

다중 시계열 모델을 이용한 단기 부하 무효전력 예측

박우현 · 이윤호 · 정창호 · 김진오  
한양대학교 전기공학과

Short-term Reactive Load Forecasting using Multiple Time-Series Model

Woo-Hyun Park · Yunho Lee · Chang-Ho Jung · Jin-O Kim  
Dept. of EE, Hanyang University

**Abstract** - This paper showed that there exists a non-linear relationship between MVAR and MW, and the rage of the threshold value of MVAR is 56 to 67. Also, we tried the one-hour ahead forecasting model of MVAR using the MW as the explanatory variable.

1. 서 론

전력 수요가 비약적으로 성장함에 따라 안정한 전력 공급과 발전 비용의 감소, 전력 공급의 신뢰도 향상을 위한 여러 가지 시도 및 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있다. 기존의 대부분의 연구들은 유효전력의 예측이나 분석에 중점을 두었고 무효전력에 대한 연구는 전무한 실정이다. 부하의 무효전력은 계통의 전압과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 계통 전압을 관리하고 계통의 신뢰도를 높이기 위해서는 무효전력의 수요예측 또한 중요하다.

따라서 본 논문에서는 우선적으로 부하의 역률 계산에 필요한 유·무효전력의 상관관계를 규명하고, 단기 부하 무효전력 예측을 위하여 유효전력(MW)을 설명변수로 사용하고, 비선형 예측모델을 이용하여 시간별 시진(one-hour ahead) 무효전력 예측 모델을 만들었다. 본 연구를 위해서는 모든 관리처의 전력 수요 데이터가 필요하나 데이터의 관리상 문제점으로 인하여 신인천 변전소의 전력 수요 데이터만을 이용하였고 기간은 2002년 1월~8월까지이며 배전용 무효전력 보상기(Static condenser)의 자료는 신인천 변전소의 조상설비 운전일지를 사용하였다.

2. 본 론

2.1 보상전 부하의 무효 전력 산출(Q<sub>L</sub>)

유·무효전력의 상관관계를 좀 더 명확히 규명하기 위해서는 부하의 보상전 무효전력(Q<sub>L</sub>)산출이 선행된다. 현재 계통 해석 시 적용하고 있는 부하 자료(유·무효 전력 등)는 변압기 2차측(주로 22.9 kV)에만 계기가 부착되었으므로 계측되는 유·무효전력 중에는 배전용 무효 전력 보상기(22.9 kV Static Condenser)의 보상량이 포함되었다. 따라서 보상량을 제한 무효전력은 부하의 순수 무효 전력 소비량이 된다. 154 kV측에서 보상전 무효 전력 산출 과정을 설명하기 위해 대표적인 154 kV 변전소의 개요도를 그림 1에 나타내었고 유·무효전력에 대한 산출 방법은 다음과 같다.

총 유효전력(total active power) :

$$P_T = \sum P_{DM} + \sum P_M = \sum P_{DM} + \sum P_L$$

총 무효전력(total reactive power) :

$$Q_T = \sum Q_{DM} + \sum Q_M = \sum Q_{DM} + \sum Q_L + \sum Q_C$$

부하의 총 무효전력(total load reactive power) :

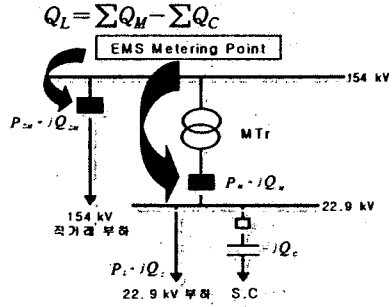


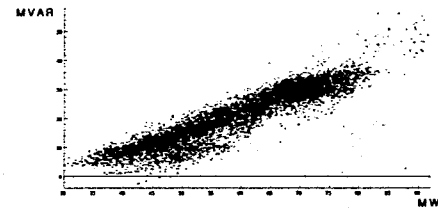
그림 1 154kV 변전소 개요도

2.2 유효 전력과 무효 전력의 관계

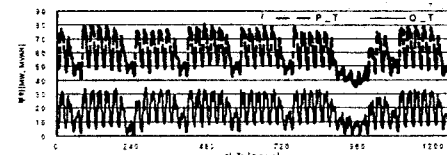
부하의 유·무효전력의 상관관계를 자세히 알아보기 위하여 부하의 유효전력(이하  $P_T$ ) 과 보상전 무효전력(이하  $Q_L$ )의 관계,  $P_T$  과 보상후 무효전력(이하  $Q_T$ )의 관계를 규명하고자 한다.

2.2.1  $P_T$ 와  $Q_T$ 의 관계

두 변수가 어떠한 상관관계를 가지고 변화하는지를 대략적으로 알아보기 위해서 두 변수의 관측치들을 우선도표상에 산점도(Scatter Plot)로 나타내 보았다. 그림 2(a)에 나타나듯이  $P_T$ 와  $Q_T$ 가 positive 선형 관계가 뚜렷한 것을 볼 수 있다. (b)는 2002년 1월부터 2월까지의  $P_T$ 와  $Q_T$  값을 시간에 대하여 나타낸 것으로 두 변수가 유사한 패턴을 보이는 것을 확인 할 수 있다.



(a)  $P_T$ 와  $Q_T$ 의 산점도



(b) 2002년 1월~2월  $P_T$ 와  $Q_T$ 의 추세

그림 2  $P_T$ 와  $Q_T$ 의 관계

두 변수의 관계를 규명하기 위하여 선형 모델을 이용하여 회귀분석 하였고 그 결과는 다음과 같다.

$$Q_T = 0.58846 P_T - 11.606 \quad (0.8413) \quad (0.0119)$$

여기서  $R^2=0.52$ , DW(Durbin-Watson)=0.733, ()는 계수 각각의 SE(Standard Error)값을 나타낸다.

### 2.2.2 $P_T$ 와 $Q_L$ 의 관계

그림 3은  $P_T$ 와 보상전 부하의 무효전력( $Q_L$ )관계를 나타내는 것으로 본 논문에서 예측하게 될 무효전력이기도 하다. 두 관계를 보면 특정 임계치를 기준으로 하위영역(Lower Regime)과 상위영역(Upper Regime)으로 나누어지는 비선형 관계임을 알 수 있고, 그림 2(a)와 비교해서 보면 그림 3의 상위영역만이 보상되는 것을 볼 수 있다.

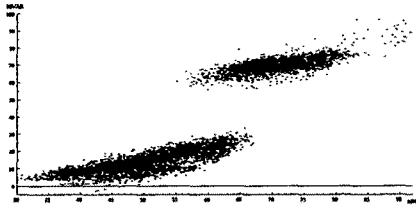


그림 3  $P_T$ 와  $Q_L$ 의 산점도

상위영역을 선형모델을 이용하여 회귀분석 하였고, 그 결과는 다음과 같다.

$$Q_L = 0.5941 P_T + 27.924 \quad (0.0122) \quad (0.86302)$$

여기서  $R^2=0.5127$ , DW=0.726, ()는 각각의 SE값을 나타낸다.

### 2.2.3 회귀 분석 결과의 응용

회귀 분석결과를 토대로 역률과 F.C(Fixed capacitor), S.C(Switched Capacitor)값을 추정하였다. 유효전력과 무효전력을 각각  $x_t$ 와  $y_t^*$ 라 하면, 식(1)처럼 표현된다.

$$y_t^* = \tan(\theta)x_t \quad (1)$$

여기서  $\cos(\theta)$ 는 역률을 나타내고, 시간 t에서 계측되는  $Q_T$ 를  $y_t$ 로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$y_t = y_t^* - (C_0 + C_t) = \tan(\theta)x_t - (C_0 + C_t) \quad (2)$$

여기서  $C_0$ : 고정된 무효 전력

$C_t$ : 시간 t에서의 투입된 무효 전력 보상량

$C$ 는 배전용 무효 전력 보상기 각각의 capacitor 용량을 나타내고 다음과 같이 표현된다.

$$C_t = \sum_{i=1}^{n_s} I_{Ci}^0 \beta_{t,i}; \beta_{t,i} = (0 \text{ or } 1) \quad (3)$$

여기서  $I_{Ci}^0$ : 배전 i번째 capacitor의 정격 용량

$\beta_{t,i}$ : 시간 t에서의 capacitor의 ON/OFF 상태

$n_s$ : capacitor의 개수

아래와 같은 두 가지 방식으로 표현된다.

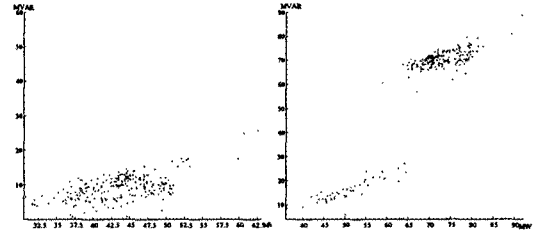
$$y_t = \begin{cases} \tan(\theta)x_t - C_0 & \text{if } \beta_{t,i}=0 \\ \tan(\theta)x_t - (C_0 + I_{Ci}^0) & \text{if } \beta_{t,i}=1 \end{cases} \quad (4)$$

그림 2의 (a)와 그림 3에 상위영역의 회귀분석 결과를 표1에 정리하였다. 수식(6)과 회귀 분석 결과를 비교해 보면  $F.C \approx 27.924$ ,  $S.C \approx 39.53$  MVAR라는 것을 추정할 수 있다.

표 1 그림 2와 그림 3의 회귀 분석 결과

	$\tan(\theta)$	$C_0$	$C_0 + C_t$	평균 P.F
그림 2	0.58846		-11.606	0.862
그림 3	0.59405	27.924		0.859

### 2.3 예측 모델



(a) 0시~8시 산점도 유형 (b) 9시~23시 산점도 유형

그림 4  $P_T$ 와  $Q_L$  시간별 산점도

$Q_L$ 을 예측을 함에 있어, 먼저 각 시간별로  $P_T$ 와  $Q_L$ 의 산점도를 그려보았다. 그림4의 (a)와 (b) 같은 두 가지 형태의 산점도를 보이는데 0시~8시까지 (a)와 같은 형태를 보이고 9시~23시까지는 (b)와 같은 형태를 보인다. 따라서 (a)와 같은 경우에는 일반적인 선형 회귀 분석을 사용하고 (b)와 같은 경우에는 임계치를 기준으로 비선형 예측모델을 설정하였고, 또한 (b)와 같은 경우에는 2단계 예측 모델을 사용하였다. 그 이유는 두 변수가 임의의 임계점을 기준으로 비선형 관계가 존재하므로  $P_T$ 를 예측 할 수 있으면  $Q_L$ 도 예측 가능하기 때문이다.

#### 2.3.1 부하의 $P_T$ 예측 모델

그림 2에서 보여 지듯이,  $P_T$ 와  $Q_T$ 는 선형 관계가 뚜렷함을 볼 수 있다. 따라서 다음과 같은  $P_T$  예측모델을 만들었다.

$$P_T = f(P_{\pi(t-1)}, Q_{\pi(t-1)}) = a_0 + (a_1 P_{\pi(t-1)} + a_2 P_{\pi(t-2)} + \dots + a_i P_{\pi(t-i)}) + (b_1 Q_{\pi(t-1)} + b_2 Q_{\pi(t-2)} + \dots + b_i Q_{\pi(t-i)}) \quad (5)$$

여기서  $P_{\pi(t-i)}, Q_{\pi(t-i)}$ : 유·무효전력의 과거치  
 $t-i$ : 과거 유·무효전력의 시간 시차의 개수

$P_T$ 와  $Q_T$ 의 시간 시차 개수를 각각 96으로 하고, 회귀 분석 한 후 신뢰 수준 5%를 기준으로 그 때의 t-통계치 보다 큰 t-값을 갖는 변수들만 선택하여 다시 회귀

분석한다. 이러한 과정을 반복해서 모든 변수들이 모두 t-통계치 보다 큰 t-값을 갖을 때 그 모델을 선택한다. 여기서 예측된 값을  $\hat{P}_T$ 로 한다.

### 2.3.2 부하의 $Q_L$ 예측 모델

2단계로서  $Q_L$  예측 모델을 설정하였다.  $P_T$ 와  $Q_L$ 에 대하여 각각의 일간 및 시차에 대하여 24시간, 7일로 lag-term을 주었다.

[0시~8시 형태의 예측 모델]

$$Q_L = f(\hat{P}_T, P_{t-i}, P_{d-j}, Q_{t-i}, Q_{d-j}) \\ = a_0 + a_1 \hat{P}_T + (a_2 P_{t-1} + a_3 P_{t-2} + \dots + a_i P_{t-i}) \\ + (b_1 P_{d-1} + b_2 P_{d-2} + \dots + b_j P_{d-j}) \\ + (c_1 Q_{t-1} + c_2 Q_{t-2} + \dots + c_i Q_{t-i}) \\ + (e_1 Q_{d-1} + e_2 Q_{d-2} + \dots + e_j Q_{d-j}) \quad (6)$$

여기서  $\hat{P}_T$ : 예측 유효전력  
t-j, d-j: 과거 부하의 유·무효전력 일간 및 시간 시차개수

[9시~23시 형태의 예측 모델]

$$Q_T = \begin{cases} a \hat{P}_T + b & \text{if } \hat{P}_T > A \\ c \hat{P}_T + d & \text{if } \hat{P}_T < A \end{cases} \quad (7)$$

여기서 A: 임계값(threshold vale)  
 $\hat{P}_T$ :  $P_T$ 의 예측값

비선형 모델에 오차를 가장 작게 하는 임계값 A를 찾아야 한다. 먼저 n개의 임의의 임계값을 선택하여 예측치와 실제치의 오차가 가장 작도록 하는 함수를 구하는 기법인 최소자승법을 이용하여 모든 n에 대하여 하위영역과 상위영역 각각의 계수를 구한다. 세 번째와 네 번째 단계에서는 모든 n에 대하여  $RSS_1$ 과  $RSS_2$ ,  $TRSS$ 와  $Pooled SE$ 를 계산한다. 여기서  $RSS_1$ 과  $RSS_2$ 는 각각의 하위영역과 상위영역의 잔차제곱합(RSS Residual Sum of Squares),  $TRSS$ 는  $RSS_1$ 과  $RSS_2$ 의 합이며  $Pooled SE$ (Pooled standard Error)는 다음 식 (3)과 같다.

$$Pooled SE = (TRSS/자유도)^{0.5} \quad (8)$$

마지막 단계에서는 최소  $Pooled SE$ 값을 갖는 임계값 A를 선정하였다. 모델의 효용성을 검증하기 위하여 예측 부하의 실제 부하에 대한 평균 오차는 식(11)과 같이 시간별 평균 오차 절대값의 합을 평균하여 구한 절대 평균 백분율 오차(MAPE: Mean Absolute Percentage Error, [%])로 정의하였다.

$$MAPE[\%] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Actual(i) - Forecast(i)|}{Actual(i)} \times 100$$

여기서, N: 예측 시간의 개수 (9)

### 2.4 회귀 분석 결과

먼저  $P_T$ 에 대한 회귀 분석 결과는 표 2와 같으며 여기서 구한  $\hat{P}_T$ 를 이용하여  $Q_L$ 에 대한 시간별 예측 회귀 분석 결과는 표 3에 정리하였다. 여기서 구한 MAPE값은 전체 데이터의 10%에 해당되는 관찰치를 가지고 예측한 결과값이다.

표 2  $P_T$ 의 회귀 분석 결과

$R^2$	DW	MAPE[%]
0.9894	2.00	1.6411

표 3  $Q_L$ 의 시간별 예측 모델 결과

시간	최소오차	최대오차	MAPE[%]
0시	0.026344	1.152568	5.213775
1시	0.088871	0.609274	5.347605
2시	0.011027	1.22517	7.048702
3시	0.037244	0.482304	2.550764
4시	0.006013	0.460421	2.905882
5시	0.023683	0.50999	2.937837
6시	0.00806	1.51308	7.2118202
7시	0.040034	1.043	3.96369
8시	0.024797	0.979718	3.403729
9시	0.214982	7.79451	8.383763
10시	0.285131	5.27578	7.5546
11시	0.047855	4.29784	4.571757
12시	0.01845	4.5721	5.606569
13시	0.735426	4.21312	5.44803
14시	0.0204	4.75673	5.869628
15시	0.143378	4.07661	4.345515
16시	0.125532	6.65977	4.219445
17시	0.34632	5.39939	4.045113
18시	0.1523	4.33606	4.121281
19시	0.077761	3.84711	5.341895
20시	0.073545	4.94352	4.247521
21시	0.096222	9.43586	5.835628
22시	0.661526	5.33817	10.12591
23시	0.301105	5.24595	13.49035
평균	0.1486	3.6737	5.5746

## 3. 결 론

유효전력의 공급과 수요뿐만 아니라 무효전력의 공급과 수요 또한 계통의 전압과 아주 밀접한 관계를 가지고 있으므로 계통전압을 관리하고 계통의 신뢰도를 높이기 위해서는 예측된 무효전력 수요에 따라 무효전력 공급계획을 별도로 수립하여 운영해야 한다. 이와 관련하여 본 논문에서는 시간별 유·무효전력의 상관관계를 규명하였고, 그 결과 선형 관계인 시간대와 비 선형 관계가 있는 시간대가 존재하는 것을 입증하였다. 비선형 관계인 시간대에는 임계치가 존재하였으며 대략 56-67 사이의 구간이고 이를 바탕으로 무효전력에 대한 비선형 예측모델을 만들었다. 또한 설명 변수로 유효전력에 대한 예측값을 사용하여 예측력을 높였다.

### [참 고 문 헌]

- Yunho Lee, "Nonlinear Dynamic Models: Applications of Chaos Theory and Threshold Autoregressive Model to Agricultural Prices", Thesis Texas A&M Uni. 1998
- S.Civanlar and J.J.Grainger, "Forecasting Distribution Feeder Loads: Modeling and Application to Volt/Var Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, January 1988
- 한국 전력 거래소, "전력계통 전압운용 및 부하역률 결정방안에 관한 연구", 2002. 7
- M. T Hagan and S. M. Behr, "The Time Series Approach to Short-Term Load Forecasting", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 2, No. 3, pp.785~791, 1987
- Tong, H., "Threshold Models in Nonlinear Time Series Analysis", Lecture Notes in Statistics 21, Berlin: Springer Verlag, 1993