

객체지향기법을 이용한 도매전력시장에서의 급전계획 프로그램 개발

論 文
54A-3-7

A Development of Dispatch Schedule Program for TWBP Using Object Oriented Technique

金 光 源[†]
(Gwang Won Kim)

Abstract - An objected-oriented programming(OOP) technique is introduced to dispatch schedules for TWBP. Some dispatch schedules such as constrained (pre)dispatch, unconstrained (pre)dispatch, and nominal self-dispatch schedule need to be performed to make power market work. These dispatch schedules are similar but have some differences in required constraints, needed data, and scheduling time. Therefore, it makes the scheduling program simple to introduce the OOP technique to this problem: to have each instance of the OOP perform its own dispatch scheduling. The developed program adopts linear programming(LP) as an optimization tool and could consider some crucial constraints such as power balance, generation power limits, generation ramp-rates, power limitations of transmission lines, and power system security.

Key Words : 급전계획, 선형계획법, 도매전력시장, 객체지향프로그래밍

1. 서 론

급전계획은 발전비용이 최소인 운전점을 찾는 문제이기 때문에 경제급전이라고 불리우며, 지난 수 십년간 이에 대한 많은 연구들이 수행되어왔다[1-5]. 그러나, 전력시스템의 효율적인 운용을 목적으로 1990년대 후반부터 세계적으로 시작한 전력시장구조개편으로 급전계획을 위한 최적화 문제도 함께 변화하고 있다.

우리나라에서도 전력거래소에서 제약급전계획, 비제약급전계획, 제약선행급전계획, 비제약선행급전계획, 가상급전계획 등을 수립하여 경제원리에 따라서 전력시장이 원활히 운영되도록 하여야 한다[6]. 선행급전계획은 예상되는 시장가격 및 급전량 정보를 시장참여자에게 사전에 제공하기 위하여 수립하며, 비제약급전계획은 해당 급전주기의 시장가격을 결정하고, 제약급전계획은 다음 급전주기에 시장참여자들이 발전하여야 하는 또는 수급하게 될 급전량을 결정한다. 한편, 가상급전계획은 시장계약으로 인하여 발전량을 줄이거나 발전하지 못한 시장참여자의 기회비용을 정산하는데 사용된다.

저자는 이전의 논문에서 선형계획법을 이용한 제약급전계획을 제안하였는바[7], 선로전력제한조건을 구현하는데 '발전량변동 배분인자'를 도입하여 조류계산을 수행하지 않으면서도 충분히 정확한 선로전력을 예측할 수 있었고, 증·감발출을 감안하여 최적화 변수를 선별함으로써 부등식 조건과 최적화 변수의 수를 줄일 수 있었다[7]. 본 논문은 이의 후속

논문으로서 제약급전계획외에 비제약급전계획, 제약선행급전계획, 비제약선행급전계획을 함께 다루고 있으며, 비슷하면서도 역할이 상이한 각 급전계획을 구현하는데 객체지향프로그래밍 기법을 도입하였다.

2. 기호의 약속

- $P^{gen i}$: 중앙급전발전기 i 의 발전량
- $P^{demand i}$: 중앙급전부하 i 의 전력량
- n_g : 중앙급전발전기 수
- n_d : 중앙급전부하 수
- P^{demand} : 비중앙급전부하예측량-비중앙급전발전량
- P^{loss} : 손실의 예측량
- $\underline{P^{gen i}}$: 중앙급전발전기 i 의 발전하한
- $\overline{P^{gen i}}$: 중앙급전발전기 i 의 발전상한
- $P^{FCAS i}$: 중앙급전발전기 i 의 보조서비스 확보량
- $\Delta P^{gen i}$: 중앙급전발전기 i 의 발전량변화(5분)
- $P_{ramp}^{gen i}$: 중앙급전발전기 i 의 감발출(5분)
- $P_{start}^{gen i}$: 중앙급전발전기 i 의 증발출(5분)
- $P^{line(i,j)}$: 선로 (i,j) 에 흐르는 유효전력 (≥ 0)
- $\overline{P^{line(i,j)}}$: 선로 (i,j) 에 흐르는 유효전력 한계

3. 급전계획의 정리

우리나라의 도매전력시장에서 급전계획은 다음의 5가지로 구분된다[6].

[†] 교신저자, 正會員 : 蔚山大學校 電氣電子情報시스템工學部
副教授 · 工博

E-mail : kim66@ieee.org

接受日字 : 2005年 1月 3日

最終完了 : 2005年 2月 14日

- 제약급전계획(Five-Minutes Dispatch schedule)
- 제약선행급전계획(Constrained Pre-Dispatch Schedule)
- 비제약급전계획(Unconstrained FMD)
- 비제약선행급전계획(Unconstrained PDS)
- 가상급전계획(Nominal Self-Dispatch Schedule)

위의 급전계획은 크게 제약, 비제약, 가상급전으로 구분되며 각각에서 고려하여야 하는 제약조건(constraint)은 표 1과 같다.

표 1 급전계획에 따른 제약조건
Table 1 Constraints for dispatch schedules

제약 조건	제약	비제약	가상
전력수급균형	○	○	×
발전기의 기술적 제한	○	○	○
주파수보조서비스	○	○	×
전력망제약	○	×	×

제약급전계획은 급전주기마다 중앙급전발전기 출력 및 중앙급전부하의 크기를 결정하며, 제약선행급전계획은 제약급전계획의 결과를 거래주기별로 사전에 예측함으로써(거래 전달 정오부터) 전력계통의 안전한 운영을 확인하고 전력거래자의 운전 및 입찰에 도움을 준다.

비제약급전계획은 발전시장가격(Generation Market Clearing Price)과 임시발전시장가격(Interim gMCP)의 산정이 목적인데, 발전시장가격은 해당 급전주기의 급전가격이며, 임시발전시장가격은 예상되는 발전시장가격으로서 비제약급전계획에서는 현 급전주기 이후 다섯 급전주기에 대한 임시발전시장가격을 제시하여야 한다. 시장가격(MCP)은 거래주기별로 각 거래주기에 포함되는 여섯 급전주기의 발전시장가격을 가중평균하여 계산하며 비중앙급전발전기와 비중앙급전부하의 정산에 사용한다. 비제약선행급전계획에서는 거래 전달 정오부터 거래주기별로 예상시장가격(Forecasted MCP)을 제시함으로써 전력거래자의 의사결정에 도움을 준다.

가상급전계획은 거래일이 종료된 후 모든 급전주기에 대하여 발전시장가격에 따른 각 발전기의 가상적 급전용량을 산출하여 제약정산금을 산정하는데 이용한다. 따라서, 타 급전계획과는 구별되게 가상급전계획은 최적화의 문제가 아니다.

그림 1은 가상급전계획을 제외한 도매전력시장에서의 급전계획을 정리하여 나타낸 것인데, 비제약선행급전계획(UFMD)은 그 자체가 발전시장가격(GMCP)과 다섯개의 임시발전시장가격(IMCP)의 계산을 포함하지만 내부적인 데이터의 이동을 나타내기 위하여 그림 1에서는 한번의 최적화과정을 UFMD로 표현하였다.

제약급전계획은 5분 후의 급전지시량을 결정하는 것이 목적이므로 5분 후의 부하예측값과 현재의 발전량을 기본 자료로 수행되는 반면에, 비제약급전계획은 현재의 발전량에 대한 발전시장가격의 산출이 목적이므로 SCADA로부터 얻을 수 있는 현재의 부하량과 이전 급전주기 비제약급전계획에서 계획된 발전량을 기본 자료로 하여 수행된다. 한편, 비제약급전계획에서 임시발전시장가격을 산출하는 데는 미래의 부하예측값을 이용하여야 한다.

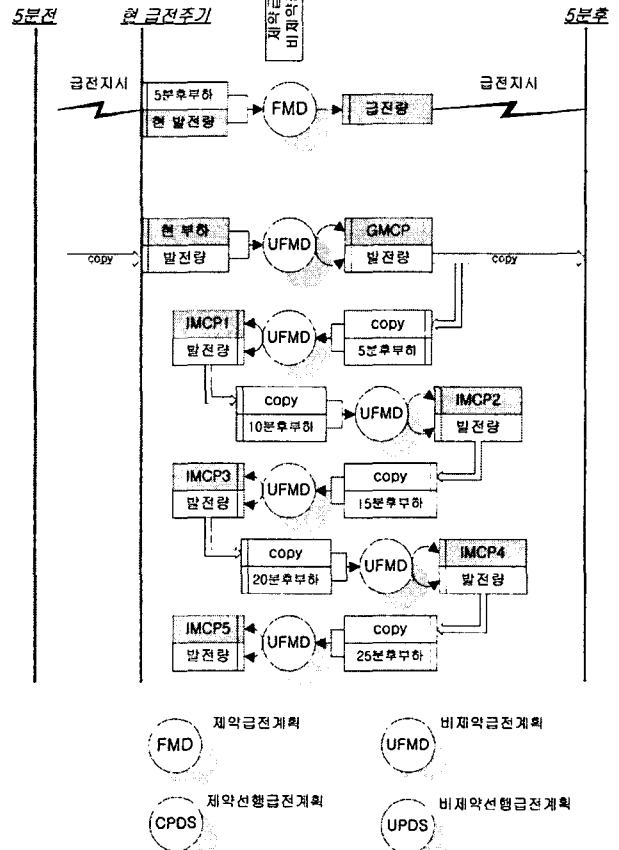
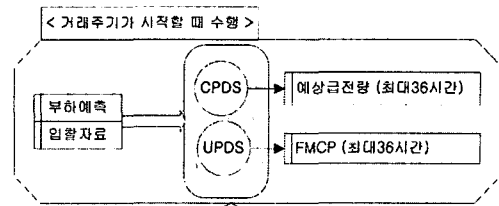


그림 1 도매전력시장에서의 급전계획
Fig. 1 Dispatch schedules in TWBP

거래주기를 시작하는 급전주기에서는 그림 1에서와 같이 제약선행급전계획과 비제약선행급전계획을 수행하여야 하며, 현 거래주기가 12시 이전이면 당일 24시까지의, 12시 이후면 익일 24시까지의 거래주기별 예상급전량과 예상시장가격을 새로이 산출하여야 한다. 또한, 거래주기별로 입찰자료의 변경이 가능하므로 모든 급전계획은 거래주기가 변경되는 시점에서 입찰자료를 갱신하여야 한다.

그림 1의 각 급전계획은 목적이 다르므로 고려하여야 하는 제약조건 종류가 표 1과 같이 구별되지만, 최적화의 목적함수는 거래이익의 최대화로서 동일하며 식 (1)을 최소화 하여야 한다.

$$\sum_{i=1}^{n_g} Price(P^{gen_i}) - \sum_{i=1}^{n_d} Price(P^{demand_i}) \quad (1)$$

단, Price(·)는 중앙급전발전기와 부하의 입찰가격

표 1의 제약조건에서 발전기의 기술적 제한은 발전력 한계와 발전기의 증·감발율로 세분할 수 있고, 전력망제약은 선

로전력의 한계와 안전도 제약으로 구분할 수 있다. 표 1의 제약조건을 수식으로 표현하면 식 (2)~(5)와 같다,

· 전력수급균형을 위한 등식조건

$$\sum_{i=1}^{n_g} P^{geni} - \sum_{i=1}^{n_d} P^{demandi} = P^{demand} + P^{loss} \quad (2)$$

· 발전력한계를 위한 등식조건

$$P^{geni} \leq \overline{P^{geni}} \leq \overline{P^{geni}} - P^{FCASi}, 1 \leq i \leq n_g \quad (3)$$

· 중·감발율을 위한 부등식 조건

$$P_{rateo}^{geni} \leq \Delta P^{geni} \leq P_{rateu}^{geni}, 1 \leq i \leq n_g \quad (4)$$

· 선로전력 한계를 위한 부등식 조건

$$P^{line(i,j)} \leq \overline{P^{line(i,j)}}, (i,j) \in line\ set \quad (5)$$

식 (3)은 보조서비스로 인한 발전력제한까지 포함한 발전량한계 부등식조건이다. 본 논문에서는 발전기별로 보조서비스를 위하여 확보해 두어야 하는 전력량이 계약에 의하여 급전계획수립 이전에 이미 결정되어 있다고 가정하고 그 크기를 위에서도 같이 P^{FCASi} 로 표현하였다. 식 (5)는 선로의 과부하 방지를 위한 선로제약조건으로 선로에 흐르는 전력 $P^{line(i,j)}$ 을 공급모선에서의 전송전력으로 정의하여 언제나 양수가 되도록 하였다. 한편, 안전도를 고려하기 위한 부등식은 적용시스템에 따라서 상이하므로 급전계획 적용시스템을 사전에 해석하여 안전도 제약을 표현하는 선형의 부등식조건을 구하여야 한다.

계약급전계획은 모든 제약조건을 적용하여 수행하여야 하고, 비계약급전계획은 식 (2)~(4)만을 제약조건으로 사용한다. 한편, 최적화 문제는 아니지만 가상급전계획에서는 제약조건 (3), (4)만이 의미를 가진다. 한편, 시장참여자의 전력공급, 전력수요 입찰가격곡선은 불연속점이 있는 계단 형태이므로 도함수를 이용한 최적화 알고리즘을 적용하기가 쉽지 않으므로 이전의 연구에서 선형계획법으로써 계약급전계획의 해를 도출하는 방법을 제안하였으며[7], 본 논문에서도 동일한 선형화 기법과 선형계획법을 이용하여 도매전력시장에서의 각 급전계획문제를 해결하였다. 이를 위해서는, 그림 1에서와 같이, 각 급전주기마다 계약급전계획 및 비계약급전계획을 수립하여야 하고, 거래주기가 시작되는 급전주기에서는 선행급전계획을 함께 수행하여야 한다. 이렇듯 비슷하면서도 구별되는 과정을 구현하는데는 객체지향기법이 효과적이다. 이에 본 논문에서는 객체지향기법으로 도매전력시장에서의 급전계획을 매우 간편하게 구현할 수 있음을 보이고자 한다.

4. 객체지향기법의 적용

객체지향기법은 데이터 추상화, 캡슐화, 상속성, 다형성 등의 특징이 있어서 큰 프로그램을 여러 사람이 나누어 작성하거나 개발한 프로그램을 재사용하기에 용이하다[8]. 본 연구에서는 객체지향기법의 이러한 장점과 함께 객체(instance)의 생성 및 파괴가 자유롭고 각 객체는 독립된 데이터로써 독립된 역할을 수행할 수 있다는 특징이 도매경쟁시장의 다양한 급전계획의 구현에 적합하다고 생각되어 이에 객체지향기법을 도입하였다. 표 2는 본 연구에서 개발한 프로그램의 각

객체의 behavior를 정리한 것으로 객체의 외부에서는 public behavior만을 실행할 수 있다.

표 2 객체의 behavior
Table 2 Behavior of the instances

public	protected
· 객체 생성 및 파괴	· 선형계획법의 변수지정 (중·감발율을 고려한 변수범위 설정 포함)
· 객체 복제	· 전력수급조건 추가
· 데이터 갱신	· 발전력한계조건 추가
· 제약급전계획	· 선로전력조건 추가
· 비계약급전계획	· 안전도조건 추가
· 계약선행급전계획	· 선형계획법
· 비계약선행급전계획	· 기타 부수적인 함수

표 2의 public behavior는 객체복제, 데이터 갱신과 각 급전계획으로 구성되는데, 데이터 갱신이란 급전계획에 필요한 최신의 데이터를 구비하는 과정이고, 객체 복제는 현 객체의 데이터를 타 객체에 복사하여 동일한 객체로 만드는 과정이다. 각 객체는 4가지 급전계획 중에서 임의의 급전계획을 수행할 수 있고, 각 급전계획은 필요한 protected behavior를 실행시킨다.

그림 2는 도매경쟁시장의 급전계획을 구현하는데 필요한 객체의 생성, 복제, 파괴의 시기와 각 객체의 역할을 도시한 것으로 객체지향기법의 유용성을 보여준다.

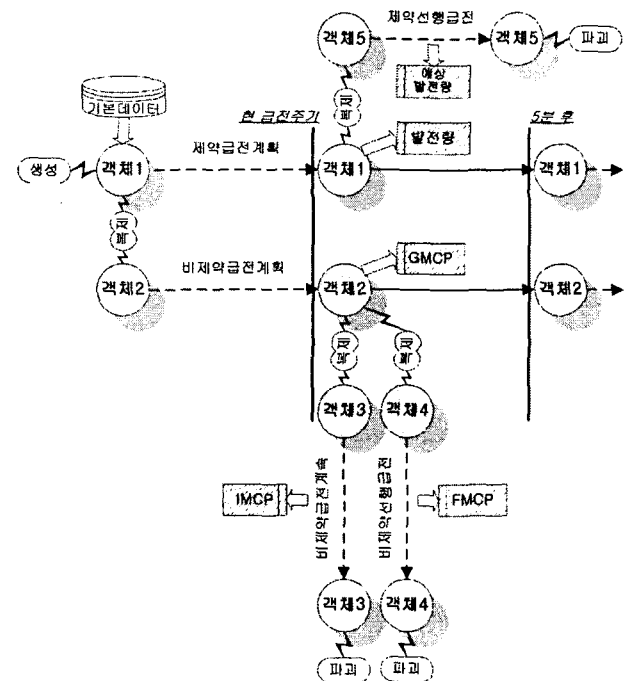


그림 2 객체의 생성, 복제, 소멸과 역할
Fig. 2 Construction, reproduction, deconstruction and roles of instances

그림 2의 각 객체는 필요에 따라 상이한 역할을 수행할 수 있으므로 그림 2에서와 같이 제약급전계획을 위한 객체(객체

수 있다. 표 6에 따르면 선로전력제한이 미세하게 지켜지지 않았는데, 이는 수요예측오차, 선형화기준점과 운전점과의 상이함등에 그 원인이 있으며, 실제 운전시에는 이를 감안하여 오차의 여유를 두어야 하겠다.

표 6 급전계획에 따른 모의운전결과

Table 6 Simulation results according to dispatch schedule

급전 주기	1	2	3	4	5	6	7	8
A	90.8	90.5	91.2	99.3	100.1	100.1	100.2	100.2
B	129.9	136.8	135.9	146.1	146.0	149.8	150.0	146.1

A: 모선 1에서 모선 2로 흐르는 유효전력
B: 모선 2에서 모선 4, 5, 6으로 흐르는 유효전력의 합

한편, 비계약급전계획에서는 발전시장가격과 함께 이의 예측값인 임시발전시장가격을 계산하였는데, 급전주기2의 밀출된 IMCP5를 제외하고는 실제 발전시장가격과 일치하였다. 그러나, 실제의 문제에서는 입찰 발전기의 수가 많고 불확실 요소가 발생할 가능성이 높으므로 임시발전시장가격이 늘 정확한 예측을 한다고 볼 수는 없다.

비중앙급전부하의 가격은 거래주기의 시장가격(MCP)으로 결정되는데, 시장가격은 거래주기에 속하는 급전주기의 발전시장가격의 가중평균으로 구하며, 각 가중치는 비중앙급전부하량과 전력손실의 합에서 비중앙급전발전량을 제하여 얻는다. 본 사례연구에서는 비중앙급전발전기가 없으므로 표 3으로부터 거래구간1에서의 급전구간별 가중치를 구하면 각각 282.51, 314.19, 333.16, 349.39, 348.41, 364.78이며, 이로써 표 4의 발전시장가격을 가중평균하면 거래구간1의 시장가격 128.5원을 얻는다. 비계약선행급전계획에서는 이러한 시장가격의 예상값을 거래주기별로 최대 36시간 후까지 제공하여야 한다.

6. 결 론

본 논문에서는 객체지향기법을 도입하여 전력도매시장에서의 급전계획을 구현하였다. 전력도매시장에서는 계약급전계획, 비계약급전계획, 제약선행급전계획, 비계약선행급전계획, 가상급전계획등을 수립하여야 하는데 각 급전계획은 방법적으로 유사하면서도 제약조건, 사용하는 데이터, 적용시점이 조금씩 달라서 각 급전계획을 별도의 객체로 정의하여 수행하는 것이 효과적이다.

본 논문에서는 최적화 방법으로 선형계획법을 사용하였으며, 정식화 과정에서 전력수급조건에 의한 제한, 발전량 한계로 인한 제한, 발전기의 증·감발율로 인한 제한, 선로전력 한계로 인한 제한, 안전도로 인한 제한 등을 고려하였다. 사례연구에서는 본 논문에서 개발한 프로그램을 IEEE 30모선 시스템에 적용하여 제한조건을 만족하는 최적의 급전결과를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(02-전-01) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] C. E. Lin et al., "A Direct Newton-Raphson Economic Dispatch," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 1149-1154, August 1992.
- [2] Ji-Yuan Fan et al., "Real-Time Economic Dispatch with Line Flow and Emission Constraints Using Quadratic Programming," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 320-325, May 1998.
- [3] Aurelio R. L. Oliveira et al., "Optimal Active Power Dispatch Combining Network Flow and Interior Point Approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1235-1240, November 2003.
- [4] Rabih A. Jabr et al., "A Homogeneous Linear Programming Algorithm for the Security Constrained Economic Dispatch Problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 930-936, August 2000.
- [5] Ahmed Farag et al., "Economic Load Dispatch Multiobjective Optimization Procedures Using Linear Programming Techniques," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 731-738, May 1995.
- [6] 한국전력거래소, 전력시장의 운영 (<http://www.kpx.or.kr>).
- [7] 김광원, 이종배, 정정원, "선형계획법을 이용한 양방향 전력 시장에서의 계약급전계획 연구," *대한전기학회논문지*, 53A권, 10호, pp. 573-580, 2004년 10월.
- [8] Timothy Budd, *An Introduction to Object-Oriented Programming*, Addison-Wesley, 1991.

저 자 소 개



김 광 원 (金 光 源)

1966년 5월 14일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수.
Tel : 052-259-2186, Fax : 052-259-1686
E-mail : kim66@ieee.org