수력발전기의 최적 운영계획을 위한 의사결정 지원시스템

(Decision Support System for Optimal Scheduling of Hydropower Units)

이 재 응*

1. 서 론

수력발전기의 최적 운영계획은 유역내 발전효율을 최대화시키는 동시에 전력 수요량 및 다른 운영조건 등의 제약조건을 만족시키면서 어떤 발전기를 어떤 시간에 얼마의 발전량으로 운영할 것인가를 결정하는 의사결정(Decision-Making) 과정이다. 이것은 혼합정수 변수형을 포함한 비선형, 요면형(Nonconvex) 및 다차원의 최적화 문제로 분류된다.

의사결정 지원시스템(Decision Support System, DSS)이란 체계화되지 않은 정보 및 지식을 체계화하도록 도와줌으로써, 기술적인 혹은 관리에 필요한 의사결정을 할 수 있도록 지원하는 컴퓨터 시스템이다. DSS는 모형의 설정, 최적화 방법(Optimization Algorithms) 등과 같은 분석 방법을 이용하여 사용자가 여러가지 대안을 검토하고 효과를 분석하는 등 쉽게 의사결정을 할 수 있도록 지원하는 일종의 복합적인 컴퓨터 모형이라고도 정의할 수 있다.

DSS는 데이터베이스 관리시스템(Database Management System, DBMS), 모형베이스 관리시스템(Model Base Management System, MBMS), 의사교환 관리시스템(Dialog Generation and Management System, DGMS)의 세가지 요소로 구성되어 있다. DBMS는 다양한 자료를 수집한 후 필요한 자료를 신속하고 쉽게 얻을 수 있도록 도와주는 역할을 한다. MBMS는 정해진 분석방법을 사용하여 주어진 문제를 분석하며 의사결정을 위한 여러가지 대안들을 비교, 검토할 수 있는 역할을 한다. DGMS는 사용자와 컴퓨터 시스템을 상호 조정, 연결하는 매개체 역할을 담당하며, DBMS와 MBMS의 입력을 의사결정자(Decision-Maker)로부터 전달받거나 출력을 의사결정자에게 전달하는 역할을 한다. 그림 1은 DSS의 일반적인 세가지 요소간의 상호연관성을 나타낸다.

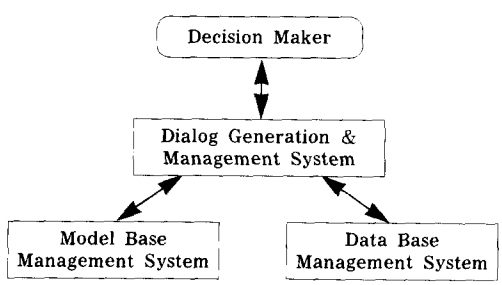

그림 1. DSS의 일반적인 요소

수력발전기의 최적 운영을 위한 DSS는 다음과 같은 특성을 가지고 있어야 한다.

- ○ 운영자가 유역내 모든 수력발전기의 운영계획을 쉽게 세울 수 있도록 지원하여야 한다.
- ○ 수학적 프로그래밍(Mathematical Programming)기법과 같은 복잡한 분석방법을 운영

* 국토개발연구원 책임연구원

자가 쉽게 사용할 수 있도록 하여야 한다.

- ○ 모형구축에 전문적인 지식이 없는 운영자와 사용자도 쉽게 사용할 수 있어야 한다.
- ○ 실제 상황에서 경험하기 어려운 비상사태 등에 대처할 수 있도록 운영자들을 훈련시킬 수 있어야 한다.

2. 수력발전기의 최적운영을 위한 DSS의 구성

2.1 데이터베이스 관리시스템 (Database Management System, DBMS)

본 연구에서는 데이터베이스 관리시스템으로 미 개척국에서 개발된 RAMS(Reclamation Alternative Modular SCADA)가 사용되었다(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1996). RAMS 데이터베이스 시스템은 계층적으로 분류된 데이터베이스 관리시스템이며 사용자가 쉽게 사용하고 운영할 수 있도록 C 프로그래밍 언어 라이브러리를 포함하고 있으며 RAMS의 구조가 그림 2에 나타나 있다. 모든 사용자는 자료를 만들거나 이용할 수 있는데 자료를 만든 사람은 '자료원'(source)으로 표시가 되며 자료를 이용하는 사람은 '자료목적지'(destination)로 표시가 된다. 자료원은 하나일 수 밖에 없으나 많은 사람이 동일한 자료를 이용할 수 있으므로 자료 목적지는 하나 이상일 수 있다. RAMS는 콜로라도강 하류 유역의 수력발전소의 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템과 연결되어 상부조정지 수위, 하부조정지 수위, 발전기의 이용가능성, 방류량 등의 필요한 자료들을 수력발전기의 최적 운영계획을 위한 의사결정 시스템에서 직접 사용할 수 있다.

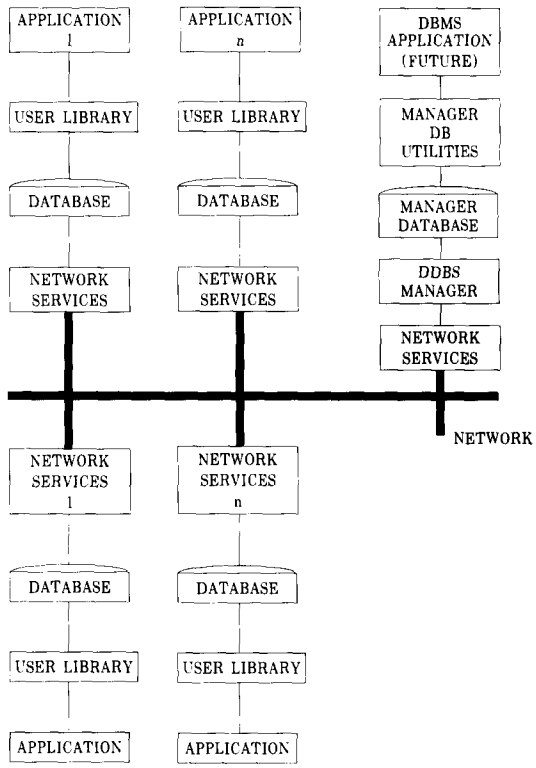

그림 2. RAMS의 구조

2.2 모형베이스 관리시스템(Model Base Management System, MBMS)

동적 프로그래밍(Dynamic Programming, DP) 모형이 모형베이스 관리시스템의 분석모형으로 사용되었다. DP는 최적화 기법 중 가장 널리 사용되는 방법 중 하나로서 문제를 한 단계로 해결하는 대신 여러 개의 단계로 분할하여 차례로 해결하는 기법을 사용한다. DP에 대해서는 여러 참고문헌에서 자세히 설명되어 있으므로 그 해석기법에 대해서는 여기서 다루지 않는다. DP는 비선형, 추계학적, 요면형, 비연속 함수 문제 등을 무리없이 해결할 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면 상태변수(State Variable)의 수가 증가하거나 상태변수를 세밀한 간격으로 분할함에 따라 전산시간이 증가한다는 문제점이 있다(Bellman, 1961). 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 연속가정 DP(Dynamic Programming with Successive Approximations)를 사용하였다(Bellman et al., 1962).

MBMS의 목적은 수력발전기의 최적운영을 통하여 유역내 수력발전소들의 운영효율을 높이는 데 있다. 목적함수는 유역의 효율을 최대화시키는 것으로써 식 (2-1)과 같이 표현된다.

$$E_{total} = 100 \cdot \frac{\sum_{p \in P} \sum_{t=1}^{24} P_{pt}}{\sum_{p \in P} \sum_{t=1}^{24} (Q_{pt} \cdot H_p \cdot 8.46 \times 10^{-5})} \quad (2\text{-}1)$$

여기서, P는 유역내의 모든 수력 발전소, P_{pt}는 t 시간 동안 수력발전소 p로부터의 발전량, Q_{pt}는 t 시간 동안 수력발전소 p를 통해 방류되는 유량, H_p는 수력발전소 p의 총수두로서 이미 알려진 값으로 가정한다.

유역 운영효율의 증가는 다음의 두가지 방법으로 얻을 수 있다. 첫째, 용수공급이 주목적인 수력발전소의 발전량을 최대화시킨다. 용수공급이 주목적인 수력발전소에서는 하류로의 방류량을 일정하게 유지해야 하므로 발전량을 최대화시켜 유역효율을 증가시킬 수 있다. 둘째, 발전이 주목적인 수력발전소의 방류량을 최소화시킨다. 발전이 주목적인 수력발전소에서는 발전량이 일정하므로 방류량을 최소화시켜 유역효율을 증가시킬 수 있다.

수력발전소의 최적운영을 위하여 다음의 중요 제약조건이 만족되어야 한다.

1) 총 발전량 제약조건

   유역내 수력발전기의 발전량은 유역내 총 부하량을 만족시켜야 한다.

2) 용수공급이 주목적인 수력발전소의 발전형태 곡선 제약조건

   용수공급이 주목적인 수력발전소의 발전계획은 주어진 부하곡선의 형태와 일치해야 한다.

3) 발전여유량 제약조건

   갑작스러운 발전기의 고장 등으로 인한 발전중단 가능성을 최소화하기 위하여 발전여유량이 필요하며 부하량을 만족시키는 위험도가 증가함에 따라 발전여유량도 증가시킨다.

4) 방류량 제약조건

   용수공급이 주목적인 수력발전소의 일 방류량 제약조건을 만족시켜야 한다.

5) 불안정 구간 회피 제약조건

   발전기는 불안정 구간에서 작동해서는 안된다. 불안정 구간에서 작동할 경우 발전기의 축이 심하게 떨리게 되며, 발전기에 손상이 갈 수 있다.

6) 최소 작동 및 중지시간 제약조건

   발전기는 일단 작동하기 시작하면 최소한 일정한 시간동안 작동 후 중지해야 한다. 또한 일단 중지하면 역시 최소한 일정한 시간동안 중지한 후 재작동해야 한다. 이것은 잦은 작동과 중지의 반복으로 인한 발전기의 마모와 고장을 방지하기 위한 제약조건이다.

이 외에도 여러 제약조건들이 있으며 이들에 대해서는 Yi(1996)에 자세히 설명되어 있다.

2.3 의사교환 관리시스템(Dialog Generation and Management System, DGMS)

의사교환 관리시스템은 OpenVMS 운영체계하에서 RAMS 응용 프로그램과 C 언어를 사용하여 개발되었다. DGMS는 MBMS의 입력과 출력을 돕기 위하여 전 DSS과정에 걸쳐 자료를 수정하거나 검증한다. 운영자와 모형을 상호 연결함으로써 초보자도 큰 어려움없이 DSS를 사용하도록 도와준다.

사용자가 자료를 입력하거나 수정하면 즉시 MBMS가 실행되며, 그 결과는 DBMS와 DGMS로 보내진다. MBMS의 실행, 중지, 재실행 등이 DGMS에 의하여 이루어지며 DBMS와 MBMS를 조정, 관리하는 기능을 담당한다.

3. 하측 콜로라도강 유역에의 적용예

3.1 하측 콜로라도 강의 수력발전소들의 특성

콜로라도강 유역은 인위적으로 아리조나 주의 리페리를 경계로 상측 콜로라도강 유역과 하측 콜로라도 유역으로 나뉘어져 있다. 하측 콜로라도강은 아리조나 주의 그랜드 캐년에서 시작하여 미국과 멕시코의 경계지점까지 달한다. 하측 콜로라도강 유역에는 세 개의 수력발전소가 있으며 총 발전량은 약 년 50억 kw-hour에 이른다. 후버댐은 하측 콜로라도강의 가장 북쪽에 위치하며 19개의 발전기가 설치되어 총 발전용량은 약 2,000MW이다. 데이비스 댐은 후버 댐에서 67마일 하류에 위치하며 5개의 발전기가 설치됐으며 총 발전용량은 240MW이고, 파커 댐은 데이비스 댐의 88마일 하

류에 위치하며 4개의 발전기가 설치되어 총발전용량은 120MW이다. 후버 댐의 주목적은 수력발전이고, 데이비스 댐과 파커 댐의 주목적은 하류의 용수수요를 충족시키는 것으로 구분할 수 있으며 표 1에 후버, 데이비스, 파커 수력 발전소의 발전기들의 제원이 나타나 있다.

3.2 하측 콜로라도 강에의 적용

미 개척국(U.S. Bureau of Reclamation)에서 콜로라도 강의 저수지, 수력발전소 및 발전기 등의 운영, 관리를 담당하고 있고 서부지역 전력관리소(Western Area Power Administration, Lower Colorado, WALC)에서 하측 콜로라도 유역 발전 시스템의 운영관리를 담당한다. 따라서, 방류량 계획, 발전기 운영계획은 미 개척국 산하의 후버 조정소에서 관리하고 발전계획은 WALC에서 관리한다. 개척국에서 계획된 일 방류량으로부터 발전 가능량을 산정하여 WALC에 제공하면 WALC는 발전 가능량을 조절하여 일 부하량을 만족시키도록 발전계획을 세운다. 이 발전계획을 이용하여 개척

표 1. 하측 콜로라도 강 수력발전소 발전기들의 제원

수력발전소	발 전 기	최소불안정 구간(MW)	최대불안정 구간(MW)	용량(MW)
Hoover	N1	55	80	130
Hoover	N2	50	85	130
Hoover	N3	60	75	130
Hoover	N4	60	75	130
Hoover	N5	65	65	130
Hoover	N6	45	90	130
Hoover	N7	45	90	127
Hoover	N8	60	60	130
Hoover	A1	45	90	130
Hoover	A2	45	90	130
Hoover	A3	65	65	130
Hoover	A4	65	65	130
Hoover	A5	60	75	127
Hoover	A6	55	85	130
Hoover	A7	60	75	130
Hoover	A8	30	30	61.5
Hoover	A9	35	35	68.5
Davis	D1	16	22	48
Davis	D2	16	22	48
Davis	D3	16	22	48
Davis	D4	16	22	48
Davis	D5	16	22	48
Parker	P1	10	12	28
Parker	P2	10	12	28
Parker	P3	10	12	28
Parker	P4	10	12	28

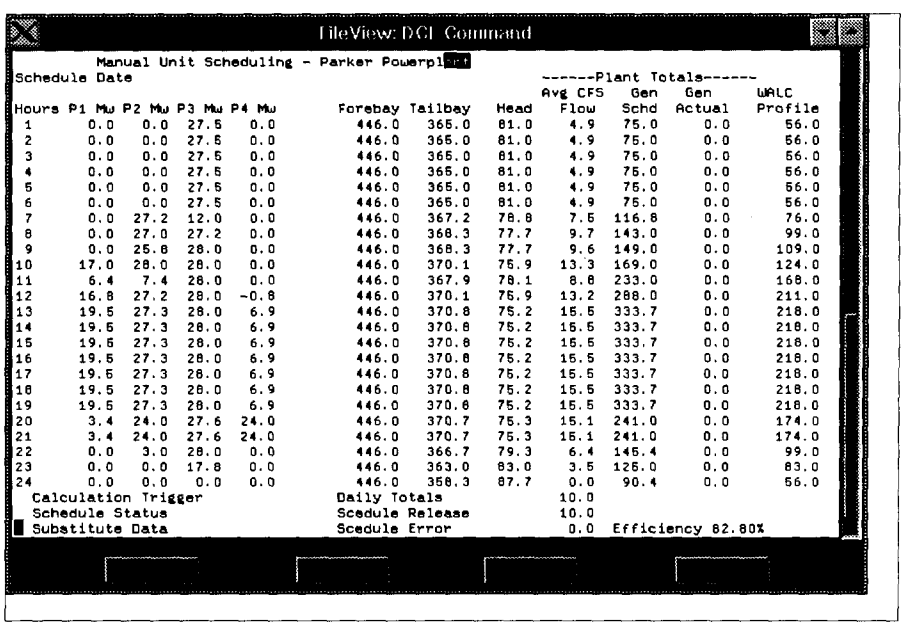

그림 3. 파커 수력발전소 일 발전계획

국에서 DSS를 실행시켜 각 발전기의 운영계획을 세우게 된다. 방류량 계획이나 일 부하량 등이 변화하면 이를 반영하기 위하여 DSS를 다시 실행시킨다.

수력발전기의 최적 운영계획을 위한 DSS는 후버 댐에 설치되어 후버 댐, 데이비스 댐 및 파커 댐의 수력발전기들의 최적 운영계획을 세우고 있다. 그림 3은 DSS시스템에 의해 얻어진 파커 수력발전소 일 발전계획의 한 예이다. 처음 행은 시간을 나타내고 두번째 행부터 다섯번째 행까지는 실재 발전계획을 나타낸다. 여기서, 0.0이라는 숫자는 발전기가 주어진 시간에 발전을 하지 않고 있으며, 음의 수는 발전기가 발전 대신 모터를 돌리고 있음을 표시한다. 여섯번째와 일곱번째 행은 각각 상부조정지와 하부조정지의 수위를 나타내고 여덟번째 행의 수위는 상부조정지와 하부조정지의 수위차이다. 아홉번째 행은 방류량, 열번째 행은 파커와 데이비스 댐의 발전량의 합, 열한번째 행은 실재의 발전량, 열두번째 행은 WALC로부터 결정되는 다음 날의 예정 발전계획이다.

수력발전기의 최적 운영계획을 위한 의사결정 지원시스템을 하측 콜로라도 유역에 적용한 결과 평균 1.8% 유역효율을 높일 수 있었는데 이는 약 년 2백5십만불의 전력수입의 증가를 의미한다.

4. 결 론

수력발전기의 최적 운영계획을 위한 의사결정 지원시스템을 사용함으로써 유역내 수자원의 운영효율을 높일 수 있었으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 수력발전기의 최적 운영계획을 위한 의사결정 지원시스템은 운영자 및 계획자가 적합한 운영계획을 실시간 내에 수립할 수 있도록 지원한다.
2) 하부조정지의 수위를 급격히 변동시키지 않도록 방류량을 조정할 수 있다.
3) 예정된 부하계획이 갑자기 변경되도 즉시 그에 대응하는 운영계획을 수립할 수 있다.
4) 발전여유량 제약조건을 유역효율을 감소시키지 않도록 각 발전기에 분담시킬 수 있다.
5) 하부조정지의 수위를 조정하여 환경관리 등 필요한 제약조건을 만족시킬 수 있다.

참 고 문 헌

Bellman, R. E.(1961). Adaptive Control Process : A Guided Tour, Princeton University Press, Princeton, N. J.

Bellman, R. E. and S. E. Dreyfus(1962). Applied Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, N. J.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (1996). RAMS, Reclamation Alter-native Modular SCADA, Distributed Database System (DDBS) DDBS Interface User's Guide Version 4.0, February, 1996

Yi, Jaeeung(1996) Decision Support System for Optimal Basin-Wide Scheduling of Hydropower Units, Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado ♧