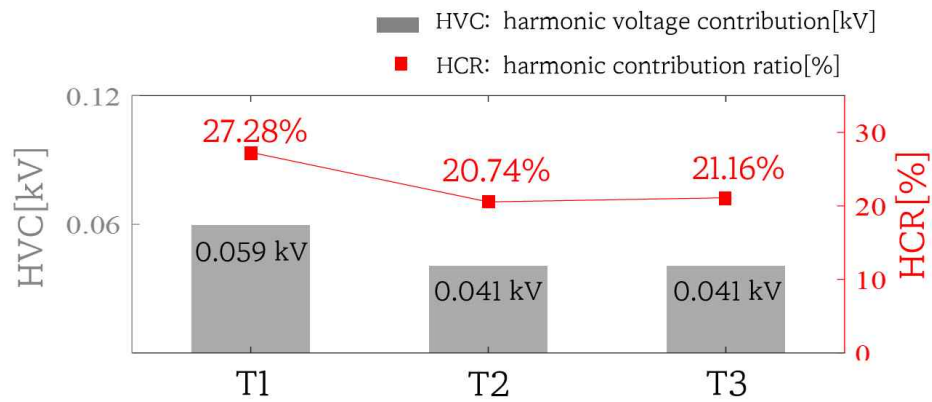
파라미터	추정 방법	추정값	실제값	오차(%)
R[Ω]	CFRLS	-1.415	2.000	170.75
	VFRLS	0.262		86.90
	Proposed	2.001		0.05
X[Ω]	CFRLS	-0.089	3.393	102.62
	VFRLS	1.662		51.02
	Proposed	3.389		0.12
V[kV] (real)	CFRLS	0.239	1.753	86.37
	VFRLS	0.997		43.13
	Proposed	1.749		0.23
V[kV] (imaginary)	CFRLS	0.286	0.309	7.44
	VFRLS	0.316		2.27
	Proposed	0.308		0.32

표 5.8 T3 구간에 대한 수용가 5의 등가 파라미터 추정결과 비교

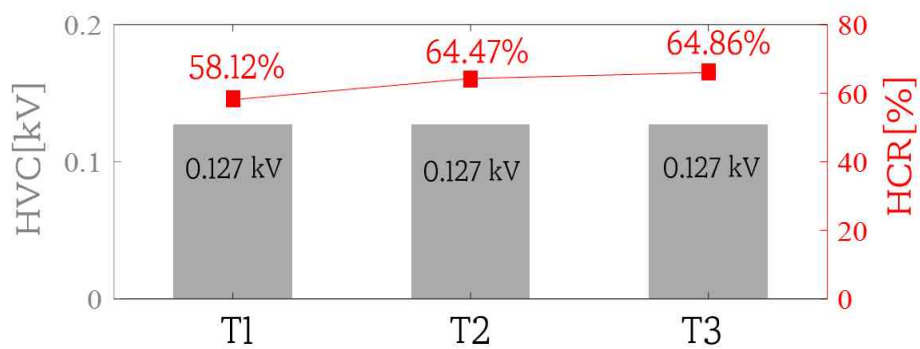
파라미터	추정 방법	추정값	실제값	오차(%)
R[Ω]	CFRLS	4.344	6.000	27.60
	VFRLS	5.441		9.32
	Proposed	5.987		0.22
X[Ω]	CFRLS	1.045	6.786	84.60
	VFRLS	4.472		34.10
	Proposed	6.776		0.15
V[kV]	CFRLS	0.991	1.753	43.47
	VFRLS	1.431		18.37
	Proposed	1.745		0.46
V[kV]	CFRLS	-0.254	0.309	182.20
	VFRLS	0.069		77.67
	Proposed	0.306		0.97

5.3 고조파 전압 기여도와 기여율 평가

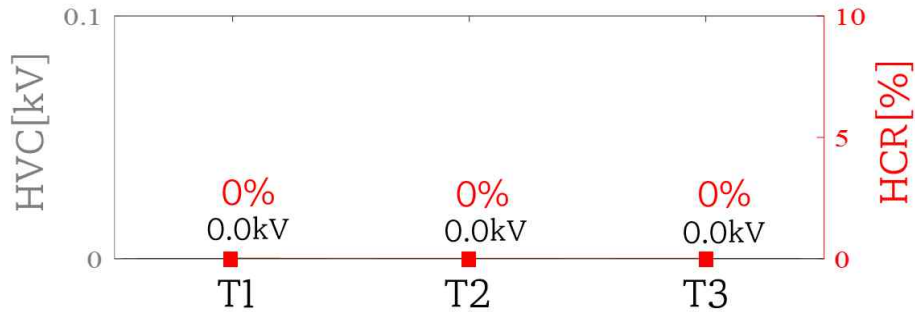
추정된 고조파원의 등가 모델과 중첩의 원리를 이용하여 HVC와 HCR를 산출하였다. 그림 5.5는 PCC₂에서의 7th 고조파 성분에 대한 HVC 및 HCR 추정결과와 평균값을 나타낸 것이다.



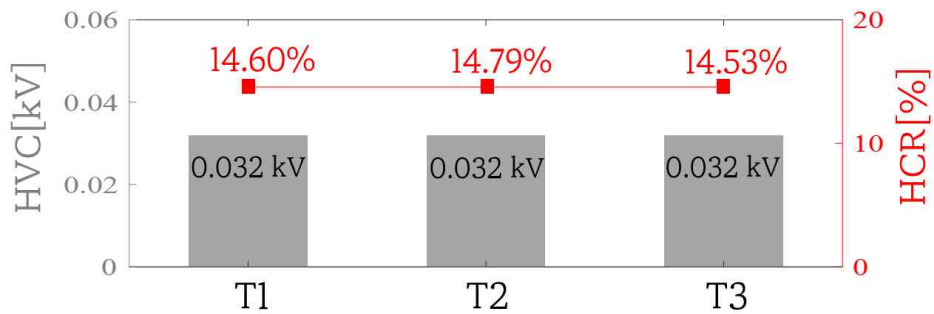
(a) 수용가 1



(b) 수용가 2



(c) 수용가 3

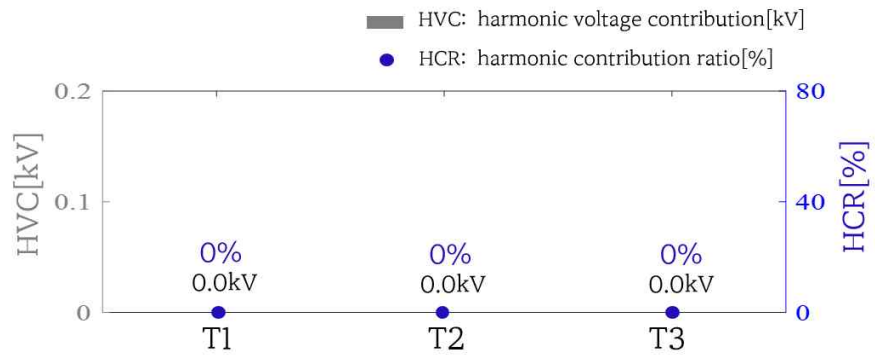


(d) PCC₁

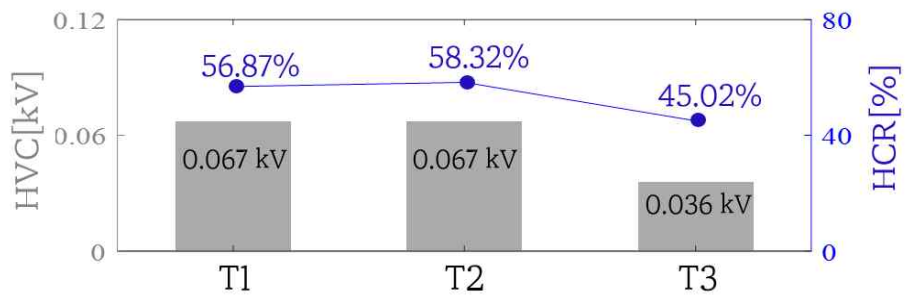
그림 5.5 PCC₂에 대한 7th HVC 및 HCR

수용가 2의 7th HVC는 모든 구간 T1, T2 및 T3에서 0.127kV로 가장 큰 전압 왜곡에 기여하는 것을 알 수 있다. 반면 선형 부하인 수용가 3의 7th HVC는 모든 구간에서 0kV로 나타났으며, PCC₂의 전압 왜곡에 기여하지 않는 것을 알 수 있다.

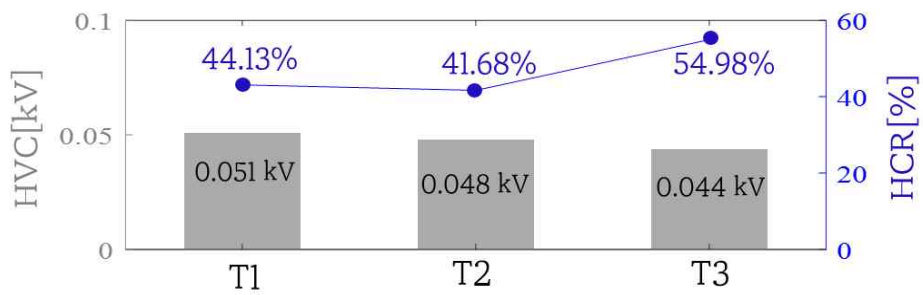
그림 5.6은 PCC₃에 대한 7th HVC와 HCR 결과를 나타낸 것이다. 수용가 5는 구간 T1 및 T2에서 HVC가 0.067kV로 가장 높았으나 구간 T3에서 0.036kV로 감소하였다. 반면 PCC₁은 T3 구간에서 HVC가 0.044kV로 나타났으며, 수용가 5보다 높게 나타나며, 기여도가 역전된 것을 알 수 있다.



(a) 수용가 4



(b) 수용가 5



(c) PCC₁

그림 5.6 PCC₃에 대한 7th 고조파 HVC 및 HCR

개별 고조파 차수에 대한 HVC와 HCR 추정결과는 표 5.9~표 5.11과 같다. 해당 결과로부터 PCC_1 , PCC_2 및 PCC_3 전압 왜곡에 대한 개별 고조파 차수별 고조파원의 기여 정도를 정량적으로 파악할 수 있다. PCC_1 을 기준으로 했을 때 피더 1은 T3구간에서 모든 차수에 대한 고조파 기여도가 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, 피더 2는 상대적으로 기여도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 유틸리티의 3rd 와 5th 고조파 기여도가 1% 이하로 나타나지만 7th 고조파 기여도는 1% 이상으로 나타난다. 이는 수용가들의 HVC가 다른 차수에 비해 작기 때문에 상대적으로 유틸리티의 기여도가 상승하게 된 것을 알 수 있다.

표 5.9 3rd 고조파 성분에 대한 HVC 및 HCR 평가 결과

PCCs	Harmonic sources	HVC [kV]			HCR [%]		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
PCC_1	Utility	0.00	0.00	0.00	0.33	0.38	0.51
	피더 1	0.12	0.11	0.12	35.43	33.77	50.83
	피더 2	0.22	0.22	0.11	64.24	65.85	48.66
PCC_2	PCC_1	0.12	0.11	0.08	21.51	22.31	16.68
	수용가 1	0.10	0.07	0.07	18.82	14.10	15.12
	수용가 2	0.32	0.32	0.32	59.67	63.59	68.20
	수용가 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PCC_3	PCC_1	0.19	0.19	0.15	33.22	32.62	43.73
	수용가 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	수용가 5	0.39	0.39	0.19	66.78	67.38	56.27

표 5.10 5th 고조파 성분에 대한 HVC 및 HCR 평가 결과

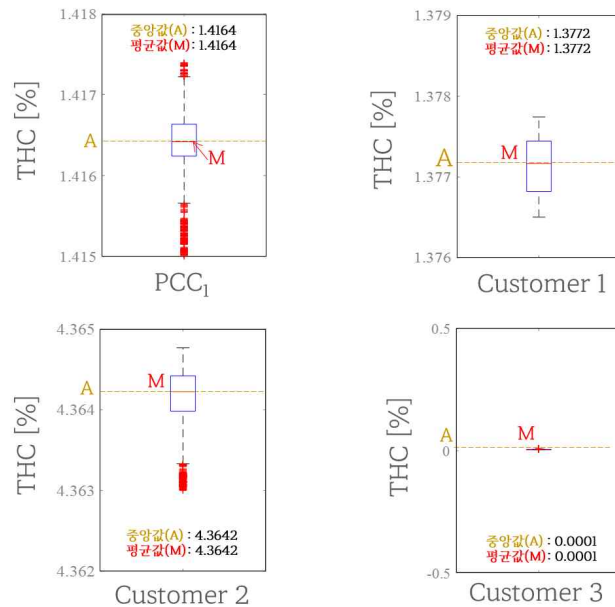
PCCs	Harmonic sources	HVC [kV]			HCR [%]		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
PCC ₁	Utility	0.00	0.00	0.00	0.69	0.67	0.77
	피더 1	0.08	0.09	0.09	47.48	50.12	65.57
	피더 2	0.08	0.08	0.05	51.83	49.21	33.66
PCC ₂	PCC ₁	0.06	0.06	0.05	17.09	16.36	13.43
	수용가 1	0.05	0.09	0.09	16.43	23.32	24.12
	수용가 2	0.22	0.22	0.22	66.48	60.32	62.45
	수용가 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PCC ₃	PCC ₁	0.09	0.10	0.09	37.88	39.11	52.11
	수용가 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	수용가 5	0.15	0.15	0.15	62.12	60.89	47.89

표 5.11 7th 고조파 성분에 대한 HVC 및 HCR 평가 결과

PCCs	Harmonic sources	HVC [kV]			HCR [%]		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
PCC ₁	Utility	0.00	0.00	0.00	1.23	1.43	1.53
	피더 1	0.05	0.05	0.05	57.52	54.82	69.04
	피더 2	0.04	0.04	0.02	41.25	43.75	29.43
PCC ₂	PCC ₁	0.03	0.03	0.03	14.57	14.81	14.55
	수용가 1	0.06	0.04	0.04	27.31	20.93	21.17
	수용가 2	0.13	0.13	0.13	58.12	64.26	64.28
	수용가 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PCC ₃	PCC ₁	0.05	0.05	0.04	43.15	41.69	54.98
	수용가 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	수용가 5	0.07	0.07	0.04	56.85	58.31	45.02

5.4 총 고조파 기여도와 고조파 왜곡 지도 구축

마지막으로, 모든 PCC에서의 포괄적인 THC 평가를 수행하였다. 각 PCC에서의 THC 평가는 기본파 및 모든 고조파 차수를 포함한 HVC와 식 4.10, 식 4.11을 이용하여 계산할 수 있다. 그림 5.7은 PCC₂에서 각 시간 구간 T1, T2 및 T3에 대한 THC의 중앙값과 평균값을 나타낸 것이다. THC 결과의 중앙값과 평균값 사이의 추정 편차가 매우 작아 추정이 매우 안정적임을 나타낸다.



(a) T1에 대한 THC의 평균 및 중앙값



(b) T2에 대한 THC의 평균 및 중양값



(c) T3에 대한 THC의 평균 및 중양값

그림 5.7 PCC₂에서의 THC 평가 결과

수용가 2는 전 구간에서 약 4.37%로 가장 높은 THC 기여도를 보였고, 수용가 3은 THC 기여도가 0%가 아닌 것으로 나타났다. 모든 PCC에 대한 THC 및 THCR를 산출한 후 그림 5.8과 같이 고조파 왜곡 지도를 구축하였다. 해당 왜곡 지도에서 PCC_1 의 경우 T1 및 T2 시간 구간에서 피더 2 측의 THC 및 THCR이 상대적으로 높아 가장 높은 값을 나타내는 것을 직관적으로 알 수 있다. 그러나 T3 구간에서는 피더 2 측의 THC 및 THCR이 감소하고 피더 1 측의 고조파 기여도 증가하여 서로 역전되는 것을 알 수 있다. 이러한 고조파 평가를 바탕으로 심각한 계통의 전압 왜곡을 유발하는 고조파원에 대해 정량적으로 파악하여 효과적으로 관리할 수 있다.

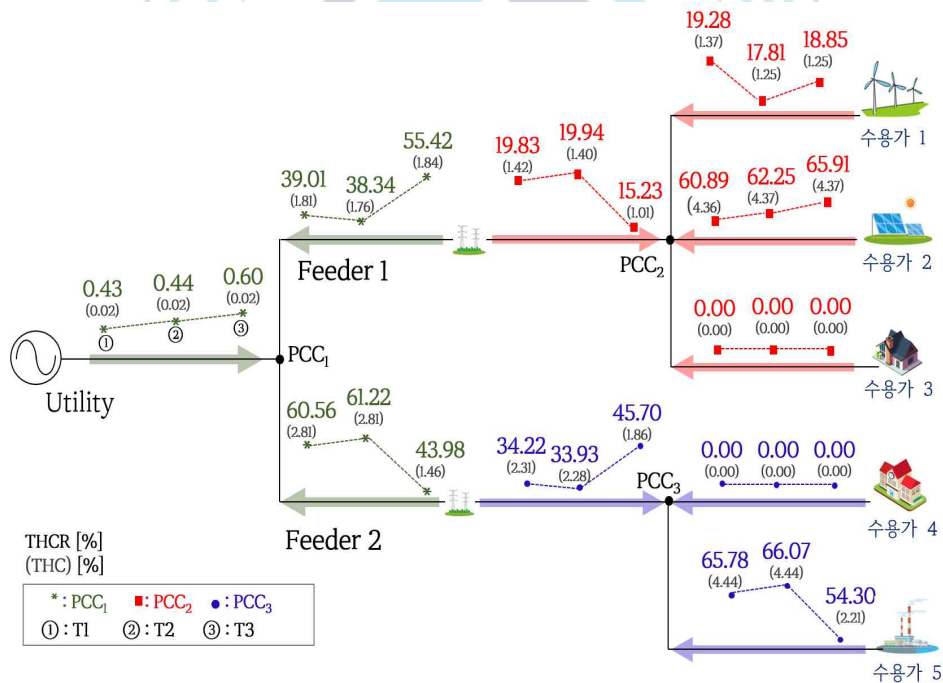


그림 5.8 THC와 THCR에 기반한 고조파 왜곡 지도 구축 결과

제 6 장 결론

본 논문은 배전계통에서의 고조파 등가 전압원 모델 추정에 기반한 고조파 기여도 평가방법을 제안하였다. 고조파 기여도 평가를 위해서는 고조파원에 대한 정확한 전압원 등가 모델 추정이 필요하다. 기존의 추정 방법들은 PCC 측정 데이터와 RLS 알고리즘을 이용하여 등가 모델 파라미터를 추정한다. 해당 방법들은 등가 파라미터가 변화하지 않는 조건과 측정 데이터에 이상점이 없는 양호한 상태에서 제안되었다. 그러나 실제 계통 환경에서의 등가 파라미터는 고정된 값이 아니며, 데이터 계측에 있어서도 이상점이 나타날 수 있기 때문에 실계통 적용에는 한계가 있다.

이에 본 논문에서는 가변 망각인자를 갖는 RLS와 RANSAC 알고리즘을 기반으로 기존 방법의 문제점을 극복한 새로운 고조파 기여도 평가방법을 제안하였다. 학위과정에서 수행한 연구 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 가변 망각인자의 RLS를 이용한 파라미터 추정 방법 개발

RLS의 망각인자는 추정에 있어 과거 데이터 반영 정도를 조절하는 요소이다. 고정 망각인자를 갖는 RLS는 일정한 크기의 가중치로 인해 공분산 행렬이 극도로 민감해지는 “wind-up” 문제가 발생하여 추정성능이 떨어질 수 있다. 이에 가변 망각인자를 갖는 RLS를 이용하여 wind-up문제 해결하였으며 안정적인 추정이 가능하도록 개선하였다.

2. 파라미터 변화감지 방법 개발

RLS 알고리즘은 등가 모델의 파라미터가 변화하여도 과거의 데이터가 추정에 계속 반영됨으로 인해 추정 오차가 증가하고 수렴하는 데 오랜 시간이 걸릴 수 있다. 따라서 등가 파라미터가 변화하는 경우 RLS 추정에 있어 과거 데이터는 무시하고 새로운 데이터만을 이용하여 파라미터를 추정할 필요가 있다. 본 연구에서는 파라미터 추정 성능 향상을 위해 PCC 전압 변화율에 기반한 파라미터 변화 검출 방법을 제안하였다. 해당 방법은 PCC 전압 변화가 임계범위 이내일 경우 계속적으로 추정하며, 임계범위를 벗어날 경우 RLS를 초기화한 후 새로운 추정을 시작한다.

3. 이상점 감지 및 데이터 재구성

일반적으로 RLS는 측정 데이터에 이상점이 존재하는 경우 추정 성능이 현저히 떨어지는 근본적인 문제가 있다. 계통에서 전압과 전류 등의 계측에 있어 다양한 원인에 의해 오차가 큰 데이터가 기록될 수 있으며 이에 따라 RLS 추정 성능이 현저하게 저하될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 RANSAC 알고리즘을 이용한 원시 데이터의 이상점 검출 및 제거 방법을 제안하였다. 또한, RLS 적용을 위해 유효점만으로 구성된 데이터 재구성 방법을 개발하였다.

4. 가변 임계범위를 갖는 RANSAC 알고리즘 개발

RANSAC 알고리즘의 임계범위는 이상점 및 유효점 결정에 큰 영향을 줄 수 있다. 임계범위가 너무 큰 경우에는 이상점이 제대로 제거되지 않을 수도 있으며, 작은 경우에는 유효점이 제거될 수도 있다. 따라서 적절한 임계범위 설정을 통해 효과적인 이상점 제거 방법이 필요하다. 이에

본 논문에서는 가변 임계범위를 갖는 RANSAC를 제안하였다. 해당 방법은 최소의 임계범위를 두고 RANSAC알고리즘을 통해 유효점을 결정한다. 해당 유효점이 RLS추정에 필요한 최소 데이터 조건을 만족하는 경우에는 데이터 재구성을 수행한다. 만약 조건을 만족하지 않으면 임계범위를 증가시켜 RANSAC알고리즘을 반복 수행한다. 이 과정은 설정된 최대 임계범위까지 반복하게 된다.

5. 고조파 왜곡 지도 구축

추정된 등가 파라미터와 중첩의 원리를 이용한 고조파 기여도 평가방법을 개발하였다. 개별 고조파 차수에 대해 고조파 전압 기여도(HVC) 및 고조파 기여율(HCR) 평가방법을 제시하였고 기본파 전압에 대한 모든 고조파 전압의 기여 정도를 나타내는 총 고조파 기여도(THC)의 산출 방법을 도출하였다. 계통내 모든 고조파원에 대한 THC와 THCR 등의 평가결과를 계통도에 나타내는 고조파 왜곡 지도 구축 방법을 제안하였다. 고조파 왜곡 지도를 통해 각 고조파원들의 전압 왜곡 정도를 직관적으로 파악할 수 있다.

이상의 연구 결과를 바탕으로 배전계통에서의 신뢰도 높은 고조파원 추적 및 기여도 평가가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 계통의 고조파 현황 파악 및 고조파 문제에 따른 책임소재 규명 등 효과적인 고조파 관리에도 활용이 가능할 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 실계통 측정을 기반으로 개발 기술의 검증과 개선 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

- [1] S. Kim, Y.-H. Park, "Transient Recovery Voltage in Single-Tuned Low-Order Harmonic Filter Banks," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 72, no. 1, pp. 9-15, 2023.
- [2] A. Taghvaie, T. Warnakulasuriya, D. Kumar, F. Zare, R. Sharma and D. M. Vilathgamuwa, "A Comprehensive Review of Harmonic Issues and Estimation Techniques in Power System Networks Based on Traditional and Artificial Intelligence/Machine Learning," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 31417-31442, 2023.
- [3] L. Wu and Z. Lyu, "Harmonic Injection-Based Torque Ripple Reduction of PMSM With Improved DC-Link Voltage Utilization," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 7, pp. 7976-7981, July 2023.
- [4] A. Manito, U. Bezerra, M. Tostes, E. Matos, C. Carvalho, T. Soares. "Evaluating Harmonic Distortions on Grid Voltages Due to Multiple Nonlinear Loads Using Artificial Neural Networks," *Energies* 3303, no. 11, 2018.
- [5] EIA, "International Energy Outlook 2019," 2019.
- [6] EIA, "Annual Energy Outlook 2019," 2019.
- [7] W. A. Omran, H. S. K. El-Goharey, M. Kazerani, and M. M. A. Salama, "Identification and measurement of harmonic pollution for radial and nonradial systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1642-1650, Jul. 2009.

- [8] B. M. Ganesini, I. N. Santos and P. F. Ribeiro, "Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 4, pp. 2398–2407, Aug. 2023
- [9] W. Xu, E. E. Ahmed, X. Zhang, and X. Liu, "Measurement of network harmonic impedances: Practical implementation issues and their solutions," IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 1, pp. 210216, Jan. 2002.
- [10] E. Sezgin, M. Gol, and O. Salor, "State-estimation-based determination of harmonic current contributions of iron and steel plants supplied from PCC," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 52, no. 3, May 2016.
- [11] P. H. Swart, M. J. Case, and J. D. van Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in electric power networks," presented at the 2nd Int. Workshop on Power Definitions and Measurements Under Nonsinusoidal Conditions, Stresa, Italy, pp. 8–10, Sep. 1993.
- [12] T. Tanaka and H. Akagi, "A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits," IEEE Trans. on Power Del., vol. 10, no. 4, pp. 1737–1742, Oct. 1995.
- [13] C. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu, and T. Tayjasananant, "Critical impedance method – a new detecting harmonic sources method in distribution systems," IEEE Trans. on Power Del., vol. 19, no. 1, pp. 288–297, Jan. 2004.

- [14] N. Hamzah, A. Mohamed, and A. Hussain, "Harmonic source location at the point of common coupling based on voltage magnitude," in *Proc. IEEE Region 10 Conf.*, vol. C, pp. 21–24, Nov. 2004.
- [15] W. Zhang and H.-G. Yang, "A method for assessing harmonic emission level based on binary linear regression," *Proc. Chin. Soc. Elect. Eng.*, vol. 24, no. 6, pp. 50–53, Feb. 2004.
- [16] A. Zebardast and H. Mokhtari, "New method for assessing the utility harmonic impedance based on fuzzy logic," *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, vol. 11, no. 10, Jul. 2017.
- [17] J. Wu, H. Qiu, J. Xu, F. Zhou, K. Dai, C. Yang, and D. Lv, "Quantifying harmonic responsibilities based on kurtosis detection principle of amplitude fluctuations," *IEEE Access*, vol. 6, 2018.
- [18] G. V. de Andrade, S. R. Naidu, M. Neri, and E. G. da Costa, "Estimation of the utility's and consumer's contribution to harmonic distortion," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 11, pp. 3817–3823, Nov. 2009.
- [19] J. H. Han, K. Lee, C. H. Park and G. Jang, "Estimation of Harmonic Sources in a Power System using Recursive Least-Squares Technique", *Tran. Korean. Inst. Elect. Eng.*, vol. 60, no. 9, pp. 1639–1645, Sep. 2011.
- [20] J. H. Han, K. Lee, C. Song, G. Jang, G. Byeon and C. H. Park, "A New Assessment for the Total Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling," *J Electr. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 6–14, Jan. 2014.
- [21] J. I. Park and C. H. Park, "A Study on the Application of the

- Recursive Least Square Method for Estimating Harmonic Load Model,” *Tran. Korean. Inst. Elect. Eng.*, vol. 68, no. 7, pp. 827–833, Apr. 2019.
- [22] Park, J.I.; Lee, H.; Yoon, M.; Park, C.H. A Novel Method for Assessing the Contribution of Harmonic Sources to Voltage Distortion in Power Systems. *IEEE Access* 2020, 8, 76568 – 76579.
- [23] 한국전력공사, “기본 공급약관 시행세칙”, 2018. 02
- [24] 한국전력공사, “송전계통 고조파 관리기준”, 2018. 06
- [25] IEEE Std. 519-2022, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems
- [26] 한국원자력안전기술원, “원자력발전소 소내 전력계통 고조파 영향 분석”, 2009. 10
- [27] P. E. Wellstead and M. B. Zarrop, “Self-tuning systems. control and signal processing,” Wiley, August 1991, ISBN 978-0-471-92883-6.
- [28] G. Fusco, A. Losi and M. Russo, “Constrained least squares methods for parameter tracking of power system steady-state equivalent circuits,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 3, pp. 1073–1080, Jul. 2000.
- [29] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, and H. Peng, “Recursive least squares with forgetting for online estimation of vehicle mass and road grade: theory and experiments,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 43, no. 1, pp. 31–55, Jan. 2005.
- [30] C. Jiao, J. Yang, X. Wang and B. Liang, “Adaptive coordinated motion control with variable forgetting factor for a dual-arm space robot in post-capture of a non-cooperative target,” *International Journal of*

- Advanced Robotic Systems, vol. 16, no. 5, pp. 1–15, September 2019.
- [31] X. Sun, J. Ji, B. Ren, C. Xie and D. Yan, “Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-Ion Battery,” *Energies*, vol. 12, 2242. June 2019.
- [32] Li, S.; Kaile, Z.; Xiaoling, Z.; Shanlin, Y.; Outlier Data Treatment Methods Toward Smart Grid Applications. *IEEE Access* 2018, 6.
- [33] Yanlin, P.; Yining, Y.; Yuejie, X.; Yang, X.; Runan, S.; Jinping, K.; Haisen, Zhao.; Electricity Theft Detection in AMI Based on Clustering and Local Outlier Factor. *IEEE Access* 2021, 9.
- [34] Jaime, Y.; Bo, T.; Detection of Electricity Theft in Customer Consumption Using Outlier Detection Algorithms. 2018 1st International Conference on Data Intelligence and Security (ICDIS) 2018, pp. 135–140.
- [35] Wenpeng, L.; Joshua, P.; Mirjana, M.; Joyce, L.; Brian, H. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification. *IEEE Trans. Smart Grid* 2015, 6, 1964 – 1971.
- [36] E. O. Rybakova, A. V. Trusov, E. E. Limonova, N. S. Skoryukina, K. B. Bulatov and D. P. Nikolaev, “PESAC, the Generalized Framework for RANSAC-Based Methods on SIMD Computing Platforms,” in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 82151–82166, 2023.
- [37] W. Ci, T. Xu, T. Xu, X. Wu and S. Lu, “Fast and Low-Drift Visual Odometry With Improved RANSAC-Based Outlier Removal Scheme for Intelligent Vehicles,” in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 60128–60140, 2022.
- [38] Sunglok, C.; Taemin, K.; Wonpil, Y.; Performance evaluation of

- RANSAC family. Proceedings of the British Machine Vision Conference 2009, 24.
- [39] Martin A, F.; Robert C, B.; Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Communications the ACM 1981, 24.
- [40] Wenjiang, W.; Wen, L.; An Optimized Method Based on RANSAC for Fundamental Matrix Estimation. 2018 IEEE 3rd Inter-national Conference on Signal and Image Processing (ICSIP) 2018, pp. 372-376.
- [41] Sang-Min Lee, Hyong-Mo Jung, Gwon-Jong Yu, Kang-Wan Lee "Harmonic Impact Syudies of Grid-connected Wind Power and PV Generation Systems", The Transactions of the KIEE, Vol. 58, No. 11, pp. 2185-2191, November 2009.
- [42] Seong-Gyu Lee, Yong-Jin Kim, Hyoung-Mo Jeong and Kang-Wan Lee. "Harmonic Analysis of Small-Scale Power Systems with Wind Power Generation." The proceedings of the KIEE conference, pp. 132-135, May 30-31, 2008.
- [43] Purushothama Rao Nasini, Narender Reddy Narra and Santosh A, "Modeling And Harmonic Analysis Of Domestic/Industrial Loads", International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 2, Issue 5, pp. 485-491, October 2012.
- [44] H. Kumar, O. A. Alvarez and S. Kumar, "Experimental Evaluation of Smart Electric Meters' Resilience Under Cyber Security Attacks," in IEEE Access, vol. 11, pp. 55349-55360, 2023.
- [45] Y. -H. Lin, H. -S. Tang, T. -Y. Shen and C. -H. Hsia, "A Smart Home Energy Management System Utilizing Neurocomputing-Based

- Time-Series Load Modeling and Forecasting Facilitated by Energy Decomposition for Smart Home Automation," in IEEE Access, vol. 10, pp. 116747–116765, 2022.
- [46] X. Xia, Y. Xiao, W. Liang and J. Cui, "Detection Methods in Smart Meters for Electricity Thefts: A Survey," in Proceedings of the IEEE, vol. 110, no. 2, pp. 273–319, Feb. 2022.
- [47] Park, J.I, Park, C.H. Harmonic Contribution Assessment Based on the Random Sample Consensus and Recursive Least Square Methods. Energies. 2022.



감사의 글

저는 30 후반의 늦은 나이에 박사과정을 시작하였습니다. 열정만 가지고 열심히 한다면 학위를 쉽게 마칠 수 있을 것으로 생각했습니다. 박사과정은 석사 과정과 달리 단편적이지 않고 매우 입체적인 연구가 필요했습니다. 평소에 쉽게 읽고 공부한 많은 논문과 보고서들을 직접 연구를 통해 작성해보니 부족한 면이 많았으며, 이전 연구자들의 노력과 열정을 느낄 수 있었습니다. 지도교수님께서 기초적인 보고서 및 논문 작성방법과 함께 연구자가 지녀야 할 자세에 대해 섬세하게 가르쳐 주셨습니다. 이러한 교수님의 노고에 학위 과정과 논문을 완성할 수 있었습니다. 지도교수님이신 박창현 교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 진심으로 감사합니다.

그리고 논문심사를 열심히 해주신 우경일, 고영중, 이한상, 이계병 교수님에게도 감사의 인사를 전합니다. 또한, 연구실에서 열심히 학위 과정을 같이 한 채하경 후배에게 감사를 전합니다. 힘든 일이 있을 때 같이 이겨내고 많은 점을 배웠습니다. 그리고 연구실에서 먼저 박사학위를 마치신 이명철, 손정대 박사님에게도 감사를 전합니다. 항상 좋은 말씀을 주셔서 너무 감사합니다.

마지막으로 딸 박재희와 아내 김지현에게 감사를 전합니다. 항상 비타민이 되어 주고 용기를 북돋아 주어 즐거운 학위 과정을 마칠 수 있었습니다. 그리고 사랑하는 아버지, 어머니, 장인, 장모님에게도 감사를 전하며, 하늘에 있는 동생 박중환에게도 감사를 전합니다.

2023년 12월

박중일 올림