

일간 발전계획 프로그램 개발

김성수* 남영우* 김진호* 박종근* 김성구** 이호상**
 *서울대학교 전기공학부 **한국전력공사 계통운영처

Development of Daily Generation Scheduling Program

Sung-Soo Kim* Young-Woo Nam* Jin-Ho Kim* Jong-keun Park* Sung-Goo Kim** Hyo-Sang Lee**
 *Seoul National University **KEPCO

Abstract - Daily generation scheduling system (DGSC) is a main tool in the power system operation. In Korea, a DGSC was developed in 1982 and it was updated continuously. However, as new type of generators and the number of constraints are introduced, it is very difficult to use the old DGSC. This paper presents a proposal for the development of new DGSC. In the proposed proposal, line flow constraint and dispatch of combined cycle plant are included.

1. 서 론

일간발전계획은 익일의 시간별 예상 수요를 신뢰성 있게 공급할 수 있는 시간대별 발전기의 출력배분 계획을 수립하는 것으로 전력계통 운용의 핵심을 이루는 기능이다. 우리나라의 경우 1982년에 한전에서 자체 개발한 일간발전계획 프로그램을 수차에 걸쳐 수정, 보완하여 사용하고 있다. 그러나 독립적인 개별 프로그램들의 조합으로 이루어진 일간 발전계획 시스템은, 그 동안 크게 확장된 전력계통의 다양한 요소와 다변화된 제약 요건들을 신속하고 적절하게 처리하는데 한계가 있고, 개별 프로그램들을 각각 실행하는 등 업무의 비효율적인 요소들을 내포하고 있다.

기존의 일간 발전계획시스템이 가지고 있는 문제점을 개선하고 필요한 요소들을 보완하여 새로운 일간발전계획 시스템을 개발하고자 한다. 개발될 새로운 시스템은 최신 기술이 실현되는 H/W 및 S/W 환경에서 이용자 위주의 최적 시스템을 구축하여 발전설비의 효율적 운영을 기하고 계통신뢰도의 향상을 꾀하고 있다. 새로운 시스템은 송전손실과 소내소비를 고려한 수화력 협조 및 화력기 경제배분에 근거하여 각 발전기의 출력을 결정하게 되는데 개발 내용을 요약하면 다음과 같다.

- . 화력기의 예비력과 발전기의 최소 운전/정지 시간을 고려한 기동정지 (우선순위에 의한 방법)
- . 양수 발전소 처리 (수급, 잉여, 경제 양수)
- . 소내전력과 송전손실을 고려한 출력 배분.
- . 복합화력의 G/T와 S/T의 구성 모드 및 열공급 제약 조건을 고려한 기동정지 및 출력 배분
- . 책임연료사용량계약(LNG, 석탄)이 있는 발전기의 출력 배분
- . 사용량 수급 제한(유연탄, BC유)이 있는 발전기의 출력 배분
- . 전력계통의 안전도에 영향을 미치는 복상조류의 한계치를 고려한 발전기의 기동정지 및 출력 조정
- . 해남~제주간 HVDC 연계 송전선의 송전량제약을 고려한 발전기 기동정지 및 출력 조정
- . 선로 과부하를 방지할 수 있도록 발전기의 출력 조정
- . 기존 개별 프로그램의 통합

2. 문제의 정식화

앞에서 언급한 문제를 해결하기 위하여 일간 발전계획을 발전기의 기동정지 문제와 출력배분 문제로 분리하여 구성하고자 한다. 발전기의 기동정지 문제는 화력기의 최소 운전/정지 시간이 24 시간을 초과하는 경우가 많으므로 대략 1 주일 정도의 기간을 필요로 한다. 따라서 매일 매일의 발전기 출력을 결정하는 일간발전계획에서는 발전기의 기동정지 문제를 효과적으로 취급할 수 없기 때문에 별도로 처리하고[1]. 본 논문에서는 이 문제에 대하여 언급하지 않겠다. 발전기의 기동정지가 결정된 후 출력 배분을 결정하는 일간발전계획 문제는 다음과 같이 1일 24시간 동안의 발전연료비용을 최소화하는 최적화 문제로 표현할 수 있다. 이때 수력기의 사용 수량제약을 제외한 다른 제약조건은 무시하였다.

$$\min \sum_i \sum_t F_i(P_{it}) \tag{1}$$

$$s.t. \sum_j P_{jt} + \sum_j P_{jt} = load_t \tag{2}$$

$$\sum_j Q_j(P_{jt}) \leq W_j \tag{3}$$

여기서,

- P_{it} : i 화력기의 t 시간에서의 출력
- P_{jt} : j 수력기의 t 시간에서의 출력
- $F_i(P_{it})$: 화력기의 발전비용
- $Q_j(P_{jt})$: 수력기의 사용수량
- $load_t$: t 시간의 계통 부하
- W_j : j 수력발전기의 사용수량

각각의 제약조건에 대한 설명은 다음과 같다. 먼저 (2) 식은 계통부하에 대한 조건으로 각 시간별로 독립적인 식이다. 그리고 (3)식은 수력기의 사용수량에 대한 식으로 각 발전기별로 독립적이다. 화력기 중에서 연료제약이 있는 발전기는 기본적으로 수력기와 같은 방식으로 처리된다.

2.1 최적해에 대한 조건과 알고리즘

식 (1)-(3)으로 주어진 최적화 문제에 대한 최적해는 다음과 같은 Kuhn-Tucker 조건을 만족해야 한다.

$$F'_i(P_{it}) = \lambda_t \tag{4}$$

$$\gamma_j \cdot Q'_j(P_{jt}) = \lambda_t \tag{5}$$

여기서 λ_t, γ_j 는 각각 t 시간의 계통 한계비용과 j 수력발전기의 증분수단가를 나타내게 되고, (4), (5) 식에

의하여 출력을 배분하는 방법은 등증분 비용 방법이라고 불린다. (4) 식은 계통부하에 대한 조건으로 각 시간별로 독립적인 식이고, (5) 식은 수력기의 사용수량에 대한 식으로 각 발전기별로 독립적이다. 이러한 사실을 이용하면 전체 문제를 수력문제와 화력문제로 분리하여 반복적으로 푸는 효율적인 알고리즘을 구성할 수 있다[1].

2.2 조류제한 조건의 수식화

복상조류에 대한 제약조건과 제주 연계선 용량계약, 선로 과부하 등을 처리하기 위해서는 각 선로에 흐르는 조류를 계산해야 한다. 정확한 조류상태를 파악하기 위해서는 조류계산을 해야 하지만 계산시간과 데이터 등의 문제로 인하여 DC 조류계산을 하게 된다. DC 조류계산은 다음과 같은 형태로 이루어진다[2].

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \\ \theta_n \end{bmatrix} = [Y]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P_k = \frac{1}{x_k} \cdot (\theta_{ki} - \theta_{kj}) \quad (7)$$

(6) 식에서 [Y]는 Y bus 행렬을 나타내고, (7)식에서 P_k , x_k , θ_{ki} , θ_{kj} 는 각각 k 송전선의 조류, 임피던스, 송전단측 위상각, 수신단측 위상각을 나타낸다. 따라서 (6)식과 (7)식을 결합하면 송전선의 조류를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_i a_{ki} \cdot P_{it} \leq flow_{ki} \quad (8)$$

여기서, a_{ki} , $flow_{ki}$ 는 각각 k 송전선 조류에 대한 i 발전기의 계수와 t 시간의 조류 상한을 나타낸다.

여기서 계수 a_{ki} 는 계통의 연결 상태와 선로의 임피던스만으로 결정되기 때문에 실제 계산에 앞서 오프라인으로 계산해 두면 된다.

2.3 복합화력의 처리

발전계획에서 복합화력을 처리하기 위해서는 개스 터빈(G/T)과 스팀 터빈(S/T)이 연결된 복합화력의 구조를 모델링하여야 하는데, 이때 주의해야 할 점은 다음과 같다.

- (1) 열공급을 하는 발전기는 열 공급이 우선이므로 열 공급량이 주어지면 전기로 환산하여 복합화력의 하한출력이 열공급량이 되도록 하여야 한다.
- (2) 복합화력은 여러대의 가스터빈에 여러대의 스팀 터빈이 혼합된 형태이다. 이때 스팀 터빈을 중심으로 하나의 유니트로 생각해야 한다.
- (3) 한 발전소내의 가스 터빈이 서로 다른 연료를 사용할 수 있으므로 실제와 같이 모델링 되어야 한다.
- (4) 같은 발전기라도 시간대에 따라 다른 연료를 사용할 수 있다.
- (5) 연료에 따른 특성 커브의 변화는 고려하지 않으며 대신 연료계약은 정확히 일치 시켜야 한다.
- (6) 스팀 터빈이 매일 기동정지를 하면 hot 그렇지 않으면 cold로 본다.
- (7) 순수한 가스 터빈용과 스팀 터빈과 동시에 운전될 때의 두 개의 I/O 커브가 필요하다.

또한 기동정지 계획 수립시 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) S/T은 G/T의 여열을 이용하므로 추가 연료비는 없다.
- (2) S/T의 출력은 통상 G/T 가동후 cold start의 경

우는 3시간, hot start의 경우는 1시간이후에 발생한다.

- (3) S/T의 출력은 G/T의 출력의 1/2 정도가 된다.
- (4) 지역난방의 열공급은 S/T의 후기에서 빠르게 S/T의 출력이 감소된다.
- (5) 특정 시간대에 S/T의 출력이 필요할 경우는 사전에 G/T 1대분의 예열이 필요하다. 다만, 서인천의 경우는 개별적 예열이 필요하다.

위와 같은 각 설비의 특성으로 인하여 G/T와 S/T를 묶어서 등가 발전기를 생성하고 실제 계산은 등가 발전기를 기준으로 이루어지게 된다. 다음은 등가 발전기의 입출력 특성곡선을 구하는 과정을 예로써 보인 것이다.

복합화력에서 실제 연료가 사용되는 부분은 G/T이므로 일반적으로 G/T의 입출력 계수가 주어진다. G/T의 입출력 특성식을 $F = a_1 P_1^2 + b_1 P_1 + c_1$ 라 하자. 그리고, 등가 발전기의 입출력 특성식을 $F = a_2 P_2^2 + b_2 P_2 + c_2$ 라 하자. 대개 S/T의 출력은 G/T의 출력의 1/2 정도이므로, S/T의 출력과 S/T출력과 G/T의 출력의 합은 일정하다고 가정할 수 있으므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_1 = \alpha P_2 \quad (9)$$

여기서 $\alpha = \frac{G_M}{G_M + S_M}$ 로 G/T의 설비용량과 G/T

와 S/T의 설비용량 합인 비이다.

따라서 그림 1.로부터 등가 발전기의 입출력 특성식 계수는 다음과 같이 결정됨을 쉽게 알 수 있다.

$$\begin{aligned} a_2 &= a_1 \alpha^2 \\ b_2 &= b_1 \alpha \\ c_2 &= c_1 \end{aligned} \quad (10)$$

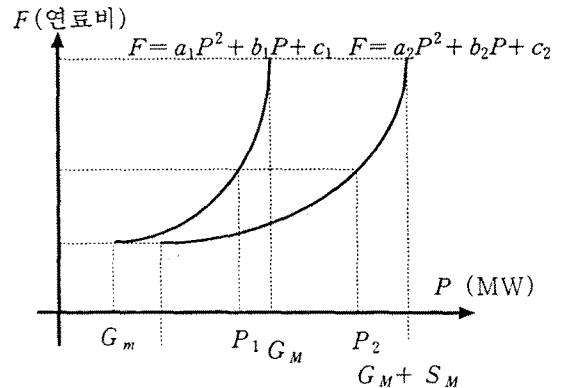


그림 1. 복합화력의 입출력 특성곡선

3. 프로그램의 구현

새로 개발될 일간 발전계획 시스템의 구조를 나타내면 그림 2.와 같다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 새로운 시스템에서는 수요예측 오차율 분석, 발전기 입출력 특성 곡선(I/O curve)산정, 시간대별 수요곡선 출력 등의 기존 개별 프로그램을 통합하여 사용자의 편의를 도모하고자 한다.

화력기의 최소 운전/정지 시간, 양수 발전소 특성, 복합화력의 구성 모드, 연료계약, 복상조류, 제주 연계선 용량, 조류 제한 등의 여러 제약조건을 고려한 일간 발전

계획 시스템을 구현하기 위한 방법을 설명하면 다음과 같다.

[참고문헌]

- (1) 먼저 계통 부하 및 예비력에 대한 제약조건과 열공급 제약, 그리고 발전기의 예방정비 기간 등의 특성만을 고려한 주간단위의 발전기 기동정지 계획을 작성한다. 여기에서 수급, 잉여, 경제 양수 모드를 고려한 양수발전소의 개략적인 출력과 피크 삭감 형태의 수력기 배분 계획을 제시한다.
- (2) 앞에서 얻은 개략적인 발전기 기동정지 계획을 바탕으로 복상조류, 제주 연계선 송전량, 조류 제한, 연료제약 등의 제약조건을 체크하여 결과를 출력한다.
- (3) 프로그램의 사용자가 얻어진 결과를 바탕으로 발전기의 기동정지를 수정한 후, 각 발전기의 출력을 배분한다.
- (4) 각 제약조건을 체크하여 조건이 만족되도록 발전기의 출력을 조정한다. 이때 필요한 경우 사용자가 개입하여 문제를 해결한다.

- [1] "발전연료 제약을 고려한 주간 발전계획 전산화 시스템 개발", 한국전력공사 계통운용처, 1991. 5.
- [2] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control - 2nd Edition", John Wiley & Sons, Inc.
- [3] A. I. Cohen, V. R. Sherkat, "Optimization-Based Methods for Operation Scheduling", IEEE Proc., Vol. 75, pp 1574-1591, Dec. 1987.
- [4] K. D. Le, J. T. Day, B. L. Cooper, E. W. Gibbons, "A Global Optimization for Scheduling Thermal Generation, Hydro Generation and Economic Purchases", IEEE Trans., Vol. PAS-102, pp 1986-1993, July 1983.

5. 결론

본 논문에서는 발전기 기동정지와 송전손실을 고려한 새로운 일간 발전계획 프로그램 개발 방안에 대하여 논하였다. 새로운 시스템에서는 현재 우리나라의 피크를 담당하고 있는 복합화력의 구성모드를 고려한 복합화력기(G/T/S/T)의 출력 배분으로 경제적인 전력계통 운용을 기할 수 있고, 또한 DC 조류계산을 통한 복상조류와 제주 연계선 등의 선로 조류를 고려함으로써 전력계통 운용의 안전도를 향상시킬 것으로 기대된다. 그리고 기존의 개별 프로그램에서 별도로 처리하던 프로그램을 통합하여 사용자 위주의 일관된 작업 환경을 구축함으로써 효율적인 일간 발전계획 업무가 이루어질 것으로 짐작된다.

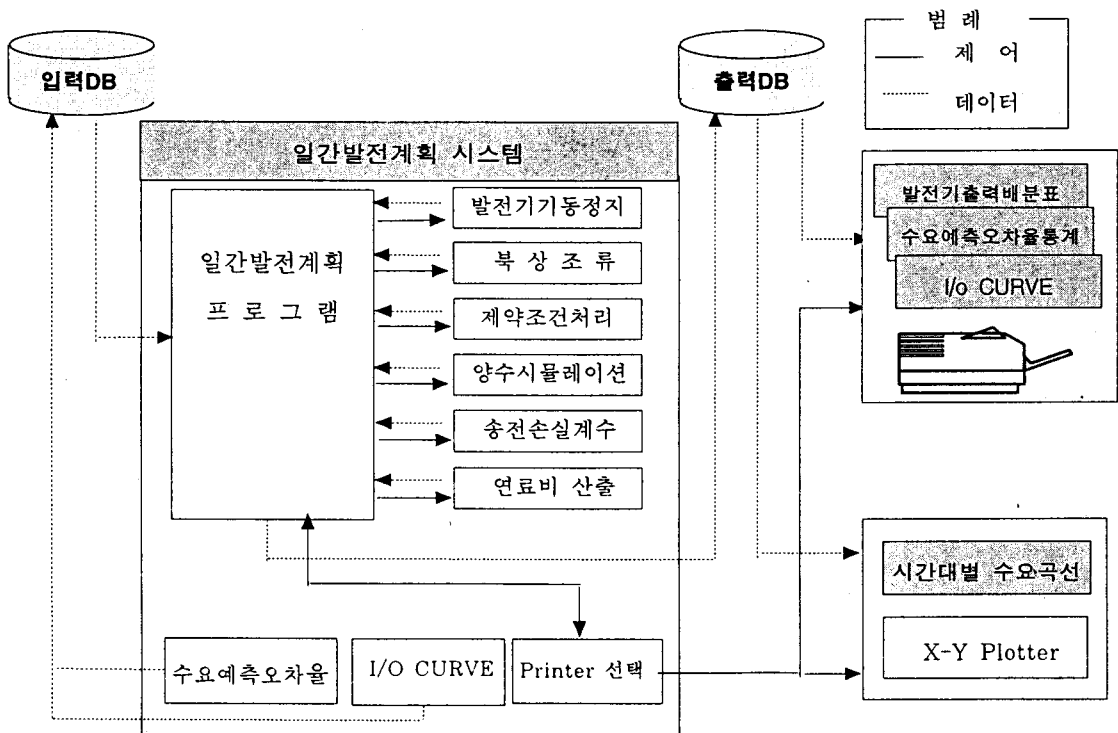


그림 2. 개발될 일간 발전계획 프로그램의 구조