

배전계통의 고조파 분포 계산 프로그램

○김성수* 강용철* 남순열* 박종근* 명성호** 강영석*** 최효열***
 * 서울대학교 전기공학부 ** 한국전기연구소 *** 한국전력공사 전력연구원

A Program for Calculation of Harmonic Distribution in Distribution Systems

Sung-soo Kim* Yong-cheol Kang* Soon-ryul Nam* Jong-keun Park*
 Sung-ho Myoung** Young-seok Kang*** Hyo-yeol Choi***

* Seoul National University

** Korea Electrotechnology Research Institute

*** Korea Electric Power Research Institute

Abstract

This paper presents an algorithm for calculation of harmonic distribution in distribution systems. In distribution systems, most state variables are not given explicitly. To calculate the harmonic distribution in distribution systems, state estimation is necessary. In this paper, power usage and harmonic current injection is estimated for each node from practically available data. The estimating procedure is illustrated by examples.

1. 서론

사용이 날로 증가하는 사무용 자동화기기, 인버터 등과 같은 비선형 부하로부터 발생하는 고조파에 의한 전력계통의 사고 및 장애 가능성이 점점 늘어나고 있다. 고조파에 의한 장애 문제에 대처하기 위하여 전력계통에서 고조파 계산 알고리즘에 대한 많은 연구가 있었다.[1~3] 이들 대부분의 연구는 고조파 발생원 및 배전계통에 대한 정보 - 배전선의 임피던스, 각 모선의 부하 - 는 정확히 알 수 있다고 가정하고, 고조파 발생원으로부터 다른 모선으로의 전파 특성을 계산하는 것이다.

그런데, 배전계통의 구성이 지역적에 따라 다르고, 각 모선에 연결되어 있는 부하의 업종별 비율도 다르다. 일반적으로 여기에 대한 상세한 자료와 실제 계산하고자 하는 시점에서 각 기기가 어떻게 사용되고 있는지에 대한 데이터가 주어지지 않는다. 고조파 발생원은 산업용 인버터 등과 같이 대용량의 기기로 고조파 발생기기의 사용 위치, 용량, 운전 패턴, 기기에 대한 자세한 모델 등의 정확한 정보를 알 수 있는 것과, 컴퓨터, 에어컨 등과 같이 사용 위치, 사용 패턴 등의 정보를 정확히 알 수 없는 것이 있다.

본 논문에서는 컴퓨터, 에어컨 등과 같이 정확한 데이터가 없는 고조파 발생원에 의하여 발생한 고조파의 분포를 이들 기기가 연결된 배전계통에서 추정하는 방법을 제시하고자 한다. 배전계통의 고조파 분포를 계산하기 위해서는 각 모선별 고조파 발생기기의 분포, 각 모선의 부하 등과 같은 현재 계통 상태에 대한 정확한 추정이 필요하다. 이를 위하여 실질적으로 구할 수 있는 데이터를 사용하여 업종별 분포를 가정하고 이로부터 계산 대상의 배전선에 관한 부하 상태 및 고조파 발생원의 분포를 추정한다. 추정된 데이터로부터 기본파회로에 대한 조류계산을 실시하고, 그 결과에서 각 모선의 위상차를 구한 다음, 각 모선에서 유입된 고조파 전류의 벡터 합을 사용하여 고조파 분포를 계산할 수 있다.

2. 고조파 분포 계산

본 프로그램에서는 배전선을 대상으로 하기 때문에 일반적으로 정확한 입력 데이터의 취득이 어렵다. 따라서 고조파 발생원의 분포를 보급율 등을 고려하여 결정하게 된다.

고조파 분포의 계산과정은 크게 모선 별 부하 추정, 기본파 조류계산,

고조파 전류원 계산, 고조파 분포 계산 4 단계로 구성된다. 이외에 각각의 계산에 필요한 데이터를 준비하기 위한 전처리 과정과 출력부분이 추가된다. 그림 1.은 고조파 계산 프로그램의 전체적인 흐름도를 표시한 것이다. 그림 1.에 나타나 있는 것처럼 계산을 수행하고 결과를 검토한 후 필요한 데이터를 수정하여 계산을 반복하게 된다.

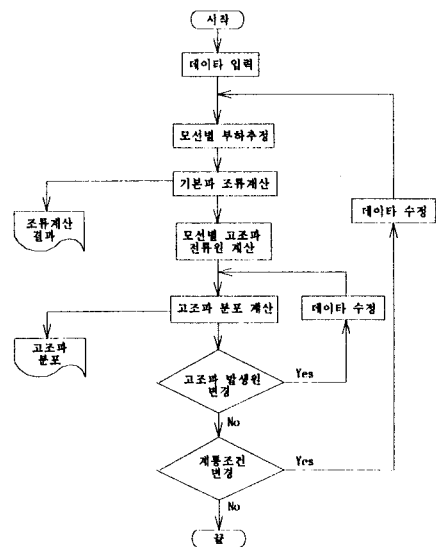


그림 1. 고조파 계산 흐름도

2.1 모선별 부하 추정

고조파 계산 프로그램의 첫 단계인 조류계산을 하려면 각 모선의 부하를 알아야 한다. 그러나 배전계통에서는 일반적으로 각 모선의 부하를 정확히 알 수 없기 때문에 취득 가능한 데이터로부터 각 모선별 부하를 추정해야 한다. 각 모선별 부하를 추정하는 방법을 설명하면 다음과 같다.

먼저 고조파 계산을 필요로 하는 배전선(D/L)을 선정하고 이 배전선의 회선별 단선도로부터 다음과 같은 데이터를 얻을 수 있다. 또한 배전선을 관리하는 배전사업소로부터 구간별 업종 구성비를 얻을 수 있을 것이다.

- 선로 연결 상태
- 구간별 선종, 길이 → 선로 임피던스
- 구간별 고압 수용가 계약 용량, Ptr 용량 합계 → 부하 합계 용량
- 구간별 업종 구성비

그림 2는 회선별 단선도로부터 선로연결 상태와 구간별 부하 합계 용량을 구하여 나타낸 것이다.

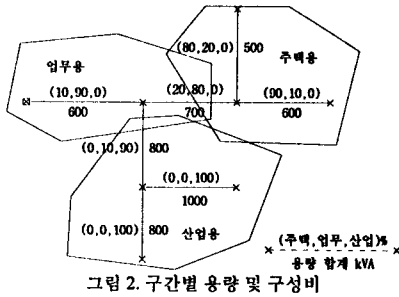


그림 2. 구간별 용량 및 구성비

그림 2의 구성비로부터 업종별 부하 용량을 산출하면 그림 3과 같이 된다. 그리고 업종별 부하곡선으로부터 정해진 계산 시간의 업종별 부하를 추정할 수 있다. 추정한 업종별 부하를 합하면 각 모선의 부하를 얻을 수 있다. 예를 들어 평일의 업종별 부하곡선이 그림 4와 같다고 가정하면 15시의 업종별 부하는 그림 5와 같이 된다.

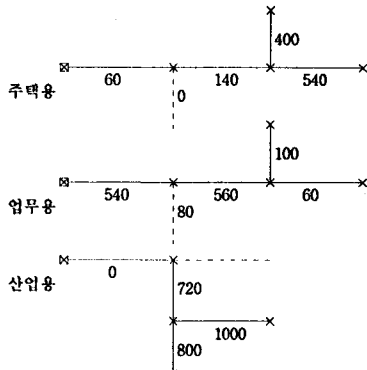


그림 3. 업종별 부하 용량

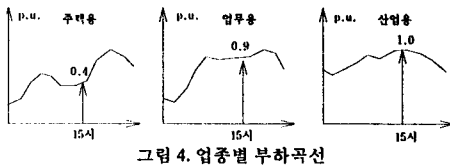


그림 4. 업종별 부하곡선

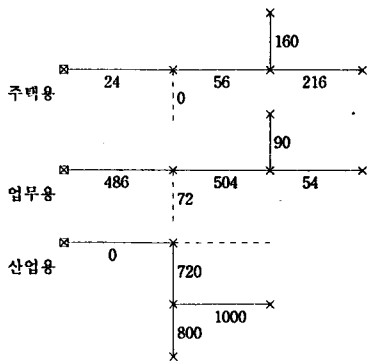


그림 5. 평일 15시의 업종별 부하 구성

그림 5의 업종별 부하를 합하면 업종별 구성비와 사용시간대를 고려

한 구간별 부하 용량을 얻을 수 있다. 그러나 이 값에는 각 업종별 피크 시에는 설비용량이 모두 가동된다고 가정된 것이 되므로 각 설비의 수용율을 고려해야 한다. 그러나 이에 대한 데이터가 주어지지 않으므로 업종별로 같은 수용율을 갖는다고 가정하여, 변전소 인출전력의 인출전력을 고려하면 주어진 시간대의 구간별 부하를 추정할 수 있다. 그림 6은 인출전력이 2091[kW] 이고 손실이 없다고 가정할 경우 구간별 부하를 추정된 값을 나타낸 것이다.

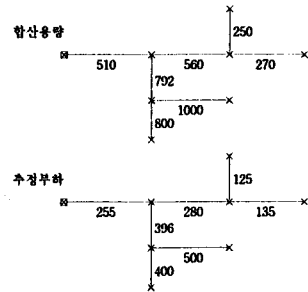


그림 6. 추정된 부하 (인출전력 = 2091)

2.2 기본파 조류계산

회선별 단선도로부터 계통도와 각 선로구간의 임피던스를 구하고, 각 구간별 부하가 추정되면 기본파회로의 조류계산을 하게 된다. 조류계산을 하는 기본 목적은 모선별 고조파 전류원의 위상차를 구하기 위하여 모선별 전압의 위상각을 구하는데 있다.

배전계통에서는 X/R 비율이 커서 송전계통에서 사용하는 조류계산 알고리즘을 적용할 경우 수렴이 보장되지 않는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복할 수 있도록 수치상 계통의 특성을 활용하여 수렴 특성이 매우 양호하고 효율적인 알고리즘을 사용하였다[4]. 이 알고리즘에서는 배전계통이 수치상 계통이라는 점을 고려하여 변전소 모선으로부터 인접 모선간의 전압, 전류의 관계식으로부터 변전소 인출단에서 주어지는 유효, 무효 전력과 전압 크기로부터 말단 모선까지의 유효, 무효 전력과 전압을 순차적으로 구하게 된다.

2.3 모선별 고조파 발생량

모선별 고조파 발생량을 계산방법은 크게 일반부하와 대용량 기기 두 가지로 나눌 수 있다. 일반부하는 고조파 발생원 중 직접적으로 알 수 없는 대부분 수용량의 고조파 발생기기를 모의하는 것으로 업종별 고조파 발생기기를 조사하여 이로부터 근사적으로 고조파 발생량을 추정한다. 대용량기기는 다량의 고조파를 발생하는 기기를 말하며 고조파 발생에 관한 상세한 데이터를 직접 얻을 수 있으므로 별도의 자세한 계산을 통하여 고조파 발생량을 결정하게 된다. 일반부하의 고조파 발생량을 추정하는 방식을 설명하면 다음과 같다.

일반부하의 고조파 발생량은 업종별로 고조파 전류원의 크기와 위상을 각 모선별로 구한 다음 이들의 벡터 합을 취하게 된다. 예를 들어 주택용 부분의 고조파 발생량은 다음과 같이 구할 수 있다. 주택용 기기 중 고조파를 발생하는 기기를 TV, 전자렌지, 에어컨이라 가정하고 이들의 용량, 보급율, 고조파 발생량(각조파 전류 크기의 기본파 전류에 대한 비율), 평일 15시의 수용율이 다음과 같다고 가정하자.

| | TV | 전자렌지 | 에어컨 | 기타 |
|------------|-----|------|-----|-----|
| 용량[W] | 50 | 100 | 300 | 500 |
| 보급율[%] | 100 | 50 | 20 | 40 |
| 수용율[%] | 10 | 20 | 50 | 50 |
| 5조파 전류 [%] | 10 | 3 | 4 | 1.5 |

위의 표로부터 주어진 시간대의 주택용 표준 수용가의 경우 각 기기별로 실제 사용 용량은 다음과 같이 추정할 수 있다.

기기별 사용 용량 = 기기의 용량 * 보급율 * 수용율
 또한 5고조파의 전류비는 전체 사용용량에서 해당 기기가 차지하는

용량 비율만큼 기본과 전류가 해당기기로 흐르기 때문에 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\text{제 5고조파 전류비} = \text{기기별 발생량비} \cdot \text{사용량} / \text{전체 사용용량}$$

| | TV | 전자렌지 | 에어컨 | 기타 | 합계 |
|-----------|------|------|-----|-----|------|
| 사용량 [W] | 5 | 15 | 30 | 100 | 150 |
| 5조파 전류[%] | 0.33 | 0.3 | 0.8 | 1 | 2.43 |

한편 표준 수용가에서 사용하는 각 기기가 수용가가 여럿 있을 경우 동시에 사용되지는 않는다. 그리고 같은 선로구간이라 하더라도 각 기기에서 발생하는 고조파의 위상차 등으로 인하여 실제 계통으로 유출되는 고조파 전류는 위에서 구한 값보다 작을 것이다. 따라서 이러한 차이를 보정하는 중첩계수를 도입하고 이 값을 대략 0.5 정도라 가정하면 주택용 수용가에서 발생하는 고조파 전류의 비율은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\text{구간별 5조파 전류 비율} = \text{구간별 주택용 부하구성비}(\%) \cdot \text{5조파 전류}(2.43\%) \cdot \text{중첩계수}(0.5)$$

구간별 주택용 부하의 비율은 그림 5.와 그림 6.으로부터 구할 수 있으므로 주택용 수용가에 의한 구간별 제 5조파 전류의 비율을 나타내면 그림 7.과 같다.

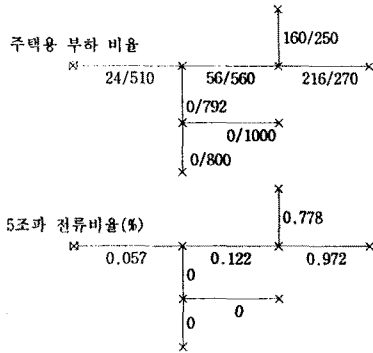


그림7. 구간별 5고조파 전류 크기의 비율

따라서 각 구간별로 주택용 수용가에 의한 5조파 전류는 조류계산에서 얻어진 기본과 전류 벡터에 그림 7.의 비율을 곱하여 얻을 수 있다. 마찬가지로 업무용 및 산업용부하에 의한 제 5고조파 전류를 구할 수 있으므로 이들을 합하면 각 구간별 5고조파의 전류를 구할 수 있다. 다른 차수의 고조파도 같은 방법으로 모두 구할 수 있다.

2.4 고조파 분포 계산

앞에서 구한 각 구간별, 차수별로 고조파 전류원의 값과 선로 임피던스 및 전원 임피던스로부터 키르히호프 법칙을 적용하면 고조파 전압의 분포를 얻을 수 있다. 개통도와 선로임피던스를 사용하여 고조파 차수별로 어드미턴스 행렬을 구하고, 고조파 전류원·데이터로부터 다음 연립방정식을 풀면 각 구간별 고조파 전압을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1^h \\ I_2^h \\ \vdots \\ I_n^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^h & Y_{12}^h & \dots & Y_{1n}^h \\ Y_{21}^h & Y_{22}^h & \dots & Y_{2n}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1}^h & Y_{n2}^h & \dots & Y_{nn}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^h \\ V_2^h \\ \vdots \\ V_n^h \end{bmatrix}$$

여기서, h는 고조파 차수이고, n은 모선수이다.

각 구간에서 전압해형용(V_i^{mod})을 구하기 위해서는 다음과 같이 기본과 전압의 크기와 고조파 전압의 벡터 합과의 비를 취하면 된다.

$$V_i^{mod} = \frac{\sqrt{(V_i^1)^2 + (V_i^3)^2 + (V_i^5)^2 + \dots}}{|V_i^1|}$$

3. 결론

본 논문에서는 사무자동화 기기와 같이 용량, 분포, 운전패턴 등의 데이터가 구하기 어려운 기기에 의하여 발생한 고조파의 분포를 배전계통에서 계산하는 방식을 제안하였다. 고조파 분포 계산에 필요한 입력자료는 실제적으로 구할 수 없기 때문에 취득 가능한 데이터로부터 추정하는 방법을 제안하였다. 각 모선에서 부하와 고조파 발생량을 추정하기 위하여 주택용, 업무용, 산업용 각 업종별로 동일한 패턴으로 기기를 사용한다고 가정하였다. 추정에 필요한 데이터와 추정방법을 간단한 예를 통하여 보였다.

4. 참고문헌

- [1] M. McGranaghan, et al, "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 12, pp. 3663-3671, Mar./Apr. 1984
- [2] T.H.Chen, M.S.Chen, K.J.Hwang, P.Kotas, E.A.Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 6, No. 3, pp. 1146-1152, July 1991
- [3] S.M.Williams, G.T.Brownfield, J.W.Duffus, "Harmonic Propagation on an Electric Distribution System : Field Measurement Compared with Computer Simulation", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 2, pp.547-552, April 1993
- [4] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 735-743, 1989