

고조파를 고려한 지능형 부하모델링 기법 개발

박재원, 이종필, 변상준, 임재운, 지평식
충주대학교, 충북대학교, 대덕대학, 대덕대학, 충주대학교

A Development of Load Modeling Technique with Harmonics

J. W. Park, J. P. Lee, S. J. Byun, J. Y. Lim, P. S. Ji

Chungju Nat'l Univ., Chungbuk Nat'l Univ., Daeduk College, Daeduk College, Chungju Nat'l Univ.

Abstract - Increasingly nonlinear dynamic loads have been connected into power systems. This adds to the harmonics in the power system. In traditional load modeling techniques, the harmonics has not been considered. Thus, the harmonics problems in load modeling are considered and ANN load modeling is proposed.

1. 서 론

전력계통에는 기본파 외에 다양한 부하에서 발생하는 고조파 전류가 혼재되어 있다. 고조파의 발생원인은 크게 두 가지 그룹으로 구분할 수 있는데, 그 하나는 최근 사용이 늘어난 첨단 제어장치, 전력전자기기 등 다양한 반도체 전력변환 설비에 의한 것이며, 다른 하나는 변압기, 회선기 등의 기존 전력기기의 비선형 특성 영역에서의 운전으로 인한 것들을 들 수 있다. 이러한 비선형 부하의 유형이나 양이 증대하면 전원측에 많은 고조파 전류가 흐르게 되고 따라서 전압의 왜형이 발생하여 계통내의 다른 설비에까지 악영향을 미친다. 또한, 고조파에 의해 전압과 주파수의 변동을 조래하며 그로 인하여 전력계통 해석에 중요한 성능 지표로 고려되는 유효전력과 무효전력의 동특성을 모델링하는데 어려움을 겪고 있다.

부하모델에 관한 기존 연구로 개별부하 및 집단부하에 대하여 정특성 실험을 실시하고 주거용 및 상업용, 산업용 부하에 대한 시간별 부하구성비를 추정하여 부하모델의 효용성을 입증하였으며, 신경회로망 등을 이용한 부하모델링 기법 및 계통 적용 방법에 관한 방법론이 제시되었다[1]. 또한, MLP신경회로망을 이용하여 동태부하를 모델링하고, RNN 신경회로망을 이용한 부하를 표현하고 전압안정도에 적용한바 있으며, 부하의 정태/동태모델의 파라미터를 확률론적 방법으로 표현하였다[2][3]. 그러나 기존의 기법들은 고조파를 고려하지 않고 부하를 모델링함으로써 고조파가 존재하는 환경에서는 신뢰성 높은 모델을 제공하지 못하는 단점이 있다. 따라서 전력계통에 고조파가 존재할 경우 부하의 특성 및 변화를 해석 및 분석할 필요성이 제기되나 이와 관련된 연구는 거의 이루어지지 않았다. 특히, 비선형 특성을 갖는 부하에 대한 모델링 기법은 매우 취약한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고조파가 존재하는 환경하에서, 대표적인 부하 모델 기법인 IEEE 2차식을 적용하여 문제점을 분석하고 이를 해결하기 위한 방법으로 고조파를 고려한 신경회로망에 의한 부하모델링을 제안하고자 한다.

2. 본 론

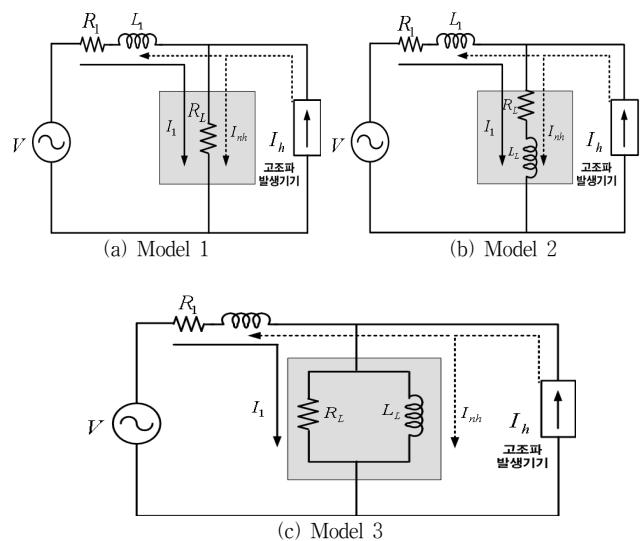
2.1 부하 구성요소별 고조파 메커니즘 분석

산업의 발달과 함께 전력계통에는 첨단 제어장치, 전력전자 기기로 대표되는 다양한 반도체 전력설비와 전력기기인 변압기, 회선기기 등의 비선형 특성을 나타내는 부하설비의 사용이 증가하고 있다. 이러한 비선형 부하들은 고조파를 발생시켜 입력전압의 왜곡뿐만 아니라 연계된 계통내로 고조파 전류가 흘러 들어가 다른 부하설비에까지 악영향을 미친다. 또한, 비선형 부하로부터 발생된 고조파 전류원은 전원측 뿐만 아니라 인접한 부하로 흘러들어가 부하의 유효전력 및 무효전력에 영향을 미친다. 본 절에서는 그림 1에서 보인 세 가지 모델에 대하여 고조파 메커니즘 및 부하의 유효전력 및 무효전력의 특성을 분석하고자 한다.

그림 1에 나타난 회로를 이용하여 기본파 성분만 존재하는 경우와 n 차 고조파 성분까지 존재하는 경우에 대하여 부하에 흐르는 고조파의 영향을 분석하고자 한다. 각각의 경우에 대해 부하에 인가되는 전압과 주파수에 대한 유효/무효전력을 계산하고, 구해진 무효전력과 유효전력값을 이용하여 식 (1) 및 식 (2)으로 표현되는 IEEE 2차식 모델[4]로 부하모델링을 한다. IEEE 2차식 모델은 대표적인 부하모델링 기법으로서 최소자승법을 이용하여 각 파라미터를 구할 수 있다.

$$\widehat{P}_{(t)} = P_0 [p_1 V_{(t)}^2 + p_2 V_{(t)} + p_3](1 + K_{pf} \Delta f_{(t)}) \quad (1)$$

$$\widehat{Q}_{(t)} = Q_0 [q_1 V_{(t)}^2 + q_2 V_{(t)} + q_3](1 + K_{qf} \Delta f_{(t)}) \quad (2)$$



〈그림 1〉 부하구성 요소별 기준 모델

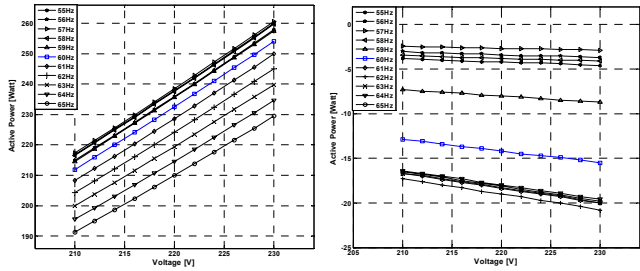
2.2 모의 실험 결과 및 분석

비선형부하에서 발생하는 고조파가 존재하는 조건하에서 유효전력과 무효전력을 예측하는 부하모델링 기법의 특성을 분석하기 위하여 그림 2에 나타난 세 가지 모델에 대하여 모의실험을 한다. 그림 1에 나타난 파라미터 중에서 선로 임피던스는 모든 모델에 동일하게 $R_1=0.01[\Omega]$, $L_1=0.01[\text{mH}]$ 을 설정하였다. 부하모델에 대해서는 모델 1에 대해서 $R_L=500[\Omega]$, 모델 2와 모델 3은 동일하게 $R_L=200[\Omega]$, $L_L=0.5[\text{mH}]$ 을 설정하였다. 또한, 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 가정하여, 고조파 전류원은 3, 5, 7, 11차수를 고려하였으며, 3차수에는 기본 주파수 성분에 대한 전류의 90%, 5차수에는 70%, 7차수에는 50%, 11차수에는 30%를 설정하였다.

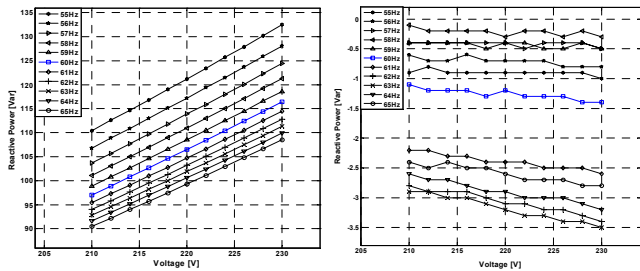
본 연구에서는 분석하고자 하는 고조파가 포함된 부하의 유효전력과 무효전력의 영향을 분석하기 위하여 다양한 측면에서 모의실험을 실시하였다. 즉, 고조파의 영향 뿐만 아니라 전압과 주파수를 변동하면서 부하의 유효전력과 무효전력을 구하였다. 입력전압은 210V에서 230V까지 2V씩 총 11개의 전압변동에 따른 유효/무효전력값을 구하였고, 주파수는 55Hz에서 1Hz씩 증가하여 65Hz까지 변동시켜 총 11개의 주파수 변동에 따른 유효/무효전력값을 구하였다. 모든 실험은 Matlab 7.0에서 실행하였다.

그림 2에서는 모델 3에 대해서 고조파 유무에 따른 유효전력값과 무효전력값을 나타냈다. 그림 2(a)는 전압변동과 주파수 변동에 따른 유효전력값을 보였으며, 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전압이 증가할수록 유효전력값은 증가했으며, 주파수가 증가할수록 유효전력값은 감소하였다. 그림 2(b)에서는 고조파를 고려하지 않은 조건에서 구해진 유효전력값과 고조파를 고려한 조건에서 구해진 유효전력값의 차를 나타냈다. 그림 2(b)에서 차이가 부(음)의 값을 나타냄으로 고조파가 존재할 경우 유효전력의 값이 증가하는것을 의미한다. 그림 2(b)에서 알 수 있

는 바와같이 고조파의 유무에 의해 유효전력값은 최소 3[Watt]에서 최대 20[Watt] 차이가 발생한 것으로 나타났다. 그림 2(c)는 전압변동과 주파수 변동에 따른 무효전력값을 나타냈고, 그림 2(d)에서는 고조파 유무에 따른 무효전력의 차를 나타냈다. 그림 2(d)에서 알 수 있는 바와같이 고조파의 유무에 의해 무효전력값은 최소 0.5[Var]에서 최대 4[Var] 차이가 발생한 것으로 나타났다.

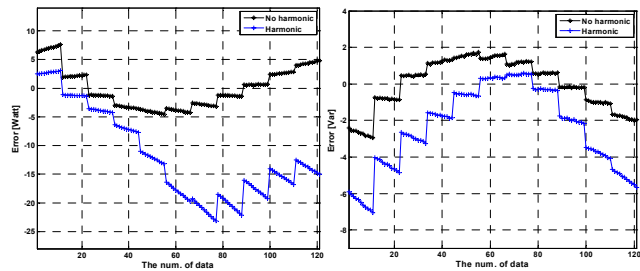


(a)고조파를 고려하지 않은 유효전력 (b)고조파 유무에 따른 유효전력의 차



(c)고조파를 고려하지 않은 무효전력 (d)고조파 유무에 따른 무효전력의 차

〈그림 2〉 Model 3에 대한 유효전력 및 무효전력



(a) 유효전력 (b) 무효전력

〈그림 3〉 고조파 유무에 따른 Model 3에 대한 부하 모델링 오차

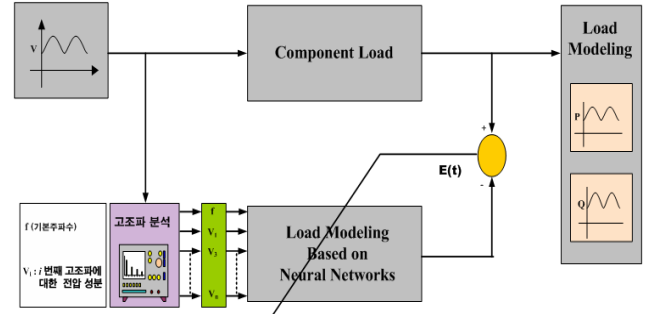
〈표 1〉 고조파 유무에 따른 부하 모델링 결과

구분		Model 1	Model 2	Model 3
정격유효전력(Watt)		96.8	125.8	232.5
정격무효전력(Var)		-	118.5	106.5
오차	유효전력(고조파무)	0.276	1.220	3.489
	유효전력(고조파유)	0.573	2.046	14.00
	무효전력(고조파무)	-	0.293	1.366
	무효전력(고조파유)	-	2.429	3.290

표 1에서는 모의실험 단계에서 인가전압 및 주파수 변동에 따라 구해진 유효/무효전력값을 IEEE 2차식 방법으로 부하모델링을 한 결과를 나타냈다. 표 1에 나타난 성능지표인 오차는 자승오차근(Root square error)의 총합을 의미한다. 표 1에서 보는 바와 같이 고조파를 고려하지 않은 경우 유효/무효전력값은 양호한 결과를 나타낸 반면에 고조파가 존재하는 경우 예측된 유효/무효전력값의 오차는 크게 나타났다. 특히, 모델 3의 경우 고조파를 고려하지 않은 경우 유효전력에 대한 오차가 3.489[Watt]인 반면에 고조파가 존재하는 경우 14[Watt]의 오차를 보여 고조파를 고려하지 않은 경우에 비해 4배 이상의 오차가 증가함을 확인할 수 있다. 그림 3은 모델 3에 대한 고조파 유무에 따른 유효전력과 무효전력에 대한 오차값을 나타냈다. 그림에서 사용된 데이터는 시뮬레이션 단계에서 구해진 121개의 데이터(11의 전압변동×11번의 주파수변동)를 이용하였다. 표 1 및 그림 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 고조파가 존재하는 경우 일반적인 부하모델링 방법으로는 효과적인 부하모델을 개발하는 데는 한계가 있다. 따라서 고조파 성분을 고려한 부하모델의 개발이 시급히 요구됨을 알 수 있다.

3. 고조파를 고려한 지능형 부하모델링 기법 제안

앞 절에서 계통에 고조파가 존재하는 경우 부하에 미치는 영향을 보았고 기존의 수학적인 부하 모델링 기법으로는 효과적인 부하모델을 개발하기 어려움을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 비선형의 문제를 효과적으로 취급할 수 있는 신경회로망 기법을 기반으로 고조파를 고려한 부하모델링 기법을 제안한다.



〈그림 4〉 고조파를 고려한 지능형 부하모델링의 개요

그림 4는 고조파를 고려한 지능형 부하모델링의 개요를 나타낸다. 부하실험으로부터 각각의 부하에 대한 특성실험을 진행하여 취득한 자료를 근거로 신경회로망 기법을 이용하여 고조파를 고려한 부하모델링을 한다. 이 때, 신경회로망 부하모델의 입력부에 고조파 성분을 포함할 수 있도록 식 (3)과 같이 고조파에 대한 입력변수-THD, 각 고조파 성분 등-를 포함시켜 신경회로망의 출력인 유효/무효전력을 추정하도록 할 수 있다.

$$P = F_{ANN}(v \dots, f \dots, h) \quad (3)$$

$$Q = F_{ANN}(v \dots, f \dots, h)$$

4. 결 론

본 논문에서는 고조파가 존재하는 환경하에서 IEEE 2차식을 이용한 부하모델링 기법을 분석하였다. 분석결과, 고조파가 존재하지 않는 조건하에서는 기존의 부하모델링 방법으로 우수한 결과를 보였으나, 고조파가 존재하는 환경에서 취득한 데이터에 대해서는 오차값이 크게 나타나 효과적이지 않은 것으로 분석되어 고조파가 존재하는 환경에서도 우수한 성능을 보일 수 있는 부하모델링 기법이 요구됨을 확인할 수 있었다. 또한, 고조파의 영향을 고려한 부하 모델링 기법으로 신경회로망의 이용을 제안하였다.

본 논문은 세 가지의 부하모델에 대한 모의실험 결과로서 현장 실측 및 실증실험을 통하여 분석방법의 타당성을 검증할 필요성이 요구된다. 향후, 실증 실험 및 다양한 부하모델에 대한 실험과 이론적 고찰을 통해 기존 부하모델링 방법의 문제점을 지적하고, 고조파가 존재하는 환경에서도 효과적인 부하모델링 기법을 개발하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2007-2-043) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] 김정훈 외, "전력계통 안정도 정밀해석을 위한 적정부하모델에 대한 연구" 한국전력공사 전력연구원 연구보고서, 2000.
- [2] Vilathgamuwa, D.M. Wijekoon, H.M, "Representation of Power System Load Dynamics with ANN for Real-time application", 2003, IEEE General Meeting.
- [3] Knyazkin, V, Canizares, C.A., Soder, L.H, "On the Parameter Estimation and Modeling of Aggregate Power System Load", IEEE Trans. On Power System, Vol. 19, No. 2, May 2004.
- [4] J.R. Ribeiro, F.J. Lange, "A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No.8, pp. 2869-2875, 1982.