

전문가 시스템을 이용한 부하 구성비 추정

김정훈, 임재윤, 이재혁, 김형섭

홍익 대학교 공과대학 전기제어 공과과

Estimation of Load Composition by Expert System

J. H. Kim, J. Y. Lim, J. H. Lee, H.S. Kim
Hong-Ik University, Dept. of Electrical & Control Engr.

< Abstract > The accurate simulation of the static and/or dynamic response of a power system requires detailed knowledge of the behavior of the loads. For the Precise load model, the characteristics and the composition of the load are needed.

In this papers, the reliable estimation method of load composition is suggested intruding knowledge-based system though it used various weekly-reliable survey data.

1. 서론

전력 계통의 구성 요소중 부하의 모델 표현 방법에 따라서 전력 조류계산과 안정도 해석의 결과에 많은 영향을 준다. 그러므로 보다 정교한 부하 모델의 구축이 요구된다. 각 부하의 특성실험에 의해 유도된 개별 부하 모델에 시간별 부하의 구성 비율을 반영하여 합성한 부하 모델을 얻을 수 있는데 이중 각 부하의 시간별 실제 부하 구성비율을 추정하는 데에는 많은 어려움이 있다. 이 이유는 부하 구성비 추정에서 신뢰성이 미약한 각종 자료를 근거로 하기 때문이다. 이에 대한 본격적인 연구는 없으며, 다만 1987년 GE社가 발표한 EPRI보고서[1]를 통하여 부하 구성비 자료가 필요하다는 언급과 함께 각 지역별 자료를 사용한 적이 있고 그의 여러 연구[2,3,4]에서도 그대로 자료만이 인용될 뿐이다. 한편, 전문가 시스템은 전력 시스템 분야의 응용분야를 점차 넓혀가고 있으며, 전력계통에서 보호협조, 부하예측, 계통계획, 무효전력의 운용분야등에 적용을 시도하고 있으나 부하 구성비 추정에 적용한 예는 아직 없었다.

본 논문은 우선 이용 가능한 자료를 가지고 용도별, 계절별, 일형식별, 시간대별 부하 구성비 추정 알고리즘을 FORTRAN으로 개발 하였다. 그러나 이 추정 알고리즘의 입력자료로 사용된 것은 신뢰성이 매우 떨어지는 조사 자료로서 이를 써서 얻은 결과는 신뢰성에 문제가 있게 된다. 이 때 경험적으로 이미 갖고 있는 지식을 사용하여 진단 및 교정할 수 있는 Rule들을 개발하여, 이들을 Rule Base 구축에 편리한 TURBO PROLOG언어로 구현하여 실제 사례에 적용, 신뢰성있고 선택된 부하 구성비를 추정 하였다.

2. 부하 구성비 추정 알고리즘

2.1. 추정목표

부하 구성비 추정문제의 목표는 전국별 또는 모선별 ○년 ○월 ○일 ○요일 ○시 ○○용 부하중 ○○부하군이 차지하고 있는 비율 및 부하 전력을 아는 것이다.

2.2. 추정을 위한 부하의 분류

부하는 다음과 같이 분류한다.

- 용도별 . . . 주거용, 상업용, 증화학공업, 경공업.
- 계절별 . . . 겨울, 여름, 봄·가을.
- 일형식별 . . . 근무일, 월요일, 일요일, 토요일, 공휴일.
- 지역별 . . . 특별시, 직할시, 중소도시, 읍, 면.
- 시간별 . . . 24시간.

용도별 부하는 부하의 구성비율이 높은 부하로 서로 전압 및 주파수 특성이 비슷하고 사용 시간대가 비슷한 부하 종류를 묶어서 대표 부하군을 만들어 추정하였다. 각 용도별 부하의 대표 부하군을 표시하면 다음과 같다. [5,6]

- 주거용 . . . 조명, 냉장고, 에어컨, 취사, T.V, 기타.
- 상업용 . . . 조명, 냉방, 전산, 엘리베이터, 동력, 콘센트 및 단속기기 부하.
- 증화학공업 } . . . 조명, 전열 및 전기화학, 용접 및 기타, 경공업 동력.

또한 동력 부하는 4단계 전동기 등급별로 추정한다.

2.3. 추정을 위한 입력자료

각종 조사된 자료를 통하여 얻을 수 있는 입력 자료는 다음과 같다.

시간대별 부하곡선은 조사 또는 예측된 자료인 용도별 년간 전력 소비량, 월별지수, 일형식별 부하지수, 근무일 시간대별 상대계수, 기타일의 용도별 가중계수로 추정할 수 있는 프로그램을 개발하여 얻을 수 있다.

부하종류별 부하계수는 용도별로 다음과 같은 자료로 구해진다.

- 주거용 대표 부하군별 부하계수 . . . 부하군별 대당 년 평균 사용시간, 대당 년평균 전력사용량, 시간별 사용 대수로 평균에 대한 상대계수로 추정.
- 상업용 대표 부하군별 부하계수 . . . 일조량, 근무계수, 부하곡선 및 조사자료로 추정.
- 산업용 대표 부하군별 부하계수 . . . 부하의 특성, 산업용 조명계수 특징, 산업용 부하곡선 조사자료.

그러나, 각 용도별 부하군 한 가지씩에 대하여는 근거자료의 존재가능성이 희박하여 추정이 불가능하다고 판단된다.

또 부하군별 에너지 계수는 주거용은 지역별, 월별, 부하군별, 대당 월평균 사용량, 지역별 보급률 및 지점·지사 및 변전소별로 수집된 자료로 구해진 전력 사용량을 가지고 산출하였고, 상업용도 상용, 공공용, 호텔등의 에너지 구성비율 조사자료를 근거로 월별로 추정하였으며 산업용은 각 세분류 구성비율 자료를 근거로 추정하였다. [4,5,6] 한편, 전동기 등급별 구성비율은 주거용은 모두 10kWh이하로 추정하였고, 상업용 및 산업용은 각 종류별 조사 자료중 동력설비의 용

량, 가동률 및 부하율을 사용하여 FORTRAN 프로그램에 의하여 산출된다.

2.4. 추정 방법

구성비 추정 방법은 앞에서 언급한 계수 예측이 어려운 부하 전력을 미지변수로 선정할 후 이 부하의 시간별 최대 및 최소값을 자로나 경험에 의하여 정한다. 그 다음 미지 부하 이외의 전력값은 각 부하의 계수에 의하여 시간별로 결정하고, 미지 부하의 전력은 그 시간에서 결정된 부하 전력의 합을 빼면 계산된다. 미지 부하전력의 최대, 최소값의 범위를 위반하면 최대, 최소값으로 정하여 는다. 이렇게 최대, 최소값에 위배된 경우에 결정된 각 부하군별, 시간별 부하전력을 군별로 합하여 보면, 입력된 미지 부하군별 에너지값과 비교하면 일반적으로 일치하지 않게 된다. 그러면 차이가 난 전력량은 미지 부하군의 시간별 전력이 조정가능 최대, 최소 범위를 만족하게 조정함과 동시에 조정한 전력으로 말미암아 그 시간대 부하값이 차이가 나게되므로 두번째 신뢰성없는 부하군의 시간별 전력을 가감하여 그 시간대 부하값이 변동이 되지 않도록 하여준다. 이로써 예측이 어려웠던 부하군의 계수가 구하여지고 아울러 이 다음의 신뢰성이 없는 부하군의 계수도 수정된다. 만약 수정되는 범위가 크면 입력된 미지부하 최대, 최소 값의 추정 에 문제가 있게 되므로 조정하여야 한다.

2.5. 추정 결과

추정 알고리즘에 의한 상업용 3월 부하군의 구성비율, 전력의 크기 및 주요 부하군 계수의 그림은 각각 그림 2.1, 그림 2.2, 그림 2.3 및 그림 2.4와 같다.

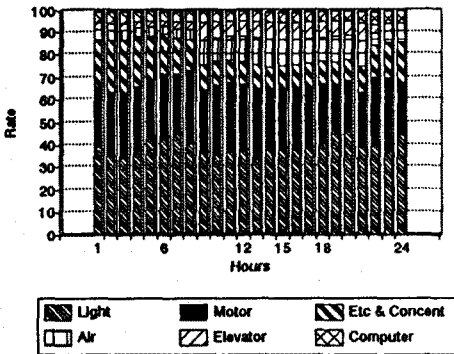


그림 2.1 추정 알고리즘의 부하 구성비 결과

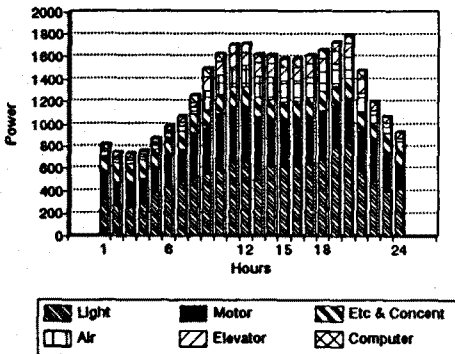


그림 2.2 부하폭선에 기준을 둔 부하 구성비 결과

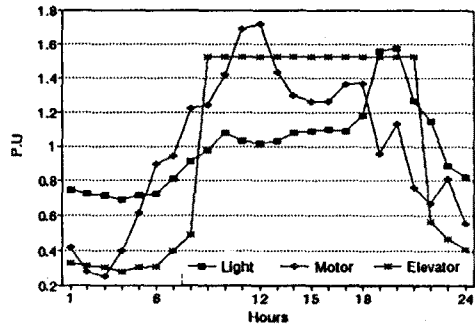


그림 2.3 자료조사에 의한 부하의 상대계수

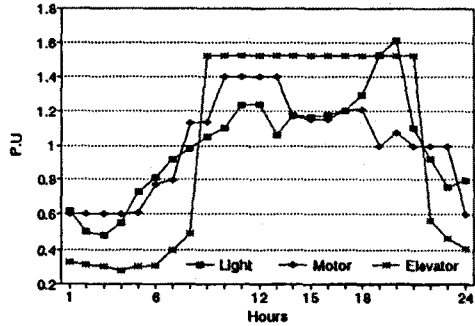


그림 2.4 추정알고리즘 결과로 얻은 부하의 상대계수

추정 알고리즘으로 실제보다 큰 구성비율을 갖는 초기의 동력 부하는 제한하였으나 부하계수가 위의 그림 2.3 및 그림 2.4의 두 그래프에서 보는 바와 같이 실제와는 달리 미끄러지지 못함을 관찰할 수 있다.

3. 부하 구성비 추정을 위한 전문가 시스템의 구성

실제와 차이가 나타난 부하계수의 출현은 입력된 자료의 신뢰성의 미약에서 비롯된 것이므로 이를 보완하기 위하여 전문가 시스템을 도입한다. 본 논문에 사용된 전문가 시스템의 구성은 그림 3.1과 같고, 구성에 필요한 기본요소로는 추정 알고리즘을 통한 입력, 출력 자료를 저장하는 Data Base와 문제를 해결하는데 필요한 전문가 시스템의 지식표현 방법중 하나인 조건 판단문 If - Then 구조로 되어있는 Rule Base 그리고 Rule을 효율적으로 사용하여 신뢰성이 높은 결과를 얻도록하는 추론기관(Inference Engine)이 있으며, 후방향 추론 방식을 취하고 있다. 부하 구성비 추정에 사용된 Knowledge Base는 물리적 법칙이나, 경험적 판단, 공학적 판단 에 근거를 둔 Rule로 구성된다. [8]

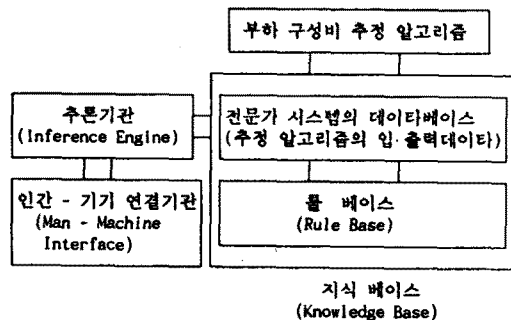


그림 3.1 Expert System의 구성도

4. Knowledge Base 의 구성

Knowledge Base는 전문가 시스템의 가장 중요한 부분이라 할 수 있으며 효율적인 Rule의 구축은 Memory와 시간의 절약을 할 수 있으며 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있도록 한다.

본 논문에서의 Knowledge Base의 구성은 추정 알고리즘을 통하여 얻은 입, 출력 데이터와 부하곡선, 시간대별에 대한 각종 Rule을 기본으로 하였으며, 탐색도중 나타나는 정보 또한 새로운 Fact로 저장된다.

4.1 Data Base의 구축

Knowledge Base를 구성하는 기본요소인 Data Base에는 부하 구성비 추정 알고리즘에 입력되는 입력자료와 출력자료를 기본으로 하여 구성하였다.

Data Base에 저장되는 자료로는 부하곡선, 각 부하군별 상대계수, 부하구성비 추정 알고리즘의 결과로 구성되며, 부하곡선의 경우는 용도별, 일형식별, 시간대별로 구성이 되고, 각 부하군별 상대계수의 경우는 각 부하군별로 부하곡선의 경우와 같이 시간대별로 구성된다. 데이터 베이스에 구성되는 출력 자료는 새로운 초기 계수를 얻기 위해 시간별, 부하군별로 입력되도록 구성하였다. 이들 정보는 부하 구성비 추정을 위한 전문가 시스템을 추론하기 위한 기본적인 정보들이다. 또한 Data Base에는 Rule Base의 구축에 필요한 자료도 저장되며, 진단 Rule에서 기준이 되는 값과 각 부하군의 신뢰도 수준등이 그것이다. 본 논문에서는 각 부하군의 신뢰도 수준을 1부터 5까지의 수로 표현하였다. 1은 가장 불확실한 신뢰도를 나타내고 5는 반대로 가장 확실한 정도를 나타낸다.

4.2 Rule Base의 구축

앞 절에 기술된 데이터베이스를 이용하여 신뢰할 수 있는 부하 구성비율을 얻기 위한 Rule은 부하군의 선정 Rule, 부하군 계수 진단 Rule, 부하군 계수 조정 Rule으로 세분류 할 수 있다.

4.2.1 부하군의 선정 Rule

조정대상 부하군의 선정 Rule은 조정대상이 되는 부하군의 수와 순서를 결정한다.

Rule 1) 부하군의 비율이 전체 전력 사용량의 기준값 $a[x]$ 이하이면 조정대상 선정에서 제외한다. 왜냐하면 전력 사용량이 적은 부하군의 계수조정은 전체 부하구성비에 영향이 적기 때문이다. 즉,

$$E_a < E_r \times (a/100)$$

단, E_a : 임의의 부하군
 E_r : 전체 전력 사용량
 a : Rule 1의 기준값

이런 제외한다.

→ Rule 1)에 의해 전체 부하군중에서 조정대상 부하군의 갯수 N_i 이 결정된다.

Rule 2) Data Base에 구축된 각 부하군의 신뢰도 수준을 근거로 하여 조정대상 부하군의 조정순위를 결정한다.

→ Rule 2)에 의해 N 개의 조정대상 부하군들의 조정 순서가 1부터 N 까지 결정된다. (만약 신뢰도 수준이 같을 경우 전력사용량이 큰 것을 우선 순위로 한다.)

부하군 선정 Rule에서 선정된 부하군은 상대계수의 조정이 가능(Free)하고 나머지 부하군의 상대계수는 고정(Fixed)된다.

4.2.2 부하군의 계수 진단 Rule

Rule 3) 부하곡선의 기울기 부호변화의 갯수와 조정대상 부하군 상대계수 곡선의 기울기 부호변화의 갯수를 진단한다.

전 시간에 대한 부하군 계수곡선의 기울기를 계산하여 부호가 바뀌는 시간의 갯수 N_a 를 알아낸다. 이 갯수가 부하곡선의 기울기 부호변화의 기준 갯수 N_r 이하이면, 그 갯수가 그대로 인정되고 이상이면 Rule 4)를 통하여 Rule 6)에서 조정된다. 즉,

- 경우 1 — $N_r < N_a$.
- 경우 2 — $N_r = N_a$.
- 경우 3 — $N_r > N_a$.

경우 1은 전체 부하곡선의 기울기 변화시간과 부하군 상대계수 곡선의 기울기 변화시간이 일치하는 것은 그대로 인정된다. 일치하지 않는 경우에는 그 시간의 한 시간전후의 기울기 변화점을 조사하여 일치하면 변화점으로 인정한다. (2시간 이상인 경우는 고려하지 않음.) 즉,

$$\begin{aligned} \text{SGN} \left[\frac{\text{LRF}(T) - \text{LRF}(T+1)}{T - (T+1)} \right] &= \text{SGN} \left[\frac{\text{LF}(T-1) - \text{LF}(T)}{(T-1) - T} \right], \text{or} \\ &= \text{SGN} \left[\frac{\text{LF}(T) - \text{LF}(T+1)}{T - (T+1)} \right], \text{or} \\ &= \text{SGN} \left[\frac{\text{LF}(T+1) - \text{LF}(T+2)}{(T+1) - (T+2)} \right] \end{aligned}$$

단, $\text{LRF}(T)$: T 시간대의 부하군 상대계수
 $\text{LF}(T)$: T 시간대의 부하곡선 계수
 SGN : 부호만 취하는 함수

위와 같이 진단된다.

경우 2는 경우 1과 같이 기울기의 부호변화 시간대만 검사하여 2시간이상 차이가 나면 신호를 내주고 그대로 인정한다.

경우 3은 그대로 인정된다.

Rule 4) Rule 3)의 경우 1을 만족하면, 부하군의 상대계수 곡선의 연속적인 기울기 부호변화를 진단한다.

연속적인 기울기의 부호변화 수 $\leq N_c$

단, N_c : 기울기 부호변화의 기준값

이 때, 연속적인 기울기의 부호변화 수가 N_c 보다 작거나 같으면 그대로 Rule 6)을 수행하고, 연속적인 기울기의 부호변화 수가 N_c 보다 크면 기울기 부호변화의 기준값단위로 나누어져 Rule 6)이 수행된다.

Rule 5) 부하군의 상대계수 곡선의 기울기가 부하곡선 기울기의 $b[x]$ 이내인가 진단 한다. $b[x]$ 이내이면 부하군의 상대계수 곡선의 기울기가 부하곡선의 기울기와 유사하다고 볼 수 있다. 즉,

$$\left| \frac{\text{LF}(T) - \text{LF}(T-1)}{T - (T-1)} \right| < \left| \frac{\text{LRF}(T) - \text{LRF}(T-1)}{T - (T-1)} \times \frac{b}{100} \right|$$

단, LRF(T) : T 시간대의 부하군 상대계수
 LF(T) : T 시간대의 부하곡선 계수

이런, Rule 7)에서 계수조정

4.2.3 부하군의 계수 조정 Rule

부하군의 계수 진단 Rule에 위반된 경우는 다음의 계수 조정 Rule을 추론한다.

Rule 6) Rule 4)를 통하여 조정을 필요로 하는 상대계수는 조정구간의 평균기울기와 부하곡선의 기울기 그리고 조사된 상대계수 곡선의 기울기의 영향을 반영하여 조정된다.

먼저, 조정구간의 평균기울기를 구해보면

$$NLRF(c) = \frac{LRF(T) + LRF(T+c)}{(T+c) - (T)}$$

단, NLRF(c) : 조정구간(c)의 평균 기울기
 T : 임의 시간대, 1 ≤ T ≤ 24
 c : 조정시간대 (0 ≤ c ≤ Nc)
 RNLRF(i) = LRF(T) + NLRF(c) × (i-T)

단, RNLRF(i) : 평균기울기를 이용한 i시간의 새로운 상대계수
 i : 상대계수의조정이 필요한 시간 (i-T < c)

결국, 최종적인 i시간의 상대계수는 다음처럼 계산된다.

부하곡선의 i시간에서의 부하군 상대계수 x d = DD

조사된 상대계수 곡선의 i시간에서의 상대계수 x e =EE

RNLRF(i) x f =FF

여기서, d, e, f는 각 상대계수의 가중치

라 하면,

원하는 i시간에서의 새로운 상대계수는

$$\frac{DD + EE + FF}{d + e + f}$$

이다.

Rule 7) Rule 5)에 위반된 경우 부하군의 상대계수 기울기가 부하곡선 기울기의 b[*]이상이면 부하곡선의 기울기와 부하군 상대계수 곡선의 기울기 및 조사된 상대계수 곡선의 기울기의 가중 평균값으로 조정한다.

$$SRF(T) = \frac{2x \left[\frac{LF(T-1)-LF(T)}{(T-1)-(T)} \right] + \left[\frac{LRF(T-1)-LRF(T)}{(T-1)-(T)} \right] + \left[\frac{TF(T-1)-TF(T)}{(T-1)-(T)} \right]}{4}$$

단, SRF(T) : T 시간의 새로운 부하군 상대계수
 LF(T) : T 시간의 부하곡선 계수
 LRF(T) : T 시간의 부하군 상대계수
 TF(T) : T 시간의 조사된 부하군 상대계수

Rule 8) 모든 경우에서 부하군 상대계수의 합은 24이다.

수식으로 나타내면,

$$\sum_{T=1}^{24} k_T = 24$$

단, k : 부하군의 상대계수
 T : 시간 (T = 1, ..., 24)

Rule 9) 신뢰도 수준에 따른 하나의 부하군의 상대계수를 조정할 때에는 조정대상 부하군의 신뢰도 수준을 다시 배열하여야 한다. 즉, 조정이 끝난 부하군은 신뢰도 수준이 N이되고, 조정된 부하군 다음의 신뢰도 수준을 갖는 부하군이 조정대상이 된다.

Rule 10) Rule 9)에 의하여 모든 조정대상 부하군의 상대계수 조정이 끝난 후에, 결정이 된 각 부하군의 상대계수 기울기의 차이가 심한 경우는 그 시간대의 조정 여유분이 있는 조정된 부하군의 상대계수에 의하여 재 조정이 된다.

Rule 11) 미지부하군의 K+1번째 조정계수와 K번째 조정계수의 차이가 오차한계 ε보다 적으면 종료된다.

$$\max_{T=1 \sim 24} \left| COEF_{K+1}(T) - COEF_K(T) \right| < \epsilon$$

5. 전문가 시스템의 실행과정

전문가 시스템을 이용한 부하 구성비 추정 전체적인 흐름은 그림 5.1과 같이 크게 부하 구성비 추정 알고리즘 부분과 전문가 시스템으로 구성되어 있다. 부하 구성비 추정 알고리즘은 효율적인 산술계산을 위하여 FORTRAN으로 작성하였으며, 전문가 시스템은 TURBO PROLOG로 작성하였다.

6. 사례연구

사례 연구결과를 통해 알고리즘의 결과로 나타났던 부하 계수의 날카로운 모양이 매우 완화되었음을 관찰할 수 있었으며, 경사진 부하계수 패턴의 경향을 쫓아가면서 오류가 있는 자료는 교정이 됨을 알 수 있다. 알고리즘에 의해 추정된 계수도 현실에 적용하는데 문제는 없으나 형태 자체에서 나타나는 거부감을 느낄 수 있다. 전문가 시스템을 통하여 얻은 결과는 그림 6.1이다.

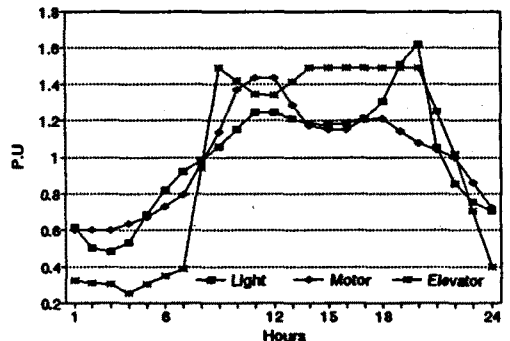


그림 6.1 전문가 시스템을 이용하여 얻은 계수

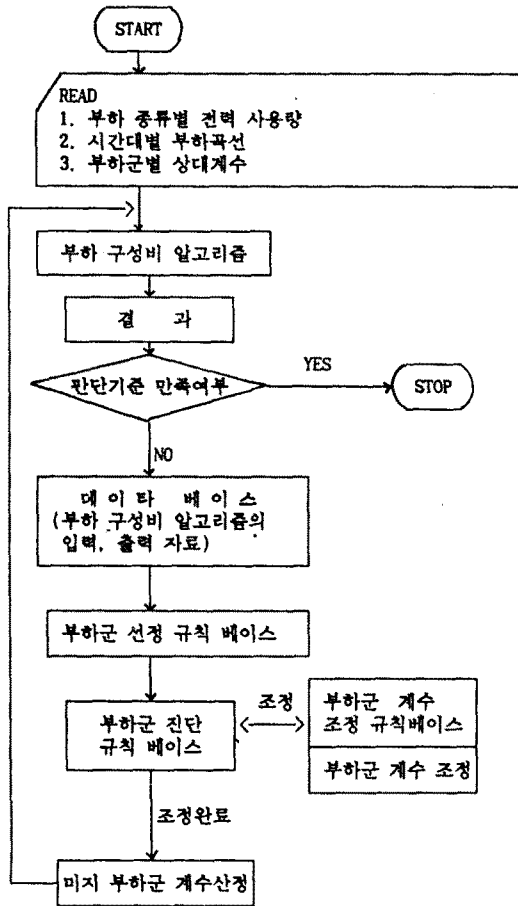


그림 5.1 전문가 시스템의 실행과정

7. 결론

일반적인 알고리즘으로 추정하기 어려운 부하 구성비에 전문가 시스템을 도입 적용한 본 논문의 내용은 다음과 같이 요약된다.

- 일반적으로 적용 가능한 부하 구성비 추정은 기존의 자료와 전문가의 지식을 Knowledge Base 에 저장하여
- 1) 논리적인 부하 구성비 추정 방법을 제시하였다.
 - 2) 부하모델의 구축을 위한 기초자료를 제공하였다.
 - 3) 부하곡선에 시간대별 각 부하군의 신뢰성이 향상된 구성 비율을 얻을 수 있었다.
 - 4) 풍부한 경험과 지식만 제공된다면 보다 객관적이고 신뢰성이 높은 부하 구성비의 추정 가능성을 보였다.

이에 관한 자료는 주거용인 경우 지역별로 분류하여 경제적 환경차에 의한 부하구성의 차이를 보여주었고 경제발전에 의하여 부하구성이 매우 달라질 것도 예견할 수 있으므로 부하예측에도 도움이 될 것으로 사료된다.

[참고문헌]

- [1] G. E. Company, "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", Vol 1-2, 1987.1
- [2] E. Vaahedi, M. A. F. I-Kady, et al., "Load Model for Large - Scale Stability Studies from End - User Consumption", IEEE Trans. Vol. PWR-2, No. 4
- [3] J.R. Ribeiro, F.J.Lange, "A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics", IEEE Trans. Vol. PAS-101, No. 8, Aug. 1982.
- [4] C. Concordia, S. Ihara, " Load Representation in Power System Stability Studies", IEEE Trans. Vol. PAS-101, No. 4, April, 1982.
- [5] 한국 전력 공사, " 가전기기 보급률 조사연구 ", 1987.12
- [6] 한국 전력 공사, "하계 냉방 부하 특성 조사연구", 1989.11
- [7] 에너지 관리 공단, " 대형건물 전력사용 실태 보고서 ", 1987.7
- [8] 문영현, 최병윤, 김세호, " 배전 계통에서의 최적 부하를 위한 전문가 시스템", 1990.9, 대한전기학회 논문집
- [9] T. Taylor, D. Lubkeman, " Applications of Knowledge -Based Programming to Power Engineering Problems", 1987.
- [10] J.R. Ribeiro, F.J. Lange, "A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics", 1982.
- [11] Gupta, Yamada, "Adaptive Short Term Load Forecasting of Hourly Load Using Weather Information", 1972.