

A Short Term Hydro-Thermal Scheduling using Evolutionary Programming

金宰徹* · 白榮植**

(Jae-Chul Kim · Young-Sik Baek)

Abstract - This paper proposes an efficient method of hydro-thermal scheduling in coordination with head variation and hydraulically coupled plants using Evolutionary Programming(EP). Based on the EP technique, the proposed algorithm is capable of determining the global optimal solutions. The constraints such as power balance condition, water available condition and transmission losses are embedded and satisfied throughout the proposed EP approach. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated on the test systems and compared to those of other method. The results show that the new approach obtains a more highly optimal solutions than the conventional other methods such as newton-raphson method, Dynamic Programming(DP), LU factorization.

Key Words : Head variation, Hydraulic coupled plants, Heights, Discharge, Evolutionary Programming

1. 서 론

수화력 협조(Hydrothermal coordination)문제는 수력 계통이 전력계통의 한 부분일 때 계통의 경제적인 운용에 있어서 해결되어야 할 가장 중요한 문제중의 하나이다. 일정 기간동안 각각의 저수지에서 사용수량 일정제약조건을 만족시키는 수력발전기와 기동정지계획(Unit Commitment, UC)에 의해 선택된 화력발전기와의 어떤 조합이 화력 발전기에서 소요되는 총 연료비가 최소로 되는가 하는 것이 수화력 협조의 핵심이라고 할 수 있다.

화력계통만을 포함한 경제운용에서는 부하와 전력손실, 예비력등이 고려대상이 되지만, 수력 계통을 포함한 수화력 계통에서는 화력계통에서의 고려대상외에 낙차변동, 연결수계(연계), 홍수, 물의 유입량, 지류, 각각의 저수지사이의 물의 시지연 시간, 태풍 및 장마 등의 자연 재해등, 이 밖에도 고려되어야 할 제약 조건이 상당히 많고 화력 계통에 비해 그 해석이 대단히 복잡하다고 할 수 있다.[1,2,3]

전통적으로 수화력 계통의 경제 운용 계획에 관한 기존의 연구는 Dynamic Programming(DP), Newton Raphson Method, Linear Programming(LP)등과 같이 주로 비효율적이고 과다한 계산시간이 요구되었다. 이러한 방법들에 의한 해는 진정한 의미에서 전역적인 값(Global value)이 아니며, 단지 탐색한 해중에서 가장 최적인 값, 즉, 지역적 혹은 국

부적인 값(Local value)이다. 특히, 수화력계통의 경제적 운용을 위한 발전기의 최적의 출력 배분과 같은 문제는 수력 계통으로 인한 수많은 제약조건들로 인해 복잡한 비선형이면서 불연속 및 미분 불가능하게 되는 문제들도 있다. 이러한 문제의 해를 찾는 데 있어서 기존의 방법들은 함수의 연속성 및 미분 가능 등과 같은 조건들을 만족해야 하기 때문에 비효율적이고, 계통이 대형화 되었을 때 응용자체가 아주 어려운 경우가 많다. 따라서, 수많은 제약조건들에 복잡한 비선형 형태로 정식화된 함수에 쉽게 적용될 수 있고, 함수의 연속성 및 미분 가능에 대한 조건이 필요가 없는 탐색 기법이 연구되어야 할 필요가 제기되었다.

본 연구에서는 최근 들어 최적화 문제에서 많이 제시되고 있는 전역적 탐색 기법인 진화 연산(Evolutionary Computation, EC)[4]의 한 종류로서 진화 프로그래밍 기법(Evolutionary Programming, EP)[4-8]을 이용하여 수화력 계통의 경제적 운용을 위한 최적의 배분에 대한 방안을 제시하였다. 수화력 계통을 크게 나누어 낙차 변동과 연결수계를 각각 고려하였을 때, 고려하지 않았을 때의 네 가지 경우로 나누어 시뮬레이션을 수행하여 각각의 경우에 대해서 기존의 방법들과 비교하였고 더 나아가 계통의 전력손실, 저수지 사이의 시지연 시간, 예비력등을 제약조건으로써 부가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 제안한 알고리즘의 실용성을 입증하기 위하여 한전의 실제계를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 보았으며 그 결과를 사례연구에 보였다.

2. 본 론

2.1 진화 연산

진화 연산(EC)은 다윈의 생물학적 진화 원리에 근거를 둔 탐색, 최적화 알고리즘으로서 자연계에서의 진화 원리를

* 正 會 員 : 慶北大 電氣工學科 博士課程 修了

** 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998年 9月 11日

最終完了 : 1999年 7月 16日

구체화하고 그 메커니즘을 소프트웨어로 디자인하고자 개발되었으며 확률론(Probabilistic), 통계학(Stochastic)적인 알고리즘으로 다른 탐색 방법에 비해 매우 강인(Robust)하다는 것이 큰 특징이라고 할 수 있다.[4-8] 또, 다른 탐색 방법이 한점(Single point)으로서 해를 찾는것에 비해 진화 연산은 해의 집단(Population)을 가지고 병렬적인 탐색을 하여 해를 찾기 때문에, 국부적 탐색(Local search)이 아닌 전역적 탐색(Global search) 방법으로써 기존의 방법들에 비해 더욱더 최적에 가까운 해를 찾을 가능성이 더 높다고 할 수 있다.[4-7] 주어지는 목적함수에 대해서 미분, 연속성등 어떤 제한된 가정에 구애받지 않고 단지 목적함수의 값(Fitness)만을 필요로 하기 때문에 계산상으로도 아주 간단하고 메모리의 절감, 수렴성 측면에서도 아주 강력한 특성을 가지고 있다. 또한 확률적 방법에 의한 탐색을 함으로써 전역적해를 탐색하는 한편 강력한 수렴특성을 갖는다.

이러한 진화 연산의 종류에는 Genetic Algorithm(GA), Evolution Programming(EP), Evolution Strategy(ES), Genetic Programming(GP)등이 있다.[4] 이진 코드(Binary code)를 이용하는 GA는 일반적으로 긴 스트링에 대한 인코딩(Encoding), 디코딩(Decoding)절차로 말미암아 많은 시간이 소모될 뿐만 아니라 메모리, 수렴 속도의 저속도 측면에서 문제가 제기되고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 최근에는 이진 코드가 아닌 실 변수를 사용하는 실변수 알고리즘(Real-Variable Genetic Algorithms : RVGAs)이 제시되고 있다. 실 변수(Real Variable) 그 자체를 변수로 사용하는 EP, ES기법들은 GA에서의 인코딩, 디코딩절차가 필요 없으므로 GA보다 계산 시간, 메모리, 수렴측면에 있어서 훨씬 더 좋은 성능을 발휘하고 있다.[4-7]

한편, EP와 ES는 실변수 코딩, 정규분포특성을 갖는 난수를 이용한 돌연변이 연산자의 사용 및 탐색 중 변수의 자기적응 등의 점에서 많은 유사성을 갖는다. 그러나, EP와 달리 ES는 교차연산자를 사용함으로써 더 빠른 수렴특성을 보인다. 한편, 이 모든 기법들이 최근 들어서는 점차 유사해 지는 추세에 있다.

위에서 제시한 진화연산에 대한 각각의 알고리즘을 표1에 간략하게 도시하였다.

표 1 진화연산의 알고리즘

Table 1 The algorithm of Evolution Computation

	GA	EP	ES
절차 1	변수 초기화	벡터표현과 초기화	벡터표현과 초기화
절차 2	적합도 계산	적합도 계산	적합도 계산
절차 3	교차연산	후손개체 생성 부모개체 = 후손개체	후손개체 생성 부모개체 < 후손개체
절차 4	돌연변이	부모, 후손개체 경쟁	부모, 후손개체 경쟁
절차 5		다음세대 부모개체 결정	다음세대 부모개체 결정

2.2 수화력 운용의 정식화

2.2.1 기호법

- F_T : 일정기간 모든 화력발전소에서 소요되는 총 연료비
- $f(P_k^s)$: s 화력 발전기의 k시간의 연료비
- PD_k : k시간 부하
- PTL_k : k시간 전력손실(Power Transmission Loss)
- V_h : h 저수지의 일정기간 동안의 총 사용수량
- $q(P_k^h)$: h 수력 발전기의 k시간의 사용수량
- $\phi(P_k^h)$: h 수력 발전기의 k시간의 출력함수
- $\Psi(h_k^h)$: h 수력 발전기의 k시간의 수위함수
- I_k^h : h 저수지의 k시간의 유입량
- S_h : h 저수지의 면적
- A_h, B_h, C_h : h 저수지의 수위 특성 상수
- \bar{h}_k^h : h 저수지에서의 k시간과 k-1시간 수위의 평균 수위
- $q_k^{h,Pa}$: h수력 발전기의 k시간의 물의 사용수량을 표현하는 부모유전자(Parent genes) 개체
- $q_k^{h,Off}$: 후손 유전자(OffSpring genes) 개체
- $N(0, \sigma^h)$: Gaussian random value

2.2.2 정식화

본 연구에서는 수화력 계통에 대하여 낙차 변동과 연접수계의 조합에 따라 네 가지 경우로 나누어 개개의 경우에 대해 경제적인 운용을 위한 발전기의 최적의 배분에 대하여 방안을 제시하였다. 수화력 계통은 고찰하고자 하는 기간과 수력 계통에 따라 분류가 될 수 있으며 각각의 경우에 따라 고려하고자 하는 제약조건이 조금씩 다르다. 각각의 경우에 따른 수화력 운용의 정식화과정은 다음과 같다.

2.2.2.1 낙차 변동, 연접수계 무시

m개의 화력 발전기와 n개의 수력 발전기로서 수화력계통의 경제적인 운용에 관한 목적함수와 제약조건들을 다음에 나열하였다.

$$\text{Minimize } F_T = \sum_{s=1}^m \sum_{k=1}^{T_{max}} f(P_k^s) \quad (1)$$

$$\text{where } f(P_{sk}) = \alpha_s P_{sk}^2 + \beta_s P_{sk} + \gamma_s$$

우선, 주어지는 시간대별 부하의 크기에 따라 각 발전기들의 출력이 배분되어야 하는 전력 수급 평형 제약조건(Power balance constraint)이 만족되어야 한다.

$$\sum_{s=1}^m P_k^s + \sum_{h=1}^n P_k^h - PTL_k - PD_k = 0 \quad (2)$$

여기서 전력 손실은 B 계수를 이용하여 다음과 같이 표현한다.[1,2,3,9]

$$PTL_k = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} P_i^T B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{m+n} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (3)$$

한편, 각각의 수력 발전소에는 일정 기간 내에 사용할 수 있는 사용수량 일정제약조건(Water availability constraint)

이 정해져 있으며, 이때 주어지는 저수지의 총 사용수량은

$$V_h = \sum_{k=1}^{T_{max}} q(P_k^h) \quad (4)$$

where $q(P_k^h) = \alpha_h P_k^{h2} + \beta_h P_k^h + \gamma_h$

로 주어진다. 단, 주어지는 물의 양은 일정기간내 모두 사용하는 것으로 가정한다. 한편, 사용수량 일정계약조건을 표현하는 또 다른 방법으로서 각각의 저수지에는 초기의 수위 (h_0^h)와 일정기간이 지난후의 마지막 수위(h_{Tmax}^h)가 정해져 있다는 것[1,2]으로 시뮬레이션 결과의 마지막 수위값이 각각의 저수지에 주어지는 마지막 수위와 일치해야 한다는 것으로 초기 저수지 수위와 마지막 수위와의 관계식은 식(5)와 같다.

$$h_{Tmax}^h = h_0^h + \sum_{k=1}^{T_{max}} \frac{I_k^h}{S_h} - \frac{V_h}{S_h} \quad (5)$$

또한, 각각의 발전기의 출력에는 상·하한 제약조건 (Inequality constraint)이 적용이 된다.

$$\begin{aligned} P_{min}^s &\leq P_k^s \leq P_{max}^s \\ P_{min}^h &\leq P_k^h \leq P_{max}^h \end{aligned} \quad (6)$$

2.2.2.2 낙차 변동 고려

낙차 변동을 고려하였을때의 목적함수와 제약조건들은 낙차 변동을 고려하지 않았을때의 경우와 같으며 단지 사용수량 일정 제약조건식이 달라진다.

$$V_h = \sum_{k=1}^{T_{max}} q_k^h \quad (7)$$

$$q_k^h = \phi(P_k^h) \psi(\bar{h}_k^h) \quad (8)$$

수식에서도 알 수 있듯이 매 시간대에서 사용수량은 식(4)와는 달리 수력 발전기의 출력에 관한 함수와 수위에 관한 함수로 이루어져 있음을 알 수 있다.

$$\phi(P_k^h) = \alpha_h [P_k^h]^2 + \beta_h [P_k^h] + \gamma_h \quad (9)$$

$$\psi(\bar{h}_k^h) = A_h [\bar{h}_k^h]^2 + B_h \bar{h}_k^h + C_h \quad (10)$$

where $\bar{h}_k^h = (h_k^h + h_{(k-1)}^h) / 2$

매시간 저수지수위에 관한 식, 수위 연속방정식(Height continuity equation)은 다음과 같다.

$$h_k^h = h_{(k-1)}^h + \frac{I_k^h}{S^h} - \frac{q_k^h}{S^h} \quad (11)$$

2.2.2.3 연접수계 고려

연접수계만을 고려할 경우에 있어서도 목적함수는 변함이 없으며 방류량에 대한 표현식은 수식(4)와 같다. 그리고, 수력계통이 하나의 단일수계에 서로 연이어 접하고 있으므로 각각의 저수지는 상류 저수지에서 방류하는 물의 양에 영향을 받는다. 따라서, 낙차 변동을 고려하였을 때의 수위 방정식에서 상류로부터의 방류량에 관계되는 항이 첨가가 된다. 그러므로 h 저수지의 k시간에 있어서의 수위(h_k^h)는 다음

수식과 같다.

$$h_k^h = h_{(k-1)}^h + \frac{q_{k-1}^{h-1}}{S^h} + \frac{I_k^h}{S^h} - \frac{q_k^h}{S^h} \quad (12)$$

여기서 h 는 상류로부터 h 번째 저수지임을 의미한다. 한편, 현실의 연계 계통에서는 저수지와 저수지 사이에는 어느 정도 물이 이동하는데 시간이 소요된다.[1,2,3] 이를 시지연 시간이라 하며 연계 계통에서 고려해야 할 중요한 요소라고 할 수 있다. 여기서는 시지연 시간을 임의의 상수, Delay로 고정시켜 놓고 생각을 한다. 이제까지는 상류 저수지에서 k시간에 방류한 물의 양이 다음 저수지의 k시간에 바로 유입되도록 생각해왔었다. 그러나, 시지연 시간을 고려할 때는 그 시간에 바로 유입되지는 않는다. 즉, h-1저수지에서 k시간에 방류한 물의 양은 다음 저수지, 즉, h저수지의 k+Delay시간에 유입된다는 것으로 현실적인 수계의 상황을 나타내었다. 이를 수식으로 표현해 보면 다음과 같다.

$$h_k^h = h_{(k-1)}^h + \frac{q_{k-Delay}^{h-1}}{S_h} + \frac{I_k^h}{S_h} - \frac{q_k^h}{S_h} \quad (13)$$

단, 최상류 저수지에(h=1)로의 유입량은 전체 유입량을 일정기간(Tmax)으로 나눈 양이 일정하게 유입되는 것으로 하고 Delay가 없는 것으로 가정하였다.

2.2.2.4 낙차 변동, 연접수계 고려

지금까지는 낙차 변동과 연접 수계를 각각 고려하여 생각해 보았고, 두가지 경우 모두를 동시에 고려하였을 때를 생각해 보기로 한다. 우선, 목적함수는 변함이 없으며 방류량 표현식은 식(8)과 같다. 낙차 변동만을 고려하였을 경우에는 기존의 방법과 비교를 원활히 하기 위해 평균 수위를 가정하였지만 여기서는 k시간의 저수지의 수위를 바로 사용하기로 한다. 따라서, 식(8)은 다음과 같이 변형된다.

$$q_k^h = \phi(P_k^h) \psi(h_k^h) \quad (14)$$

where $\psi(h_k^h) = A_h [h_k^h]^2 + B_h [h_k^h] + C_h$

그리고, 각각의 저수지의 수위는 현실의 수력계통과 마찬가지로 시지연 시간을 고려하였다. 한편, 각각의 발전기에는 매 시간마다 예비력이 정해져 있어서 다음의 조건식을 만족하여야 하며 본 연구에서 매시간의 예비력은 부하의 10%로 가정하였다.

$$\sum_{s=1}^m (P_{k,max}^s - P_k^s) + \sum_{h=1}^n (P_{k,max}^h - P_k^h) \geq R_k \quad (15)$$

3. 제안한 방법

여러 연구에서도 수화력 경제 운용에 있어서 해를 구하는 과정은 화력, 수력 부분의 2개의 독립된 부분으로 나누어 해를 구하고 있다. 즉, 수력 부분에서는 사용수량 일정계약조건에 관한 해를 찾고, 화력 부분에서는 구해진 수력 발전기의 출력들과 더불어서 전력 수급 평형 제약조건을 만족시키는 해를 찾는다. 전력 손실 역시 화력 부분에서 담당하고 있다. 본 연구에서는 수력 부분에서 각 수력 발전기의 매시간 물의 사용수량을 유전자개체로 표현한 후 EP를 적용하

여 수화력 경제 운용에 관한 해를 구하였다. 그림1에 진화 프로그래밍의 알고리즘을 보였다.

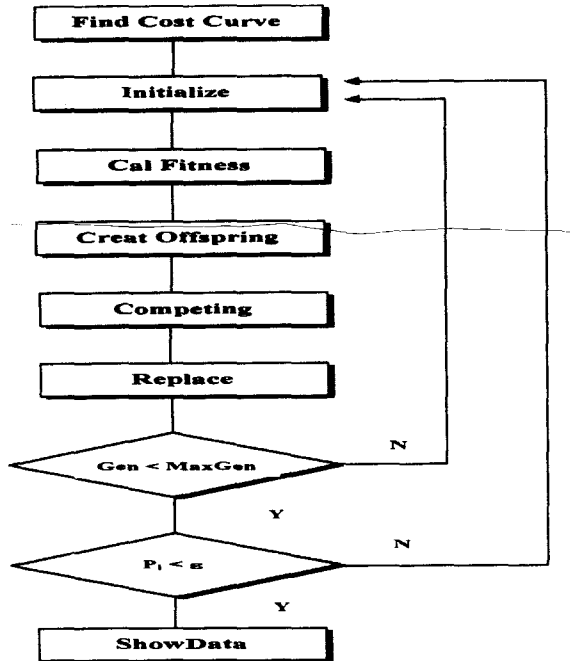


그림 1 진화 프로그래밍 알고리즘
Fig. 1 The algorithm of evolution programming

3.1 Find Cost Curve

진화되는 유전자개체 하나하나의 적합도(Fitness)를 구하고자 할 때 매 시간, 매 Generation마다 구한다면 아주 많은 시간이 소요된다. 따라서, 여기서는 먼저 m개의 화력 발전기 연료 곡선으로부터 그림 2와 같이 하나의 연료비 곡선을 구한다.

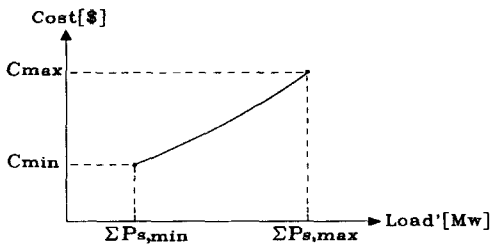


그림 2 연료비 곡선
Fig. 2 The Fuel Cost Curve

그림에서 $\sum P_{min}^s$, $\sum P_{max}^s$ 는 주어지는 각각의 화력 발전기들의 출력 상하한값들의 합을 말하며 $[\sum P_{min}^s, \sum P_{max}^s]$ 구간을 미소의 구간[Del]으로 나누어 $\sum P_{min}^s$ 부터 차례로 Del씩 증가시켜 가면서 해당하는 연료비를 λ 반복법을 이용하여 곡선을 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 곡선이 선형에 가까운걸 알 수 있지만 미소의 구간으로 본다면 거의 선형으로 볼 수 있다. 따라서, 미소구간내에 해당하는 연료비는 선형적인 성질을 이용해서 쉽게 구할 수 있다.

Cmin, Cmax는 각각 최소, 최대의 연료비를 말하며 매 시간 연료비는 반드시 [Cmin, Cmax]사이에서 있게 된다. 그리고, Load'는 식(16)과 같이 매 시간 주어지는 부하로부터 해당 시간의 n개의 수력 발전기의 출력의 합을 뺀 양으로서 화력 발전기 부분에서 담당해야할 양을 의미하며, 진화되고 있는 유전자개체 하나하나의 적합도를 구할 때는 연료비 곡선으로부터 바로 읽어서 구하도록 하여 알고리즘을 수행하는데 있어서, 특히, 적합도를 계산하는데 있어서 아주 용이하도록 하였다.

$$Load_k = Load_k - \sum_{h=1}^n P_k^h \quad (16)$$

3.2 Initialize

구하고자 하는 변수, 즉 수력발전기들의 매 시간 사용수량(q_{hk})을 유전자 개체로 표현한 다음 각각의 개체에 주어지는 상하한 제약조건내에서 식(17)과 같이 임의로 선택해서 초기화시킨다.

$$q_k^{h,Pa} = q_{min}^h + P \times (q_{max}^h - q_{min}^h) \quad (17)$$

각각의 경우에 있어서 q_{min} , q_{max} 는 저수지의 수위의 유무에 따라 달라지며 다음과 같다.

a) 저수지 수위 무시

$$\begin{aligned} q_{min}^h &= \alpha^h [P_{min}^h]^2 + \beta^h [P_{min}^h] + \gamma^h \\ q_{max}^h &= \alpha^h [P_{max}^h]^2 + \beta^h [P_{max}^h] + \gamma^h \end{aligned} \quad (18)$$

b) 저수지 수위 고려

$$\begin{aligned} q_{min}^h &= \Phi(P_{min}^h) \Psi(h_{Tmax}^h) \\ q_{max}^h &= \Phi(P_{max}^h) \Psi(h_0^h) \end{aligned} \quad (19)$$

초기화시키는 과정에서 만족해야 하는 두 가지 제약조건은 다음과 같다.

1. 전력 수급 평형 제약조건(Power balance constraint)

주어진 부하에서 수력 발전기 출력의 합(SumPa)을 뺀 양(PaVar or Load')이 화력 발전기들의 출력 하한값의 합($\sum P_{min}^s$)과 출력 상한값의 합($\sum P_{max}^s$)사이에서 있어야 한다.

$$\sum P_{min}^s \leq PaVar \leq \sum P_{max}^s \quad (20)$$

2. 사용 수량 일정제약조건(Water availability constraint)

일정기간(Tmax)내에서 임의의 시간(Dtime)을 정해서 주어진 물의 양(V_h)에서 Dtime을 제외한 시간들의 사용수량과의 차이로부터 Dtime의 사용수량을 구하여 주어지는 물의 양과 일치하도록 한다.

$$q_{Dtime}^{h,Pa} = V_h - \sum_{k \neq Dtime}^{Tmax} q_k^h \quad (21)$$

언어진 사용수량값들로부터 매 시간 출력은 다음 식들로부터 구할 수 있다.

a) 저수지 수위 무시

$$\alpha_h [P_k^h]^2 + \beta_h [P_k^h] + \gamma_h = q_k^h \quad (22)$$

b) 저수지 수위 고려

$$\alpha_h [P_k^h]^2 + \beta_h [P_k^h] + \gamma_h = q_k^{h,Pa} / \Psi(h_k^h) \quad (23)$$

3.3 Cal Fitness

A 과정에서 구한 연료비 곡선으로부터 초기화된 각각의 유전자 개체의 적합도 값을 구한다. 미소구간내에서 선형적인 성질을 이용하여 적합도 값을 구하는 과정은 다음의 예와 같다.

ex. if PaVar[Time]=123.45 and Del=1 Then
 Cost[123.45]=Cost[123]+0.45*(Cost[124]-Cost[123])

3.4 Creat OffSpring

부모 유전자개체로부터 식(24)과 같이 Gaussian random variable을 더해서 후손 유전자개체를 생성한 다음 후손 유전자개체들의 적합도 값을 구한다. Initialize부분과 마찬가지로 두 가지 제약조건을 만족하면서 후손 유전자개체를 생성시킨다.

$$q_k^{h, Off} = q_k^{h, Pa} + N(0, \sigma^h) \quad (24)$$

where $\sigma^h = \beta \times \frac{f_h}{f_{min}} (q_{max}^h - q_{min}^h)$

3.5 Competing

부모 세대 N개의 집단과 후손 세대 N개를 합한 총 2N개의 집단에서 하나의 유전자개체를 선택해서 나머지 2N-1개의 집단에서 N개를 임의로 선택한 후, 처음 선택한 것과 목적함수를 비교하여 몇 번 나은 목적함수의 값을 가지는지 그 횟수를 기억한다. 이 같은 과정을 총 2N개의 집단에 대해 수행한다.

3.6. Replace

각 유전자마다 기록된 점수로부터 차례대로 많은 점수를 얻은 N개의 유전자들을 다음 세대의 부모 유전자로 선택한다.

3.7. $P_i < \epsilon$

구해진 각각의 최적의 출력으로부터 식(3)을 사용하여 전력손실을 구한 다음 주어진 부하값에 손실양을 더해 다시 진화 알고리즘을 수행하여 반복회수(Iteration)사이의 최적의 해가 변화가 없을 때까지 반복한다는 것이다. 즉, 두 번째 진화 알고리즘 수행시부터는 첫 번째 알고리즘의 수행에서 얻어진 가장 최적의 해에 대한 전력손실양을 부하의 양에 더해서 실행한다는 것이다.

이상의 알고리즘을 이용해서 사례 연구에 그 결과를 제시하였다. 먼저 낙차 변동과 연접수계를 무시했을 때의 경우를 기존의 방법과 비교·검토한 후, 각각을 고려했을 경우와 동시에 고려했을 경우에 대해 시뮬레이션 하였다. 단, 유입량은 일정상수로 생각하여 시뮬레이션 중에는 0으로 가정하였다.

4. 사례 연구

4.1 낙차 변동, 연접 수계 무시(전력 손실 고려)

수화력 협조 문제에서 가장 기본적인 문제로 사례계통은 참고 문헌[9]의 계통으로써 시뮬레이션을 수행하였다. 그림

3은 제안한 방법으로써의 수렴 특성을 보인 것으로서 140~150 세대에서 수렴하고 있음을 알 수 있다. 표2에 참고 문헌[9]에서 제시한 기존의 방법들과의 비교에 제안한 방법으로써의 결과를 첨가하여 그 결과를 비교하였다. 표2에서 알 수 있듯이 제안한 방법으로써의 결과가 기존의 방법들보다 좋은 결과를 얻고 있음을 알 수 있다.

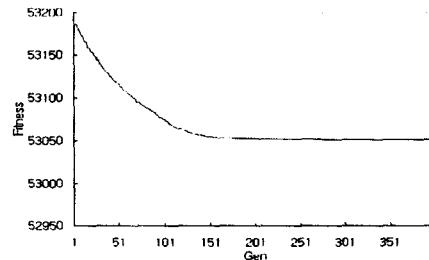


그림 3 수렴 특성

Fig. 3 The convergence characteristics

표 2 기존의 방법과의 연료비 비교

Table 2 Fuel cost comparison of other methods

화력 2기, 수력 2기	Cost	Error
Newton's Method[9]	53125.38758 \$	$0.45 \times e^{-4}$
Progressive Optimality[9]	54504.53645 \$	0.0001
LU Factorization[9]	53051.47631 \$	$1 \times e^{-9}$
Newton's Method (B 계수 수정)[9]	53051.47 \$	$1 \times e^{-27}$
제안한 방법	53051.47 \$	$1 \times e^{-27}$

4.2 낙차 변동 고려, 전력 손실 무시

낙차 변동을 고려한 수화력 협조 문제의 경우 참고 문헌 [10]의 사례계통을 참고하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4에 각각의 발전기들의 부하에 따른 출력 배분결과를 제안한 방법으로 수행하여 그림으로 나타내었다. 표3은 참고 문헌[1]에서 제시한 Newton-Raphson Method의 연료비와의 비교를 나타내었다. 표3에서 알 수 있듯이 제안한 방법으로써의 결과가 기존의 방법으로써의 결과보다 우월하다는 것을 알 수 있다.

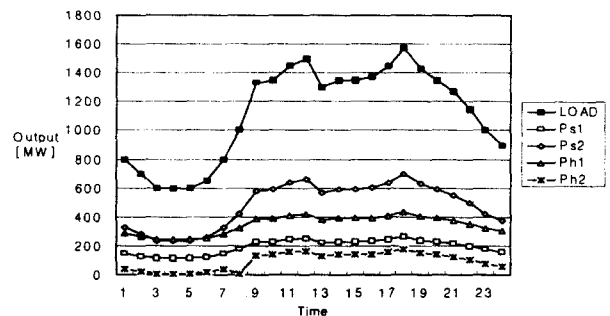


그림 4 발전기들의 출력 곡선(낙차 변동고려)

Fig. 4 The output curves of generators (Consider height variation)

표 3 제안한 방법과의 연료비 비교
Table 3 Cost comparison of proposed method

전체 연료비	62938.43 [\$]	62849.6 [\$]
--------	---------------	--------------

이상의 사례계통으로써 진화 프로그래밍(EP)을 이용한 알고리즘이 전역적인 해(Global value)를 찾는데 있어서 기존의 방법보다 우수함을 검증하였고 본 연구에서는 더 나아가 전력 손실과 연결 수계에서 필요한 제약조건들을 첨가하여 시뮬레이션을 수행하였다.

4.2.1 낙차변동 고려, 전력 손실 고려

참고 문헌[10]의 사례 계통에 본 연구에서는 전력 손실까지 고려하여 수화력 경제운용의 범위를 더 확장하고자 하였다. 언급한 바와 같이 전력 손실은 제한한 알고리즘의 마지막 부분에서 고려하여 첫 번째 반복회에서 얻어진 가장 최적의 해에 대한 전력손실의 양과 부하의 양을 더하여 다시 알고리즘을 수행하고 있다. 본 연구에서 여러 데이터들으로써 시뮬레이션을 수행해본 결과로는 반복회수가 2회를 넘어서부터는 해의 값에 변화가 거의 없었으며 그 결과도 기존의 방법에 비해 우수하다는 것을 낙차 변동을 고려한 사례계통에서 제시하였다. 그림 5는 낙차 변동을 고려하였을 때 더 나아가 전력 손실을 고려한 경우로 확장을 하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 그림 5에서의 첫 번째 곡선은 주어진 부하값과 전력 손실의 값을 더한 곡선을 나타내고 있다.

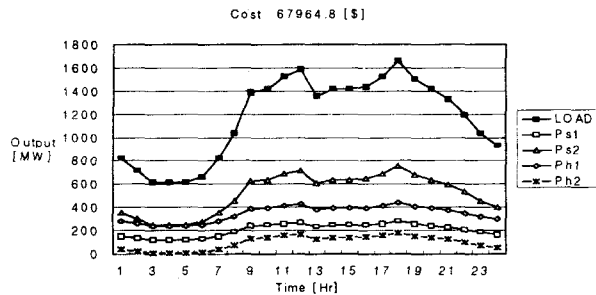


그림 5 발전기들의 출력 곡선(전력손실 고려)
Fig. 5 The output curves of generators(Consider loss)

4.3 낙차 변동 무시, 연결 수계 고려

현실의 수계에서는 상류 저수지에서 방류량이 하류 저수지에 영향을 미치는 관계를 형성하고 있다. 이에 본 연구에서는 연결 수계를 고려하였을 때의 경우를 제안한 알고리즘으로 해석하고자 하였으며 그 결과를 다음의 그림으로써 나타내었다. 그림 6은 각각의 저수지에서의 시간에 따른 수위의 변화를 나타내었다. 그림에서 h_1, T_{max} , h_2, T_{max} 는 상류로부터 첫 번째, 두 번째 저수지에서의 일정기간(T_{max})이 지난 후의 수위를 말하며 그림에서도 알 수 있듯이 시뮬레이션에서의 마지막(T_{max} 일 때) 수위값이 주어진 마지막 수위값과 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 이 사실은 언급한 바와 마찬가지로 각각의 저수지에서 주어진 사용수량 일정제약조건을 충족시켰다는 의미가 된다. 그림 7은 연결수계를 고려하였을 경우 제안한 알고리즘에 의한 발전기들의 출력값과 부하값들을 나타내고 있다.

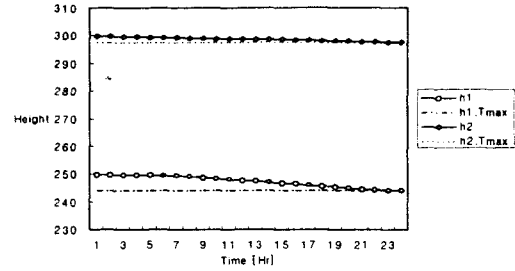


그림 6 저수지에서의 수위곡선
Fig. 6 The height curves of reservoirs

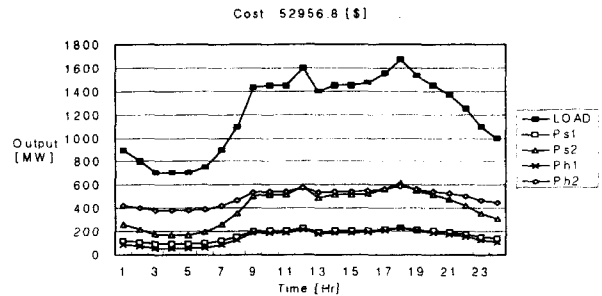


그림 7 발전기들의 출력 곡선(연계 고려)
Fig. 7 The output curves of generators (Consider hydraulic coupling)

4.4 낙차변동, 연결수계 고려

이제까지의 제약조건들과 현실의 수계에서 필요로 하는 저수지와 저수지사이의 물의 시지연시간을 포함한 수화력 계통의 최종적인 결과를 그림 8에 나타내었다. 시지연 시간을 고려하였을 때 각각의 저수지에서 일정 기간이 지난 후의 마지막 수위는 주어지는 데이터 값과 일치하지는 않는다. 즉, t 시간을 기준으로 해서 저수지 2번과 3번 사이의 시지연 시간을 2시간으로 가정하면 2번 저수지의 마지막 2시간($T_{max}-1, T_{max}$)동안의 방류량이 3번 저수지로 t 시간에 바로 유입되지는 않고 $t+2$ 시간에 유입이 된다. 또, 3번 저수지에서 보면 처음 2시간(1, 2)동안은 2번 저수지에서의 일정기간(T_{max})전의 방류량, 혹은, 지류의 영향으로 인해 유입이 된다고 할 수가 있으므로 제안한 방법에서는 이와 같은 양을 일정 상수로 생각하여 시지연 시간동안 유입되도록 생각하였다.

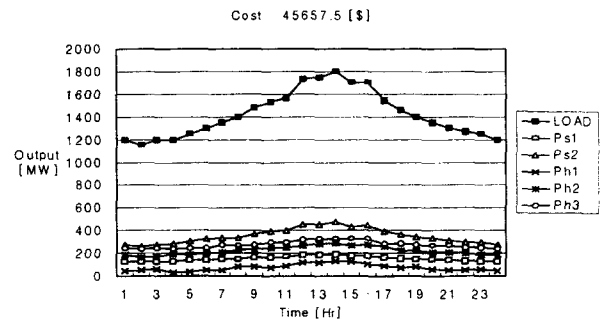


그림 8 발전기들의 출력 곡선(낙차, 연계 고려)
Fig. 8 The output curves (Consider height variation and hydraulic coupling)

이상의 사례계통에 부가하여 제안한 알고리즘의 실용성을 보고자 실제계통에 적용을 하여 보았다. 대상 데이터로는 기력(LNG, OIL, 유연탄, 무연탄 포함) 50기, 수력 16기, 원자력 14기이며 이중 수력 발전기의 데이터는 현재 한강수계에 해당하는 데이터이다. 제안한 알고리즘을 3가지 계통으로 모델링을 해서 시뮬레이션을 수행하여 그 계산시간 결과를 다음의 표 4에 제시하였다. 표에서도 알 수 있듯이 화력 50기, 수력 10기의 사례계통의 경우 대략 1분 정도 소요되어 제안한 알고리즘이 충분히 실용성이 있음을 확인할 수 있었다.

표 4 실제계통에 대한 계산시간 비교
Table 4 The comparison of Computation time to on-line system

사례 계통	계산 시간
화력 2기, 수력 2기[참고문헌]	7.56 [sec]
화력 20기(원자력 3기), 수력 5기	29.22 [sec]
화력 40기(원자력 7기), 수력 10기	56.76 [sec]
화력 50기(원자력 10기), 수력 10기	62.48 [sec]

5. 결 론

본 연구에서는 수화력 계통의 경제적인 운용에 관한 각각의 발전기의 최적의 해를 구하는 방안을 제시하였다. 전역적인 해를 찾는데 있어서 최근에 여러 최적화 문제에서 많이 응용되고 있는 진화 연산(Evolution Computation)의 한 종류인 진화 프로그래밍(Evolution Programming) 기법을 이용하였다. 수화력 계통을 낙차 변동과 연결수계의 유무에 따라 4가지 경우로 나누어 시뮬레이션을 수행하였으며, 저수지의 물의 이동시간 등을 고려하여 현실적인 수계의 상황을 표현하였다. 제안한 방법을 사례계통에 적용하여 기존의 방법들과 비교·검증하였으며 더 나아가 실제계통에 적용을 하여 제안한 알고리즘의 실용성을 얻을 수 있었다.

본 연구는 한국 과학재단 목적 기초연구 (981-0901-003-1)지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

[1] M. E. El-Hawary and G.S. Christensen, "Optimal Economic Operation of Electric Power Systems", Academic Press, New York, 1979.
 [2] IJNAGRATH, DPKOTHARI, "Power System Engineering", Tata McGraw-Hill Publishing Company, pp. 273-338. 1994,
 [3] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley and Sons, New York, 1984.
 [4] David B. Fogel and Lawrence J. Fogel, "Guest Editorial Evolutionary Computation", IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 5, No. 1, pp. 1-14, January 1994.

[5] Hong-Tzer Yang, Pai-Chuan Yang and Ching-Lien Huang, "Evolutionary Programming Based Economic Dispatch for Units with Non-Smooth Fuel Cost Functions", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 112-118, February 1996
 [6] D. B. Fogel, "An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 5, No. 1, pp. 3-14, Jan 1994
 [7] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, New York : Springer-verlag, 1992.
 [8] D. C. Walters and G. B. Sheble, "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading", IEEE Trans. Power Systems, Vol. PWRS-8, No. 3, pp. 1352-1331, August 1993.
 [9] Abdul Halim and Khalid Mohamed Nor, "An Efficient Method for Optimal Scheduling of Fixed Head Hydro and Thermal Plants", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 632-636, May 1991.
 [10] Abdul Halim Abdul Rashid and Khalid Mohamed Nor, "An Algorithm For The Optimal Scheduling of Variable Head Hydro and Thermal Plants", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1242-1249, August 1993.

저 자 소 개



김재철 (金宰徹)
 1972년 1월 2일 생. 1995년 경북대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1999년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료
 Tel : 053-950-5602
 E-mail : kjc@palgong.kyungpook.ac.kr



백영식 (白榮植)
 1950년 7월 8일 생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 1977년 명지대 공대 전기공학과 조교수 현재 경북대 전자전기공학부 교수
 Tel : 053-950-5602
 E-mail : ysbak@bh.kyungpook.ac.kr