

발 · 송전설비 통합성을 고려한 전력계통계획 전산모형 프로그램 개발

(Development of Transmission Expansion Planning Optimization Software Considering Integration of Generation and Transmission Facilities)

허 돈* · 정해성 · 유현수 · 조강욱

(Don Hur · Hae-Sung Jung · Heon-Su Ryu · Kang-Wook Cho)

요 약

본 논문에서 제안하는 전력계통계획 방법론은 계통계획이 신규 자원의 수익에 영향을 미칠 수 있다는 인식 하에 발전 및 송전 투자 결정에 관한 상호 작용을 반영하고, 이것으로 인하여 설비 투자자 및 전력계통계획자의 목적을 동시에 고려할 수 있게 된다. 이러한 관점에서 본 논문은 혼합정수계획 모형에 기초한 전력계통계획 전산모형 프로그램을 개발하고자 한다. 이 소프트웨어는 설비예비율, 발전원별 비용, 순동예비력 양, 에너지 및 연료계약 조건, 송전선로 사고 및 손실, 파이 분기 등의 기술적 제약조건을 만족하면서 신규 발전설비, 송전선로, 변전소의 용량뿐만 아니라 건설 시기와 장소를 결정하도록 설계되어 있다. 최종적으로 간단한 Garver 계통을 통하여 본 논문에서 제안된 전산모형 프로그램의 정확성 및 효율성을 검증하고자 한다.

Abstract

The transmission valuation methodology we propose here captures the interaction between generation and transmission investment decisions recognizing that a transmission expansion can impact the profitability of new resources investment, so that a methodology should consider both the objectives of investors in resources and the transmission planner. In this perspective, this paper purports to develop the mixed-integer programming based transmission expansion planning optimization software, which is well designed to determine the construction time and place of new generators, transmission lines, and substations as well as their capacities to minimize total expenditures related to their investment and operations while meeting technical constraints such as capacity margin, constitution ratio of power resources, spinning reserves, energy and fuel constraints, transmission line outages and losses, pi-type branching, and so on. Finally, Garver's simple system is adopted to validate not simply the accuracy but the efficiency of the proposed model in this paper.

Key Words : Transmission Expansion Planning, Mixed Integer Programming,
Integration Of Generation And Transmission Facilities

* 주저자 : 광운대학교 전기공학과 조교수

Tel : 02-940-5473, Fax : 02-940-5141, E-mail : dhur@kw.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 23일, 1차심사 : 2009년 7월 27일, 심사완료 : 2009년 12월 28일

1. 서 론

전력계통계획이라는 것은 전력수요 예측 결과에 따라 전력수요 포화 연도의 최적 계통 구성을 상정하고, 정해진 계획기간에 대하여 환경적, 물리적 제반 제약요건을 충족시키면서 공급신뢰도와 경제성이 조화된 발전설비 및 154[kV] 이상 송·변전 설비를 연차별로 순차적으로 구성하는 과정을 일컫는다. 즉, 장기적으로 예측된 전력수요와 발전설비계획 및 전원입지계획과의 합리적 조화를 통하여 전력계통의 공급신뢰도 향상은 물론 투자비용 최소화 및 환경 친화적 송·변전 설비건설 추구를 목적으로 한다고 할 수 있다[1].

최근 들어 송전망 개방, 서비스 분리, 탁송 등과 같은 전력산업에 불어 닥친 일련의 변화들이 전력계통계획의 방법론에 상당한 영향력을 행사하고 있다[2-3]. 비록 신뢰도, 비용 및 최적화 등이 주요 쟁점이지만, 상기와 같은 변화들이 송전망 분석의 범위를 확장시켰다는 것만은 자명하다. 전력계통계획은 기술적 요인에 의해서만 좌지우지 되는 것이 아니라, 경제성, 사회적 공감대, 제도적 요인 등 계통계획 과정의 이면에 있는 다양한 요소에 의해서도 영향을 받는 매우 복잡한 작업이라고 할 수 있다.

지금까지의 국내 전력수급기본계획은 발전설비 계획 이후 송·변전설비 계획을 수립하는 순차적 방식에 의해 수립되어 왔는데, 이 방식은 발전설비 계획과 송·변전설비계획 각각에 대하여 독립적으로 최적화된 준최적화 개념의 설비 투자계획이라고 할 수 있다[4]. 또한 송·변전설비 계획의 경우는 단년도 차원의 설비 투자계획으로 설비계획기간 전체에 대한 최적 설비투자 검토가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 하나의 망으로 연결된 발전설비와 송·변전설비는 상호 보완적 관계를 가지기 때문에[5], 설비 투자계획 수립 시 발전설비와 송·변전설비 간의 경험성을 동시에 반영할 수 있는 평가체계를 구축하여 신뢰도와 경제성을 높일 필요가 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 발전설비와 송·변전설비 계획 간의 통합성을 확보하고, 계통계획의 합리성을 도모할 목적으로 혼합정수계획법에 기초한 전력계통계획 최적화 전산모형을 개발하고자 하였다. 그러므로 발·송·변전설비

특성을 고려한 합리적인 건설계획은 전체 전력생산 비용을 감소시키게 되고, 보다 합리적이고 투명한 정보를 제공하여 효율적인 설비투자를 유도할 수 있다는 점에서 의의를 가진다고 할 수 있다.

2. 전산모형 프로그램의 특징 및 구성

발전계획과 송·변전계획을 통합하여 최적의 자원 계획을 세우기 위해서는 발전설비와 송·변전설비에 대한 특성이 정확하게 모델링되어야 하고, 전산모형 프로그램은 이를 정확하게 반영하여야 한다. 설비투자의 문제는 의사결정의 문제이며, 결국 0 또는 1이라는 값을 갖는 이진 변수를 고려해야 한다. 따라서 혼합정수계획법을 기초로 최적화 모형을 구성하였으며, 사용자의 편의성을 도모하기 위해 Visual C++를 이용하여 사용자 인터페이스를 구성하였다.

전산모형 프로그램의 주요 특징은 다음과 같다.

- 1) 10~15년의 기간에 대해 최적화를 수행하여 신규 발전기, 신규 송전선, 그리고 신규 변전소의 진입을 결정한다. 즉 신규 발전기의 진입 위치와 진입 시기가 결정되며, 신규 송전선의 건설 위치와 건설 시기, 신규 변전소의 건설 위치와 건설 시기, 그리고 bank의 건설시기가 결정된다.
- 2) 발전기는 정확한 비용을 도출하기 위해 기동정지를 반영한다.
- 3) 발전설비용량에 대해 설비에비율이 반영된다.
- 4) 원자력, 석탄, 증유, LNG, 신재생 설비 등에 대한 적정 설비 비율을 반영한다.
- 5) 에너지 제약을 주기별로 반영할 수 있다. 사용자가 선택한 발전기 그룹에 대해 상한제약과 하한 제약으로 반영할 수 있다.
- 6) 국내 “전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준” 준수를 위해 송전망의 이중 고장까지 반영된다. 이 때 신규 선로의 진입으로 인한 송전망 구성의 변화는 반영되지 않는다.
- 7) 지역별 적정 변전설비용량이 반영된다. 또한 각 모선의 변전소 용량은 그 모선의 부하보다 크게 되도록 설정한다.
- 8) 신규 변전소 건설 시 특정 선로가 건설되거나 폐

기되는 조건이 반영된다.

먼저 사용자는 발·송·변전설비에 대한 정확한 데이터를 입력해야 한다. 본 논문에서 개발된 프로그램은 수동으로 입력하는 것뿐만 아니라, 엑셀 파일 형식으로도 데이터를 입력할 수 있도록 하였다. 또한 송전선 사고를 모의하기 위해 선로사고 배분지수(LODF: Line Outage Distribution Factor)를 적용할 수 있다 [6]. LODF를 모든 선로에 적용하면 제약식이 너무 많아 해의 수렴성 문제가 야기될 수 있기 때문에, 개발된 프로그램에서는 사용자가 선택한 최대 10개까지의 선로에 대해서만 LODF가 적용되도록 하였다. 그림 1과 같이 다양한 데이터가 입력되면 입력 데이터베이스에 저장된다. 사용자는 저장해 놓은 입력 데이터베이스를 언제든지 다시 불러와 모의할 수 있다. 입력 데이터베이스의 정보는 GAMS와 연동되어 최적화가 수행되고, 최적화 수행의 결과는 결과 데이터베이스에 저장된다.

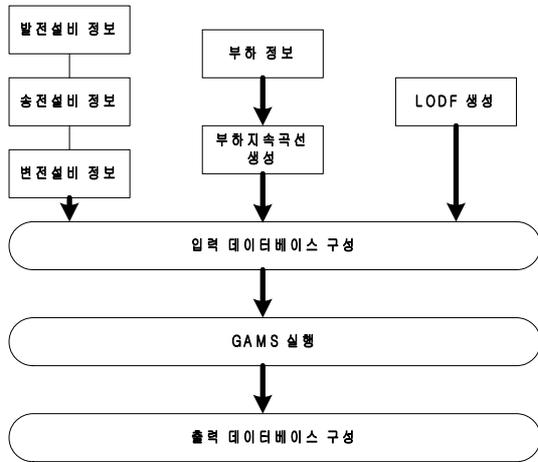


그림 1. 전산모형 프로그램의 전체적인 구성
Fig. 1. Overall structure of transmission expansion planning optimization software

3. 발·송·변전설비 모델링

3.1 목적함수의 구성

목적함수는 아래와 같이 구성되어 발전설비, 송전설비, 변전설비의 투자비용과 발전설비의 운전비용이 포

함되도록 하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{목적함수} \\
 & = \text{신규 선로 투자가 발생한 시점의 투자비} \times (1 - \text{AnucFlag}) \\
 & + \text{신규 선로 투자비를 연도별로 연가화 시킨 비용} \times \text{AnucFlag} \\
 & + \text{신규 발전기 투자가 발생한 시점의 투자비} \times (1 - \text{AnucFlag}) \\
 & + \text{신규 발전기 투자비를 연도별로 연가화 시킨 비용} \times \text{AnucFlag} \\
 & + \text{발전기의 현가화 운전비용} \\
 & + \text{신규 변전소 투자가 발생한 시점의 투자비} \times (1 - \text{AnucFlag}) \\
 & + \text{신규 변전소 투자비를 연도별로 연가화 시킨 비용} \times \text{AnucFlag} \\
 & + \text{신규 bank 투자가 발생한 시점의 투자비} \times (1 - \text{AnucFlag}) \\
 & + \text{신규 bank 투자비를 연도별로 연가화 시킨 비용} \times \text{AnucFlag} \\
 & + \text{Penalty Cost} \times \text{PenaltyFlag}
 \end{aligned}$$

- 1) 목적함수는 신규 발전기의 투자비용, 신규 선로의 투자비용, 발전기의 운전비용, 신규 변전소 투자비용, 신규 bank의 추가비용, 그리고 페널티 비용으로 구성된다.
- 2) 사용자는 페널티 비용의 사용 여부를 옵션에서 선택할 수 있다. 페널티 비용은 주요 제약조건에 포함시킨 가상 변수 (dummy variable)에 해당하는 비용으로서, 만일 페널티 비용을 사용하지 않도록 설정한다면, 주어진 문제가 제약조건을 만족시키지 못할 경우 (infeasible)라면, 해를 찾지 못하게 된다. 이와는 반대로 페널티 비용을 사용한다면 제약조건을 만족시키지 못할 경우가 발생하더라도 대부분 해결되며, 대신에 가상 변수는 0보다 큰 값을 갖게 되어 페널티 비용이 발생하게 된다. 또한 0보다 큰 가상 변수를 가진 제약조건을 통해 문제가 되는 제약조건을 쉽게 판별할 수 있다.
- 3) 투자비용은 익일불 비용 (overnight cost)과 연가

화 비용 중 선택적으로 사용할 수 있다. 사용자는 옵션에서 이를 지정할 수 있으며, 목적함수의 $AnucFlag$ 가 0 또는 1로 지정되어 반영된다. 발전기, 선로, 변전소, 그리고 bank의 연가화 비용은 다음 식 (1)을 통해 익일불 비용으로부터 자동변환 된다. 단, 연가화에 사용되는 이자율과 기간은 각각 지정될 수 있다.

$$Anuc = \frac{OC}{NOD} \frac{r}{(1+r)} \frac{1}{(1-1/(1+r)^N)} \quad (1)$$

여기서, $Anuc$ 는 연가화 비용, OC (Overnight Cost)는 익일불 비용, NOD 는 계통계획 모의기간을 연가화 기간으로 나눈 값이며, 발전기, 선로, 변전소, 그리고 bank 별로 지정된 r 과 N 은 각각 이자율과 연가화 기간을 나타낸다.

3.2 발전기 모델링

신규 발전기 건설을 모델링하기 위해 wg 와 wgi 라는 두 개의 이진 변수 (0 또는 1의 값)를 설정한다. wg 는 건설되는 시점부터 1의 값을 지속적으로 갖는 반면, wgi 는 건설되는 시점만 1이고, 다른 기간에는 0의 값을 갖는다.

- 1) 건설시기 모델링 : 처음 시간에는 건설이 되거나 되지 않거나 둘 중 하나이며, 이 때 wg 와 wgi 는 서로 같다. 처음 시간 이후 t 시간 주기에 발전기가 건설된다고 가정하면, $wg(t) - wg(t-1) = wgi(t)$ 가 성립된다. 또한 신규 발전기는 최초투자시점과 최종투자시점 사이에서만 건설되며, 최초투자시점과 최종투자시점 사이의 임의의 특정 시점 (고정투자시점으로 정의)에 무조건 건설되어 있어야 하는 조건도 반영할 수 있다.
- 2) 설비에비율 제약 : 발전기의 총 설비용량은 전체 부하의 특정비율 배 이상이 될 수 있다. 그리고 기동된 발전기의 용량은 전체 부하에다가 순동예비력 양을 합한 값 이상이 되도록 설정할 수 있다.
- 3) 전원별 비율 제약 : 원자력, 석탄, 국내탄, 증유,

LNG, 신재생, 기타 발전설비에 대해서 최대부하 대비 각 전원별 비율이 일정 수준 이상이 되도록 할 수 있다.

- 4) 연료 제약 : 석탄화력 발전기와 LNG 발전기 군에 대해서 연료제약을 부여할 수 있다.
- 5) 발전 비용함수 모델링 : 발전비용은 2차 함수를 선형화하여 만든다. 이를 위해서 0과 최소출력을 하나의 구간으로 잡고 최소출력과 최대출력 사이를 사용자가 지정하는 n (1 이상) 개의 구간으로 나누어 $(n+1)$ 개의 구간에 대해 각각 선형화한다. 무부하비용 (2차 함수의 상수항)은 발전기가 투입되는 경우에만 반영되도록 모델링하였다. 발전비용은 식 (2)와 같다.

$$Cost(i,t) = MINPR(i,t) \times Pgmin(i,t) \quad (2)$$

$$+ \sum_{bl} [GENMC(i,t,bl) \times PgBL(i,t,bl)]$$

$$+ C \times state(i,t)$$

여기서, i 는 발전기, t 는 시간 주기, bl 은 최소출력에서 최대출력 사이의 선형화 블록 집합, $state(i,t)$ 는 발전기의 기동정지 (기동인 경우 1, 정지인 경우 0의 값)를 의미한다.

최소출력에서 최대출력까지를 n 등분할 때 각 구간의 크기는 다음과 같다.

$$PgBL(i,t,bl) \leq \quad (3)$$

$$[Pmax(i,t) \times bidrate(i) - Pmin(i,t)] / n(bl)$$

여기서, $bidrate(i)$ 는 발전기 i 의 입찰율을 의미한다. 따라서 발전기의 출력은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$Pgen(i,t) \quad (4)$$

$$= Pgmin(i,t) + \sum_{bl} PgBL(i,t,bl)$$

발전기 기동정지를 고려하게 되면, 발전기 출력은 다음의 범위에 있게 된다.

$$Pgmin(i,t) \leq Pmin(i,t) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Pmin(i,t) \times state(i,t) & \quad (6) \\ \leq Pgen(i,t) \\ \leq Pmax(i,t) \times bidrate(i) \times state(i,t) \end{aligned}$$

3.3 변전소 모델링

3.2절의 발전기의 경우와 동일하게 변전소도 ws와 wsi라는 이진 변수를 정의하여 건설시기 결정에 활용한다.

- 1) 건설시기 모델링 : 처음 시간에는 ws와 wsi가 같아야 하며, 처음 시간 이후 t 시간 주기에 변전소가 건설된다고 가정하면, $ws(t) - ws(t-1) = wsi(t)$ 가 성립된다. 최초투자시점 이전과 최종투자시점 이후에는 건설될 수 없다. 그 밖에 고정투자시점 (최초투자시점과 최종투자시점 사이의 임의의 시점)에는 변전소가 건설되어 있어야 하는 조건도 부여할 수 있다.
- 2) 지역별 변전소 용량 제약 : 지역별로 변전소 용량이 지역별 부하의 특정 비율 배 이상이 되도록 할 수 있다.
- 3) 각 모선의 변전소 용량은 그 모선의 부하 이상이 되어야 한다.
- 4) 신규 변전소가 건설되면 최소한 하나의 선로가 연결되어 있어야 한다.
- 5) 신규 변전소 건설 시 특정 선로의 건설과 폐지가 반영될 수 있다.
- 6) 신규 변전소가 건설되면 인근 모선으로부터 부하를 이전해 올 수 있다. 본 전산모형 프로그램에서는 신규 변전소가 담당해야 하는 인근의 모선의 부하 비율을 임의로 지정할 수 있다.

3.4 Bank 모델링

Bank 건설을 모델링하기 위해 변전소와 유사하게 wbn과 wbn이라는 이진 변수를 설정한다.

- 1) 건설시기 모델링 : 처음 시간에는 wbn과 wbn이 같아야 한다. 처음 시간 이후 t 시간 주기에 bank

가 건설된다고 가정하면, $wbn(t) - wbn(t-1) = wbn(i)$ 가 성립된다.

- 2) 변전소와 bank 관계 모델링 : 신규 변전소의 bank는 신규 변전소가 건설되어야만 설치할 수 있다.
- 3) 신규 변전소는 건설되면 기본적으로 지정된 초기 bank 수만큼 bank를 가지고 있어야 한다. 그리고 기존 변전소의 bank는 총 bank 수에서 기 건설되어 있는 bank 수만큼 추가로 설치될 수 있다.

3.5 선로 및 부하 모델링

- 1) 선로 조류의 방향을 고려하여 어느 쪽으로 조류가 흐르더라도 송전용량 제약을 위배하지 않아야 한다.
- 2) 선로 사고는 단일 고장과 이중 고장을 모두 고려한다. 예를 들어, 선로 rs가 사고로 개방되는 경우, 선로 ij의 회선 k의 조류는 다음과 같이 변하게 된다.

$$\Delta Flow_{ij-k,rs} = LODF_{ij-k,rs} \cdot Flow_{rs} \quad (7)$$

여기서 LODF는 선로사고 배분계수로서, 식 (8)과 같이 유도된다[6].

$$\begin{aligned} LODF_{ij-k,rs} = & \quad (8) \\ \frac{x_{rs}/rs \text{ 회선수}}{x_{ij}} \cdot & \\ \frac{X_{ir} - X_{is} - X_{jr} + X_{js}}{x_{rs}/rs \text{ 회선수} - (X_{rr} + X_{ss} - 2X_{rs})} & \end{aligned}$$

여기서 x_{ij} 는 선로 ij의 리액턴스이고, X_{ir} 은 P=BΘ로 표현되는 조류방정식에서 B⁻¹의 i행 r열 원소에 해당한다. 그러나 식 (8)은 이중 고장으로 확장될 경우 상당히 복잡하므로, 본 논문에서는 형태는 다르나 동일한 결과를 도출할 수 있는 식 (9)를 활용하기로 한다.

$$LODF_{ij-k,rs} = \frac{X'_{ir} - X'_{is} - X'_{jr} + X'_{js}}{x_{ij}} \quad (9)$$

여기서 X_r' 은 선로사고 후의 상태에서 구한 B'의 역행렬 B'^{-1} 의 i 행 r 열 원소에 해당한다.

- 3) 상정사고의 우선순위를 정하는 방법은 전체 N개의 상정사고에 대하여 식 (10)-(11)과 같은 2 가지 기준에 따라 해당 상정사고가 전력계통에 미치는 영향을 계량적으로 측정하여 성능지수가 높은 순서대로 배열하여 상위 각 5 개의 상정사고를 LODF를 적용하기 위한 상정사고로 간주한다.

$$\text{과부하 기준} : PI = \sum_{i=1}^L \left(\frac{P_i}{P_i^{Max}} \right)^2 \quad (10)$$

$$\text{전압강하 기준} : PI = \sum_{i=1}^L X_i P_i^2 \quad (11)$$

여기서, P_i 는 i 선로에 흐르는 유효전력, P_i^{Max} 는 i 선로의 최대 용량, X_i 는 i 선로의 리액턴스, L 은 측정되는 선로의 총 개수를 의미한다.

- 4) 선로손실은 참고문헌[7]의 방법론을 적용하기로 한다.
- 5) 모선별 부하는 계통 전체 부하로부터 사용자가 주기별로 임의로 지정한 배분 비율에 따라 할당한다.

4. 사례 연구

4.1 사례 연구 대상 계통

본 논문에서는 그림 2의 수정된 Garver 계통[8]에 대하여 개발된 전산모형 프로그램이 정확하게 결과를 도출하고 있는지 검증하고자 한다. 수정된 Garver 계통은 각 모선에 부하가 있으며, 신규 변전소 b7 모선이 추가되어 있다. 발전기는 모선 b1, 모선 b3, 모선 b6에 각각 2 기씩 접속되어 있으나, G6 발전기는 폐지 예정이다. 발전기, 송전선로 및 모선별 부하 정보는 각각 표 1, 표 2, 표 3과 같다. 표 1에서 알 수 있듯이, 신규 발전기 G7과 G8은 모선 b2와 b5에 각각 건설될 수 있다. 또한, 모선 b2와 모선 b3을 연결하는 송전선로 외에 모선 b1과 모선 b6, 모선 b2와 모선 b5, 모선 b4

와 모선 b5, 모선 b6과 모선 b7을 연결하는 송전선로가 신설될 수 있다고 가정한다. 계획기간은 표 3에서와 같이 t1에서 t6까지 6 년으로 한다.

신규 발전기 또는 신규 송전선로의 건설 없이 기존 발전기, 송전선로만을 가지고 총 발전비용을 최소화할 경우 각 주기별 발전기의 출력과 송전선로의 조류량은 표 4 및 표 5와 같으며, 그 때의 발전비용은 18,141.377 억원이다. 표 5에서 보는 바와 같이 t1 시기에 모선 b2와 모선 b3을 연결하는 기존 선로 c1에 혼잡이 발생하는 것을 알 수 있다. 직관적으로 혼잡 해소를 위해서는 모선 b2의 발전기 G7이 건설되든지, 아니면 모선 b2와 모선 b3을 연결하는 송전선로가 신설되어야 한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 상황에서 본 논문에서 개발된 프로그램이 어떠한 방식으로 설비 건설을 결정하는지 다음 절에서 알아본다.

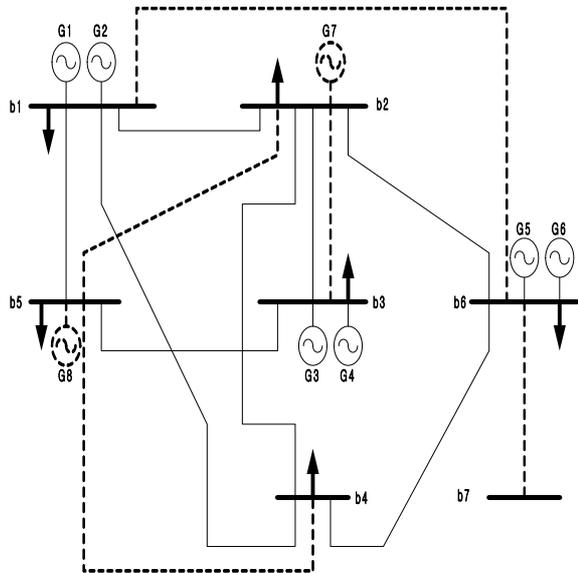


그림 2. 수정된 Garver 계통
Fig. 2. Garver's modified system

본 논문에서 개발된 프로그램은 GAMS 22.5를 적용하였으며, solver는 CPLEX (version 10.2) 또는 Xpress-MP 중에서 선택할 수 있도록 하였다. CPLEX 및 Xpress-MP는 혼합정수계획법의 해법으로써 분지한계법 (branch and bound)에 기초하고 있다[9].

발·송전설비 통합성을 고려한 전력계통계획 전산모형 프로그램 개발

표 1. 발전기 정보

Table 1. Generator Information

발전기	모선	최대출력 [MW]	최소출력 [MW]	연료단가 [천원/Gcal]	A [Gcal/MW ²]	B [Gcal/MW]	C [Gcal]	비고
G1	b1	250	100	10	0.001	0.1	0.1	기존
G2	b1	250	100	20	0.001	1.0	10	기존
G3	b3	350	100	30	0.001	1.2	15	기존
G4	b3	350	100	40	0.001	1.4	20	기존
G5	b6	350	100	40	0.001	1.6	25	기존
G6	b6	350	100	40	0.001	2.0	30	폐지
G7	b2	350	100	10	0.001	0.1	0.1	신규
G8	b5	450	100	40	0.001	2.4	40	신규

표 2. 선로 정보

Table 2. Transmission line information

시작모선	끝모선	회선	리액턴스[p.u.]	선로용량[MW]	비고
b1	b2	c1	0.004	200	기존
b1	b4	c1	0.006	200	기존
b1	b5	c1	0.002	200	기존
b2	b3	c1	0.002	200	기존
b2	b4	c1	0.004	200	기존
b2	b6	c1	0.003	200	기존
b3	b5	c1	0.002	200	기존
b4	b6	c1	0.003	200	기존
b2	b3	c2	0.002	200	신규
b1	b6	c1	0.002	250	신규
b2	b5	c1	0.002	250	신규
b4	b5	c1	0.002	250	신규
b6	b7	c1	0.002	250	신규

표 3. 부하 정보

Table 3. Load information

모선	t1 부하[MW]	t2 부하[MW]	t3 부하[MW]	t4 부하[MW]	t5 부하[MW]	t6 부하[MW]
b1	200	100	200	100	200	100
b2	220	110	220	110	220	110
b3	240	120	240	120	240	120
b4	260	130	260	130	260	130
b5	200	100	200	100	200	100
b6	200	100	200	100	200	100

표 4. 기준 경우의 발전기 출력
Table 4. Generator output in base case

발전기	t1	t2	t3	t4	t5	t6
G1	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00
G2	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00
G3	350.00	160.00	350.00	160.00	350.00	160.00
G4	194.53	-	194.53	-	194.53	-
G5	275.47	-	275.47	-	275.47	-
G6	-	-	-	-	-	-

표 5. 기준 경우의 선로 조류량
Table 5. Transmission line flow in base case

시작모선	끝모선	회선	t1	t2	t3	t4	t5	t6
b1	b2	c1	95.47	137.75	95.47	137.75	95.47	137.75
b1	b4	c1	109.07	117.08	109.07	117.08	109.07	117.08
b1	b5	c1	95.47	145.17	95.47	145.17	95.47	145.17
b3	b2	c1	200.00	85.17	200.00	85.17	200.00	85.17
b2	b4	c1	68.14	37.87	68.14	37.87	68.14	37.87
b2	b6	c1	7.33	75.05	7.33	75.05	7.33	75.05
b3	b5	c1	104.53	-45.17	104.53	-45.17	104.53	-45.17
b4	b6	c1	-82.79	24.95	-82.79	24.95	-82.79	24.95

4.2 사례 연구 결과

신규 설비 투자를 발전설비 투자와 송전설비 투자로 나누어 분석하고자 한다.

- 1) 모선 b2와 모선 b3 사이에 하나의 선로가 추가 신설된 경우
총 발전비용은 17,941.770억원으로, 총 발전비용이

199.607억원 감소함을 알 수 있다. 이 때 각 발전기의 출력과 송전선로의 조류량은 표 6 및 표 7과 같다.

- 2) 발전기 G7이 모선 b2에 진입한 경우

총 발전비용은 9,030.94억원이며, 총 발전비용이 9,110.44억원 감소하는 것을 알 수 있다. 이 때 각 발전기의 출력과 송전선로의 조류량은 표 8 및 표 9와 같다.

표 6. 선로 신설인 경우의 발전기 출력
Table 6. Generator output when a new line is constructed

발전기	t1	t2	t3	t4	t5	t6
G1	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00
G2	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00
G3	350.00	160.00	350.00	160.00	350.00	160.00
G4	287.50	-	287.50	-	287.50	-
G5	182.50	-	182.50	-	182.50	-
G6	-	-	-	-	-	-

표 7. 선로 신설인 경우의 선로 조류량

Table 7. Transmission line flow when a new line is constructed

시작모선	끝모선	회선	t1	t2	t3	t4	t5	t6
b1	b2	c1	80.21	130.27	80.21	130.27	80.21	130.27
b1	b4	c1	115.12	113.52	115.12	113.52	115.12	113.52
b1	b5	c1	104.67	156.21	104.67	156.21	104.67	156.21
b3	b2	c1	151.08	48.11	151.08	48.11	151.08	48.11
b3	b2	c2	151.08	48.11	151.08	48.11	151.08	48.11
b2	b4	c1	92.47	40.02	92.47	40.02	92.47	40.02
b2	b6	c1	69.90	76.46	69.90	76.46	69.90	76.46
b3	b5	c1	95.33	-56.21	95.33	-56.21	95.33	-56.21
b4	b6	c1	-52.40	23.54	-52.40	23.54	-52.40	23.54
b1	b6	c1	-	-	-	-	-	-
b2	b5	c1	-	-	-	-	-	-
b4	b5	c1	-	-	-	-	-	-
b6	b7	c1	-	-	-	-	-	-

표 8. 발전기 신설인 경우의 발전기 출력

Table 8. Generator output when a new generator is installed

발전기	t1	t2	t3	t4	t5	t6
G1	250	250	250	250	250	250
G2	250	100	250	100	250	100
G3	350	-	350	-	350	-
G4	120	-	120	-	120	-
G5	-	-	-	-	-	-
G6	-	-	-	-	-	-
G7	350	310	350	310	350	310
G8	-	-	-	-	-	-

표 9. 발전기 신설인 경우의 선로 조류량

Table 9. Transmission line flow when a new generator is installed

시작모선	끝모선	회선	t1	t2	t3	t4	t5	t6
b1	b2	c1	65.46	42.84	65.46	42.84	65.46	42.84
b1	b4	c1	134.24	71.93	134.24	71.93	134.24	71.93
b1	b5	c1	100.31	135.23	100.31	135.23	100.31	135.23
b3	b2	c1	130.31	-84.77	130.31	-84.77	130.31	-84.77
b2	b4	c1	135.90	65.05	135.90	65.05	135.90	65.05
b2	b6	c1	189.87	93.02	189.87	93.02	189.87	93.02
b3	b5	c1	99.69	-35.23	99.69	-35.23	99.69	-35.23
b4	b6	c1	10.13	6.98	10.13	6.98	10.13	6.98

표 10. 총 발전비용 비교

Table 10. Comparison of total generation cost in each case

사례	총 발전비용[억원]	기준 경우와의 발전비용 차이[억원]
기준 경우	18,141.377	-
선로가 신설된 경우	17,941.770	199.607
발전기가 추가된 경우	9,030.940	9,110.437

선로가 신설된 경우를 보면 모선 b2와 모선 b3 사이에 신규 선로가 건설될 때 그 비용이 199.607억원을 초과하지 않는다면 선로가 건설되는 것이 총 비용을 줄여줄 수 있다.

반면에 발전기가 추가된 경우를 보면 G7의 건설비용이 9,110.437억원을 초과하지 않는다면 발전기가 건설되는 것이 총 비용을 줄여줄 수 있다. 각각의 경우에 대한 총 발전비용은 표 10에 요약되어 있다.

4.3 발 · 송전설비 경합성 테스트

1) 모선 b2와 모선 b3 사이의 신규 선로의 건설비용을 190억원으로, 신규 발전설비 G7의 건설비용을 9,100억원으로 가정한 경우

모선 b2와 모선 b3 사이의 신규 선로의 건설비용이 190억원일 때, 신규 발전설비의 건설비용은 9,100.83억 원이어야 비용 효과 측면에서 등가이다. 따라서 신규 발전설비 G7의 건설비용이 9,100억원이므로 발전설비가 건설되는 것이 유리하다.

모의 결과 총 비용은 18,130.94억원이며, 발전기 G7이 모선 b2에 건설되었다.

2) 모선 b2와 모선 b3 사이의 신규 선로의 건설비용을 190억원으로, 신규 발전설비 G7의 건설비용을 9,101억원으로 가정한 경우

모의 결과 총 비용은 18,131.77억원(총 발전비용 17,941.77억원 + 선로 건설비용 190억원)이며, 모선 b2와 모선 b3 사이에 신규 선로가 건설되었다.

이상과 같이 본 논문에서 개발된 전력계통계획 프로그램은 각 설비의 투자비에 근거하여 경제성 측면에

서 가장 비용효과적인 발전설비와 송전설비의 입지 및 진입시기를 결정할 수 있었다. 실제로, 혼잡이 발생한 시점이 t1 시기이므로 그 때부터 설비가 투입되는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 논문은 발 · 송 · 변전설비의 투자비용 및 발전기 운전비용의 최소화를 목적함수로 하여 설비예비율, 전원별 비율, 에너지 및 연료 제약, 예비력 제약, 상정사고, 선로손실, 파이형 분기 등 발전설비와 송 · 변전설비의 기술적 제약을 만족하는 계통계획기간 전체의 혼합정수계획법에 기초한 전력계통계획 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 또한 발전설비와 송 · 변전설비의 경합성을 고려한 통합적 평가 알고리즘을 적용하여 발 · 송 · 변전설비의 최적 투자시기와 입지, 용량 등을 결정할 수 있었다. 특히, 경제적 측면에서 볼 때 다년도에 걸쳐 발 · 송 · 변전설비의 투자비용과 발전기의 운전비용을 동시에 최적화함으로써 투자의 효율성을 확보할 수 있게 되고, 송전선로 신뢰도 기준 변화나 신규 변전소 투자에 의한 계통 구성의 변화 등에 대한 경제성 변동 분석이 가능케 됨으로써 발전설비 및 송 · 변전설비 투자계획의 정당성을 부여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] 한국전력공사 계통계획처, "장기 송변전 설비계획," 2007.
- [2] R. Baldick and E. Kahn, "Transmission Planning Issues in a Competitive Economic Environment," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 4, Nov. 1993, pp. 1497-1503.
- [3] A. K. David and Fushuan Wen, "Transmission Planning and Investment under Competitive Electric Market Environment," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 3, 15-19 July 2001, pp. 1725-1730.
- [4] 허돈, "국내의 계통계획에 대한 소개," 전기의 세계, 대한전기학회, 제56권, 제8호, 2007년 8월, pp. 35-40.
- [5] B. Graeber, "Generation and Transmission Expansion Planning in Southern Africa," IEEE AFRICON, vol. 2, 28 Sept.-1 Oct. 1999, pp. 983-988.
- [6] R. D. Christie, B. F. Wollenberg, and I. Wangenstein, "Transmission Management in the Deregulated Environment," Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 2, Feb. 2000, pp. 170-195.
- [7] N. Alguacil, A. L. Motto, and A. J. Conejo, "Transmission Expansion Planning: A Mixed LP approach," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 3, Aug. 2003, pp. 1070-1077.
- [8] L. L. Garver, "Transmission Net Estimation Using Linear Programming," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 7, Sept./Oct. 1970, pp. 1688-1697.
- [9] J. A. Momoh, Electric Power System Applications of Optimization, 2nd edn., CRC Press: FL, USA, 2008.

◇ 저자소개 ◇

허 돈(許 焜)

1974년 1월 17일생. 1997년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1999년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 2005년~현재 광운대학교 전기공학과 조교수.
Tel : (02)940-5473
Email : dhur@kw.ac.kr

정해성(丁海聖)

1969년 12월 22일생. 1993년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1996년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 2008년~현재 장인의 공간 대표.
Tel : (02)498-5564
Email : econohs@masterspace.co.kr

유헌수(柳憲秀)

1992년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1996년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 2002년~현재 한국전력거래소 근무.
Tel : (02)3456-6723
Email : maxima@kpx.or.kr

조강욱(趙康旭)

1986년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1988년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~현재 한국전력거래소 근무.
Tel : (02)3456-6720
Email : jokangu@kpx.or.kr