

Estimation of Harmonic Sources in a Power System using Recursive Least-Squares Technique

한 중훈* · 이 계병* · 박 창현** · 장 길수†

(Jong-Hoon Han · Keybyung Lee · Chang-Hyun Park · Gilsoo Jang)

Abstract - A technique to allocate responsibilities among the interested parties in electric power system with harmonic voltage distortion at the point of common coupling (PCC) has been presented. The recursive least-squares technique has been used to estimate the parameters of the Thevenin equivalent load model. The validity of the technique has been verified using a simulation which considered the voltage waveform distortion at the PCC between the utility and two industrial consumers. With the estimated data from the measured voltage and current waveform at the PCC, the individual contributions to the distortion of voltage waveform at an interested harmonic frequency have been calculated and could provide a flexible solution to identify the source of harmonic pollution in distribution systems.

Key Words : Harmonics, Harmonic distortion, Harmonic source, Power quality

1. 서 론

오늘날의 산업은 제조 공정상의 효율성을 높이기 위해 자동화 설비에 대한 구축이 점점 증가하고 있다. 산업용 수용가들의 이러한 경향으로 인하여 배전계통에 유입되는 비선형 부하가 증가하고 있으며, 이는 전력계통으로 유입되는 고조파 전류가 늘어나고 있음을 의미한다. 따라서 전력공급자 측면에서는 수용가로부터 야기되는 고조파 전류의 유입을 제한하여 계통의 전압 왜곡을 방지할 수 있고, 이를 위반할 경우에 벌금과 같은 제약 사항을 고려할 수 있다. 일반적으로 전압 혹은 전류 파형의 고조파 왜곡을 측정하기 위해 흔히 사용되는 두 가지 지수로 total harmonic Distortion (THD)와 total demand distortion (TDD)가 있으나, 모니터링 지점에서의 고조파 발생원을 구분할 수 있는 정보는 제공하지 못하고 있다. 실제 전력계통에서의 고조파 발생원은 모니터링 지점을 기준으로 상단과 하단 모두에 존재할 수 있기 때문에 전력공급자와 수용가 모두 고조파 왜곡에 대한 책임 주체가 될 수 있다.

고조파 발생원을 추정하기 위한 방법들에 대해 모니터링 지점을 기준으로 구분하자면, 계통 내 다양한 지점에서의 동기화된 측정을 통해 고조파 발생원을 판별하거나 단일 point of common coupling (PCC) 지점에서의 측정을 통해 고조파 발생원을 탐지할 수 있다. 물론 다양하게 분산된 지점에서 측정된 데이터를 이용하는 것이 고조파에 대한 자세한 정보

를 취득할 수 있지만, 동기화된 데이터를 얻기 위해 구현이 복잡해지고 많은 비용 문제가 발생된다. 반면에 단일 지점에서의 측정방법은 구현이 단순하고 비용 측면에서 효과적인 장점이 있지만, 신뢰성 있는 판별력을 갖춘 방법이 나오기까지는 아직까지 지속적인 연구가 필요한 상황이다 [1].

단순한 계산방법으로 total harmonic power (THP)를 계산한 결과의 부호를 이용하는 방법이 [2], [3]에 소개되었다. 이 방법은 고조파 발생원이 모니터링 지점으로부터 상단 혹은 하단에 위치하는 지를 판별하는 방법이다. 하지만 이 방법은 비방사상 계통에 대해 적용할 수 없고, THP의 부호는 이를 계산하기 위한 전압과 전류의 위상차에 큰 영향을 받게 되어 특히 차수가 높은 고조파에 대한 결과 값은 전압과 전류의 위상차가 크게 날 경우에 신뢰도가 떨어질 수 있다 [4]-[7].

이 밖에 전력공급자와 수용가를 노턴 등가화 모델로 구성하여 각 고조파 차수에 대해 중첩의 원리를 이용한 고조파 발생원 검출 방법도 소개되었다 [8]. 하지만 계통 운영 조건마다 각 고조파 차수에 대한 전력공급자와 수용가에 대한 노턴 등가화 모델이 필요하기 때문에 많은 계산이 요구된다. 마찬가지로 테브닌 등가 모델을 이용한 방법에서도 동일한 문제가 발생한다 [9], [10]. 이런 방법들은 모두 수용가 부하에 대한 임피던스 정보가 요구된다.

본 논문에서는 [11]에서 소개된 부하 파라미터 추정 방법을 이용하여 부하를 각 고조파 차수에 대한 전압원과 임피던스로 등가화 하여 전력공급자와 다수의 수용가 간에 고조파 발생 기여도를 평가해보고자 한다. 기존의 방법들이 고조파 발생원의 여부를 'yes' or 'no'로 판단했다면, 동 방법을 사용하면 고조파 왜곡에 기여하는 모든 참여자에 대한 기여분을 계산할 수 있기 때문에 특정 고조파 발생원을 평가하는데 보다 유연한 해석이 가능하다.

* 정 회 원 : 고려대 공대 전기전자공학과 박사과정

** 정 회 원 : 부경대 공대 전기공학부 교수

† 교신저자, 시니어회원 : 고려대 전기전자전공공학부 교수

E-mail : gjang@korea.ac.kr

접수일자 : 2011년 1월 25일

최종완료 : 2011년 8월 17일

2. 본 론

2.1 회귀최소자승법의 기본 이론 [12]

일반적인 Least squares 알고리즘의 해를

$$\hat{\theta}(t) = [X^T(t)X(t)]^{-1} X^T(t)y(t) \quad (1)$$

라 하면, 이때 $X(t) = \begin{bmatrix} x^T(1) \\ x^T(1) \\ \vdots \\ x^T(t) \end{bmatrix}$, $y(t) = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(t) \end{bmatrix}$ 이다.

(t+1) 시점에서는

$$X(t+1) = \begin{bmatrix} x^T(1) \\ x^T(1) \\ \vdots \\ x^T(t) \\ x^T(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(t) \\ x^T(t+1) \end{bmatrix},$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(t) \\ y(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(t) \\ y(t+1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

이고, 추정되는 해는

$$\hat{\theta}(t+1) = [X^T(t+1)X(t+1)]^{-1} X^T(t+1)y(t+1) \quad (3)$$

이다. 여기서 우변의 2개 term을 살펴보면

$$\begin{aligned} X^T(t+1)X(t+1) &= [X^T(t) \ x(t+1)] \begin{bmatrix} X(t) \\ x^T(t+1) \end{bmatrix} \\ &= X^T(t)X(t) + x(t+1)x^T(t+1) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X^T(t+1)y(t+1) &= [X^T(t) \ x(t+1)] \begin{bmatrix} y(t) \\ y(t+1) \end{bmatrix} \\ &= X^T(t)y(t) + x(t+1)y(t+1) \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 하지만 식 (3)을 업데이트하기 위해서는 식 (4)의 역행렬이 필요하다.

수식 전개 편의를 위해

$$P(t) = [X^T(t)X(t)]^{-1} \quad (6)$$

$$B(t) = X^T(t)y(t)$$

라 하면,

$$\hat{\theta}(t+1) = P(t+1)B(t+1) \quad (7)$$

$$\hat{\theta}(t) = P(t)B(t)$$

와 같이 표현할 수 있다.

식 (6)을 식 (4), (5)에 대입하면,

$$P^{-1}(t+1) = P^{-1}(t) + x(t+1)x^T(t+1) \quad (8)$$

$$B(t+1) = B(t) + x(t+1)y(t+1) \quad (9)$$

이다. 이때 P(t)로부터 P(t+1)을 바로 업데이트하기 위해 Matrix Inversion Lemma를 적용하면

$$\begin{aligned} P(t+1) &= P(t)[I_m - x(t+1)(1+x^T(t+1)P(t)x(t+1))^{-1} \\ &\quad \cdot x^T(t+1)P(t)] \end{aligned} \quad (10)$$

이다.

에러 변수에 대해 정의하면,

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - x^T(t+1)\hat{\theta}(t) \quad (11)$$

이다. 식 (9)에 식 (11)의 $y(t+1)$ 을 정리하여 대입하면

$$B(t+1) = B(t) + x(t+1)x^T(t+1)\hat{\theta}(t) + x(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (12)$$

이고, 식 (7)을 정리하면

$$B(t+1) = P^{-1}(t+1)\hat{\theta}(t+1) \quad (13)$$

$$B(t) = P^{-1}(t)\hat{\theta}(t)$$

이다.

식 (13)을 식(12)에 대입하여 정리하면

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)x(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (14)$$

이다.

지금까지의 과정을 정리하면 회귀최소자승법 알고리즘은 다음과 같다.

[단계1] Time step t+1에서 새로운 입력값 $x(t+1)$ 취득

[단계2] 식 (11) 계산

[단계3] 식 (10) 계산

[단계4] $\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)x(t+1)\varepsilon(t+1)$ 업데이트

[단계5] [단계1] 반복

시간에 따라 파라미터가 천천히 변하는 시스템의 경우에는 최근의 데이터가 오래된 데이터에 비해 더 큰 중요도를 가지는 것이 효율적이므로, forgetting factor $\lambda(0 < \lambda < 1)$ 를 이용하여 식 (10)을 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$P(t+1) = P(t)[\lambda^{-1} - x(t+1)(\lambda + x^T(t+1)P(t)x(t+1))^{-1} \cdot x^T(t+1)\lambda^{-1}P(t)] \quad (15)$$

2.2 고조파 발생 기여도 추정 알고리즘 구현

동 기술에 대해 [11]에서 제안한 방법은 그림 1과 같이 PCC에서 측정된 3상 전압, 전류 파형에 기반하고 있다.

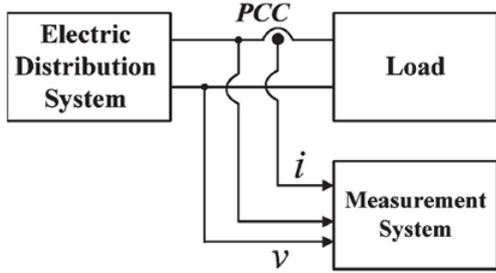


그림 1 PCC에서의 파형 측정
Fig. 1 Measurement of waveforms at the PCC

2.2.1 고조파 발생 기여도 추정 알고리즘

고조파 발생 기여도를 계산하기 위한 사전 단계로 PCC에 설치된 모니터링 장비로부터 관심 있는 고조파 차수에 대한 전압 및 전류 크기와 위상 정보를 취득하여 임의의 각주파수 ω 에 대한 전압과 전류 샘플을 각각 $V_{x,w}^i + jV_{y,w}^i$, $I_{x,w}^i + jI_{y,w}^i$ 로 표현한다. (i : sample number, ω : 각주파수) 단상의 경우 각주파수 ω 에 대한 PCC에서 전력 공급자와 단독 수용가에 대한 등가 회로는 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

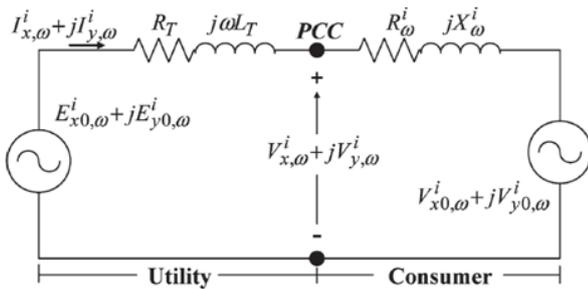


그림 2 PCC에서 전력 공급자와 단독 수용가에 대한 등가 회로
Fig. 2 Equivalent circuit of a load and an utility at the PCC

키르히호프의 전압 법칙을 적용하면 식 (16)과 같고,

$$V_{x,w}^i + jV_{y,w}^i = V_{x0,w}^i + jV_{y0,w}^i + (R_w^i + jX_w^i) \cdot (I_{x,w}^i + jI_{y,w}^i) \quad (16)$$

식 (17)은 이를 행렬식으로 표현한 것이다. ($R_1 = R_2 = R_w^i$, $-X_1 = X_2 = X_w^i$)

$$\begin{bmatrix} I_{x,w}^i & I_{y,w}^i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & X_2 \\ X_1 & R_2 \\ V_{x0,w}^i & V_{y0,w}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{x,w}^i & V_{y,w}^i \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 제약 조건인 $R_1 = R_2$, $X_1 = -X_2$ 를 만족하는 상태 변수 $R_1, X_1, R_2, X_2, V_{x0,w}^i, V_{y0,w}^i$ 를 구하기 위해 연속적인 샘플들을 고려하여 회귀최소자승법을 이용한다. 대규모 수용가의 경우 일반적으로 단독 급전선에 의해 전력을 공급받기 때문에 $R_T + j\omega L_T$ 는 근접한 변압기의 임피던스와 PCC에 연결된 급전선의 임피던스의 합으로 생각할 수 있다. 결국 각 주파수 ω 에서의 전력 공급자의 전압원은 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{x0,w}^i + jE_{y0,w}^i = V_{x,w}^i + jV_{y,w}^i + (R_T + j\omega L_T) \cdot (I_{x,w}^i + jI_{y,w}^i) \quad (18)$$

여기에 중첩(superposition)의 원리를 적용하면 각주파수 ω 에서 PCC의 전압에 대한 기여도를 식 (19), (20)와 같이 계산할 수 있다.

$$V_{Utility,w} = (E_{x0,w}^i + jE_{y0,w}^i) \cdot \frac{R_w^i + jX_w^i}{(R_w^i + jX_w^i) + (R_T + j\omega L_T)} \quad (19)$$

$$V_{Consumer,w} = (V_{x0,w}^i + jV_{y0,w}^i) \cdot \frac{R_T + j\omega L_T}{(R_w^i + jX_w^i) + (R_T + j\omega L_T)} \quad (20)$$

동일한 방법으로 3상 배전 계통에 확대 적용하면, PCC에서 측정되는 변수는 각주파수 ω 에 대한 3상 전압 ($Va_{x,w}^i + jVa_{y,w}^i$), ($Vb_{x,w}^i + jVb_{y,w}^i$), ($Vc_{x,w}^i + jVc_{y,w}^i$)과 3상 전류 ($Ia_{x,w}^i + jIa_{y,w}^i$), ($Ib_{x,w}^i + jIb_{y,w}^i$), ($Ic_{x,w}^i + jIc_{y,w}^i$)이다. 3상 전압과 전류에 대하여 대칭성분변환 (symmetrical component transformation)을 이용하면 식 (21), (22)와 같이 정상, 역상, 영상 성분으로 분해할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Vp_{x,w}^i + jVp_{y,w}^i \\ Vn_{x,w}^i + jVn_{y,w}^i \\ Vz_{x,w}^i + jVz_{y,w}^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Va_{x,w}^i + jVa_{y,w}^i \\ Vb_{x,w}^i + jVb_{y,w}^i \\ Vc_{x,w}^i + jVc_{y,w}^i \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} Ip_{x,w}^i + jIp_{y,w}^i \\ In_{x,w}^i + jIn_{y,w}^i \\ Iz_{x,w}^i + jIz_{y,w}^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Ia_{x,w}^i + jIa_{y,w}^i \\ Ib_{x,w}^i + jIb_{y,w}^i \\ Ic_{x,w}^i + jIc_{y,w}^i \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서 $a = e^{j120}$ 이다.

관심 있는 고조파 차수에 대한 전압 왜곡 기여도를 추정하는 방법은 단상 회로일 때와 동일하다. 예를 들어, PCC에서 정상 전압 고조파의 기여도를 추정하기 위해 ($Vp_{x,w}^i + jVp_{y,w}^i$), ($Ip_{x,w}^i + jIp_{y,w}^i$) 값을 이용하고, 역상, 정상 성분에 대해서도 마찬가지로 방법이 적용 된다.

그림 3과 같이 PCC에 연결된 수용가가 2개일 경우에도

동일한 방법을 적용할 수 있다.

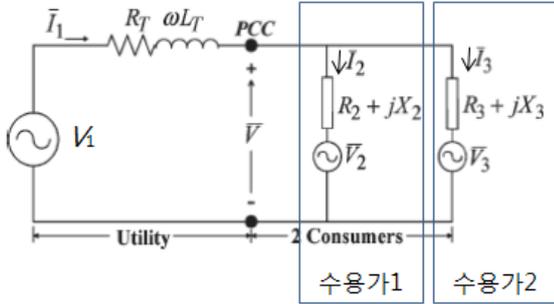


그림 3 2개의 수용가가 연결된 PCC에서의 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of 2 consumers and an utility at the PCC

2개 수용가에 대한 키르히호프의 전압 법칙을 적용하면 식 (23), (24)와 같고,

$$V_{x,w}^i + jV_{y,w}^i = V_{x2,w}^i + jV_{y2,w}^i + (R_{2,w}^i + jX_{2,w}^i) \cdot (I_{x2,w}^i + jI_{y2,w}^i) \quad (23)$$

$$V_{x,w}^i + jV_{y,w}^i = V_{x3,w}^i + jV_{y3,w}^i + (R_{3,w}^i + jX_{3,w}^i) \cdot (I_{x3,w}^i + jI_{y3,w}^i) \quad (24)$$

이를 행렬식으로 표현하면 식 (25), (26)과 같다. ($R_3 = R_4 = R_{2,w}^i$, $-X_3 = X_4 = X_{2,w}^i$, $R_5 = R_6 = R_{3,w}^i$, $-X_5 = X_6 = X_{3,w}^i$)

$$\begin{bmatrix} I_{x2,w}^i & I_{y2,w}^i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_3 & X_4 \\ X_3 & R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{x,w}^i & V_{y,w}^i \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} I_{x3,w}^i & I_{y3,w}^i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_5 & X_6 \\ X_5 & R_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{x,w}^i & V_{y,w}^i \end{bmatrix} \quad (26)$$

각주파수 ω 에서의 전력 공급자의 전압원은 식 (27)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{x0,w}^i + jE_{y0,w}^i = V_{x,w}^i + jV_{y,w}^i + (R_T + jwL_T) \cdot \{ (I_{x2,w}^i + I_{x3,w}^i) + j(I_{y2,w}^i + I_{y3,w}^i) \} \quad (27)$$

각주파수 ω 에서의 전압원측 임피던스를 ($Z_T = R_T + jwL_T$), 2개 수용가의 i번째 샘플 임피던스를 각각 ($Z_{2,w}^i = R_{2,w}^i + jX_{2,w}^i$), ($Z_{3,w}^i = R_{3,w}^i + jX_{3,w}^i$)라고 하면, PCC에서 전압 파형에 대한 고조파 기여도는 중첩(superposition)의 원리를 적용하여 식 (28), (29), (30)과 같이 계산할 수 있다.

- Utility (set $V_2 = V_3 = 0$)

$$V_{Utility,w} = (E_{x0,w}^i + jE_{y0,w}^i) \cdot \frac{\frac{Z_{2,w}^i Z_{3,w}^i}{Z_{2,w}^i + Z_{3,w}^i}}{\frac{Z_{2,w}^i Z_{3,w}^i}{Z_{2,w}^i + Z_{3,w}^i} + Z_T} \quad (28)$$

- 수용가 1 (set $V_1 = V_3 = 0$)

$$V_{Consumer1,w} = (V_{x2,w}^i + jV_{y2,w}^i) \cdot \frac{\frac{Z_T Z_{3,w}^i}{Z_T + Z_{3,w}^i}}{\frac{Z_T Z_{3,w}^i}{Z_T + Z_{3,w}^i} + Z_{2,w}^i} \quad (29)$$

- 수용가 2 (set $V_1 = V_3 = 0$)

$$V_{Consumer2,w} = (V_{x3,w}^i + jV_{y3,w}^i) \cdot \frac{\frac{Z_T Z_{2,w}^i}{Z_T + Z_{2,w}^i}}{\frac{Z_T Z_{2,w}^i}{Z_T + Z_{2,w}^i} + Z_{3,w}^i} \quad (30)$$

3상 배전계통에 대해서도 앞서 설명한 동일 방법으로 확장 적용이 가능하며, 마찬가지로 PCC에 연결된 2개 이상의 수용가에 대해서도 동일한 알고리즘으로 응용이 가능하다. 그림 4는 고조파 발생 기여도 추정 알고리즘에 대한 순서도를 보여준다.

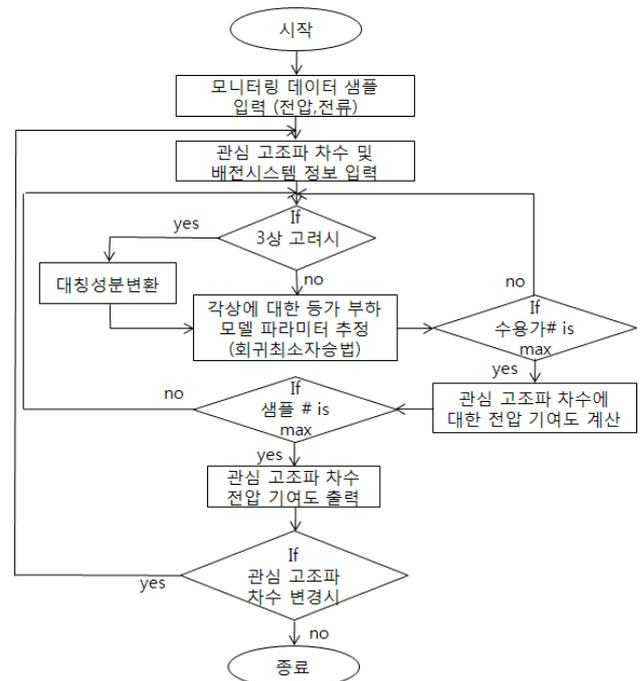


그림 4 고조파 발생 기여도 추정 알고리즘
Fig. 4 Flow chart of harmonic source estimation algorithm

2.2.1 모의 사례

본 논문에서 제안하는 고조파 기여도 추정 알고리즘은 PCC에서 측정된 전압과 전류 데이터를 기반으로 회귀최소

자승법을 이용하여 개별 고조파 차수에 대한 부하의 테브닌 등가 모델을 추정하고, 추정된 부하의 파라미터와 배전시스템의 테브닌 등가 파라미터로부터 PCC 전압 왜곡에 대한 전력공급자와 수용가들의 고조파 기여도를 계산할 수 있다.

우선 PCC에서 보이는 부하의 테브닌 등가 모델을 추정하기 위해서는 PCC에서 측정된 전압 및 전류가 제공되어야 한다. 전력공급자로부터 전력을 공급받는 다수의 수용가에 대한 기여도를 추정하기 위해 2개의 수용가를 포함하는 테스트 시스템이 그림 3과 같이 상정되었다. 선형 중첩의 원리에 의해 일반적인 회로망은 각 고조파 차수별로 구분하여 독립적으로 해석할 수 있다. 따라서, 그림 3의 테스트 시스템은 특정 n차 고조파를 표현하는 임의의 3상 회로망으로 해석할 수 있다.

그림 5의 테스트 시스템은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델로 개발되었고, 이를 이용하면 부하 모델의 운전점에 따른 PCC의 전압과 전류를 얻을 수 있다. MATLAB으로 구현된 고조파 기여도 추정 알고리즘은 시뮬레이션 모델로부터 얻어진 PCC의 전압과 전류 데이터를 기반으로 고조파 왜곡에 기여하는 모든 참여자에 대한 기여도를 추정할 수 있다.

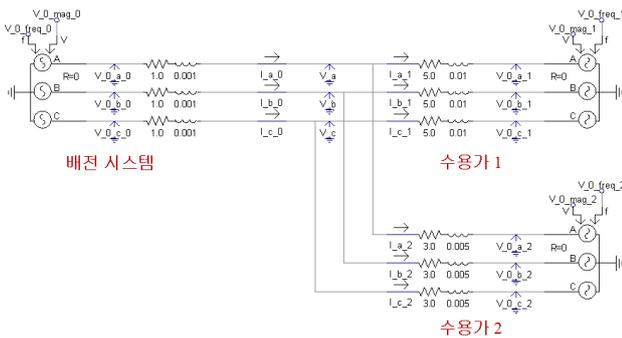


그림 5 2개의 수용가를 포함하는 테스트 시스템
 Fig. 5 Test system including two customers

그림 5의 테스트 시스템에서, 왼쪽의 전압원 및 임피던스는 PCC에서 바라본 배전시스템에 대한 전력공급자 측의 테브닌 등가 전압원 및 임피던스이고, 오른쪽 2개의 전압원 및 임피던스는 추정하고자 하는 대용량 개별 수용가 모델에 해당된다. 임의의 n차 고조파 차수에 해당하는 개별 수용가별 테브닌 등가 전압원의 운전점은 해당 수용가의 비선형 부하 등에 따라 결정되므로, 실시간으로 변하고 있는 일반적인 운전점 범위를 가정하기가 쉽지 않다. 따라서, 특정 변전소에서 수집된 정상상태의 데이터를 분석하여 얻은 정보를 바탕으로 그림 5의 테스트 시스템에서 각 수용가의 운전점이 과도하게 변경되고 있다고 가정하여 전압원 및 임피던스 값을 산정하였다. 그림 6은 테스트 시스템에서 임의의 n차 고조파 차수로 가정한 각 전압원에 대한 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과이다. 실제 부하 모델의 임피던스 성분은 변동이 없다고 가정했기 때문에 수용가의 등가 전압원 변화로 고조파 기여도가 변하도록 시뮬레이션이 구성되었다.

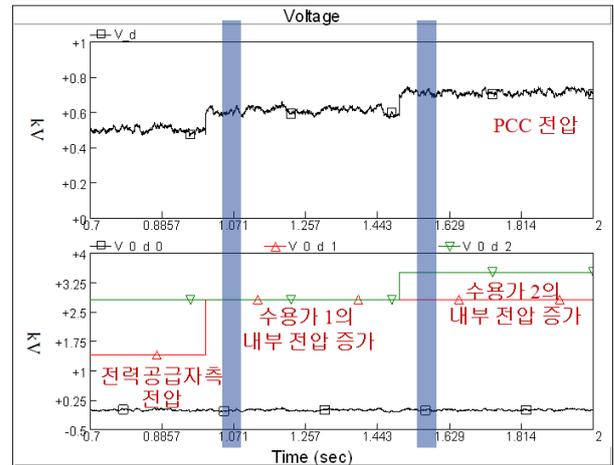
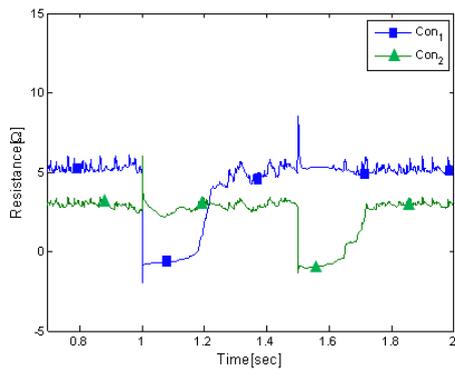


Fig. 6 Simulation results of test system
 그림 6 테스트 시스템의 시뮬레이션 결과

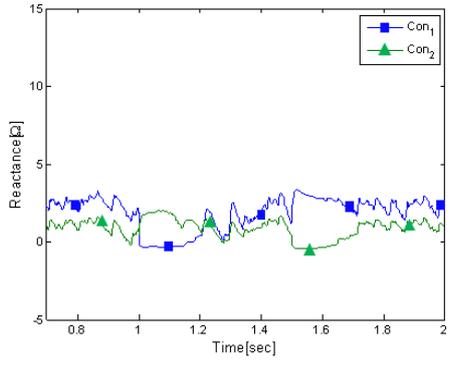
그림 6에서 위 그래프는 임의의 n차 고조파 차수에 대한 PCC에서 측정된 전압을 나타내고, 아래 그래프는 배전시스템의 전력공급자 측과 2개 수용가에 대한 등가 전압원의 단상 전압을 나타낸다. 그림 6의 PCC 전압을 모의하기 위해서 배전시스템 전력공급자 측의 전압은 일정하게 유지시키고, 1번 수용가의 전압은 1초에, 2번 수용가의 전압은 1.5초에 상승한다고 가정하였다. 배전시스템 전력공급자 측의 전압은 현실성을 반영하기 위해서 약간의 노이즈 성분을 포함하였다. PCC에서의 전압과 함께 PCC에 연결된 각 선로의 전류 데이터를 이용하여 식 (25), (26)과 같이 행렬식을 구성하고, 이로부터 개별 수용가에 대한 부하의 테브닌 등가 모델에 대한 파라미터들을 회귀최소자승법을 이용하여 그림 7과 같이 추정하였다. 그림 7(a), (b)에서는 테스트 시스템 구성시 이미 알고 있는 부하의 등가 임피던스에 대해 회귀최소자승법에 의한 부하 파라미터 추정이 잘 되고 있음을 보여주고 있다. 또한 그림 6에서 가정한 수용가별 내부 전압원 변동에 대해서도 그림 7(c), (d)에서와 같이 잘 추정되고 있다.

개별 수용가에 대한 부하의 테브닌 등가 모델 파라미터들을 추정한 다음, 배전시스템 전력공급자측 등가 전압을 PCC에서 측정된 전압과 전류 그리고 배전시스템의 임피던스로부터 식 (27)을 이용하여 계산할 수 있다. 이로부터 임의의 n차 고조파 차수에 해당하는 PCC 전압에 대한 전력공급자와 수용가들의 기여도를 계산하기 위해 각 테브닌 등가 모델에 대한 중첩의 원리를 적용하여(식 (28)~(30)) PCC에서 측정된 고조파 전압에 대한 기여도를 그림 8과 같이 계산하였다.

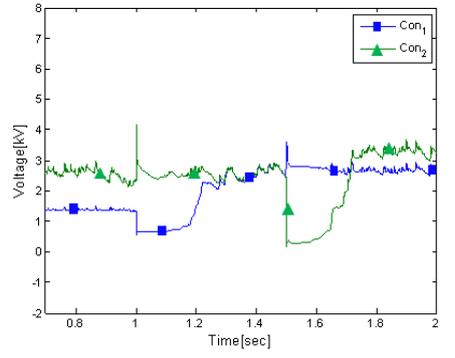
시뮬레이션상의 부하 모델 전압원 변동시점마다 부하 파라미터를 추정하는 과정도 영향을 받게 되어 실제 부하의 임피던스 성분은 변동이 없지만 그림 7(a), (b)에서와 같이 수렴값을 찾아가는 중간 과정이 필요하고, 마찬가지로 부하 파라미터의 수렴값을 찾아가는 중간값들이 수식 (28)~(30)에 반영되기 때문에 그림 8의 기여도 결과값에서도 영향을 미치고 있다.



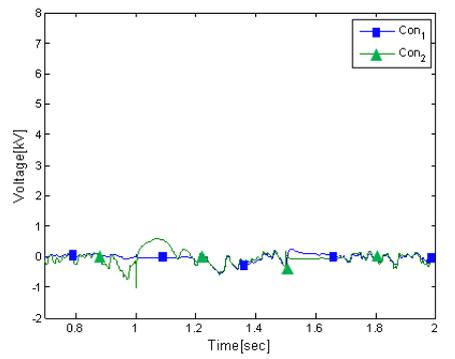
(a) 저항[옴]



(b) 리액턴스[옴]



(c) 전압의 실수 성분[V]



(d) 전압의 허수 성분[V]

그림 7 각 수용가의 부하 모델 추정 결과
Fig. 7 Estimation of each load model parameters

그림 8에서 1초부터 1.25초 사이와 1.5초부터 1.75초 사이의 구간은 수용가별 부하의 운전점이 변경됨에 따라 부하의 파라미터를 추정하는 중간 과정이므로 기여도 계산에서 제외할 수 있다.

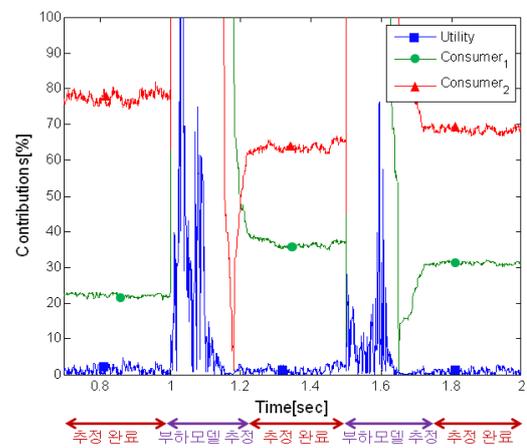


Fig. 8 Harmonic voltage contribution at PCC
그림 8 PCC 전압에 대한 기여도

3. 결 론

본 논문에서는 PCC에서의 고조파 전압 왜곡에 영향을 미칠 수 있는 전력공급자와 수용가들 간에 기여도를 추정하는 알고리즘에 대한 연구가 수행되었다. 실시간 변동하는 부하에 대한 실제 모델링이 복잡하고 적용하기 어렵기 때문에 부하 모델에 필요한 파라미터 추정 방법이 필요하고, 제안된 방법을 이용하여 전원측 임피던스 성분과 PCC 모니터링 지점에서 측정된 전압과 전류 데이터만으로 고조파 차수별 부하 모델을 추정하여 고조파 왜곡에 대한 기여도를 계산하였다. 향후 고조파 왜곡에 대한 분쟁이 일어날 경우에 책임 소재를 구분 할 수 있는 방법을 실 계통에 적용하기 위해 과도한 부하 운전점 변동을 가정한 테스트 시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 제안하는 기술을 고조파 전압 THD 기준에 적용하면, 관리 상한을 초과하는 기간에 한정하여 PCC에서의 고조파 차수별 전압 왜곡에 대한 고조파 발생원별 기여도를 추정할 수 있기 때문에 그 결과를 가지고 해당 고조파 전압 THD에 지대한 영향을 미치는 고조파 차수에 대하여 기여도가 가장 큰 고조파 발생원을 대상으로 고조파 저감 대책을 수립하는 데 활용할 수 있다. 추후에는 회귀최소자승법 알고리즘의 파라미터 추정 성능을 향상시키기 위한 연구가 추가로 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] W.A. Omran, H. S. K. El-Goharey, M. Kazeraii, and M. M. A. Salama, "Identification and measurement of harmonic pollution for radial and nonradial systems," IEEE Trans. on Power Del., vol. 24, no. 3, pp.1642-1650, Jul. 2009.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] CIGRE 36.05/CIREDD 2 Joint Working Group CC02 (Voltage Quality), "Review of methods for measurement and evaluation of harmonic emission level from an individual distorting load," Jan. 1999.
- [5] T. A. George and D. Bones, "Harmonic power flow determination using the fast fourier transform," IEEE Trans. on Power Del., vol. 6, no. 2, pp.530-535, Apr. 1991.
- [6] L. Cristaldi and A. Ferrero, "A method and related digital instrument for the measurement of the electric power quality," IEEE Trans. on Power Del., vol. 10, no. 3, pp.1183-1189, Jul. 1995
- [7] K. Srinivasan, "On separating customer and supply side harmonic contributions," IEEE Trans. on Power Del., vol. 11, no. 2, pp.1003-1012, Apr. 1996.
- [8] W. Xu and Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," IEEE Trans. on Power Del., vol. 15, no. 2, pp.804-811, Apr. 2000.
- [9] C. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu, and T. Tavjanasant, "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.
- [10] 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.
- [11] G. V. de Andrade, Jr., S. R. Naidu, M. G. G. Neri, and E. G. da Costa, "Estimation of the utility's and customer's contribution to harmonic distortion," IEEE Trans. on Instrumentation and measurement, vol. 58, no. 11, pp.3817-3823, Nov. 2009.
- [12] P.E. Wellstead and M.B. Zarrp, Self-tuning systems. control and signal processing, Wiley, ISBN 0471928836.

저 자 소 개

**한 종 훈 (韓宗勳)**

1978년 1월 30일생. 2003년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2003~2007년 삼성전자 네트워크사업부 근무. 2007년~현재 동 대학원 전자전기공학과 석박사 통합과정.

Tel : 02-3290-3675

Fax : 02-3290-3692

E-mail : hanpro_@korea.ac.kr

**이 계 병 (李桂秉)**

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과(석사). 2008~현재 고려대학교 대학원 전자전기공학과 박사과정.

Tel : 02-3290-3675

Fax : 02-3290-3692

E-mail : kyebyung@korea.ac.kr

**박 창 현 (朴昶炫)**

1974년 12월 25일생. 2001년 인하대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2007년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2008년~현재 부경대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 051-629-6322

Fax : 051-629-6305

E-mail : spch@pknu.ac.kr

**장 길 수 (張吉洙)**

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 美 Iowa 주립대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박). 2000년~현재 고려대 전기전자전파공학과 교수

Tel : 02-3290-3246

Fax : 02-3290-3692

E-mail : gjang@korea.ac.kr