Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No.5, pp. 83~89 September 2004 논문 18-5-12

대규모 전력계통의 부하역률 대표모델 산정을 위한 데이터베이스 구축

(Database Construction to Compute Representative Model of Load Power Factor in Bulk Power System)

조종만* · 이효상 · 이정희 · 김진오**
(Jong-Man Cho · Hyo-Sang Lee · Jung-He Lee · Jin-O Kim)

요 약

최근 전력계통의 대형화와 중조류 설비의 증가 등으로 계통내부에서 소모되는 무효전력 급증에 따라 계통전압 관리차원에서 부하역률 관리의 중요성이 새롭게 대두되고 있다. 따라서 본 논문에서는 최소자승법(Least Square Method)을 이용하여 변압기 무효전력 손실량을 산출하였으며, 유량평균법(Average Flow Method)을 사용하여 부하특성에 따른 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델을 수립하였다.

Abstract

The importance of the Load Power Factor(LPF) management is newly noticed from the voltage management and operation of the power system due to the rapidly increasing reactive power consumed. Therefore, this paper proposes the regional, seasonal and hourly Representative Model of Load Power Factor(RMLPF) considering load characteristics of all 154/22.9[kV] substations. The RMLPF is used to present a precision improvement of power system analysis and security. Computation of representative model of load utilizes the average flow method based on moving average method. The Energy Management System(EMS) data are used as the source to assess the load power factor.

Key Words : load power factor, transformer reactive losses, average flow method, database

1. 서 론

최근 우리나라는 도시의 개발이나 산업의 발전, 생활여건의 향상 등에 따른 전력수요의 지속적인 증가와 전력계통 전력설비의 대용량화 및 냉·난방 부하의 증가 등으로 계통내부에서 소모되는 무효전력 급증에 따라 계통전압 관리와 계통의 신뢰도 차원에서 부하역률 관리의 중요성이 새로이 부각되고 있다.

* 주 저 자 : 전력거래소 중앙급전소 부장
Tel : 02-3456-6870, Fax : 02-3456-6879
E-mail : jongman@kpx.or.kr
** 교신저자 : 한양대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2004년 3월 22일
1차심사 : 2004년 3월 26일
심사완료 : 2004년 4월 19일

계통전압을 관리하고 계통의 신뢰도를 높이기 위해서는 예측된 무효전력 수요에 따라 무효전력 공급계획을 별도로 수립하여 운영하거나 공급 가능한 무효전력량을 지역적으로 검토하여 기준전압을 지역적으로 분류하여 관리해야 한다. 또한 계통의 안정성을 정확하게 해석하기 위해서는 부하역률을 실제적으로 평가하고 지역적으로 평가지수를 수립해야 한다. 부하역률은 부하특성에 따라 상이하므로 이를 충분히 고려하여 평가하고 부하역률 대표모델도 이에 적합하도록 수립해야 할 필요가 있다[3-4].

우리나라 154[kV] 전 변전소를 대상으로 부하역률을 평가하기 위한 자료로는 에너지관리시스템(Energy Management System : EMS) 데이터를 이용할 수 있다. 그러나 EMS 데이터는 배전용변압기의 2차측 데이터이므로 변압기 무효전력 손실량을 고려해야 하며, 또한 배전계통에서 운전된 무효전력 보상량을 제거해야만 한다. 이런 부하역률 관리에 필요한 부하데이터의 취득 및 관리는 매우 중요한 부분을 차지함을 의미한다. 더구나 EMS 데이터는 데이터 관리에 있어 시간이 지남에 따라 막대한 양으로 증가하게 된다. 특히, 저장 시 동일한 데이터가 중복(Minimal Redundancy) 저장 될 우려가 있으며 데이터의 갱신 비용 및 데이터 불일치성(Inconsistency)이 발생하기 때문에 데이터의 효율적인 관리 및 필요한 데이터의 빠른 검색에 있어서 데이터베이스 구축은 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 구축된 데이터베이스를 기반으로 우리나라 154[kV] 전 변전소를 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델을 산정하였으며 윈도우 환경에서 GUI(Graphic User Interface) 응용프로그램인 PDMS(Power Database Management System)을 개발하였다. 또한, 데이터베이스화한 모든 부하역률 자료는 사용자의 감시가 편리하도록 지리정보를 활용하여 시각화하였다.

2. 부하데이터 모델링

154[kV] 모선 부하 유·무효전력을 산정하기 위해서는 각 변전소별 배전용 변압기 1차측 및 154[kV] 전용부하(직거래 고객부하)로 공급된 유·무효전력과 변전소에서 운전된 무효전력 보상량 데이터가 필요하다. 이러한 데이터는 에너지관리시스템(EMS) 및 변전소 운전실적 관리시스템(Substation Operating results Management System : SOMAS)을 통하여 데이터를 얻을 수 있으나, EMS 포인트가 변압기 2차측에 설치되어 있으므로 여기에는 변압기 손실분이 포함되어 있지 않다. 따라서 변압기 손실분을 고려하기 위하여 본 논문에서는 최소자승법을 이용하여 변압기 무효전력 손실량을 산출하였다.

2.1 변압기 무효전력 손실량 산출

일반적으로 변압기 무효전력 손실량의 산출방법은 변압기 내부 임피던스(제작당시의 [%]임피던스)와 변압기 2차측 유·무효전력 데이터를 이용하여 계산한다. 그러나 현장 변전소에서 운전되는 실제 변압기의 내부 임피던스는 변압기 상태(온도, 노화 등)에 따라 달라진다. 따라서 본 논문에서는 그림 1의 배전용 변압기의 구조에서 아날로그 미터에 의해 측정된 데이터를 바탕으로 최소자승법을 이용하여 실제 변전소에서 운전되는 변압기의 무효전력 손실량을 근사화 하였다.

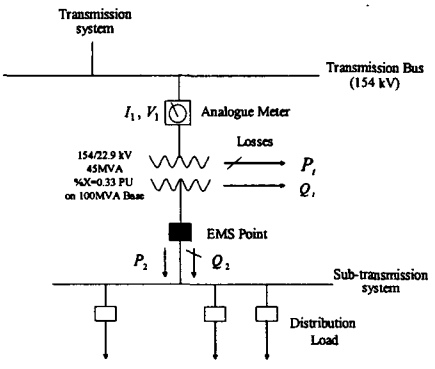


그림 1. 154/22.9[KV] 배전용변압기 구조
Fig. 1. Structure of 154/22.9[KV] distribution transformer

그림 1의 배전용 변압기 구조의 아날로그 미터기 설치점에서 미터기가 측정한 전압과 전류, 유·무효전력을 바탕으로 식 (1)에 의해 변압기 무효전력 손실량 Qt을 구할 수 있다.

$$Q_t = \sqrt{3\,V_1^2 I_1^2 - P_2^2} - Q_2 \quad (1)$$

즉, 그림 1에서 기 측정된 현장 변전소 배전용변압기 1차측 전류와 전압(I_1, V_1), 2차측 유 · 무효전력(P_2, Q_2)의 측정치를 바탕으로 변압기 무효전력 손실량을 계산한다. 그림 2는 서울전력 관리처 관할 도봉 변전소의 M. Tr.#1에서 97[%], 98[%] 각 부하역률의 경우, 변압기 2차측 무효전력을 변화시켜 가며 구한 실측치를 기반으로 변압기 무효전력 손실 특성을 나타내었다.

2.2 최소자승법을 이용한 변압기 무효전력 손실량 산출

일반적으로, 데이터가 $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)$인 경우 식 (2)을 만족하는 a, b를 구할 경우 식 (2)는 식 (3)과 같이 표현이 가능하며, 오차가 최소가 되는 a와 b를 최소자승법(Least Square Method)에 의해 구하면 식 (4)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} y_1 &= ax_1 + b \\ y_2 &= ax_2 + b \\ &\vdots \\ y_n &= ax_n + b \end{aligned} \quad (2)$$

$$Y = AX,\ Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix},\ A = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix},\ X = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (4)$$

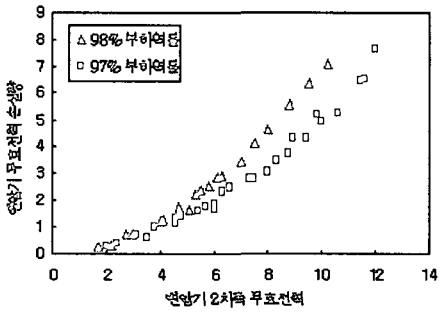


그림 2. 부하역률에 따른 변압기 무효전력 손실 특성
Fig. 2. Characteristics of transformer reactive losses depending on the load power factor

이러한 최소자승법을 이용하여 변압기 무효전력 손실량을 산출하기 위해 본 논문에서는 변압기 무효전력 손실량이 그림 2와 같은 2차 함수 특성을 나타내므로 2차 함수를 갖는 함수로 규정하여 실시하였다. 변압기 무효전력 손실량이 (Q_{21}, Q_{t1}), (Q_{22}, Q_{t2}), $\cdots$, (Q_{2n}, Q_{tn}) 라고 가정하면, 이 때 최소자승법을 이용하여 식 (5)를 만족하는 2차 함수의 계수 α_0, α_1, α_2를 구하고, 마찬가지로 부하역률을 변화시킨 경우 변압기 무효전력 손실량의 데이터를 식 (5)에서 또 다른 계수 β_0, β_1, β_2를 구한다.

$$\begin{aligned} Q_{t(97\%)} &= \alpha_0 + \alpha_1 Q_2 + \alpha_2 Q_2^2 \\ Q_{t(98\%)} &= \beta_0 + \beta_1 Q_2 + \beta_2 Q_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는 식 (6)과 같이 표현 할 수 있고 Q_2^T는 3×n 행렬, Q_2는 n×3, $Q_2^T Q_2$는 3×3행렬이 된다.

$$\begin{aligned} &\alpha = (Q_2^T Q_2)^{-1} Q_2^T Q_t \\ &\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix},\ Q_t = \begin{bmatrix} Q_{t1} \\ Q_{t2} \\ \vdots \\ Q_{tn} \end{bmatrix},\ Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & Q_{21} & Q_{21}^2 \\ 1 & Q_{22} & Q_{22}^2 \\ 1 & \vdots & \vdots \\ 1 & Q_{2n} & Q_{2n}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

그림 2를 바탕으로 식 (5)에서 역률 97[%], 98[%] 각각의 경우 2차 함수 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\alpha_0 = 0.192,\quad \alpha_1 = -0.0186,\quad \alpha_2 = -0.0503$$
$$\beta_0 = -0.0917,\quad \beta_1 = 0.09,\quad \beta_2 = -0.0616$$

따라서 부하역률에 따른 변압기 무효전력 손실량은 식 (7)에 의해 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{t(97\%)} &= 0.0192 - 0.0186\,Q_2 + 0.0503\,Q_2^2 \\ Q_{t(98\%)} &= 0.0917 + 0.09\,Q_2 + 0.0616\,Q_2^2 \end{aligned} \quad (7)$$

최소자승법을 이용한 변압기 무효전력 손실량의 오차를 확인하기 위해 실제 계측한 데이터를 기반으로 구한 변압기 무효전력 손실량과 최소자승법을 이용한 2차 함수를 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3에서 실선은 최소자승법으로 구한 2차 함수

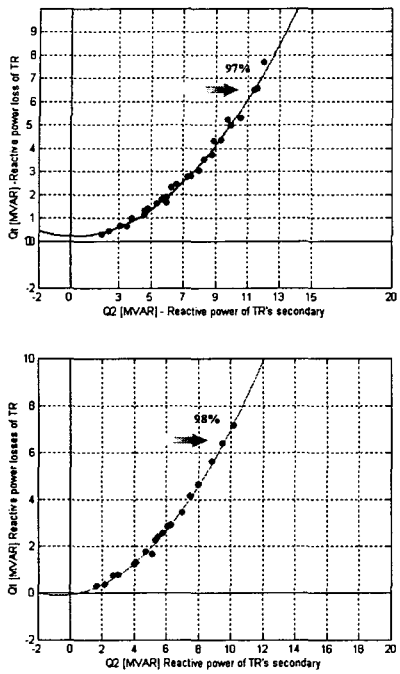


그림 3. 부하역률 97[%]와 98[%] 일 때의 아날로그 미터가 보는 변압기 무효 전력 손실과 최소자승 오차

Fig. 3. Transformer reactive losses measured by analogue meter and error of least square with LPFs - 97[%] and 98[%]

의 그래프이고 "●"은 실제 변압기의 아날로그 미터기에 의해 계측된 데이터를 기반으로 구한 변압기 무효전력 손실량을 표시한 것이다. 그림에서 변압기 무효전력 손실량과 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 변압기 무효전력 손실량의 산출 시 부하역률에 따른 2차 함수의 계수를 먼저 구하고 부하역률에 맞는 2차 함수를 이용하여 부하의 무효전력에 따른 변압기 무효전력 손실량을 산출한다.

2.3 154[kV] 모선 부하 유·무효전력 산출

154[kV] 측에서 유·무효전력 산정 과정을 설명하기 위해 대표적인 154[kV] 변전소 구성도를 그림 4에 나타냈다. 배전용변압기 1차측 유효전력은 변압기 유효전력 손실을 무시할 수 있으므로 $P_{1j} \simeq P_{2j}$로 나타내며, 무효전력은 최소자승법으로 구한 변압기 무효전력 손실량에 2차측 무효전력을 합한 $Q_{1j} = Q_{2j} + Q_{tj}$로 나타낸다[2].

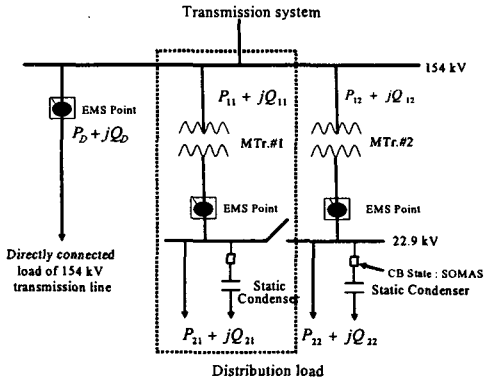


그림 4. 154[kV] 변전소 구성도

Fig. 4. Structure of 154[kV] substation

따라서 최소자승법으로 산출한 변압기 무효전력 손실량과 EMS와 SOMAS에서 계측된 데이터를 적용하여 154[kV] 모선부하 유·무효전력과 역률을 식(8)부터 식(10)으로 계산할 수 있다[5].

$$P = \sum_{j=1}^{n} P_{Ij} + P_D \tag{8}$$

$$Q = \sum_{j=1}^{n} Q_{Ij} + Q_D + \sum_{j=1}^{n} Q_{Cj} \tag{9}$$

$$\cos\theta = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \tag{10}$$

여기서, P, Q는 154[kV] 모선 부하 유·무효전력, P_{1j}, Q_{1j}는 j 변압기의 1차측 유·무효전력, P_D, Q_D는 154[kV] 전용부하(직거래 고객부하) 유·무효전력, Q_{Cj}는 j 변압기의 무효전력 보상량을 말한다.

3. 부하역률 대표모델 개발

3.1 유량평균법

유량평균법(Average Flow Method)이란 데이터를 예측할 때 쓰이는 이동 평균법을 응용한 방법으로 가장 큰 장점은 시계열 데이터로 대표모델을 산정 시 유량(Flow) 범위를 두어서 계산하기 때문에 신뢰성 높은 대표모델을 산정할 수 있으며 가중치를

고려하기 않고도 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델을 산정할 수 있다. 유량 개념을 두는 가장 큰 이유는 부하특성이 지역별, 계정별, 시간대별로 상이하게 추세를 갖기 때문이다.

3.2 부하역□ 대표모델 개발

본 논문에서는 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델을 산정하기 위하여, 전국 9개 관리처를 대표 지역으로 선정하고, 계절별 대표지역과 대표월을 선정하여 대표모델을 산정한 수식은 각각 다음과 같다[1].

$$P_{rsh} = \sum_{d=1}^{n} P_{rhd} \tag{11}$$

$$Q_{rsh} = \sum_{d=1}^{n} Q_{rhd} \tag{12}$$

$$\cos\theta_{rsh} = \frac{P_{rsh}}{\sqrt{P_{rsh}^2 + Q_{rsh}^2}} \tag{13}$$

여기서, r은 9개의 지역(관리처), d는 각 월의 일수, h는 0~23시, P_{rsh}, Q_{rsh}는 지역별-계절별-시간대별 154[kV] 전 변전소의 유·무효전력의 합, $\cos\theta_{rsh}$는 지역별-계절별-시간대별 대표 부하역률을 말한다.

본 논문에서는 그림 5에 나타낸 순서도와 같은 방법으로 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델을 수립하였다.

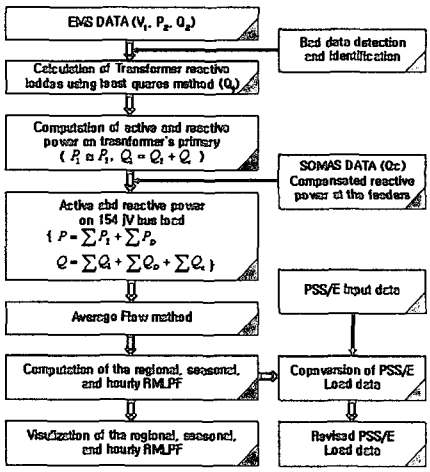


그림 5. 부하역률 대표모델 산정 순서도
Fig. 5. Flowchart of load power factor *representative model*

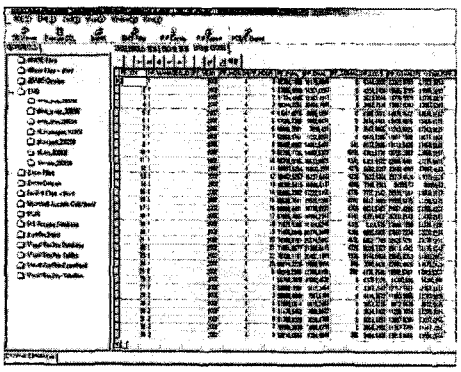


그림 6. 데이터베이스 구축
Fig. 6. Database Construction

4. 데이터베이스 구축

현재 배전용 변압기는 전국에 약 130여만 대가 산재되어 있다. 이 배전용 변압기의 감시 및 진단에 필요한 데이터는 시간이 지남감에 따라 기하급수적으로 증가한다. 특히, 저장 시 동일한 데이터가 중복 저장될 우려가 있으며, 데이터의 갱신 비용 및 데이터 불일치성(Inconsistency)이 발생하기 때문에 데이터의 효율적인 관리 및 필요한 데이터의 빠른 검색에 있어서 데이터베이스 구축은 필수적이라 하겠다. 본 논문에서는 수많은 배전용 변압기로부터 얻어지는 EMS 부하데이터를 관리하기 위하여 데이터베이스를 구축하였다.

부하역률을 산정하기 위한 데이터베이스의 요구사항 분석은 한국 전력 거래소(Korea Power Exchange)에서 관리하고 있는 EMS 데이터에 한전 KDN에서 취득된 데이터의 기능을 추가시켜 부하역률 산정에 필요한 데이터를 통합한 것이다. 데이터베이스 관리시스템은 상용 데이터베이스 프로그램인 MySql을 사용하였다. 데이터의 공유 및 보안유지를 위해 데이터베이스를 계정하였으며, 데이터가 입력될 수 있는 테이블을 구조화하였다. 그리고 취득된 EMS 부하데이터와 SOMAS 데이터 및 변전소 일괄처리명을 입력하였다. 그림 6은 MySql을 사용하여 데이터베이스를 구현한 그림이다.

5. 사용자 인터페이스

최근의 중소형 컴퓨터는 그래픽 기반으로 하는 윈도우형 운영체제가 일반화되어 보다 친숙한 환경을 제공해 주고 있다. 이에 따라 데이터베이스의 사용과 보수를 편하게 하기 위한 환경으로 그래픽 사용자인터페이스의 개발도 중요한 몫을 차지하고 있다. 본 논문에서 개발한 응용 프로그램 전력 데이터베이스 관리 시스템(Power Database Management System : PDMS)은 우리나라 154[kV] 전 변전소를 대상으로 부하역률을 감시하고 관리하기 위해 EMS 데이터를 기반으로 SOMAS 데이터 및 PSS/E 입력 데이터와의 자료연계 기능을 갖는 프로그램으로 PDMS의 Main 화면은 그림 7과 같다.

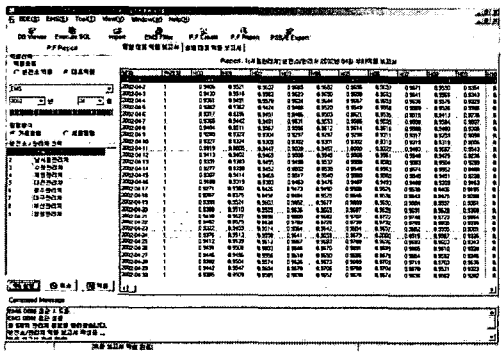


그림 7. PDMS의 Main 화면
Fig. 7. Main window of PDMS

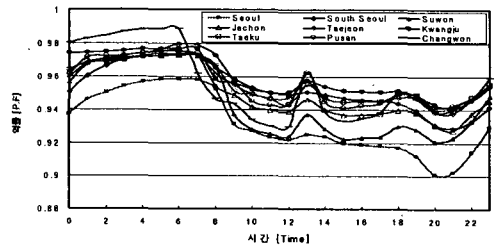
이 PDMS를 통하여 수행할 수 있는 기능을 열거하면 다음과 같다.

- EMS 데이터 변환 및 입력기능
- 데이터 진단 및 추출기능(Query)
- SOMAS 데이터 변환 및 입력기능
- 부하역률 계산 및 보고서 작성 기능
- 데이터 검색, 수정, 분석, 비교기능
- PSS/E Load data 및 엑셀데이터 변환기능
- 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델 시각화

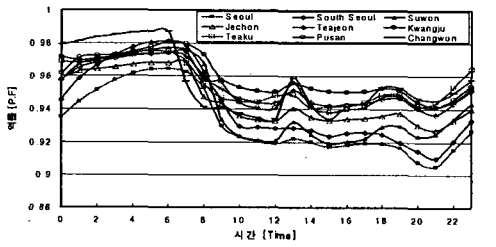
6. 사례연구

구축된 데이터베이스를 이용하여 지역별, 계절별, 시간대별 부하특성에 따른 부하역률 대표모델을 구하였다. 사용된 데이터는 2001년 11월~2002년 10월 EMS와 SOMAS에서 취득된 부하데이터를 사용하였다[6].

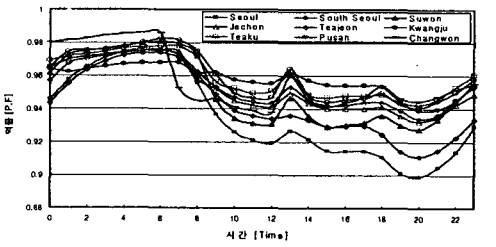
그림 8의 (a), (b), (c), (d)는 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 특성을 나타낸 그림이다.



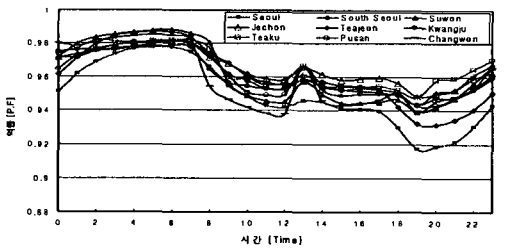
(a) 봄



(b) 여름



(c) 가을



(d) 겨울

그림 8. 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델 특성곡선
Fig. 8. Characteristics curve of regional, seasonal and hourly RMLPF

표 1. 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델 특성
Table 1. Selected characteristics of regional, seasonal and hourly RMLPF

계절	봄	여름	가을	겨울
저역률 시간대	19~21	20~21	19~20	19~20
고역률 관리처	광주	광주	광주	제천,대구
저역률 관리처	서울	서울	서울	서울

표 1은 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델의 특성을 정리한 것으로 계절에 따른 저역률 지역과 고역률 지역 및 저역률 시간대가 다르게 나타남을 알 수 있다.

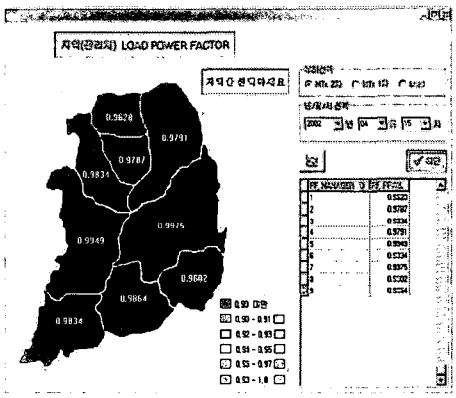


그림 9. 지역별 부하역률 대표모델의 시각화
Fig. 9. Visualization of the regional RMLPF

그림 9은 변압기 무효전력 손실량과 배전모선에서 보상된 무효전력량을 고려한 2002년 4월 15시의 부하역률 대표모델을 시각화하여 나타낸 것이다.

7. 결 론

본 논문에서는 우리나라 154[kV] 전 변전소의 지역별, 계절별, 시간대별 부하역률 대표모델을 수립하였다. 대량의 부하데이터의 효율적인 관리 및 이용을 위해서 데이터베이스의 기능을 도입하였으며 사용자 편의를 위한 GUI 응용프로그램 PDMS을 개발하였다. PDMS 프로그램은 계통운용자의 감시가 편리하도록 부하역률을 시각화였다. 향후 전력시장이 개방된 환경에서 부하역률 대표모델의 특성분석 결과는 전력계통 해석의 정밀도 향상과 계통의 안정성에 관한 자료로서 유용하게 활용될 것이라 사료된다. 마지막으로, 본 논문에서 개발된 PDMS의 기능을 다양화하여 계통의 무효전력을 평가하거나 전압제어 그리고 부하제어에 필요한 다양한 기초데이터를 제공하는 시스템으로 그 용도를 넓힐 수 있는 기능으로 향상시킬 필요가 있다.

본 연구는 한국전력거래소 지원으로 수행된 결과의 일부임.

References

[1] P. Nedwick, A.F. Mistr, Jr, Sr, E.B. Croasdale. "Reactive Management A key to Survival in the 1990s", IEEE Trans. on Power System, Vol. 10, No. 2, May 1995.
[2] So, E. Hanique, E., "In-situ calibration of high-voltage three-phase transformer loss measuring systems", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol 50 Issue 2, pp.422 -425, Apr 2001.
[3] ERCOT, "Proposed ERCOT Reactive Standards", 2001.
[4] NEPOOL, "NEPOOL Operating Procedure No.17-Load Power Factor Correction", Aug 1998.
[5] 안영태 외, "한국 전력 송전계통 보호 데이터베이스 구축", 대한 전기학회 논문집, Vol. 48A, No.7. pp.847-854, 1999.
[6] 한국전력거래소 급전처, "전력계통 전압운용 및 부하역률 결정방안에 관한 연구", Jan 2003.

◇ 저자소개 ◇

조종만 (趙鍾萬)
1959년 7월 27일생. 1986년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1998년 2월 경상대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한양대학교 전기공학과 박사과정. 현 전력거래소 중앙급전소 부장.

이효상 (李孝祥)
1955년 2월 26일생. 1981년 2월 한양대학교 전자통신공학과 졸업. 1984년 동대학 산업대학원 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현 전력거래소 정보기술처 부처장.

이정희 (李正熙)
1975년 8월 25일생. 2001년 2월 세명대 전기공학과 졸업. 2003년 2월 한양대학교 대학원 전기공학과 석사졸업.

김진오 (金鎭吾)
1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전자전기공학부 교수.