

경쟁적 전력시장 하에서의 선행급전계획 알고리즘 개발에 관한 연구

정 구 형 강 동 주\* 한 석 만 김 발 호  
 홍익대학교 \*한국전기연구원

Development of the Pre-Dispatch Scheduling Algorithm in the Competitive Electricity Market

Chung, Koohyung Kang, Dongjoo\* Han, Seokman Kim, Balho  
 Hongik Univ. \*KERI

**Abstract** - Systematic studies on the dispatch scheduling algorithm and related constraints can enhance the effectiveness of electricity market operation. Moreover, since various decision-making matters connected to dispatch schedule in competitive electricity market directly affect the market participants' profit, the dispatch scheduling procedure should be reasonable and systematic to convince them. Therefore, to prevent a dispute among the participants, these studies are indispensable requisites for the effective electricity market operation. In this paper, we develop unconstrained/constrained dispatch schedule algorithm applicable to Korean wholesale electricity market.

1. 서 론

효율적인 전력시장 운영을 위해서는 급전과정 및 시스템과 관련된 연구가 필수적이며, 급전알고리즘 및 관련 제약 특히, 안전도 및 안전도에 관련된 제약에 대한 체계적인 연구를 통하여 전력산업의 효율성은 상당히 제고될 수 있다. 또한, 기존의 수직통합적 환경에서와는 달리 급전에 관련된 제반 의사결정 사항이 시장참여자(즉, 발전사업자, 판매사업자, 소비자 등)의 손익과도 직접 관련이 되므로 합리적이고 체계적인 급전의사결정만이 시장참여자들을 납득시킬 수 있으므로 이러한 연구는 사전에 분쟁을 방지한다는 차원에서 필수적인 연구 분야이다.

이를 위해, 본 연구에서는 도매전력시장에서의 급전계획 수립 시 적용가능한 비제약 및 제약 선행 급전계획 알고리즘을 개발하였으며, 이를 전산모형으로 구현하였다.

2. 본 론

2.1 비제약 선행급전계획

급전계획이란 거래일의 전력수요를 충당하기 위해 사전에 거래일 매 시간대별 발전기들의 운전출력을 결정하는 것을 의미한다. 그러나 운전애 소요되는 비용은 발전기별로 각각 다르기 때문에, 전체 전력계통의 운전비용을 절감하기 위해 전력공급에 여유가 있는 경우에는 일반적으로 운전비용이 낮은 발전기는 높은 출력으로 운전시키고 운전비용이 높은 발전기는 출력을 낮추거나 발전기를 정지시킨다.

도매전력시장의 기본원칙은 공급과 수요입찰을 통해 사회효용을 극대화시킬 수 있도록 발전출력과 수요를 결정하는 것이다. 이러한 원칙하에 매 시간대별로 계통에 투입되어 운전하는 발전기들의 조합(UC)과 각 발전기의 출력을 결정하는 것이 급전계획이다. 이 가운데, 전력시장의 가격을 결정하고 거래대금을 정산하는 경우에 한해 가격 적용의 기준발전량을 결정하기 위해 적용하는 발전계획이 비제약 선행급전계획(UPDS)이다. 비제약 선행급전계획은 전력계통에서 송전제약, 연료제약, 열공급 제약 등의 계통운영과 관련된 제약사항이 발생하지 않는다는 조건하에서의 발전계획 즉, 이상적인 조건하에서의 경제 순위에 의한 발전계획을 의미한다.

이러한 비제약 선행급전계획은 다음과 같이 수행된다. 우선, 발전사업자는 판매의사에 대한 정보를 포함한 발전계획을 수립하고 이를 입찰의 형태로 계통운영자에게 제출한다. 마찬가지로 판매사업자는 전력의 구매에 대한 정보를 입찰의 형태로 제출한다. 계통운영자는 발전측과 판매측의 입찰내역을 기준으로 거래전력량 및 전력가격을 결정하게 된다. 이 때, 발전사업자는 발전기의 증분비용과 발전량에 대한 정보를 입찰하고 판매사업자는 구매의향을 가진 전력량과 감분비용을 입찰하게 된다. 발전사업자의 입찰에서는 발전기의 발전비용이 저렴한 발전기로부터 비싼 발전기 순으로 발전량을 누적하여 공급우선순위가 결정된다. 마찬가지로 판매사업자에 대해서는 자의지불수준이 높은 판매사업자로부터 낮은 판매사업자순으로 구매량을 누적하여 구매우선순위가 결정된다.

2.2 제약 선행급전계획

제약 선행급전계획(CPDS)은 거래일에 실제 전력계통을 운영하기 위한 발전계획이다. 이 발전계획에는 비제약 선행급전계획에서 결정된 거래일의 매 시간대별 전력수요에 맞추어 운전되는 발전기와 해

당 시간대의 출력을 결정한다. 비제약 선행급전계획이 계통의 제약 사항이 없이 이상적인 조건에서 단순히 경제원리에 의해 운전되는 것을 전제로 수립되는 데 반해, 제약 선행급전계획은 계통운영에 반영해야 하는 각종 제약조건들을 고려한 상태에서 실제로 계통운영의 결과를 예측한다.

비제약 선행급전계획의 결과로 주어진 각 발전기의 계통투입 조합을 바탕으로, 제약 선행급전계획은 거래일의 매 시간대별 최적조류계산(OPF)에 의해 수립된다. 이는 다음과 같은 비선형계획(NLP) 최적화 문제로 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(x) & (1) \\ & \text{subject to} \\ & h(x) = 0 & (2) \\ & g(x) \leq 0 & (3) \\ & x \in R^n \end{aligned}$$

단,  $f(x)$ 는 모든 발전기의 발전비용에 대한 합으로 정의되며, 총 유효전력 발전비용을 목적으로 한다. 실제 우리나라 도매전력시장에서는 목적함수에 예비력 확보비용을 포함하고 있으며 이는 추가적인 식으로 쉽게 반영할 수 있지만, 본 논문에서는 계산상의 편의를 위해 이에 대한 부분을 제외하였다.  $h(x)=0$ 는 계통 수급균형 제약조건으로 각 모선에 대한 전력조류방정식으로 정의된다. 또한,  $g(x) \leq 0$ 는 계통 제어변수  $x$  및 함수값에 대한 허용한계를 설정하는 부등제약조건(inequality constraints)을 의미한다.

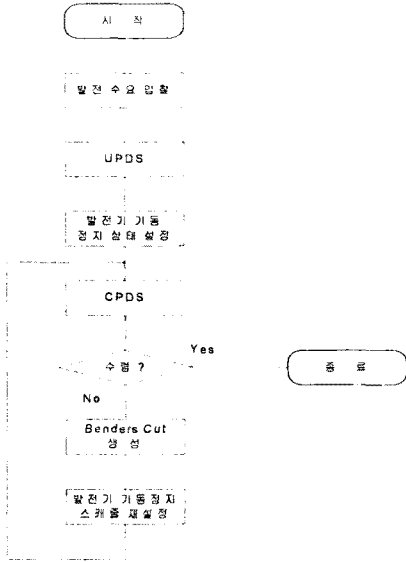
이러한 최적조류계산의 결과는 해당 시간대에서의 각 발전기의 최적 발전출력 수준을 결정한다. 그러나 주어진 발전기 투입상태로는 위의 최적조류계산의 해를 도출하지 못할 경우 즉, 계통운영이 불가능할 경우에는 계통운영을 보장함과 동시에 최소비용으로 운전이 가능하도록 발전기의 기동·정지 상태를 재수립해야 한다. 이러한 발전기 기동·정지 상태를 고려하여 제약 선행급전계획을 수행할 경우, 이는 다음과 같은 혼합 정수계획 조합 문제(mixed integer nonlinear programming, MINLP)로 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } c^T y + f(x) & (4) \\ & \text{subject to} \\ & h(x) = 0 & (5) \\ & g(x) \leq 0 & (6) \\ & Cx + By \leq b & (7) \\ & x \in R^n, y \in \{0,1\} \end{aligned}$$

단,  $y$ 는 발전기 기동·정지 상태를 결정하는 이진변수(binary variables)이며,  $Cx + By \leq b$ 는 연속변수(continuous variables)  $x$ 와 이진변수  $y$  모두에 의해 제약되는 결합 제약조건(coupling constraints)을 나타낸다.

이러한 혼합 정수계획 문제는 연속변수와 이진변수를 동시에 결정해야 하기 때문에 상당히 대규모의 문제로 정식화되며 계산이 매우 복잡하고 해의 수렴성 또한 보장하기 어렵다. 그러나 결합 제약조건  $Cx + By \leq b$ 를 제거한다면 원문제는 이진변수  $y$ 를 결정하기 위한 정수계획 주문제(master problem)와 연속변수  $x$ 를 결정하기 위한 비선형계획 부문제(subproblem)로 분리될 수 있다. 이 때, 주문제는  $y$ 값을 결정하여 이를 부문제로 전송하며, 부문제는 고정된  $y$ 값의 수정 여부를 검토하며, 이러한 두 개의 문제는 전체 해가 수렴될 때까지 서로 상호 반복연산을 수행함으로써 문제를 해결할 수 있다[2,4].  $k$ 번째 반복연산에서 주어진  $y$ 값을 고정하면, 다음과 같은 비선형계획 부문제를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } c^T y^k + f(x) & (8) \\ & \text{subject to} \\ & h(x) = 0 & (9) \\ & g(x) \leq 0 & (10) \\ & Cx + B y^k \leq b & (11) \\ & x \in R^n \end{aligned}$$



〈그림 1〉 선행급전계획 흐름도

위의 부문제를 통해 식 (11)의 쌍대(dual)값을 얻게 되면, 주문제는 이러한 쌍대값을 바탕으로  $y$ 값을 개선하기 위해 다음과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } z \\ & \text{subject to} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} z & \leq L(x^k, y, t^k), \quad k=1, 2, \dots, K \\ y & \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (13)$$

단,  $L(x^k, y, t^k) = c^T y + f(x^k) + (t^k)^T (Cx^k + By - b)$ 으로 정의되며 이는 주문제의 해를 개선하기 위한 Benders cut이 된다. 이 때,  $t^k$ 는  $k$ 번째 반복연산에서의 부문제에서 계산된 (11)식의 쌍대 변수 벡터를 나타낸다.

이러한 주-부문제 간 반복연산은 부문제의 목적함수식 (8)의 값과 주문제의 목적함수식 (13)의 값이 충분히 가까워질 경우 즉, 허용오차 범위 내로 수렴될 경우 중지되며 이 때의  $y$ 값과  $x$ 값이 원문제의 최적해가 된다.

따라서 이를 제약 선행급전계획 모형으로 구현하기 위해 주문제에서는 각 발전기의 운전, 기동 및 정지 상태를, 부문제는 주문제에서 결정된 발전기 기동·정지 상태에 대해 송전용량 제약과 선로손실 및 발전기 증·감발제약 등의 계통 제약조건을 고려하여 총 계통 운전비용을 최소화하는 시간대별 각 발전기의 최적 발전출력 수준을 결정하도록 정식화할 수 있다. 이 때, 부문제의 해는 주문제에서 결정된 발전기 기동·정지 상태가 적합한 지 여부에 대한 한계적인 정보를 제공하며, 이러한 정보는 주문제가 각 발전기의 계통투입 여부에 대한 최적의 결과를 제시하도록 한다.

### 2.3 선행급전계획 모형의 구현

위에서 제안한 알고리즘을 바탕으로 GAMS CONOPT /CPLEX solver를 이용하여 비제약 및 제약 선행급전계획 모형을 구현하였으며, 이는 다음과 같은 절차로 운영된다. <그림 1>은 이러한 선행급전계획 모형의 운영에 대한 전체적인 흐름도를 보여주고 있다.

#### ■ Step 1: 발전 및 수요입찰 데이터 입력

비제약 선행급전계획을 수행하기 위해 본 모형은 발전 및 수요입찰 데이터를 입력한다. 이 때, 매 시간대별로 발전입찰 데이터는 발전기의 중분비용과 발전량에 대한 정보를, 수요입찰 데이터는 구매의향을 가진 전력량과 감분비용을 포함한다.

#### ■ Step 2: 비제약 선행급전계획(UPDS)

발전 및 수요입찰 데이터를 바탕으로 앞에서 설명한 바와 같이 거래일 매 시간대별로 비제약 선행급전계획을 수행한다. 이를 통해 다음과 같은 결과가 도출되며, 'pds.out'이라는 파일에 기록된다.

- 매 시간대별 계통 및 모선별 유효전력 수요량
- 매 시간대별 각 발전기의 유효전력 출력수준
- 예상 시장청산물량(Forecasted Market Clearing Volume, FMCV)
- 예상 시장청산가격(Forecasted Market Clearing Price, FMCP)

#### ■ Step 3: 제약 선행급전계획(CPDS)

비제약 선행급전계획을 통해 계통투입이 결정된 발전기와 부하를

바탕으로 거래일 매 시간대별 제약 선행급전계획을 수행한다. 그 결과, 제약 선행급전계획을 통해 다음과 같은 내용이 결정된다.

- 매 시간대별 각 모선의 유효 및 무효전력 부하량
- 매 시간대별 각 발전기의 유효 및 무효전력 발전량
- 매 시간대별 각 발전기의 연료비용
- 매 시간대별 유효 및 무효 선로조류량
- 매 시간대별 각 모선의 전압 및 위상각
- 매 시간대별 총 계통 운전비용

거래일 모든 시간대에 대해 제약 선행급전계획의 해가 도출되면 종료된다. 그러나 만약 특정 시간대에 비제약 선행급전계획으로 주어진 발전기 조합으로 제약 선행급전계획의 해를 유도하지 못하는 경우에는 최소비용으로 계통운영이 가능한 새로운 발전기 조합을 찾아야 한다. 이는 다음 단계를 통해 결정된다.

#### ■ Step 4: 발전기 기동·정지 상태의 재수립

특정 시간대의 제약 선행급전계획의 해를 도출할 수 없게 되면, 해당 시간대의 제약 선행급전계획의 결과를 바탕으로 Benders cut을 생성한다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 새로운 발전기 기동·정지 상태를 계산하기 위한 제약조건으로 추가되며, 이를 바탕으로 정수계획 문제로 정식화되는 최소비용의 발전기 기동·정지계획 문제를 계산한다. 이를 통해 도출된 발전기 기동·정지 상태는 다시 Step 3의 제약 선행급전계획으로 전송된다.

## 3. 결 론

효율적인 전력시장 운영을 위해서는 급전과정 및 시스템과 관련된 연구가 필수적이며, 급전알고리즘 및 관련 제약에 대한 체계적인 연구를 통하여 전력산업의 효율성은 상당히 제고될 수 있다. 또한, 기존의 수직통합적 환경에서와는 달리 급전에 관련된 제반 의사결정 사항이 시장참여자(즉, 발전사업자, 판매사업자, 소비자 등)의 손익과도 직접 관련이 되므로 합리적이고 체계적인 급전의사결정만이 시장참여자들을 납득시킬 수 있으므로 이러한 연구는 사전에 분쟁을 방지한다는 차원에서 필수적인 연구 분야이다. 이를 위해, 본 연구에서는 도매전력시장에서의 급전계획 수립 시 적용가능한 비제약 및 제약 선행 급전계획과 실시간 급전계획 모형을 개발하였다.

제약 선행급전계획은 거래일의 각 입찰구간별 최적조류계산에 의해 수립된다. 그러나 주어진 발전기 투입상태로는 위의 최적조류계산의 해를 도출하지 못할 경우 즉, 계통운영이 불가능한 경우에는 계통운영을 보장함과 동시에 최소비용으로 운전이 가능하도록 발전기의 기동·정지 상태를 재수립해야 한다. 이러한 발전기 기동·정지 상태를 고려하여 제약 선행급전계획을 수행할 경우, 이는 혼합 정수계획 조합 문제로 정식화된다. 이러한 혼합 정수계획 문제는 연속변수와 이진변수를 동시에 결정해야 하기 때문에 상당히 대규모의 문제로 정식화되며 계산이 매우 복잡하고 해의 수렴성 또한 보장하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 각 발전기의 운전, 기동 및 정지 상태를 결정하기 위한 주문제와 주문제에서 결정된 발전기 기동·정지 상태에 대해 송전용량 제약과 선로손실 및 발전기 증·감발제약 등의 계통 제약조건을 고려하여 총 계통 운전비용을 최소화하는 각 발전기의 최적 발전출력 수준을 결정하기 위한 부문제로 분리하여 제약 선행급전계획 모형을 구현하였다. 이 때, 부문제의 해는 주문제에서 결정된 발전기 기동·정지 상태가 적합한 지 여부에 대한 한계적인 정보를 제공하며, 이러한 정보는 주문제가 각 발전기의 계통투입 여부에 대한 최적의 결과를 제시하도록 한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00290)

#### [참고 문헌]

- [1] 한국전력거래소, 전력시장의 운영, <http://www.kpx.or.kr>.
- [2] J. F. Benders, "Partitioning procedures for solving mixed variables programming problems", *Numerische Mathematik*, 4, pp.238-252, 1962.
- [3] A. M. Geoffrion and G. W. Graves, "Multicommodity distribution system by Benders decomposition", *Management Science*, 20, pp.822-844, 1974.
- [4] A. M. Geoffrion, "Generalized Benders decomposition", *Journal of Optimization Theory and Application*, 10(4), pp.237-260, 1972.
- [5] 김광원, 이종배, 정정원, "선형계획법을 이용한 양방향 전력시장에서의 제약급전계획 연구," *대한전기학회논문지*, 53A권, 10호, pp. 573-580, 2004년 10월