

전기부하구성 예측 및 새로운 전력품질 지수

■ 이 순 / 현대중공업 중앙연구소 연구원

■ 박 정 옥 / 연세대 교수

1. 서 론

수용가 측에서의 조명, 전동기, 컴퓨터와 같은 여러가지 비선형 전기부하들은 그 시스템에 정현파 전압을 공급할 때 전류를 왜곡할 수 있다는 특징을 가진다. 그러므로 그 시스템의 서비스 입력단에서의 전류와 전압 파형의 측정을 통하여 전체 시스템에 대한 각 부하의 구성 비율을 예측하는 것이 필요하다. 이 정보는 시스템을 설계하는데 유용하다. 예를 들어, 만약 시스템 확대를 계획하거나 부하의 변경이 발생하면, 이 정보는 전체 시스템에서 전류 파형을 설계하거나, 이 파형의 전체 고조파 왜곡(THD)에 미치는 영향을 분석하는데 사용될 수 있다. [1]과 [2]에서 보고된 IEEE 표준은 증가하는 설비시설을 가진 전력전자 시스템에 분배된 자원을 서로 연결할 때 THD를 위한 최대 허용 가능한 값을 정의하고 있다. 특히, 전력전자 기기의 증가된 설비는 전압이나 전류 파형의 왜곡을 악화시킨다. 그러므로 간헐적인 비선형 부하와 스위칭 동작들뿐만 아니라 고조파의 결과로써 왜곡된 전력 시스템 신호를 가진 전기적 부하 구성의 빠르고 정확한 예측을 위한 요구가 증가되고 있다. 또한, 고객에게 양질의 전기에너지를 공급하고 적절한 신뢰도를 유지하기위해, 부하 흐름과

안정성 연구를 포함한 전력시스템 분석을 위한 여러가지 부하 모델이 필요하다. 그러므로 전기부하구성을 예측하기 위한 정확한 부하 모델링은 조류계산 해석, 전압 안정도 해석, 그리고 전력시스템의 자동발생제어 등과 같은 분석을 더 효율적으로 하는데 중요성을 가진다.

본고에서는 최적화 알고리즘을 통해 구해진 전기부하구성 예측에 기반을 두어 각각의 비선형 부하가 전력시스템에 미치는 왜곡전력(distortion power) 크기의 순위를 결정하는 새로운 전력품질 지수를 제시하고자 한다.

2. 전기부하구성 예측

많은 실질적인 환경에서 부하의 구성은 알려지지 않는다. 그러한 상황에서, 전기부하구성은 개별적인 부하 요소들의 알려진 전류 파형으로부터 추론될 수 있다. 서비스 입력단에서 전체적인 전기부하 전류가 측정되고 그것의 푸리에 변환은 한 위상으로 다음과 같은 구성을 나타냄을 가정한다.

$$i(t) = 880.0\cos(\omega t) + 185.5\cos(3\omega t - 2^\circ) + 75.0\cos(5\omega t - 4^\circ) + 65.0\cos(7\omega t - 6^\circ). \quad (1)$$

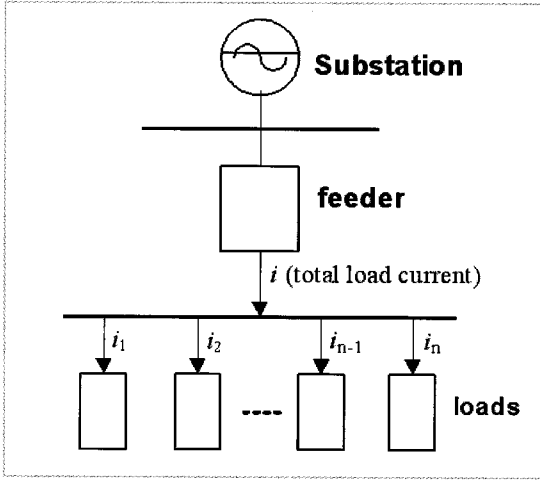


그림 1. 전기부하구성 예측을 위한 기본 모델.

그림 1에서 나타난 전체 전기부하의 전류 파형 i 는 식 (1)과 같고 기본 주파수는 60Hz이다. 서비스 입력 단에서 선간 전압은 480V를 최대값으로 가지는 정현파로 가정한다. 각 부하가 사인 곡선의 전압으로부터 공급될 때, 전류의 전형적인 부하 집단의 예가 표 1에 주어진다. 이 부하 집단은 백열등, 형광등, 컴퓨터, 그리고 모터 구동장치의 부하 유형으로 구성되어 있고, 이는 각각 첨자 i, f, c 와 m 으로 표시한다 [345].

표 1에서 주어진 대표 전기부하 집단을 이용하여, 식 (1)에서 전체적인 전기적 부하 전류 $i(t)$ 는 다음의 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i(t) = k_i i_i(t) + k_f i_f(t) + k_c i_c(t) + k_m i_m(t) \quad (2)$$

여기서 계수 k_1, k_2, k_3, k_4 는 결정되어야 하는 미지의 계수이다. 그러면 이 예측 문제는 식 (3)에서 주어진 함수 J 의 값을 최소화하면서 해결할 수 있다.

$$J = \int_{t=0}^{t=T} [i(t) - \{k_i i_i(t) + k_f i_f(t) + k_c i_c(t) + k_m i_m(t)\}]^2 dt \quad (3)$$

위 식이 최소값을 가질 때, 각 계수들과 관계된 함수 J 의 미분값은 정확히 0이 될 것이다. 이를 통해

표 1. 대표 전기부하와 발생하는 왜곡된 전류 파형

대표 전기부하 종류	전류 파형 (Reference: 전압 파형)
백열등	$I_i(t) = 1.0 \cos(\omega t)$
형광등	$I_f(t) = 1.0 \cos(\omega t - 3^\circ) + 0.48 \cos(3\omega t - 5^\circ) + 0.35 \cos(5\omega t - 3^\circ) + 0.28 \cos(7\omega t - 2^\circ)$
컴퓨터	$I_c(t) = 1.0 \cos(\omega t) + 0.28 \cos(3\omega t - 1^\circ) + 0.05 \cos(5\omega t - 8^\circ) + 0.03 \cos(7\omega t - 10^\circ)$
모터 구동장치	$I_m(t) = 1.0 \cos(\omega t) + 0.15 \cos(5\omega t - 8^\circ) + 0.11 \cos(7\omega t - 10^\circ)$

구해지는 계수 벡터 k 는 $[k_1, k_2, k_3, k_4]$ 로 구성된다. 그 후에는 각각의 전기적 부하 표본의 실질적 전기적 부하량은 쉽게 결정될 수 있다. 그러므로 실질전력, 피상전력, 전력비등의 계산은 이를 이용하여 간단히 계산할 수 있다.

3. 전기부하구성 예측을 위한 Kalman 필터 알고리즘

Kalman 필터 알고리즘은 대표적인 예측기법으로 평활 특성과 프로세스 및 측정 잡음에 강한 잡음 거절 능력을 가진다. 각 상태들이 진행되는 과정에서 프로세스 잡음이 발생되고 관찰 결과가 측정 잡음의 발생과 함께 만들어지는 실제 환경에서, 전기부하구성을 위한 평가 문제는 선형 시변계 상태방정식으로 공식화될 수 있다. 그러한 경우에, Kalman 필터 알고리즘이 우선적으로 적용된다. 예측을 위해 적용된 상태 모델은 다음에서 주어진다.

$$x(n+1) = \Phi x(n) + \Gamma \omega(n), \quad x(0) = x_0$$

$$y(n) = c \cdot x(n) \quad (4)$$

$$z(n) = y(n) + v(n)$$

식 (4)에서 $\Phi \in (\mathbb{R}^n \times m)$, $\Gamma \in (\mathbb{R}^n \times m)$, $c \in (\mathbb{R}^1 \times n)$ 는 알려진 결정변수들이다. $x \in (\mathbb{R}^n \times 1)$ 는 상태벡터이고 이것은 $x = [k_1, k_2, k_3, k_4]$ 이다. 그리고 $\omega \in (\mathbb{R}^n \times 1)$ 은 프로세스 잡음벡터이다. 또한 v 는 식 (1)에서의 전체 전류 측정치 i 이고 v 는 정상 측정 잡음이다. 그러면, 상태벡터의 예측은 다음의 단계를 사용하여 경신된다.

□ Kalman 필터 알고리즘

- 측정치의 경신: $z(n)$ 을 얻고 다음의 양을 계산하라:

$$k(n) = P^-(n) c^T [c P^-(n) c^T + r]^{-1}$$

$$\hat{x}(n) = \hat{x}^-(n) + k(n) [z(n) - c \hat{x}^-(n)] \quad (5)$$

$$P(n) = P^-(n) - k(n) c P^-(n)$$

여기서 $k (\in \mathbb{R}^{n \times 1})$ 는 Kalman 이득이고, P 는 양수의 절대 대칭행렬이며 r 은 양수이다. 대개 $P(0)$ 은 I 가 단위행렬인 $P(0) = \lambda I (\lambda > 0)$ 이다.

- 시간의 경신 : 시간 $n+1$ 에 해당하는 이전의 값을 계산하라.

$$\hat{x}(n+1) = \Phi \hat{x}(n) + P(n+1) \Gamma Q^{-1} \Gamma^T$$

여기서 $Q (\in \mathbb{R}^{m \times m})$ 는 양수의 절대 행렬이다.

- 시간의 증가 : n 을 증가시키고 이를 되풀이하라. 그러므로 예측된 결과는 다음과 같이 측정된다.

$$\hat{y}(n) = c \hat{x}(n) \quad (7)$$

상황에 따라 적용될 수 있는 여러가지 반복 기법에 의해 수렴되는 해의 비교를 통해 알고리즘을 통한 전기부하구성의 평가가 어느 정도의 정밀도를 가지는지, 그리고 실시간 구현을 위한 수렴 속도를 가지는지 결정할 수 있다. 위의 Kalman 필터 알고리즘을 적용한 후에, 마지막 $\hat{x}(n)$ 의 값은 $[0.1935, 0.1220, 0.5434, 0.1412]^T$ (정규화)로 얻어진다. 이 예측된 값들은 직접적인 계산을 통해 구한 정확한 해에 매우 가까운 값으로 수렴된다. 반복하는 동안 $\hat{x}(n)$ 에서 예측된 값들의 변화가 그림 2에서 나타난다. 또한 그림 3에서의 결과는 측정된 파형과 Kalman 필터에 의해 예측된 파형이 거의 일치함을 나타낸다. [4].

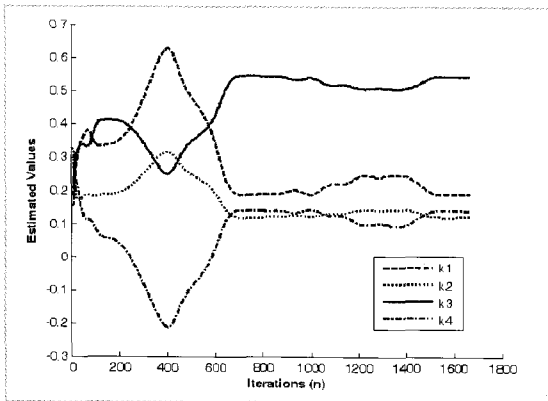


그림 2 $\hat{x}(n)$ 의 예측된 값들의 변화 (정규화)

4. 새로운 전력품질 지수

각각의 비선형 부하가 시스템에 미치는 왜곡전력의 값은 다음의 두가지 사항과 밀접한 관계가 있다. 첫째는 얼마나 많은 전류가 각 부하로 흐르는 것에 대한 정보이고, 둘째는 고조파 성분 요소를 가진 전류의 파형이 얼마나 왜곡되어 있는가에 대한 정보이다. 각각의 경우에 대해 앞 절에서 제시한 전기부하구성 비율 (Load composition rate: LCR) 예측 및 전류파형에 대한 전체 고조파 왜곡 (THD) 값의 계산을 통하여 해결되어 질 수 있다. 즉, 왜곡전력에 관한 정보를 제공해 주는 새로운 전력품질 지수는 다음과 같이 얻어질 수 있다. (9)

$$DPQI(n) = LCR(i_n) \cdot THD(i_n)$$

$$i_n(t) |_{T} = i_{n,1}(t) |_{T} + \sum_{h=2}^{\infty} i_{n,h}(t) |_{T}$$

식(9)에서 T 는 측정전류에 대한 주기를 말하며, h 는 고조파 왜곡 성분의 번호를 말한다. 위 식(8)의 왜곡전력 전력품질 지수(Distortion power quality index: DPQI)를 사용함으로써 직접적인 전력에 대한 측정 없이 각 부하의 전류파형 측정만 가지고 각 부하가 전체 시스템에 미치는 왜곡전력의 순위를 결정할 수 있게 된다. 앞 절에서 구한 전기부하구성의

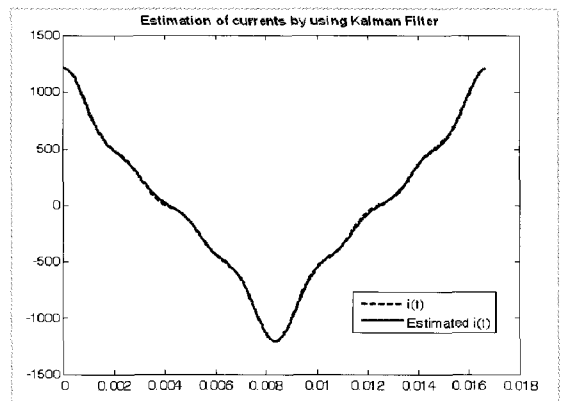


그림 3 Kalman 필터 알고리즘에 의한 예측의 성능

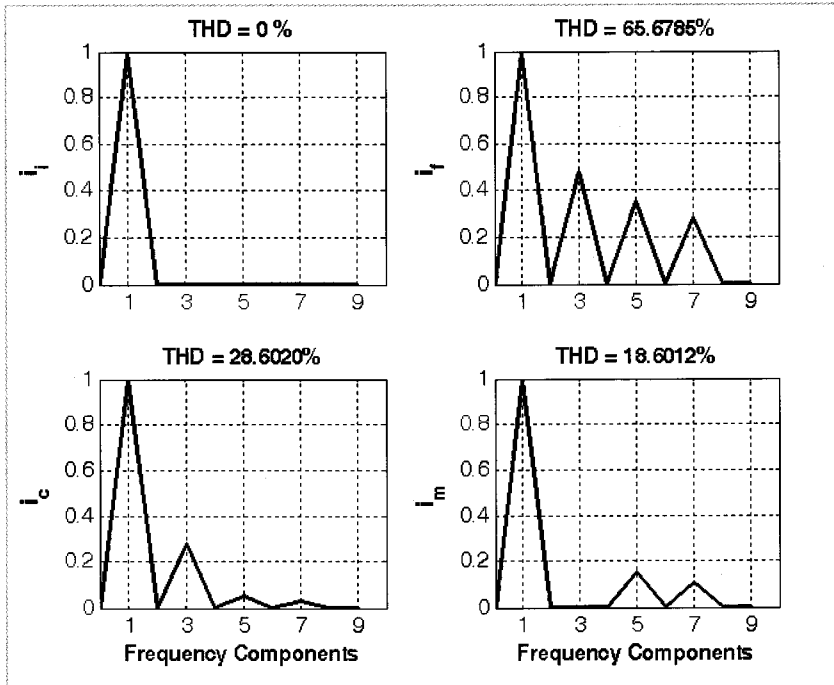


그림 4. 각 부하에 흐르는 전류의 고조파 성분

비율(LCR) 값은 [0.1935, 0.1220, 0.5434, 0.1412] 였으며 이에 상응하는 왜곡전력값은 각각 [0, 9757, 18952, 3204] 이다. 또한 각각의 부하전류에 대한 THD 값은 [0, 65.6758, 28.6020, 18.6012] 이며 그림 4에 제시되어져 있다.

식(8)에 의해서 왜곡전력 전력품질 지수 (DPQI)는 [0 8.0122 15.5428 2.2678] 이며 이에 대한 비율 (DPQI_R)은 [0, 0.3060, 0.5936, 0.1004] 로 계산되어진다. 이에 따라 관계된 고조파 오염 순위(Harmonic pollution ranking: HPR)가 DPQI_R의 크기에 따라 결

정되어 지며 표 2에 제시되어져 있다. 표 2에서는 실제 측정된 각 부하에서의 왜곡전력의 비율(D_R)과 본고에서 제시한 왜곡전력 전력품질 지수 (DPQI)의 비율(DPQI_R)이 정확하게 일치됨을 보여주고 있다. 또한, 각 부하의 THD 값이 형광등, 컴퓨터, 모터 구동장치, 백열등 순으로 되어있지만, DPQI_R의 값을 고려하면 컴퓨터, 형광등, 모터 구동장치, 백열등의 순위로 되어 있다. 이는 컴퓨터가 전체 시스템의 전력품질에 가장 많은 악영향을 미침을 알 수 있다.

표 2. 왜곡전력품질 지수 및 고조파 오염 순위

Load type	백열등	형광등	컴퓨터	모터 구동장치
THD (T) [%]	0	65.6758	28.6020	18.6012
THD Ranking	4	1	2	3
DPQI	0	8.0122	15.5428	2.2678
DPQI _R	0	0.3060	0.5936	0.1004
HPR	4	2	1	3
D _R	0	0.3057	0.5939	0.1004

5. 결 론

본 원고에서는 비선형 전기부하구성을 예측하는 연구, 즉 한 전력시스템의 상위 입력단에서 전체 전류 파형의 직접적인 측정을 통해 각 부하에 대한 전류 크기의 비를 결정하는 연구를 소개했다. 일반적으로 사용되는 백열등, 형광등, 컴퓨터, 그리고 모터 구동장치들이 전기적 부하 건본의 대표로서 선택되어졌다. 전기적 부하 구성의 예측 문제를 해결하기 위해 Kalman 필터 알고리즘이 성공적으로 적용되었다. 특히, Kalman 필터 알고리즘은 프로세스 잡음에 의해 발생하는 상태들과 측정 잡음에 의해 오차가 발생하는 관찰 결과들을 가지는 실제적인 시변계의 예측 문제를 위해 우선적으로 사용될 수 있다.

다음으로, 전기부하구성의 예측 계산값과 각 부하의 전류 값에 대한 전체 고조파 왜곡값을 가지고 왜곡전력 전력품질 지수를 구하였으며 이를 통해 각 부하의 전체 시스템에 대한 고조파 오염 수준의 크기를 결정할 수 있었다. 또한 직접적인 전력량의 측정없이 제시된 전력품질 지수를 통해 각 부하의 왜곡전력량을 구하는 큰 장점을 얻을 수 있었다.

6. 참고문헌

1. IEEE Standard for IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519, 1993.
2. IEEE Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System, IEEE Std. 1547, 1999. .
3. 이순, 박정욱, "비선형 전기부하구성 예측을 위한 최적화 기법 비교 평가", 2007년도 대한전기학회, 하계학술대회 논문집, pp. 576-577, 07. 2007.
4. Soon Lee and Jung-Wook Park, "Estimation of Electric Load Composition on a Utility Side," in Proc. of IEEE 41st IAS Annual Meeting, pp. 1425-1431, October 2006.
5. Soon Lee and Jung-Wook Park, "A Reduced Multivariate Polynomial Model for Estimation of Electric Load Composition," in Proc. of IEEE 42nd IAS Annual Meeting, pp. 1505-1511, September 2007.