

전력계통 안정도 정밀해석을 위한 적정 부하모델 개발

박시우, 김기동
한전 전력연구원

Development of Accurate Load Model for Detailed Power System Stability Analysis

S.W.Park, K.D.Kim
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - This paper presents the load modeling process and bus load models for KEPCO power system. At first, load devices commonly used in KEPCO power systems were selected, and tested for measuring the voltage and frequency sensitivity of active and reactive power. From this test, about 40 voltage and frequency dependent load models have been obtained. The bus load composition rate for KEPCO power system has been determined using the various recent surveys and papers in order to develop the load model for a power system bus. To verify the accuracy of developed bus load models, the field test for measuring active and reactive power according to artificial variation of the bus voltage was performed at 8 substations for spring, summer, autumn, winter cases. With data of this seasonal field test, more reliable bus load models for KEPCO power systems were developed.

1. 서 론

산업발전과 국민생활 수준의 향상으로 인하여 전력계통은 점점 대형화, 복잡화 되어가고 있으며, 이러한 추세는 앞으로 더욱 심화되어 전력품질에 대한 수용가의 요구도 높아질 것으로 예상된다. 공급에너지를 고품질로 유지하기 위해서는 전력계통의 계획, 운용, 제어 등이 최상의 상태로 유지되어야 하므로, 이를 위해서는 전력계통 안정도의 정밀 해석이 요구된다. 특히, 고신뢰성의 전력계통 해석을 위해서는 계통에 대한 정교한 수리적인 모델링이 필요한데, 이 중 부하부문은 시변성과 불확실성 때문에 발전·송전부문보다 상대적으로 모델링 기법과 정확성이 뒤떨어지고 있다. 그 이유는 전력계통 부하들이 전압과 주파수에 따라 다양한 응답 특성을 갖고 있기 때문에 단일부하로의 모델링이 쉽지 않기 때문이다. 부하모델링 방법에는 모선이나 급전선에서 개별 부하기기로 구성된 집단부하의 응답특성을 직접 측정하는 거시적(Macroscopic) 방법과 모선에 연결된 개별부하들을 각각 모델링하고 개별부하의 구성비를 기반으로 축약해서 집단부하를 나타내는 미시적(Microscopic) 방법으로 대별할 수 있다. 이 중 거시적인 방법은 현장 실험의 어려움과 부하 구성상태의 복잡함 등으로 매우 어려워, 미시적인 방법의 결과에 대한 검증 또는 보완책으로 이용되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 부하모선에 연결될 수 있는 개별 부하기들의 전압, 주파수 특성을 실험에 의해 취득된 데이터를 기반으로 모델링하고, 특정한 계절과 시간대의 개별 부하구성비를 추정하여, 단일 부하로 축약하는 미시적 방법론에 의하여 모선별 부하모델을 개발하였으며, 실제 변전소 모선에서 측정한 부하특성과의 상호비교를 통하여 개발된 부하모델의 신뢰성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 개별 부하기기 특성실험 및 모델링

2.1.1 정태 부하모델

전력계통의 부하모선에는 매우 다양한 부하들이 존재하므로 이들 모두에 대하여 실험에 의해 개별 부하기기를 모델링하는 것은 어려우며, 또한 부하모선에서 개별 부하기들의 모든 구성비를 파악하는 것도 현실적으로 불가능하다. 그러므로, 본 논문에서는 가전기기 보급률 분석자료, 관련 문헌(저서, 논문), 설문지 조사를 통하여 표 1과 같이 부하특성실험 대상이 될 개별 부하기기를 선정하였다

표 1. 개별 부하특성실험 대상 부하기기

품목	단위규격	품목	단위규격
TV	14, 20, 24인치	전기온수기	486
TV+VTR		전기장판	2인용
VTR		전기팬히터	
가습기	가정용	후라이팬	
PC	486DX	전자렌지	
냉장고	80, 180, 390 l	전축	100W
다리미	자동	주서	35cm
믹서	가정용	진공청소기	6.6kg
보온밥솥	10인용	카세트라디오	
선풍기	35cm	커피포트	5잔
세탁기	6.6kg	펌프	
송풍기	0.5HP	드라이기	
식기건조기	10인용	환풍기	소형
에어컨	창문형	히터	900, 450W
온수순환펌프		백열등	100W
자동펌프		형광등	40W
전기가스배출기		유도전동기	1φ, 3φ ½HP
전기담요	5잔		3φ 3HP

선정된 개별 부하기기들에 대하여 주파수를 각각 고정(56, 58, 60, 62[Hz]) 시킨 후, 전압을 0.5~1.2(p.u)로 서서히 증가 및 감소시키며 부하의 유효 및 무효전력 응답을 측정하였으며, 그림 1은 유도전동기의 정태 부하 특성실험 결과 예이다.

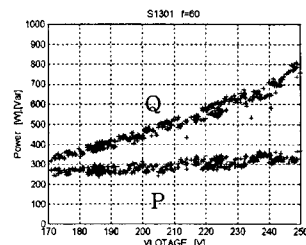


그림 1. 유도전동기 부하특성 실험

부하특성실험에 의해 취득된 데이터는 다음 식(1), (2)로 표현되는 5차 다항식 정태 부하모델식의 산정에 이용된다. 5차 다항식 정태 부하모델식은 부하모델의 정태도 및 개별부하 축약의 용이성을 고려하여 개발된 수식으로 상용 전력계통해석물에 사용시에는 해당 물에 적합한 부하모델(IEEE 또는 ZIP 모델)로의 변환과정이 필수적이다. 측정 데이터로부터 5차 다항식 모델의 계수를 산출하기 위해 최소자승법을 사용하였으며, 표 2는 유도전동기 정태부하모델의 파라미터에이다.

$$P(V, F) = P_0(a_p + b_p \Delta V + c_p \Delta V^2 + d_p \Delta V^3 + e_p \Delta V^4 + f_p \Delta V^5 + g_p \Delta V \Delta F + h_p \Delta V^2 \Delta F + i_p \Delta F) \quad (1)$$

$$Q(V, F) = P_0(a_q + b_q \Delta V + c_q \Delta V^2 + d_q \Delta V^3 + e_q \Delta V^4 + f_q \Delta V^5 + g_q \Delta V \Delta F + h_q \Delta V^2 \Delta F + i_q \Delta F) \quad (2)$$

표 2. 유도전동기 정태 부하모델 파라미터

유도전동기	a	b	c	d	e
유효전력	1.0067	0.9451	0.6434	-3.5901	17.4274
무효전력	1.8494	4.3078	6.6335	11.5324	-30.4490
	f	g	h	i	$P_0(W)$
유효전력	59.1334	3.7880	-4.0362	0.3754	300
무효전력	-129.3700	-12.8280	-32.1880	-2.7805	

2.1.2 동태 부하모델

일반적으로 동태부하를 구성하는 대부분의 부하기기는 유도전동기라 볼 수 있다. 특히, 상업용 또는 산업용 부하를 구성하는 유도전동기 부하는 대용량으로 실험실에서와 같은 다양한 전압, 주파수 입력에 대한 부하특성실험을 수행하기에는 현실상 불가능하다. 그러므로, 본 논문에서는 용도별 동태부하의 부하구성을 4등급으로 분류한 후, 과거 LOADSYS 프로그램에서 사용되었던 유도전동기 파라미터 중 대용량 유도전동기인 TEN, T2H, H2TH, THOU의 매개변수를 사용하기로 하였다(표 3).

표 3. 유도 전동기 매개변수

	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	A	B	H	판성
TEN	0.06	0.09	2	0.06	0.09	1	0	0.46	L
T2H	0.03	0.11	4.21	0.03	0.11	1	0	0.64	H
H2TH	0.01	0.12	6	0.01	0.12	1	0	0.73	H
THOU	0.01	0.09	5.17	0.01	0.09	1	0	1.35	H

2.2 부하구성비 추정을 위한 기본 입력자료

개별 부하기기의 부하모델을 확보한 후, 임의 시점에서 계통의 부하특성을 추정하기 위해서는 날짜 시간 및 용도별 개별 부하기기의 구성비를 알아야한다. 이러한 부하구성비를 추정하기 위해서는 기본적으로 3가지(부하곡선, 상대계수, 에너지 구성비)의 입력자료가 필요하다. 다음 그림 2는 부하구성비 추정을 위한 간략한 흐름도이다.

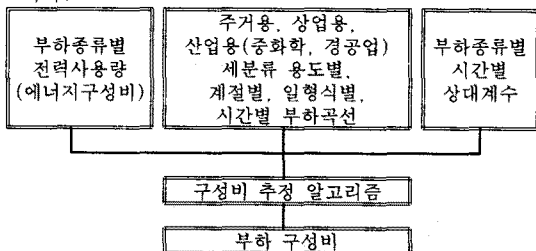


그림 2. 부하구성비 추정을 위한 간략화 흐름도

2.2.1 부하곡선

부하구성비 추정을 위한 첫 번째 입력 자료인 부하곡선은 참고문헌[1][2]를 사용하였다.

2.2.2 상대계수

· 주거용 부하계수

주거용 부하는 수십 가지 종류의 개별 부하로 구성되어 있다. 이 부하를 년간 전력사용량[3][4]을 기준으로 분류하면 TV, 냉장고, 냉방, 취사, 조명, 진공청소기, 세탁기, 기타부하의 8개 주요 부하로 분류할 수 있다. 냉장고부하와 기타 부하가 아닌 6개 주거용 부하의 시간별 상대계수 산출을 위한 자료인 일형식별 시간별 사용대수 비율[3]은 평일, 토요일, 일요일로 분류되어 있어, 월요일, 근무일, 토요일, 일요일, 공휴일로 세분하기 위해 평일 자료, 즉 화요일에서 금요일에 해당되는 요일에 대한 상대계수를 근무일계수로 정의하고, 월요일은 가전기기의 사용대수 비율이 두 배 이상 증가하는 오전 6시를 기준으로 하여 그 이전은 일요일 사용대수를 사용하였다. 그 이후 시간대에서는 평일의 사용대수를 사용하여 같은 방식으로 계수를 산출하고, 공휴일은 일요일과 동일한 계수 값을 갖는 것으로 간주하였다. 그림 3은 주거용 냉방부하의 상대계수 산출결과 예로서, 그림의 x축은 시간, y축은 단위분율 값(p.u)을 의미한다.

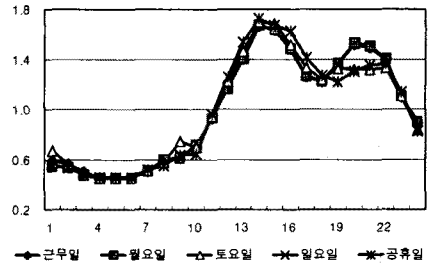


그림 3. 냉방 부하의 일형식별 상대계수(여름)

· 상업용 부하계수

공공건물, 일반건물, 백화점, 병원, 호텔, 시장, 학교 등 상업용 부하로 분류되는 전력 다소비 건물을 선정, 진단 및 표본조사를 실시하여 부하의 종류별로 평균적 상대계수를 산출해 놓은 참고문헌[7]의 자료를 이용하였다. 이 계수들은 각 시간별 합을 기준으로 정해진 값들이므로 그 시간대의 종류별 구성비율과 같으며 이 비율이 계절과 일형식에 상관없이 항상 성립한다고 가정하면, 여기에 상업용 계절별 일형식별 계수[6]를 곱하고 그 값들의 평균으로 각 시간의 값들을 나누어 상업용 계절별 일형식별 종류별 상대계수를 찾게 된다. 그림 4는 상업용 부하의 봄철 토요일 상대계수 산출결과 예로서, x축은 시간, y축은 단위분율 값(p.u)을 의미한다.

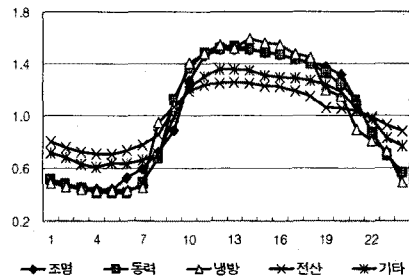


그림 4. 상업용 봄 토요일 상대계수

· 산업용 부하계수

산업용의 경우 전체 수의 약 70% 정도가 동력 부하인 것으로 추정되고 있으며, 나머지 공정(전열, 용접,

기타)의 부하와 조명 부하가 각각 약 23%, 7%정도를 차지하고 있다[9]. 중화학 부하에는 코크스·석유정제품 및 핵연료 제조업, 제 1차 금속산업, 고무 및 플라스틱 제조업 등이 포함되고 경공업 부하에는 비금속 광물 제조업, 자동차 및 트레일러 제조업, 섬유제품 제조업 등 중화학을 제외한 업종이 포함된다[1](2)[8]. 그림 5는 산업용 여름 토요일 상대계수 결과 예로서, x축은 시간, y축은 단위분을 값(p.u)을 의미한다.

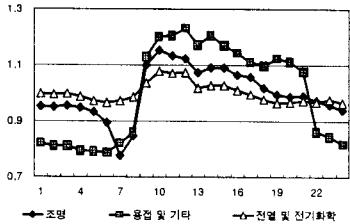


그림 5. 산업용 여름 토요일 상대계수

2.2.3 부하군별 에너지 구성비율

용도별 산출 과정은 주거용인 경우는 지역별, 월별, 부하군별 해당 월 평균 사용량, 지역별 보급율 및 변전소별로 수집된 자료를 통하여 산출하고, 상업용인 경우는 상용 및 공용 건물, 호텔 등의 에너지 구성 비율 조사를 자료로 월별 각 부하군 에너지 비율을 산출하며, 산업용은 기업체의 에너지 구성비율 조사자료 등을 근거로 산출하게 된다. 용도별 분류, 세분류 등은 표준산업분류 중분류 코드에 따른 주거용(가정용), 상업용, 산업용(중화학, 경공업) 분류기준[1][2]을 기초로 하였다.

· 주거용 부하군

지역별 기가당 연간 전력사용량[3]에 가구당 보급률[3]을 곱하여 지역별 가구당 연간 전력사용량을 구한 뒤, 월평균 사용량[5]의 값을 균등화하여 계절별 가중치로서 곱하여 계절별 일형별 에너지 구성비율을 산출한다. 단, 조명기기의 사용량이 빠져 있으므로 형광등과 백열등의 평균 소비전력[3]에 지역별 연간 사용시간[4]을 곱하여 각각의 연간 전력 사용량을 구하고, 월평균 사용량 자료를 미비한 전기밥솥, 진공청소기 부하는 계절별 가중치를 주지 않았으며, 전기장판은 월별 전력사용량[3]을 사용하여 계절별 가중치를 주었다. 표 4는 주거용 에너지구성비 산출 결과이다.

표 4. 주거용 에너지 구성비[%]

계절	지역	대표 부하군							
		취사	냉방	TV	냉장고	조명	세탁기	진공청소기	기타
봄	서울	24.2	0.0	11.7	22.7	17.0	4.6	3.6	16.3
	광역시	28.6	0.0	10.4	20.4	19.6	3.9	3.0	14.3
	기타시	27.6	0.0	10.4	22.6	18.0	4.2	3.5	13.7
	군	37.6	0.0	8.2	20.7	16.5	3.5	3.4	10.1
여름	서울	18.3	16.5	7.4	24.6	14.0	4.7	2.7	11.8
	광역시	23.7	9.0	7.2	24.3	17.7	4.3	2.5	11.4
	기타시	22.5	9.8	7.1	26.4	16.0	4.6	2.8	10.7
	군	32.2	5.6	5.9	25.5	15.4	4.0	2.9	8.4
가을	서울	22.8	3.1	11.6	19.8	17.1	6.8	3.4	15.3
	광역시	27.4	1.6	10.5	18.1	20.1	5.8	2.8	13.7
	기타시	26.5	1.8	10.5	20.0	18.5	6.3	3.3	13.1
	군	36.5	1.0	8.4	18.6	17.2	5.3	3.3	9.8
겨울	서울	22.5	0.0	10.0	19.4	22.8	4.3	3.3	17.7
	광역시	26.3	0.0	8.8	17.3	26.0	3.5	2.7	15.4
	기타시	25.6	0.0	8.9	19.3	24.2	3.9	3.2	14.9
	군	35.2	0.0	7.1	17.9	22.3	3.3	3.2	11.1

· 상업용 부하군

공공용, 일반용, 호텔, 병원, 상가, 백화점, 학교 등의

용도별 전력사용량[7]에 의거하여, 각 부하군의 평균 구성비를 상업용 부하 에너지 구성 비율로 사용할 수 있다. 표 5는 산출된 상업용 에너지 구성비 결과이다.

표 5. 상업용 에너지 구성비[%]

계절	대표 부하군				
	조명	동력	냉방	전산	기타
봄	31.30	39.75	7.80	12.20	8.95
여름	29.30	37.80	15.60	10.30	7.00
가을	31.30	39.75	7.80	12.20	8.95
겨울	33.90	44.00	0.00	11.90	10.20

· 산업용 부하군

제조 업종별 전력사용량[11]의 각 부하군 평균 구성비를 산업용 부하 에너지 구성 비율로 사용할 수 있다. 여기에 표준산업분류 중분류 코드에 따른 산업용 업종[1][2]들의 계절별 판매전력량[6]을 가중치로 곱하면 계절별 에너지 구성비가 추정된다. (표 6)

표 6. 산업용 에너지 구성비[%]

대표 부하군	조명	동력	전열	기타
구성비[%]	9.37	72.20	9.97	8.46

2.3 부하구성비 추정

합리적인 부하구성비 추정 방법은 기존의 통계자료, 문헌, 경험 등을 근거로 해서 객관적인 부하구성비를 추정하는 것으로, 앞에서 언급한 바와 같이 각 입력자료의 신뢰성이 다르므로 부하곡선과 나머지 두 개의 자료(상대계수, 에너지 구성비)의 비교를 통해 부하의 구성비를 추정해 나가는 알고리즘을 도입하게 된다. 대부분 사용량이 많은 부하에 대한 자료는 상대계수, 에너지구성비 등의 입력자료 산출을 위한 근거자료 입수가 가능하며 비교적 신뢰성이 있으나, 사용빈도나 사용 전력량이 적은 부하들은 근거자료 등의 미비로 상대계수 추정이 거의 불가능하여 경험적 방법을 사용하게 된다.

본 논문에서는 상업용의 경우는 모든 부하군의 상대계수 산출이 가능하므로 최적화 기법을, 그렇지 못한 주거용과 산업용에서는 경험적 방법을 사용하여 구성비를 추정하는 알고리즘을 사용하였다. 알고리즘의 전체적인 개념도는 그림 6과 같다.

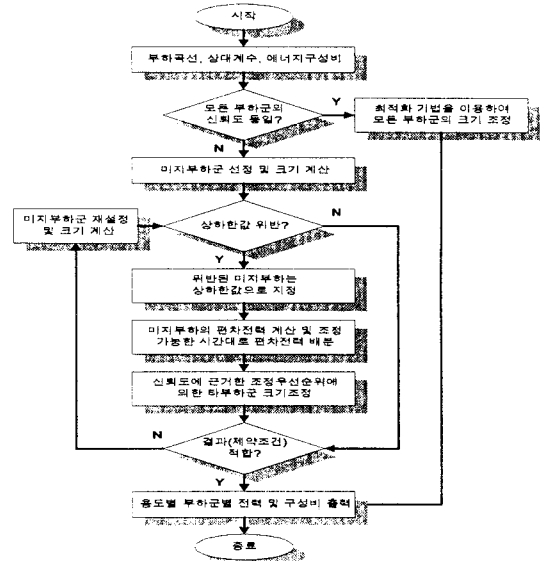


그림 6. 부하구성비 추정 알고리즘

그림 7은 계절별, 일형식별, 지역별(지역별 특색이 확실한 주거용에 한함), 시간별로 추정된 부하구성비 결과 중 여름 토요일의 부하구성비 예이다.

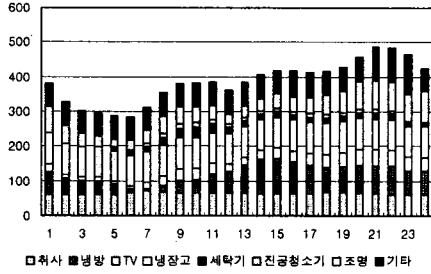


그림 7. 주거용 여름 토요일 부하곡선(서울)

2.4 배전선로 축약

본 논문의 배전선로 축약방법은 배전선로에 따라 널리 분포되어 있는 부하가 부하 중심점에 집중되어 있다고 가정하고, 부하 중심점까지의 등가선로(임피던스)를 손실율 정보에 근거하여 결정하는 부하중심점 부하축약법이다. 본 방법에 의하면 배전선 구성 여하에 관계없이, 등가선로 및 부하 중심점이 결정될 수 있으므로, GE의 지나친 근사화나 UTA의 복잡성 그리고 예상되는 오차를 극소화할 수 있다. 즉, 각 개별부하가 모여서, 구성비에 따라 축약되면, 주거용, 상업용 및 산업용 부하가 되고, 이 용도별 부하는 용도별 구성비에 따라 축약하여 부하 중심점 축약부하가 된다. 변전소의 24시간 전압, 유효 및 무효전력과 손실율정보로부터 부하 중심점까지의 등가선로가 결정되고, 이어서 모선에 대한 축약부하가 산출된다.

2.5 모선별 정태 및 동태 부하모델

모선별 종합 부하모델을 수립하기 위하여, 앞에서 설명한 부하중심점 부하축약을 수행하였다. 그 결과를 5차 다항식 형태, PSS/E용 IEEE 2차 다항식 형태 및 구성비 특성으로 나타내는 ZIP 모델 형태로 산출하였다. 이 결과 중 여름 변전소에 대한 사례 결과는 다음과 같다.

표 7. 5차 다항식 정태부하모델(여름S/S)

계절	시간	5차 다항식 모델								
		상수	ΔV	ΔV^2	ΔV^3	ΔV^4	$\Delta V \Delta F$	ΔF	$\Delta V^2 \Delta$	ΔV^5
봄	심야 P	1.0000	0.9627	1.0969	-0.3786	-0.2079	1.3049	-2.0104	0.8726	-2.8830
	야 Q	0.2282	0.9211	1.0275	0.7482	-2.9184	-2.9226	-2.4744	0.5498	-3.0242
	주간 P	1.0000	0.9433	1.0567	-0.5778	0.3545	2.0457	-2.0510	0.9936	-3.0445
	간 Q	0.2587	1.0695	1.2527	0.9099	-3.2640	-3.2568	-3.0343	0.7388	-3.7731
저녁	P	1.0000	0.9295	0.9928	-0.6847	0.5566	2.3046	-1.9165	1.0116	-2.9280
	Q	0.2705	1.1048	1.1724	0.9116	-2.6004	-2.6829	-3.0844	0.8484	-3.9328

표 8. IEEE 2차 다항식 정태부하모델(여름S/S)

계절	시간	2차 IEEE 모델			
		상수	ΔV	ΔV^2	ΔF
봄	심야 P	1.1368	-1.2204	1.0836	0.8726
	야 Q	0.8885	-0.7284	0.8399	0.5498
	주간 P	1.1603	-1.2398	1.0795	0.9936
	간 Q	0.9355	-0.9784	1.0429	0.7388
저녁	P	1.1280	-1.1565	1.0285	1.0116
	Q	0.8605	-0.8658	1.0053	0.8484

표 9. ZIP 2차 다항식 정태부하모델(여름S/S)

계절	시간	구성비 2차 다항식 모델			
		정전력(%)	정전류(%)	정어미턴스(%)	주파수
봄	심야 P	57.8389	0.7941	41.3670	0.8726
	야 Q	36.0669	27.7965	36.1366	0.5498
	주간 P	55.9406	5.5273	38.5321	0.9936
	간 Q	36.6668	20.5539	42.7793	0.7388
저녁	P	56.6001	5.5807	37.8192	1.0116
	Q	36.7062	27.1270	36.1669	0.8484

표 10. 유도전동기 등가 파라미터(여름S/S)

	Rs	Xs	Xm	Rr	Xr	A	B	H	S
봄	0.0422	0.0961	2.9332	0.0403	0.1092	1.0031	0	0.6267	0.0448
여름	0.0422	0.0961	2.9332	0.0403	0.1092	1.0031	0	0.6267	0.0448
가을	0.0426	0.1081	2.8876	0.0404	0.0959	1.0032	0	0.6213	0.0454
겨울	0.0424	0.0996	2.9140	0.0403	0.1053	1.0030	0	0.6243	0.0451

2.4 모선별 부하모델 검증

수립된 부하모델의 검증은 위해 봄 심야시 여름 변전소 실측결과와 비교하였다. 본 논문에서 수립된 5차식, 2차식 및 구성비 모델의 모의결과를 중첩하여 표현한 것이 그림 8과 9이다. 그림으로부터 전압 변동에 따라 변화하는 작은 진동까지도 모두 같은 형태를 갖는 것으로, 개발된 부하모델의 고정밀성을 검증할 수 있었다.

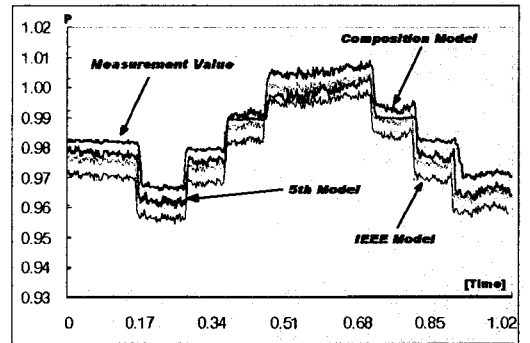


그림 8. 모선 부하모델과 실측결과와의 비교(유효전력)

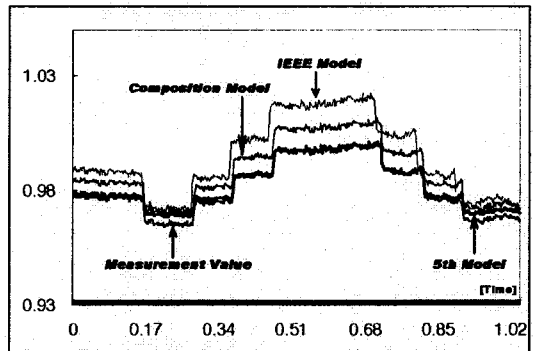


그림 9. 모선 부하모델과 실측결과와의 비교(무효전력)

3. 결론

전력계통 안정도 해석분야에 있어서 부하모델링의 중요성은 발전기 또는 발전기 제어계의 모델링에 비해 상

대적으로 그 중요성이 간과되어 왔으며, 이에 대한 연구 또한 미진한 실정이다. 본 논문은 과거 90년도에 수립되었던 한전 계통 고유의 모선별 정태 및 동태부하모델 개발 이후, 부하특성의 변화를 반영하고, 부하모델의 정밀도 향상을 위해 재개발된 것으로 추후, 전력계통 안정도해석에 개발된 부하모델이 반영되므로서 계통해석의 정밀도 및 신뢰성의 향상이 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사 전원계획처, "계약종별·산업별 부하곡선 자료집," 1997.10.
- [2] 한국전력공사 전원계획처, "계약종별·산업별 부하곡선 자료집Ⅱ," 1999.2.
- [3] 한국전력공사 전력경제처, "가전기기 보급률 조사연구," 1997.12.
- [4] 한국전력공사 전력경제처, "가전기기 보급률 조사연구," 1994.4.
- [5] 한국전력공사 전력경제처, "가전기기별 전력소비행태 조사," 1995.
- [6] 한국전력공사 전력경제처, "전자식 전력량계를 이용한 부하곡선분석," 1997.9.
- [7] 한국전력공사 전력경제처, "대형건물 정밀 진단 및 절전감재량 조사," 1997.9.
- [8] 한국전력공사 전력경제처, "조명기기 보급 실태조사," 1994.8.
- [9] 산업자원부, "DSM 잠재량평가와 모니터링을 위한 기법개발 및 활용방안 연구 최종보고서" 1998.10.
- [10] 한국전력공사 전력경제처, "중소형건물 전기관리 기술지도 및 절전감재량 조사," 1997.9.
- [11] 한국전력공사 전력경제처, "전력수요관리 잠재량 조사를 위한 대형산업체 진단," 1997.9.
- [12] 한국전력공사 기술연구원, "전력계통 안정도 해석을 위한 적정부하모델에 대한 연구," 1990.10.
- [13] 한국전력공사 전력경제처, "전력수요관리 잠재량 조사를 위한 대형산업체 진단," 1997.9.
- [14] IEEE, "Load representation for dynamic performance analysis", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.8, No.2, May 1993, pp.472-482