

소양호 시스템조작을 위한

Rule Curve 개발

Development of Rule Curves

for the System Operation of Soyang Lake

유신설계공단 김 계 호

충남대 토목과 권 오 현

1. 서론

저수지 조작은 일종의 의사결정 작업으로서, 의사결정에 기본이 되는 입력으로는 저수지 유입량이다. 그러나 실제 운영에 있어서 유입량의 장기적 예측은 불가능 하다. 이런 여건에서 저수지를 조작하기 위해서 마련되는 것이 Rule Curve 이다.

Rule Curve 는 이수용과 치수용으로 구분되는데, 대체로 시간축(월, 순 또는 일)에 대하여 보존해야 할, 또는 비워두어야 할 저수용량 (또는 저수위)을 과거의 경험에 입각하여 설정함으로써, 계산된 위험한도 내에서 운영해 보려는 방법이다.

그러나 이러한 종래방법보다는 컴퓨터를 활용해서 일종의 computer expert system을 만드는 방법으로 연구, 개발되어야 할 것이다.

이를 위하여 각종 통계자료의 정책 및 과거사례를 기초로하여 의사

결정을 다양한 여건에서 할 수 있어야 되겠으며, 이러한 의사결정역
 상 최종적으로는 냉관리차인 연강에 의하여 과지 검토, 수정 되어야
 할 것 이다.

2. 저수지 조작의 최적화

2.1 평가함수의 설계

본 연구의 주 목표는 발전생산의 최대화 이다. 여기서 수력에너지는
 다음 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_t = 9.81 \cdot \eta \cdot Q_t \cdot H_t \cdot T_t \quad \text{-----(1)}$$

여기서, E_t : t 월중 생산되는 전력량 (KWH)
 η : 합성효율 ($\eta_s \cdot \eta_g$)
 Q_t : t월중 평균사용수량 (cms)
 H_t : t월중 평균유효낙차 (m)
 T_t : t월중 발전시간 (hr)

식 (1) 에서 수차 및 발전기효율을 상수로 취급하면 결국 이 문제는
 $Q_t H_t$ 의 최대화 문제이다. 따라서 $Q_t H_t$ 항을 이산화하면,

$$Q, H, \approx \bar{Q}_R \bar{H}_R + \bar{Q}_R (H, - \bar{H}_R) + \bar{H}_R (Q, - \bar{Q}_R) \\ - \bar{Q}_R H, + \bar{H}_R Q, - \bar{Q}_R \bar{H}_R \quad \text{-----} (2)$$

여기서, \bar{H}_R : 정격낙차 (m)

\bar{Q}_R : 정격사용수량 (cms)

식 (2)에서 \bar{Q}_R 를 월간의 총량으로, \bar{H}_R 를 정격수두일때의 저수량으로 변환하면 식 (3)과 같은 평가함수 (performance measure)를 얻게 된다.

$$J = \frac{1}{2} [\underline{x}(N) - \hat{\underline{x}}(N)]^T V [\underline{x}(N) - \hat{\underline{x}}(N)] \\ + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \{ [\underline{x}(k) - \hat{\underline{x}}]^T Q [\underline{x}(k) - \hat{\underline{x}}] + [\underline{u}(k) - \hat{\underline{u}}]^T R \\ [\underline{u}(k) - \hat{\underline{u}}] \} \triangleq \frac{1}{2} \| \underline{x}(k) - \hat{\underline{x}}(N) \|_V^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \{ \| \underline{x}(k) - \hat{\underline{x}} \|_Q^2 + \| \underline{u}(k) - \hat{\underline{u}} \|_R^2 \} \quad \text{-----} (3)$$

여기서, \underline{x} : $n \times 1$ 상태벡터, 저류수준

$\hat{\underline{x}}$: $n \times 1$ 상태변수 기대벡터, 정격수두의 저류수준

\underline{u} : $m \times 1$ 제어벡터, 방류수준

$\hat{\underline{u}}$: $m \times 1$ 제어변수의 기대벡터, 정격사용수량에 대한

월간 방류수준

V : $n \times n$ 실수 대칭 가중행렬, PSD

Q : $n \times n$ 실수 대칭 가중행렬, PSD

R : $m \times m$ 실수 대칭 가중행렬, PD

k : 이산화된 시간축

N : 최종단계, 조작기간

2.2 시스템방정식 및 제약조건

$$\underline{x}(k+1) = \phi \underline{x}(k) + \Psi \underline{u}(k) + \phi \underline{y}(k) \quad (4)$$

여기서, ϕ : 단위행렬 (In)

Ψ : 저수지의 기하학적 구성을 나타내는 행렬 ($n \times m$)

\underline{y} : 기타입력 벡터

$$\underline{y}(k) = \underline{i}(k) - \underline{d}(k) - \underline{e}(k)$$

\underline{i} : 유입량

\underline{d} : 취수량

\underline{e} : 증발등 손실

제약조건

$$\underline{X}_{\min} < \underline{X}(k) < \underline{X}_{\max}(k)$$

$$\underline{U}_{\min} < \underline{U}(k) < \underline{U}_{\max}$$

2.3 최적제어율

앞에서 기술한 평가함수식 (3)과 시스템방정식 (4)로 확장방정식을 만들면 식 (5)와 같다.

$$J_{\text{mod.}} = J + \sum_{k=0}^{N-1} \{ \lambda^k (k+1) [\underline{x}(k+1) - \phi \underline{x}(k) - \Psi \underline{u}(k) - \phi \underline{y}(k)] \}$$

$$-\frac{1}{2} \|\underline{x}(N) - \hat{\underline{x}}(N)\|_Q^2 + \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2} \|\underline{x}(k) - \hat{\underline{x}}\|_Q^2 + \frac{1}{2} \|\underline{u}(k) - \hat{\underline{u}}\|_R^2 \right) + \underline{\lambda}^T(k+1) [\phi \underline{x}(k) + \Psi \underline{u}(k) - \phi \underline{y}(k)] - \underline{\lambda}^T(k+1) \underline{x}(k) \quad (5)$$

여기서 $\underline{\lambda}$ 는 공액상태벡터라는 미지수로서 변수가 제약조건에 위배될 때 중요한 역할을 하게 된다.

위의 Lagrangian의 초기 및 종기 벡터를 정리하여 Hamiltonian을 만들고 변분을 취하면 다음의 2점 경계치문제로 된다.

$$\begin{bmatrix} \underline{x}^*(k+1) \\ \underline{\lambda}^*(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi & \Psi R^{-1} \Psi^T \\ Q & \phi^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x}^*(k) \\ \underline{\lambda}^*(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi \underline{u} + \phi \underline{y}(k) \\ -Q \underline{x} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)의 차분방정식을 풀기 위하여 식(7)과 같은 형태의 해로서 Kalman의 Riccati 방정식을 만들어 식(8)의 최적제어율을 구하였다.

$$\underline{\lambda}(k) = P(k) \underline{x}(k) + \underline{\alpha}(k) \quad (7)$$

여기서, $P(k)$: $n \times n$ 대칭행렬로서 미지수임

$\underline{\alpha}(k)$: $n \times 1$ 미지벡터

$$\underline{u}^*(k) = F(k) \underline{x}^*(k) + \underline{g}(k) + \hat{\underline{u}} \quad (8)$$

여기서, $F(k) = -R^{-1} \Psi^T \phi^{-1} [P(k) - Q]$
 $\underline{g}(k) = -R^{-1} \Psi^T \phi^{-1} [\underline{\alpha}(k) + Q \hat{\underline{x}}]$

2.4 최소원리에 따르는 보정식

Pontryagin 의 최소원리에 입각하여 해결 한다.

3. Rule curve 및 관리모형

3.1 실시간 조작용위한 Rule Curve 작성

Rule curve 는 유입량을 모르는 상태에서 용수수요, 저수지특성 등을 감안하여 과거의 경험을 토대로 작성 된다. 여기서 과거의 경험이란 최적화된 성과에서 저류량의 시계열(optimal trajectory)과 방류량의 시계열(optimal history)을 뜻하며, 이로부터 공통적 특성을 추출하여 작성된다.

본 연구에서는 조작기간이 비교적 긴 23개년(276개월)의 최적화 성과로서 Rule curve 를 개발하였으며, 11개년의 실적유량으로 소양및 충주댐 Rule curve 를 적용하여 그 효율성을 검증하였다.

Rule curve 는 매월초 기준의 저류량 (X), 년중 월의 위치 (j), 월간 유입량 (Y) 및 월간 중간취수량 (URF) 에 따라 방류량 (U) 이 결정되는데, 이 중 유입량이나 취수량은 상태변수(저류량) 또는 월의 특성에 반영되어, 방류량은 결국 저류량과 월의 함수로 나타났다.

Rule curve 는 크게 $(u-x-j)$ 관계와 $(x-j)$ 로 되며, 유입량의 월분포에 따른 $(x-j)$ 의 자취를 소양호에서는 6개유형, 충주호의 경우에는 5개유형으로 나눌 수 있었다.

3.2 Rule curve 의 효율검정

앞 절에서 작성된 Rule curve 는 7개댐의 최적화 조작에 의한 장기 간 (1918-1940) 의 trajectory로 부터 구한 것 이다.

이와같은 Rule curve 의 실용성 및 그 효율을 알아보기 위하여 Rule curve 개발에 사용하지 않은 소양강댐 실유입량자료 (1974-1984) 와 충주댐 모의조작자료를 입력하여 본 결과 <표1>과 같은 값을 얻었다.

한편 실제적으로 현장에서 Rule curve 를 적용 할 때에는 유입량을 알 수 없으므로 이를 미지의 변수로 하는 조작도 수행되었다.

<표1> Rule curve 효율검정

操作區分	昭 陽		忠 州	
	年間發電量	對 比	年間發電量	對 比
生産實績	418.9	1.00	391.0	1.00
最 適 化	429.3 ~ 1,000	-	492.7 ~ 1,200	
安 定 値	465.0	1.11	572.1	1.46
Rule Curve	464.8	1.11	646.3	1.65

3.3 관리모형의 개요

(1) rule curve 는 두가지 종류로 작성되어 있는데, (X-j) 곡선은 월별로 유지해야할 저수량으로서 다음달 즉 (j+1) 월초에 도달해야 할 저수량의 운용목표를 제시한다.

(2) 한편 (U-X-j)곡선은 월별 저수량에 상응하는 적정사용수량(방류량)을 나타내 주고 있으므로 여기에서는 해당월 (j) 의 사용수량을 결정하여 준다.

(3) 따라서 두 종류의 Rule curve 를 가급적 동시에 만족시키도록 U(j)를 결정해야 한다.

(4) 월유입량은 미지이므로 일단 월별 년평균값을 적용하고 약년 초에 이를 보정토록 되어 있다.

따라서 이 Rule curve 를 운용하는데는 전월동안에 실유입량이 정확히 계량되도록 해야 된다.

(5) 이 Rule 에 의하여 저수지 조작상황을 월중에 수시로 점검 할 경우에는 월평균유입량 대신 측정된 실유입량을 입력함으로써 운영 오차를 줄일 수 있을 것이다.

(6) 일단위의 조작에서는 저수면의 증발손실은 무시해도 된다.

(7) 월별 저수량이나 사용수량은 시계열이 특정한 형태 (Optimal trajectory, history) 와 유사하도록 운영합이 여기서 제시된 Rule curve 의 의의이며 이렇게 하므로써 최적치에 근접 할 수 있을 것이다.