

선형계획법을 이용한 양방향입찰시장에서의 제약급전계획 연구

論 文
53A-10-7

A Study on the Constrained Dispatch Scheduling Using Linear Programming for TWBP

金 光 源[†] · 李 宗 培* · 鄭 正 源**
(Gwang Won Kim · Jong-Bae Lee · Jung-Won Jung)

Abstract - A new real-time constrained dispatch scheduling (CDS) is needed for TWBP. The CDS needs to be performed at every dispatch period to decide generation power of scheduling generators and amounts of scheduling load. Therefore, the CDS is not based on real generation costs but on bidding data of market participants with some constraints such as power balance, generation limits, ancillary service, and transmission line limits. This paper selects linear programming(LP) as an optimization tool for the CDS and presents effective formulae for the LP application. This paper also presents the way of minimizing the number of variables and constraints of the LP to improve real-time applicability.

Key Words : 제약급전계획, 선형계획법, 양방향입찰, 전력시장

1. 서 론

발전비용을 기준으로 발전량을 결정하는 전력시스템에서 급전계획을 수립하려면 발전비용을 최소화하는 운전점을 찾아야 한다. 급전계획에서 정확한 해를 구하려면 발전비용을 정확히 반영하는 것이 중요하지만, 실제 발전비용은 복잡한 비선형함수이기 때문에 해석적인 방법으로 최적해를 찾기 위하여 대부분 2차함수, 1차함수 또는 구간별 1차함수 등으로 근사하여 다양한 비선형최적화 기법과 [1-3] 선형계획법 [4,5] 등을 적용하여 왔다. 그러나, 전력시스템의 효율적인 운용을 목적으로 1990년대 후반부터 세계적으로 시작한 전력시장구조개편으로 전력시장은 전력 풀 및 쌍방계약의 형태로 발전해가고 있으며 [6-8], 이에 따라 급전계획을 위한 최적화 문제도 함께 변화하고 있다.

우리나라의 ISO인 전력거래소는 시장원리에 따라 전력거래를 중개해야 하고, 전력시스템의 안정도 및 신뢰도 유지를 목적으로 에너지 거래를 위한 전력시장의 입찰과 계통운영에 필요한 보조서비스를 결정하여야 한다. 이를 위하여 전력거래소는 제약선행급전계획, 비제약선행급전계획, 제약급전계획, 비제약급전계획, 가상급전계획 등을 수립하여야 한다 [9]. 이 중에서 선행급전계획은 예상되는 시장가격 및 급전량 정보를 시장참여자에게 사전에 제공하기 위하여 수립하며, 실시간으

로 수립되는 비제약급전계획의 결과는 해당 급전주기의 시장가격을 결정하고, 역시 실시간으로 수립되는 제약급전계획의 결과는 다음 급전주기에 시장참여자들이 발전하여야 하는 또는 수급하게 될 급전량을 결정한다. 한편, 가상급전계획의 결과는 시장계약으로 인하여 발전량을 줄이거나 발전하지 못한 시장참여자의 기회비용을 정산하는데 사용된다.

본 논문에서 대상으로 하는 제약급전계획은 급전주기마다 각 중앙급전발전기 자동발전제어(AGC)의 목표값(reference) 및 중앙급전부하의 부하량을 결정하며, 발전량과 급전량 결정에 있어서의 목적함수는 시장 거래가치(거래이익)의 극대화이다. 거래이익을 극대화하려면 수요-공급곡선의 교점에서 거래가 이루어져야 하겠지만, 제약급전계획에서는 발전기 출력의 상한과 하한, 발전기의 증발율과 감발율, 선로과부제한 등의 제약조건을 함께 고려하여야 하므로 그 해를 쉽게 도출할 수 없다. 특히, 선로과부하조건 만족 여부를 파악하기 위해서는 각 발전기의 발전량에 따른 선로조류를 알아야만 하므로 이를 반영하기 위한 적절한 방안을 마련하여야 한다. 본 논문에서는 현재 우리나라의 입찰자료 형태에 적합한 최적화기법을 선별하고, 이에 사용되는 변수와 조건식의 수를 최소화함으로써 실시간 적용에 적합한 제약급전 방안을 제시하였으며, 선로과부하조건을 반영하는 기존의 방법들을 비교 분석하여 우수한 방법을 채택함으로써 보다 정확한 해를 구할 수 있도록 하였다.

[†] 교신저자, 正會員 : 蔚山大學校 電氣電子情報시스템工學部
副敎授 · 工博
E-mail : kim66@ieee.org

* 學生會員 : 慶星大學校 電氣電子메카트로닉스工學部 碩士課程

** 終身會員 : 慶星大學校 電氣電子메카트로닉스工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 6月 15日
最終完了 : 2004年 8月 12日

2. 제약급전계획

양방향입찰시장에서 제약급전계획은 급전주기(5분)별로 입찰자료를 바탕으로 수립되어야 하며, 목적함수는 거래이익의 최대화이다. 따라서, 아무런 제약조건이 없다면 수요-공급곡선의 교점이 최적의 해가 된다. 식 (1)은 제약급전에서 사용

할 목적함수인데, 거래이익의 부호를 바꾼 형태이므로 최적화 과정에서 식 (1)을 최소화하여야 한다.

$$\sum_{i=1}^{n_g} Cost(P^{geni}) - \sum_{i=1}^{n_d} Cost(P^{demandi}) \quad (1)$$

여기서, P^{geni} : 급전발전기 i 의 발전량
 $P^{demandi}$: 급전부하 i 의 전력량
 n_g : 급전발전기 수
 n_d : 급전부하 수

실제 부하는 식 (1)의 급전부하 외에 비급전부하도 포함하며, 급전부하의 비율은 총 부하의 수% 정도 밖에 되지 않는다 [10]. 그러나, 비급전부하는 가격탄력성이 '0'이므로 비급전부하의 가격은 상수가 되어 식 (1)에서와 같이 목적함수에서 제외하더라도 결과에 영향을 미치지 않는다.

계약급전계획에서는 발전기 자체계약, 보조서비스 계약, 선로과부하 계약 등을 고려하여야 하므로 목적함수 (1)을 최소화하면서 동시에 다음의 제약조건을 만족하도록 급전계획을 수립하여야 한다.

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

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

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

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

여기서, P^{demand} : 비급전부하예측량-비급전발전량
 P^{loss} : 손실의 예측량
 \underline{P}^{geni} : 급전발전기 i 의 발전하한
 \overline{P}^{geni} : 급전발전기 i 의 발전상한
 P^{FCASi} : 급전발전기 i 의 보조서비스 확보량
 ΔP^{geni} : 급전발전기 i 의 발전량변화 (5분)
 P_{ratep}^{geni} : 급전발전기 i 의 감발율 (5분)
 P_{ratec}^{geni} : 급전발전기 i 의 증발율 (5분)
 $P^{line(i,j)}$: 선로 (i,j) 에 흐르는 유효전력 (≥ 0)
 $\overline{P}^{line(i,j)}$: 선로 (i,j) 에 흐르는 유효전력 한계

위에서, 식 (2)는 전력수급의 균형을 맞추기 위한 등식조건이고, 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 위에서와 같이 P^{FCASi} 로 표현하였다. 식 (4)는 증, 감발율로 인한 발전력 변동의 제한을 위한 부등식 조건이고, 식 (5)는 선로의 과부하 방지를 위한 선로계약조건이다. 본 논문에서는 선로에 흐르는 전력 $P^{line(i,j)}$ 을 전력공급모션에서의 전송전력으로 정의하여 언제나 양수가 되도록 하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 계약급전문제는 제약조건 (2),

(3), (4), (5)를 만족하면서 목적함수 (1)을 최소화하도록 급전발전기의 출력과 급전부하량을 결정하는 문제로 정리할 수 있다. 한편, 이의 해법을 생각해보면, 시장참여자의 전력공급, 전력수요 입찰가격곡선이 사례연구에서 제시한 것과 같이 불연속점이 있는 계단 형태이므로 도함수를 이용한 최적화 알고리즘을 적용하기가 쉽지 않으며, 아울러 선로계약조건 위배여부를 파악하기 위하여 전력조류계산을 수행하려면 많은 시간이 소요되므로 급전주기 내에 급전계획을 수립하여야 하는 시간적 제약은 만족하기가 쉽지 않으리라고 생각된다.

발전비용을 기준으로 경제급전을 하는 경우에는 해의 도출이 신속한 선형계획법을 비선형 발전비용의 최적화에 도입하고자 선형화 또는 구간선형화로써 목적함수를 단순화하여 왔는데 [4,5], 본 논문에서와 같이 최적화 대상 목적함수가 계단 형태인 경우에는 자체적으로 이미 구간선형화가 되어 있으므로 아무런 단순화 과정 없이 선형계획법을 이용할 수 있다. 이는 선형계획법을 사용함으로써 급전주기 내에 신속하게 해를 구하면서도 목적함수의 정확도에 아무런 희생이 없음을 의미한다. 이에 본 논문에서는 선형계획법으로써 계약급전계획을 수립하고자 한다.

3. 선형 정식화

3.1 목적함수

급전발전기 및 급전부하의 입찰가격곡선이 계단모양이므로 식 (1)의 목적함수를 선형계획법에서 그대로 사용할 수는 없다. 따라서, 본 논문에서는 입찰곡선의 각 가격구간을 별도의 최적화 대상변수로 하여 식 (6)과 같은 선형 목적함수를 도입하였다.

$$\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_b} P_j^{geni} C_j^{geni} - \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_b} P_j^{demandi} C_j^{demandi} \quad (6)$$

여기서, P_j^{geni} : 급전발전기 i 의 가격구간 j 의 발전량 (최적화 대상변수)
 C_j^{geni} : 급전발전기 i 의 가격구간 j 의 입찰가격
 $P_j^{demandi}$: 급전부하 i 의 가격구간 j 의 부하량 (최적화 대상변수)
 $C_j^{demandi}$: 급전부하 i 의 가격구간 j 의 입찰가격
 n_b : 입찰 가격구간의 수 (최대 10)

식 (6)에 의하면 최적화 대상변수가 $n_b \times (n_g + n_d)$ 개가 되어, 급전발전기와 급전부하가 합하여 150개이고 입찰 가격구간이 10개라고 하면 1500개의 변수를 최적화하여야 한다. 그러나, 실제로는 증, 감발율로 인한 제한 때문에 발전기의 발전량이 급전주기 동안 크게 변화할 수 없으므로 변수 P_j^{geni} 중의 상당수는 최적화에서 제외하여도 무방하다. 이에 본 논문에서는 선형계획법의 적용에 있어서 현재의 발전기 출력을 중심으로 증, 감발율 범위 내에 있는 P_j^{geni} 만을 최적화 변수로 지정하였다. 발전기 i 의 입찰자료가 5개의 가격구간으로 구성되어 있고, 현재 발전량과 증, 감발율이 그림 1과 같은 경우에, P_1^{geni}, P_5^{geni} 는 각각 $\overline{P}_j^{geni}, 0$ 으로 고정되며 최적화 대

상에서 제외된다. 그러나, 표현의 편의상 가격구간의 수는 이후에도 계속 n_b 로 기술하기로 한다.

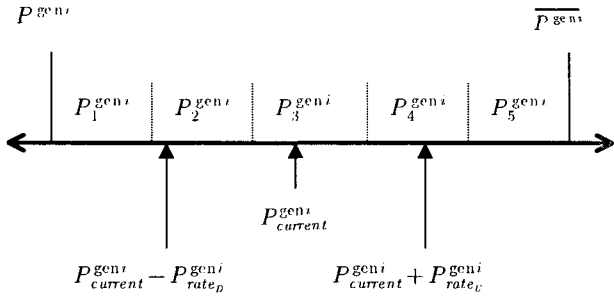


그림 1 최적화 변수 선택
Fig. 1 Selection of optimization variables

한편, 급전부하의 경우에는 부하량의 변동범위에 대한 제약이 없으므로 전 가격구간을 변수로 지정하여야 한다.

3.2 변수범위

사례연구에서의 입찰곡선과 같이 급전발전기 및 급전부하의 가격구간은 구간별로 각기 다른 크기를 가질 수 있으므로 식 (6)에서 도입한 최적화 대상변수의 범위를 변수에 따라서 다음과 같이 제한하여야 한다.

$$0 \leq P_j^{gen_i} \leq \overline{P_j^{gen_i}}, \quad 1 \leq i \leq n_g, j \in \text{feasible band} \quad (7)$$

$$0 \leq P_j^{load_i} \leq \overline{P_j^{load_i}}, \quad 1 \leq i \leq n_d, \quad (8)$$

여기서, $\overline{P_j^{gen_i}}$: 급전발전기 i 의 j 가격구간의 폭
 $\overline{P_j^{load_i}}$: 급전부하 i 의 j 가격구간의 폭

3.3 전력수급 등식조건

식 (2)의 전력수급 등식조건은 다음 식 (9)와 같이 쉽게 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_b} P_j^{gen_i} - \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_b} P_j^{demand_i} = P^{demand} + P^{loss} \quad (9)$$

3.4 발전량제한 부등식조건

식 (3)과 (4)는 발전량제한과 관련된 부등식조건이며, 두 식을 합하여 다음의 식 (10)과 같이 최적화 대상 변수에 대한 선형의 부등식으로 표현할 수 있다. 식 (10)을 이용하려면 발전기 입찰자료 외에 각 발전기의 현재 각 급전 발전기의 현재 발전출력을 알고 있어야 한다.

$$\max(P^{gen_i}, \Delta P^{gen_i}) \leq \sum_{j=1}^{n_b} P_j^{gen_i} \leq \min(\overline{P^{gen_i}} - P^{FCAS_i}, \overline{\Delta P^{gen_i}})$$

$$, \quad 1 \leq i \leq n_g \quad (10)$$

여기서, $\Delta P^{gen_i} \equiv P_{current}^{gen_i} - P_{rate_p}^{gen_i}$

$$\overline{\Delta P^{gen_i}} \equiv P_{current}^{gen_i} + P_{rate_c}^{gen_i}$$

$P_{current}^{gen_i}$: 급전발전기 i 의 현재 발전출력

그러나, 실제 급전계획 프로그램에서는 식 (10)을 부등식조건으로 부가하지 않고 식 (7)의 최적화 변수범위에 포함하여 고려할 수 있다. 예를 들어, 그림 1과 같은 경우에는 3개의 최적화 변수에 대하여 식 (7), (10)을 동시에 고려하여 각각 다음과 같이 범위를 설정할 수 있다.

$$(P_{current}^{gen_i} - P_{rate_p}^{gen_i}) - P_1^{gen_i} \leq P_2^{gen_i} \leq \overline{P_2^{gen_i}}$$

$$0 \leq P_3^{gen_i} \leq \overline{P_3^{gen_i}}$$

$$0 \leq P_4^{gen_i} \leq (P_{current}^{gen_i} + P_{rate_c}^{gen_i}) - \sum_{j=1}^3 P_j^{gen_i}$$

또한, 그림 2와 같이 발전량제한이 증발율로 인한 제한보다 범위가 좁을 경우에는 최적화 변수에 대하여 다음과 같이 변수범위를 설정하면 식 (10)의 부등식 조건을 변수범위에 포함하게 된다.

$$(P_{current}^{gen_i} - P_{rate_p}^{gen_i}) - \sum_{j=1}^2 P_j^{gen_i} \leq P_3^{gen_i} \leq \overline{P_3^{gen_i}}$$

$$0 \leq P_4^{gen_i} \leq \overline{P_4^{gen_i}}$$

$$0 \leq P_5^{gen_i} \leq (\overline{P^{gen_i}} - P^{FCAS_i}) - \sum_{j=1}^4 P_j^{gen_i}$$

발전량 제한이 감발율로 인한 제한보다 범위가 좁은 경우에도 이와 같은 방법으로 처리할 수 있다. 이와 같이 부등식 조건 (10)을 변수범위에 포함시킴으로써 최적화 과정에서 부가되는 부등식조건을 $2 \times n_g$ 개 줄일 수 있다.

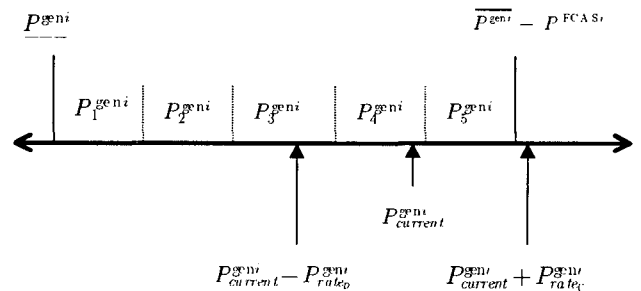


그림 2 최적화 변수의 구간 선택
Fig. 2 Feasible region of optimization variables

3.5 선로제약 부등식조건

식 (5)의 제약조건을 반영하려면 발전량의 변화에 따른 선로조류의 변화를 알아야 하므로 조류계산을 수행하여야 하지만, 교류조류계산의 결과를 얻으려면 많은 시간이 소요되므로 실시간 급전계획에 적합하지 않다. 또한 교류조류계산에 사용되는 전력방정식은 비선형이므로, 발전량과 선로조류간의

선형식을 필요로 하는 선형계획법에서 교류조류계산을 이용할 수는 없다. 이러한 문제를 해결하고자 기존에 주로 직류조류계산으로써 교류조류계산을 대신하거나 [1,4,11], 발전량 변동 배분인자(Generation Shift Distribution Factor)를 사용하여 선로조류를 구하였다 [2,5]. 또한, 선로조류를 최적화 대상의 변수로 추가하여 가능한 범위를 적절히 설정함으로써 선로제약 부등식 조건을 반영하기도 하였다 [3,12]. 그러나, 후자의 경우는 직류조류계산을 최적화의 등식조건에 포함한 것이므로 직류조류계산을 사용한 것과 다름이 없다.

직류조류계산에서는 전송선로 및 모선전압에 대한 몇 가지 가정을 통하여 전력방정식을 선형화하였으며, 결과적으로 모선유효전력과 모선전압위상간의 관계 및 선로조류와 모선전압위상간의 관계는 각각 식 (11), (12)와 같은 선형식이 된다.

$$[P]^{bus} = -[b][\delta]^{bus} \quad (11)$$

$$[P]^{line} = [l][\delta]^{bus} \quad (12)$$

여기서, $[P]^{bus}$: 모선 유효전력 벡터 ($n_{bus} \times 1$)

$[P]^{line}$: 선로 유효전력 벡터 ($n_{line} \times 1$)

$[\delta]^{bus}$: 모선 전압위상 벡터 ($n_{bus} \times 1$)

$[b]$: 요소의 직렬성분만으로 구성된 모선어드미턴스행렬의 허수부 ($n_{bus} \times n_{bus}$)

$[l]$: $l_{ij} = \begin{cases} \pm \frac{1}{x_i}, & \text{element is connected to bus } j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
($n_{line} \times n_{bus}$)

x_i : 요소 i 의 직렬리액턴스

n_{bus} : 전체 모선의 수

n_{line} : 전체 선로의 수

위에서, 선로와 변압기를 합하여 요소라고 표현하였다. 식 (11), (12)의 해는, 모선유효전력, 모선전압위상 및 선로조류가 모두 '0'인 점을 포함하는데, 이는 비선형의 전력방정식을 원점에서 선형화하였기 때문이다. 따라서, 직류 조류계산은 발전기의 출력이 증가할수록, 보다 정확히는 모선전력이 증가할수록 결과의 오차가 커지게 된다. 본 논문에서는 이러한 계산 오차를 줄이기 위해서 원점이 아닌 특정 동작점 부근에서 선형화를 하여 모선유효전력의 변화에 대한 선로조류의 민감도를 구하였고 이는 앞에서 언급한 '발전량변동 배분인자 방법'과 같다. 식 (13), (14)는 본 논문에서 사용되는 민감도 식으로, 식 (11), (12)와 동일한 형태이나 각 변수가 선형화 기준점에 대한 편차로써 주어진다.

$$[\Delta P]^{bus} = -[b][\Delta \delta]^{bus} \quad (13)$$

$$[\Delta P]^{line} = [l][\Delta \delta]^{bus} \quad (14)$$

선형화 기준점에 따라서 식 (13), (14)의 정확도에는 차이가 있겠지만, 사례연구의 적용대상인 IEEE 30모선 시스템에서 모선1, 모선2의 전압위상차 2.734°를 기준점으로 하여 선

형화한 결과, 모선1, 2의 전압위상차가 3°, 4°로 변한 경우에 (모선1-모선2의 선로조류가 각각 9%, 38% 증가), 식 (14)로 계산한 모선1-모선2의 선로조류는 각각 0.07%, 0.17%의 오차를 보인 반면, 식 (12)의 경우에는 약 6%의 오차를 보였다. 실제로 일간 부하의 변동폭은 제한되어 있고, 필요에 따라서 선형화의 기준점을 변경하여 적용할 수 있으므로 민감도 식 (13), (14)의 적용이 타당성 있다고 생각된다.

한편, 식 (13), (14)로부터, 모선전압위상을 매개로 모선전력에 대한 선로조류의 민감도를 알 수 있으나, 행렬 $[b]$ 의 역행렬이 존재하지 않기 때문에 식 (13), (14)를 하나의 간편한 식으로 줄일 수 없다. 이는 행렬 $[b]$ 를 구하면서 기준모선을 제외하지 않았기 때문인데, 본 논문의 목적은 모선전압위상을 구하는 것이 아니라 모선전력의 변화에 따른 선로조류의 변화량을 구하는 것이므로, 모선전력의 변화가 가장 작은 모선을 기준모선으로 설정하는 것이 타당하다. 즉, 부하 변동이 가장 작은 부하모선을 위 식에서 제외하는 것이 가장 적합하다. 다음의 식 (15), (16)은 각각 본 논문에서 사용된 모선전력변화에 대한 선로조류의 민감도식과 선로조류계산식이다.

$$[\Delta P]^{line} = -[l^{reduced}][b^{reduced}]^{-1}[\Delta P^{reduced}]^{bus} \quad (15)$$

$$[P]^{line} = [P]_{operating}^{line} + [\Delta P]^{line} \quad (16)$$

여기서, $[l^{reduced}]$: $[l]$ 에서 기준모선을 제외한 행렬 ($n_{line} \times (n_{bus} - 1)$)

$[b^{reduced}]$: $[b]$ 에서 기준모선을 제외한 행렬 ($(n_{bus} - 1) \times (n_{bus} - 1)$)

$[\Delta P^{reduced}]^{bus}$: $[\Delta P]^{bus}$ 에서 기준모선을 제외한 벡터 ($(n_{bus} - 1) \times 1$)

$[P]_{operating}^{line}$: 선형화 기준점의 선로조류벡터 ($n_{line} \times 1$)

따라서, 식 (5), (15), (16)로부터 선형의 선로제약부등식 (17)을 구성할 수 있고, 식 (17)의 모선전력 변화량 $[\Delta P^{reduced}]^{bus}$ 의 각 원소는 식 (18)과 같으므로 (k 번째 원소만 표현), 결국 선로제약부등식은 최적화 변수 $P_j^{gen i}$, $P_j^{load i}$ 에 대한 선형식이 된다. 식 (18)에서 i, j 는 각각 모선 k 에 연결된 급전대상 발전기와 급전대상 부하의 번호라고 가정하였다.

$$[P]_{operating}^{line} - [l^{reduced}][b^{reduced}]^{-1}[\Delta P^{reduced}]^{bus} \leq [\overline{P}^{line(i,j)}] \quad (17)$$

$$\Delta P^{reduced k} = \left(\sum_{j=1}^{n_i} P_j^{gen i} - P_{operating}^{gen i} \right) - \left(\sum_{j=1}^{n_j} P_j^{load m} - P_{operating}^{load m} \right) - \Delta P^{demand k} \quad (18)$$

여기서,

$P_{operating}^{gen i}$: 선형화 기준점에서 급전발전기 i 의 발전량

$P_{operating}^{load m}$: 선형화 기준점에서 급전부하 j 의 부하량

$\Delta P^{demand k}$: 모선 k 에서 선형화 기준점과 급전시점 비급전부하의 차

이상과 같이, 제약급전계획의 목적함수와 모든 제약조건을 선형계획법에서 이용할 수 있는 선형식으로 정식화하였다.

4. 사례 연구

4.1 급전대상 시스템

IEEE 30모선 시스템을 대상으로 제약급전계획을 수립하였다. IEEE 30모선 시스템은 6대의 발전기와 41개의 선로로 구성되어 있으며 단선도는 그림 3과 같다. 자세한 선로 및 모선 데이터는 [13] 등에 수록되어 있다.

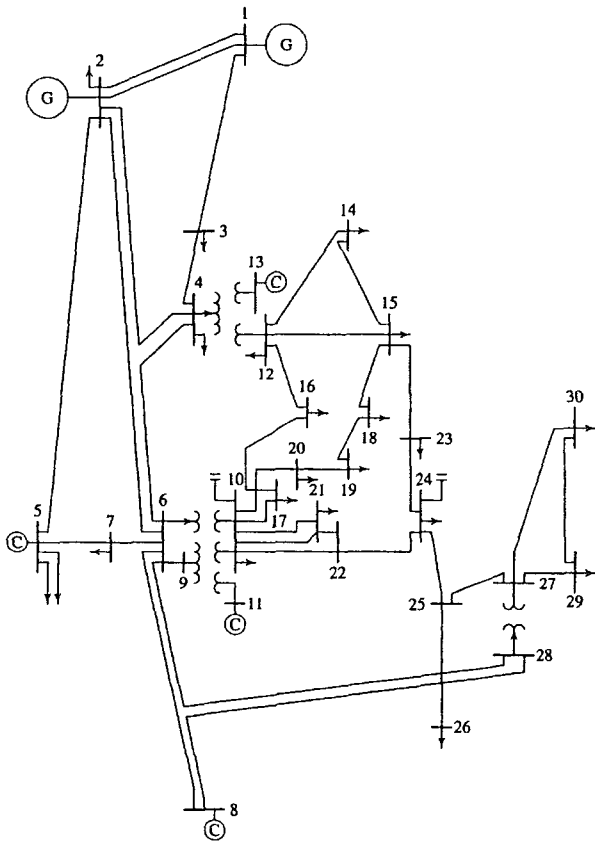


그림 3 IEEE 30모선 시스템 단선도
Fig. 3 One line diagram of IEEE 30 bus system

그림 3의 모든 발전기는 급전대상 발전기이며, 모선 1, 2, 5, 8, 11, 13의 발전기를 순서대로 발전기1 ~ 발전기6으로 명명하고, 30번 모선 부하만을 급전대상 부하라고 가정하였다. 급전발전기와 급전부하의 입찰 가격곡선은 각각 그림 4와 5에 나타나 있다. 급전발전기 입찰가격은 현실적인 값은 아니며, 제약급전 결과를 쉽게 파악하기 위하여 입찰 가격의 끝자리가 발전기 번호와 같도록 적당히 가정하였다. 즉, 1번 발전기의 입찰 가격은 101, 111, 121, 131, 141이며, 6번 발전기의 경우에는 116, 126, 136, 146, 156이다. 또한, 가격 구간이 변동하는 발전량의 끝자리 또한 발전기 번호와 일치시켰으며 그 값을 그림 2의 그래프에 표시하였다. 예를 들어, 3번 발전기는 발전량 13, 23, 33, 43[MW]에서 입찰 가격이 변한다. 그림 4로부터 각 발전기 발전량의 하한과 상한 또한 알 수 있

으며, 기타 발전기 관련 데이터는 다음과 같다.

- 증, 감발율 : ± 12 [MW/5min] (발전기1, 2)
 ± 6 [MW/5min] (발전기3, 4, 5, 6)
- 보조서비스 : 11 [MW] (발전기4)

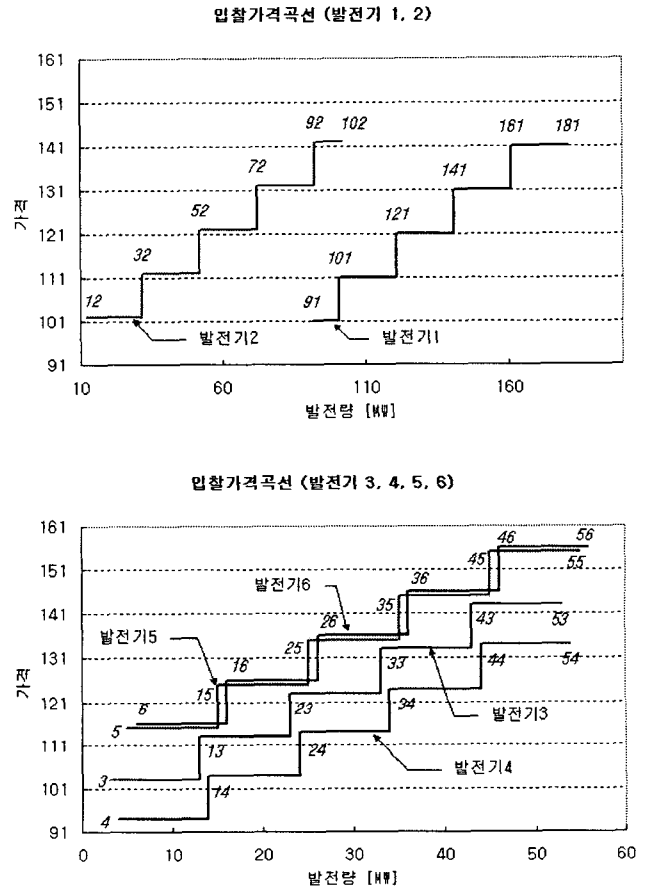


그림 4 급전대상 발전기의 입찰가격
Fig. 4 Generation bidding data

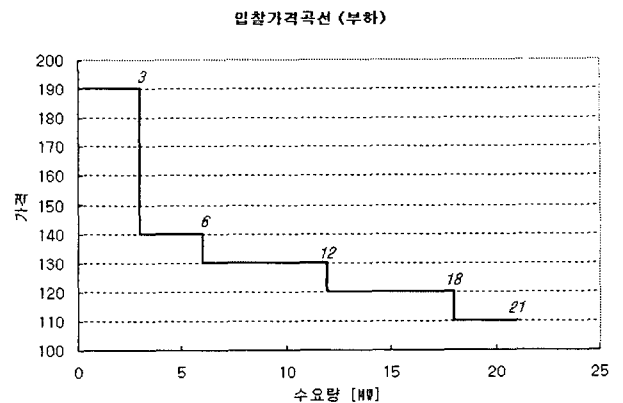


그림 5 급전대상 부하의 입찰가격
Fig. 5 Load bidding data

4.2 제약급전계획 결과

본 사례연구에서는 그림 4, 5의 고정된 입찰가격으로 5개의 연속된 급전구간에 대하여 제약급전을 수행하였다.

표 1은 각 발전기의 급전시작전의 초기 발전량과 선로과부하 제약을 고려하기 위한 선형화 기준점의 발전량을 보여준다. 표 1의 초기발전량은 최적의 급전상태는 아니며, 선형화 기준점으로 IEEE 30모선 기본데이터를 사용하였고, 이 때 전체 부하량은 283.4[MW], 전체 손실은 7.1[MW]이다.

표 1 발전기 초기정보

Table 1 Initial generation data

발전기 번호	1	2	3	4	5	6
초기 발전량 [MW]	128	58	25	35	18	17
선형화 기준점 [MW]	138.5	57.5	24.5	35.0	18.0	17.0

표 2의 수치는 5개의 급전구간별 수요 및 손실의 예측값이다. 표 2의 예측 수요량은 비급전부하만을 대상으로 하므로 급전부하인 30모선의 부하는 제외된 값이다.

표 2 예측수요 및 예측손실

Table 2 Forecasted load and loss data

급전 구간	1	2	3	4	5
예측 수요량 [MW]	271	302	321	330	340
예측 손실량 [MW]	7	8	9	9	10

IEEE 30모선 시스템의 데이터를 살펴보면 22번 모선은 발전기가 없는 부하모선일 뿐 아니라 모선부하의 크기도 '0'이다. 따라서, 본 사례연구에서는 22번 모선을 모선전력의 변화에 대한 선로조류의 민감도 계산에서 제외하는 기준모선으로 선택하였고, 선로조류의 한계를 모든 선로에서 공히 100[MW]이하의 유효전력으로 정하고, 선형계획법으로 제약급전계획을 수행하여 표 3의 결과를 얻었다.

표 3 제약급전결과

Table 3 Constraint dispatch scheduling results

급전 구간	1		2		3		4		5	
	용량	가격	용량	가격	용량	가격	용량	가격	용량	가격
발전기 1	140	121	141	121	141	121	146	131	154.08	131
발전기 2	62	122	72	122	72	122	72	122	74.92	132
발전기 3	23	113	29	123	33	123	33	123	33	123
발전기 4	34	114	40	124	43	124	43	124	43	124
발전기 5	15	115	21	125	25	125	25	125	25	125
발전기 6	16	116	19	126	25	126	26	126	26	126
급전부하	12	130	12	130	9	130	6	140	6	140

표 3에서, 발전기 용량의 단위는 [MW]이며 급전구간별로

가장 비싼 발전기의 공급가격을 밑줄로 표시하였다. 급전부하의 경우에는 밑줄 친 공급가격보다 비싸게 입찰한 용량만 급전을 받게 되므로, 표 3에는 급전 가능한 최저가의 입찰가격을 수록하였다.

그림 6은 제약급전결과를 그래프로 표현한 것으로, 공급곡선은 그림 4에 있는 6대 발전기의 입찰곡선을 모두 합하여 만든 가격곡선의 일부이며, 수요곡선은 표 2의 예측수요량, 예측부하량과 그림 5의 부하 입찰곡선을 합하여 만들었다. 수요곡선에서 비급전부하와 손실에 해당하는 발전량은 반드시 구매하여야 하므로 이에 해당하는 입찰가격은 충분히 큰 값으로 가정하여야 한다. 그림 6에서 급전구간별로 부하량이 변하므로 수요곡선은 급전구간별로 달라지지만, 급전 발전기의 입찰가격은 고정하였으므로 공급곡선은 급전구간에 관계없이 일정하다. 그러나, 실제로는 거래주기(30분)별로 공급곡선 또한 변경될 수 있다.

제약급전결과

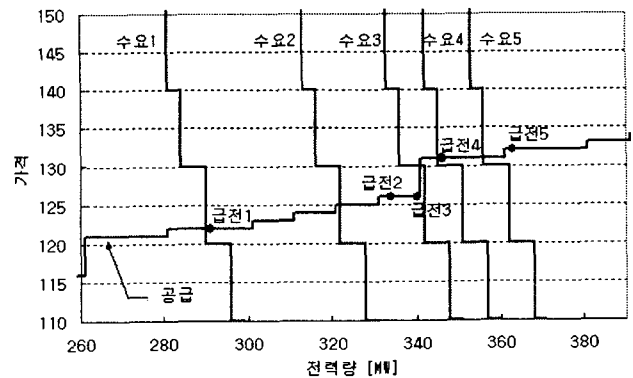


그림 6 제약급전결과

Fig. 6 Constraint dispatch scheduling results

제약조건을 무시하면 수요곡선과 공급곡선이 만나는 점에서 급전계획이 수립되겠지만, 실제로는 여러 제약조건 때문에 그림 6에 표시한 바와 같이 다른 결과를 얻게 된다. 각 급전구간별로 표 3 또는 그림 6의 급전 결과에 대하여 그 원인을 살펴보면 다음과 같다.

급전구간 1

발전기 1은 가격 121로 141[MW]까지 발전 가능하지만, 초기발전량이 128[MW]이고 증발율이 12[MW]이기 때문에 발전량이 140[MW]로 고정되었고, 이에 가격 122인 발전기 2의 발전량이 1[MW] 증가하였다. 그림 6에서 수요-공급 교점보다 1[MW] 증가한 곳에 급전점이 있음을 알 수 있다.

급전구간 2

발전기 3, 4, 5의 발전량이 증발율 조건 때문에 급전구간 1에 비하여 6[MW]씩만 증가하였고, 발전기 6에 의하여 급전가격이 결정되었다, 발전기 3, 4, 5는 현재 가격구간에서 각각 4[MW]씩 더 출력할 수 있으므로 그림 6에서 급전점은 수요-공급 교점보다 12[MW] 증가하였다.

급전구간 3

발전기 4는 가격 124로 44[MW]까지 발전 가능하지만, 발전력 상한이 54[MW]이고 11[MW]를 주파수조정예비력으로 확보하여야 하므로 43[MW]이상은 발전할 수 없다. 발전기 6 또한 증발울 조건 때문에 최적의 발전량에 1[MW] 못 미치게 된다. 따라서, 급전전이 수요-공급 교점보다 2[MW] 증가하여야 하는데, 이 경우에 급전가격이 131이 되어 급전대상인 30번 모선부하가 6[MW]로 감소하므로 총 거래이익 또한 감소하게 된다. 결과적으로, 발전량은 가격을 126에 맞추게 되고, 급전부하량은 가격 130구간내의 9[MW]로 결정되었다. 이러한 수요감소로 인하여 그림 6의 급전3은 수요-공급 교점보다 오히려 1[MW] 감소하였다.

급전구간 4

급전구간 4에서는 주파수조정예비력제한으로 발전력이 43[MW]로 조정된 발전기 4외에는 각 발전기가 최적의 발전을 하고 있다. 한편, 급전부하는 급전가격상승으로 인하여 6[MW]로 감소하였다.

급전구간 5

가격 131에서 발전기 1의 증발울에는 여유가 있으나, 선로 과부하조건으로 인하여 발전기 1의 발전량이 제한을 받게 된다. 사례연구 계통은 다른 어떤 선로보다 모선1-모선2 선로에 가장 많은 전력이 흐르고 있고, 모선1에 연결되어 있는 발전기 1의 발전력 증가는 모선1-모선2 선로의 전력흐름을 증가시키므로 선로과부하조건에 영향을 받게 된다. 실제로 선로에 과부하가 발생하는지 확인하기 위하여 급전구간5의 급전계획대로 발전량을 할당하고 교류조류계산을 수행하여 표 4에 주요결과만 수록하였다. 이 때, 전체 부하에 대한 각 모선의 부하비는 일정히 유지된다고 가정하였다.

표 4 급전구간 5의 조류계산결과

Table 4 Power flow results for dispatch period 5

구분	총 부하	총 손실	발전기1 출력	최대선로조류
전력량[MW]	346	9.38	153.46	99.73

표 4에서 총 부하는 예측 비급전부하량 340[MW]와 6[MW]의 급전부하량의 합으로 급전계획수립에서 사용된 양과 같은 반면에, 총 손실은 예측값인 10[MW]와 차이가 있으므로, 기준 발전기인 발전기1의 출력이 급전 결과인 154.08[MW]와 조금의 차이를 보였다. 표 4의 최대선로조류는 모선 1-모선2 간의 유효전력량으로, 한계값인 100[MW]에 거의 정확하게 이르렀으므로 급전계획이 매우 정교하게 이루어졌음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 양방향 입찰시장의 실시간 제약급전계획에 적용 가능한 최적화 방안을 제안하였다.

양방향 입찰시장에서는 최적화 대상 목적함수가 자체적으로 구간선형이기 때문에 선형계획법으로써 급전계획을 수립하는 것이 가장 현실성 있는 방안이 된다. 따라서, 본 논문

서는 제약급전문제를 선형계획문제로 정식화하였으며, 정식화 과정에서 발전기의 증, 감발울을 적절히 이용하여 최적화 변수의 수를 최소화 하였고, 보조서비스로 인한 부등식 조건과 각 발전기 발전량의 한계로 인한 부등식 조건을 모두 최적화 변수의 범위 제약에 포함시킴으로써 선형계획법에 부가되는 부등식 조건의 수를 최소화하였다. 아울러, 선로제약조건의 반영에 있어서 주된 동작점을 기준점으로 선형화한 모델을 사용함으로써 직류조류계산을 사용한 경우에 비하여 매우 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였고, 이를 반영한 선로제약조건의 선형식을 유도하였다. 사례연구에서는 본 논문에서 제안한 방법을 IEEE 30모선 시스템에 적용하여 설명 가능한 결과를 얻을 수 있었다.

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 Multi-objective Optimization Procedures Using Linear Programming Techniques," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 731-738, May 1995.
- [6] M.E. Northup and J.A. Rasmussen.(1997,Oct) Electricity reform abroad and U.S. investment. U.S. Department of Energy-Energy Information Agency. (<http://www.eia.doe.gov/emeu/pgem/electric>)
- [7] The Pennsylvania-New Jersey Maryland (PJM) interconnection web site (<http://www.pjm.com>).
- [8] The New England independent system operator web site (<http://www.iso-ne.com>).
- [9] 한국전력거래소, 전력시장의 운영 (<http://www.kpx.or.kr>).
- [10] IEMO, Market Surveillance Panel Monitoring Report on the IMO-Administered Electricity Markets, October 2002.
- [11] Ioannis G Damousis et al., "Network-Constrained

Economic Dispatch Using Real-Coded Genetic algorithm," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 198-205, February 2003.

[12] M. F. Carvalho et al., "Optimal Active Power Dispatch by Network Flow Approach," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, no. 4, pp. 1640-1647, November 1988.

[13] M. A. Pai, Computer Techniques in Power System Analysis, pp. 210-212, New Delhi, 1979.

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



정 정 원 (鄭 正 源)

1960년 11월 8일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년~1992년 한국전력공사 전력경제연구실 연구원. 1992년~현재 경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부 교수.

Tel : 051-620-4774, Fax : 051-624-5980

E-mail : jwjung@ks.ac.kr



이 종 배 (李 宗 培)

1978년 5월 7일생. 2004년 경성대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기전자메카트로닉스공학부 석사과정.

Tel : 051-620-4774, Fax : 051-624-5980

E-mail : mirresys@ks.ac.kr