

배전시스템의 전기부하구성비 2단계 분석법을 통한 왜곡전력품질지수 연구

손서은*, 조시훈**, 박정욱*
연세대학교*, 국방과학연구소**

A Study on Distortion Power Quality Index Based on 2-Level Analysis Applied to Electric Load Composition

SeoEun Son*, Si-Hun Jo**, Jung-Wook Park*
Yonsei University*, Agency for Defence Development**

Abstract - 본 논문은 배전시스템 내의 공통 접속점에 연결된 부하를 2단계로 분석하여 추정된 부하의 구성비를 왜곡전력 품질지수에 적용하는 방안에 관한 연구이다. 제안된 2단계 분석법은 기존의 배전시스템 내 전기부하의 구성비를 한꺼번에 추정하는 방법과 달리, 부하의 전류 파형을 고려해 전기부하를 분류하여 각 단계별로 부하구성비를 갈만 필터를 이용하여 추정한다. 제안된 부하구성비 추정법의 유효성은 분산전원이 포함된 모의 배전시스템을 구성하여 검증한다. 또한, 모의 배전시스템 내에서 추정된 부하구성비를 왜곡전력 품질지수에 적용하여 부하들의 전력품질을 진단한다.

1. 서 론

최근 에너지 절약을 위한 노력이 힘입어, 비선형 부하의 특성을 가지는 고효율 전기기기의 사용이 늘고 신재생 에너지에 기반 한 분산전원이 전력 계통에 늘어나는 추세이다. 따라서, 송·배전 계통에서 전력전자소자 기반의 장치들이 증가하였는데, 이러한 장치들은 계통 내에서 고조파를 증가시켜 전류와 전압 파형을 왜곡시키는데 이는 계통의 신뢰도와 안정도 및 전력품질 저하 문제 측면에서 중요한 부분을 차지한다. 이러한 파형 왜곡으로 인한 문제들을 제제하기 위해 IEEE 519[1] 규정에서는 각 송·배전단의 공통접속점의 전압 전고조파왜곡률을 5% 이내로 제한하고 있으며, 최근 전력품질의 정도를 나타내는 지수나 측정하는 방법들에 대한 연구가 진행되고 있다.

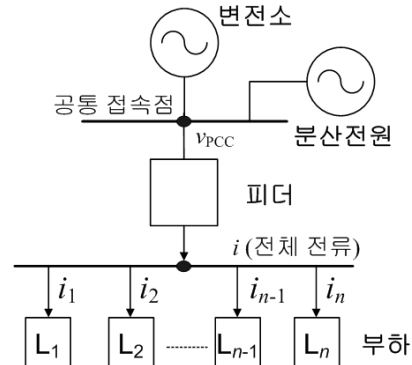
특히, 왜곡전력품질지수는 배전시스템의 각 부하가 전력품질 저하에 얼마나 영향을 미치는지 알 수 있는 척도로서, 비선형 부하에 의한 왜곡전력과 직접적인 관계를 가진다. 이는 전기부하구성비와 측정된 전압, 전류의 전고조파왜곡률(THD)의 조합에 의해 구성된다. 기존의 전기부하구성비 예측법은 다변수 다항식모델(RMP)를 이용하여 배전시스템의 공통접속점에 연결된 모든 부하의 전기부하구성비를 한 번에 구하였다[3]. 하지만 공통 접속점에 연결된 부하수가 증가할 경우 배전시스템이 복잡해져 기존의 예측법은 RMP 모델의 one-shot학습 특성 때문에 부하구성비가 최적해가 아닌 지역해로 추정 될 수 있다. 부정확하게 추정된 전기부하구성비로 계산된 왜곡전력품질지수는 배전시스템에서 각 부하가 전력품질을 악화시키는 정도를 정확히 파악할 수 없다는 문제를 야기한다.

이러한 문제를 해결하고 배전시스템의 어떠한 조건에서 정확한 왜곡전력품질지수를 측정하기 위하여 본 논문에서는 배전시스템의 공통접속점에 연결된 전기부하들을 두 그룹으로 나누어 각 전기부하 그룹마다 전기부하 구성비를 예측하는 2단계 분석법을 이용하여 배전시스템에서의 전기부하 구성비를 추정한다. 또한 RMP의 단점을 보완하기 위해서, 전기부하구성비를 추정 할 때 갈만 필터 알고리즘을 이용한다. 본 논문에서 제안된 전기부하구성비 2단계 분석법을 통한 왜곡전력품질지수의 효율성 및 유효성은 3kW 계통 연계형 단상 태양광 인버터와 전형적인 부하들로 구성된 실험을 통해 얻은 파형에 적용되어 검증된다.

2. 왜곡전력 품질지수와 전기부하 구성비 추정방법

2.1 왜곡전력 품질지수

분산전원을 포함한 배전시스템의 기본적인 모델은 <그림 1>과 같이 제시될 수 있다. 그림 1의 배전시스템의 비선형 부하들은 전류 파형을 왜곡시키고, 고조파 성분을 포함한 전체 전류는 피더의 임피던스에 의해 전압 강하를 야기한다. 또한 IEEE 519 규정[1]에 따라, 계통에 연결된 분산전원은 공통접속점의 전압을 5% 이내의 THD로 왜곡 시킨다. 이러한 왜곡된 전압과 전류 파형에 의해 왜곡 전력이 발생한다. 따라서 각 비선형 부하에 의해 발생하는 왜곡전력은 전력 품질 저하를 판단할 수 있는 측정 기준이 된다.



<그림 1> 분산전원을 포함한 배전시스템의 기본 모델

<그림 1>의 n 번째 비선형 부하의 왜곡전력 $D(n)$ 은 공통 접속점의 전압과 각 부하 전류의 THD를 이용하여 (1)와 같이 표현될 수 있다. 이에 대한 상세한 과정은 [2]에서 확인할 수 있다.

$$D(n) \approx V_{1,PCC} \cdot I_1(n) \sqrt{\text{THD}(v_{PCC})^2 + \text{THD}(i_n)^2} \quad (1)$$

(2)에서 $V_{PCC,1}$ 와 $I_1(n)$ 은 각각 공통접속점에서의 전압의 기본주파수 성분이 각 부하전류 i_n 의 기본 주파수 성분을 의미한다. (2)를 바탕으로 각 부하의 왜곡전력 품질지수는 (2)과 같이 표현될 수 있다[2].

$$\text{왜곡전력품질지수}(n) = L_n \cdot \sqrt{\text{THD}(v_{PCC})^2 + \text{THD}(i_n)^2} \quad (2)$$

(2)에서 L_n 은 n 번째 부하의 전기부하구성비를 나타낸다.

2.1.1 2단계 분석법을 통한 전기부하구성비 추정

전기 부하구성비는 배전시스템의 총 전류와 각 부하에 흐르는 전류인 i_1, i_2, \dots, i_n 와의 관계를 통해 구할 수 있다[3]. (3)은 그 관계를 보여주는 데, 모든 전류는 기본 주파수 성분의 값이 1인 정규화된 형태(위상차 $norm$)를 갖는다.

$$i^{norm}(t) = k_1 i_1^{norm}(t) + k_2 i_2^{norm}(t) + \dots + k_n i_n^{norm}(t) \quad (3)$$

(4)의 미지수 k_1, k_2, \dots, k_n 는 총 전류에 대한 각 부하의 전기부하구성비를 뜻한다. 이러한 전기부하구성비는 서로 다른 부하들이 배전 시스템에 미치는 영향을 알 수 있는 효과적인 척도가 될 수 있다.

기존의 전기부하구성비를 추정하는 방법[3]은 배전시스템이 복잡해지거나 두 개 이상의 전기부하가 비슷한 파형이 있는 경우, 전류 파형의 표준 추출 비율이 낮은 경우 정확성이 떨어진다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 공통접속점에 연결된 부하를 2단계로 계층화하여 전기부하구성비를 분석하는 2단계 분석법이 제안될 수 있다.

<그림 2>는 전기 부하 구성비 2단계 분석법을 적용하기 위한 8개의 부하를 포함한 배전시스템의 단일 선로를 보여준다. (3)과 같은 방법으로 각 단계의 전류에 관한 식은 (4)와 (5)로 표현된다. k_{G11} 와 k_{G12} 는 전체전류에 대한 각 그룹의 구성 비율이다. 또한 $[k_1 k_2 k_3 k_4]$ 와 $[k_5 k_6 k_7 k_8]$ 은 각 그룹11과 그룹 12에 대한 구성 비율이다. 이를 이용하여 최종적인 배전시스템의 전기부하구성비(L)는 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$i^{norm}(t) = k_{G11} i_{G11}^{norm}(t) + k_{G12} i_{G12}^{norm}(t) \quad (4)$$

$$i_{G11}^{norm}(t) = k_1 i_1^{norm}(t) + k_2 i_2^{norm}(t) + k_3 i_3^{norm}(t) + k_4 i_4^{norm}(t) \quad (5)$$

$$i_{G12}^{norm}(t) = k_5 i_5^{norm}(t) + k_6 i_6^{norm}(t) + k_7 i_7^{norm}(t) + k_8 i_8^{norm}(t)$$

$$L = \begin{bmatrix} k_1 & k_3 & k_5 & k_7 \\ k_2 & k_4 & k_6 & k_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{G11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{G11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{G12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{G12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

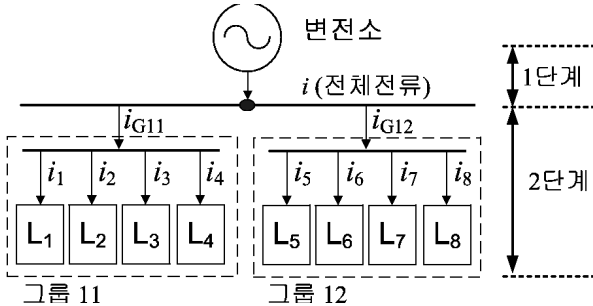


그림 11 <그림 2> 2단계 분석법이 적용된 배전시스템의 단일 선로

2.2 하드웨어 검증

전기부하구성비 2단계 분석법을 통한 왜곡전력품질지수의 효용성을 검증하기 위하여, 3kW 계통 연계형 단상 태양광 인버터와 전형적인 8개의 부하로 구성된 하드웨어 프로토타입을 <그림 3>과 같이 구성하였다. 8개의 비선형 부하는 에어컨, 형광등, LCD 모니터, 전자레인지, 유도전동기, 전열기, 냉장고, 컴퓨터로 구성되고, 각각 *a, f, l, o, m, h, r, c*로 명칭된다.

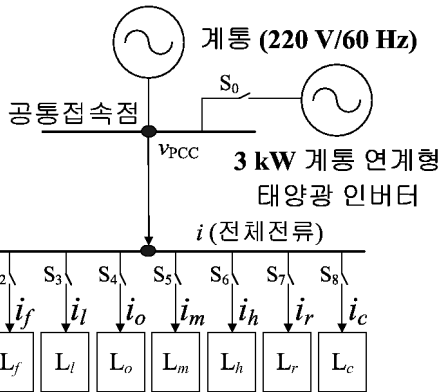


그림 3 <그림 3> 2단계 분석법이 적용된 배전시스템의 단일 선로

<그림 4>는 측정된 부하 전류의 정규화된 파형이다. <그림 4>에서 보듯이 모두 고조파 성분을 포함하고 있고, 에어컨과 전열기의 파형이, LCD 모니터와 컴퓨터의 파형이 비슷한 것을 확인할 수 있다. 그리하여 부하를 두 그룹으로 나눌 때 위의 부하들을 다른 그룹에 배치하여, 그룹 11은 에어컨, 형광등, LCD모니터, 전자레인지로 구성하고 나머지 부하는 그룹 12에 배치하였다.

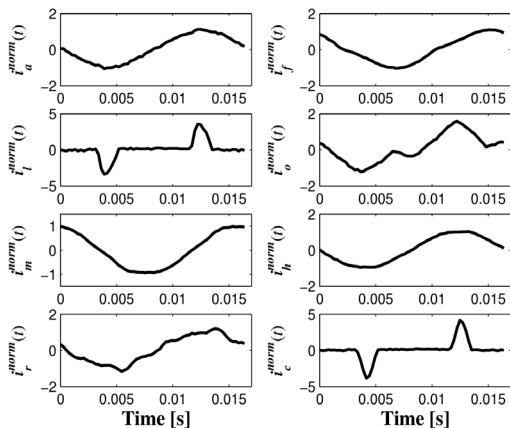


그림 3 부하들의 정규화된 파형

2.2.1 왜곡전력품질지수 계산

이와 같이 부하를 두 그룹으로 나누어 2단계 분석을 수행한 결과, 전기 부하구성비는 <표 1>의 결과와 같이 추정되었다. <표 1>에서는 2단계 분석법의 결과를 기존의 단일 단계로 추정되는 방법과 이론적으로 구한 전기부하구성비와 비교하였다.

표 1 <표 1> 전기부하구성비 추정결과 비교

부하	에어컨	형광등	LCR 모니터	전자레인지
이론값	0.0230	0.0474	0.0088	0.2389
1단계 분석법	0.0486	0.0766	0.0269	0.2036
2단계 분석법	0.0231	0.0475	0.0088	0.2394
부하	유도전동기	전열기	냉장고	컴퓨터
이론값	0.0952	0.5396	0.0283	0.0187
1단계 분석법	0.0768	0.5018	0.0380	0.0215
2단계 분석법	0.0952	0.5391	0.0282	0.0187

<표 1>에서 보면 2단계 분석법으로 추정된 전기부하구성비가 기존의 추정방식보다 이론값에 가까운 결과를 도출하는 것을 확인할 수 있다. 그리하여, 2단계 분석법으로 추정된 전기부하구성비를 바탕으로 좀 더 정확한 왜곡전력품질지수를 계산할 수 있을 것이다. 이 결과는 <표 2>에서 왜곡전력의 크기와 비교하여 전기부하 구성비 2단계 분석법을 통한 왜곡전력품질지수의 신뢰성을 검증하였다.

표 2 <표 2> 왜곡전력품질지수 계산 결과

부하	에어컨	형광등	LCR 모니터	전자레인지
왜곡전력	9.1150	24.3580	55.7783	439.5869
1단계 분석법	0.3411	0.6606	0.6607	9.4658
2단계 분석법	0.1619	0.4957	1.1738	9.2550
부하	유도전동기	전열기	냉장고	컴퓨터
왜곡전력	28.5852	81.6522	20.0795	127.40009
1단계 분석법	0.4031	2.3008	0.5740	3.0775
2단계 분석법	0.4995	2.4720	0.4272	2.6773

<표 2>에서 볼 수 있듯이 2단계 분석법을 이용한 각 부하의 왜곡전력품질지수 값의 크기순서는 왜곡전력의 크기순서와 같다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 기존의 방법에서는 냉장고, 형광등, 유도전동기의 왜곡전력 크기순서가 왜곡전력의 크기순서와 다르다. 이는, 기존의 방법이 왜곡전력 값이 비슷한 부하의 경우 왜곡전력품질지수를 정확히 계산하지 못한다는 것을 확인할 수 있었다. 그리하여, 전기부하구성비 2단계 분석법을 통한 왜곡전력품질지수로부터 왜곡전력의 측정 없이 각 부하가 전력품질 저하에 미치는 영향을 분석할 수 있다는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 전기부하구성비 2단계 분석법을 통한 왜곡전력품질지수 연구를 수행하였다. 제안된 2단계 분석법을 전기부하구성비를 정확하게 추정할 수 있고 이를 바탕으로 왜곡전력품질지수를 정확하게 계산하여 배전시스템에서 각 비선형 부하가 전력품질저하에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 제안된 방법은 8개의 비선형 부하와 인버터 기반의 분산전원으로 소규모 배전시스템을 구성하여 그 효용성을 검증하였다.

[감사의 글]

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0003398)

[참고 문헌]

- [1] IEEE Standard for IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519-1992, June 1992.
- [2] Si-Hun Jo, "A Study on New Power Quality Index in a Distribution Power System", 연세대학교 일반대학원, 석사학위논문, 2011년 2월
- [3] Soon Lee and Jung-Wook Park, "A Reduced Multivariate Polynomial Model for Estimation of Electric Load Composition," IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 44, NO. 5, pp. 1333-1340, September 2008.