

전력부문 온실가스 감축정책 평가를 위한 상향식 모형화 방안

김후곤 · 백천현* · 정용주**†

경성대학교, *동의대학교, **부산외국어대학교

(2016년 4월 5일 접수, 2016년 6월 10일 수정, 2016년 6월 16일 채택)

A Study on Constructing Bottom-up Model for Electric Sector

Hugon Kim, Chunhyun Paik, Yongjoo Chung

Dept. of Business Administration, Kyung Sung University

*Department of Industrial Management Engineering, Dongeui University

**Department of e-Business, Busan University of Foreign Studies

(Received 5 April 2016, Revised 10 June 2016, Accepted 16 June 2016)

요 약

국가온실가스 감축 로드맵을 통해 2020년 BAU 대비 약 30%의 온실가스감축을 목표로 하고 있는데, 전력부문의 경우 가장 많은 온실가스 배출을 하고 있어서 감축잠재량 산정에 매우 중요한 부문이다. 전력부문의 경우 온실가스 감축을 위해 수요관리, 전원믹스개선, 연료전환 등과 신재생에너지 비중 확대 등의 정책 및 기술확산 등을 통해 2020년 온실가스 감축 목표달성을 하게 된다. 이처럼 매우 복잡한 전력부문 온실가스 감축 정책 수립 및 평가를 위해 대부분의 국가에서는 상향식 모형 또는 하향식 모형을 이용하고 있다. 본 연구에서는 전력부문 상향식 모형의 일반적인 현황 및 적용방안에 대해서 알아보고, 이를 위해 전력부문의 가장 큰 특징인 구간부하(load region)을 분석하고, 이를 이용하여 수력 및 양수 등을 모형화하는 방안을 제시한다. 또한 전력부문에 대한 상향식 기반의 BAU 모형을 제안하고, 이 모형을 이용하는데 필요한 데이터 및 이슈들을 정리한다.

주요어 : 온실가스감축 정책, 상향식 모형, 선형계획법

Abstract - Since the release of mid-term domestic GHG goals until 2020, in 2009, some various GHG reduction policies have been proposed to reduce the emission rate about 30% compared to BAU scenario. There are two types of modeling approaches for identifying options required to meet greenhouse gas (GHG) abatement targets and assessing their economic impacts: top-down and bottom-up models. Examples of the bottom-up optimization models include MARKAL, MESSAGE, LEAP, and AIM, all of which are developed based on linear programming (LP) with a few differences in user interface and database utilization. The bottom-up model for electric sector requires demand management, regeneration energy mix, fuel conversation, etc., thus it has a very complex aspect to estimate some various policies. In this paper, we suggest a bottom-up BAU model for electric sector and how we can build it through step-by-step procedures such that includes load region, hydro-dam and pumping storage.

Key words : GHG abatement policy, bottom-up modeling, linear programing

†To whom corresponding should be addressed.

Tel : 051-509-6105 E-mail : chungyj@pufs.ac.kr

1. 서론

장기간을 요구하는 온실가스 감축 잠재량을 예측하기 위한 많은 모형들이 존재하는데, 크게 나누어 보면 접근 방법은 상향식 모형(bottom-up model)과 하향식 모형(top-down model)으로 구분할 수 있다[1]. 하향식 모형에는 거시계량경제 모형과 연산가능한 일반균형(Computable General Equilibrium; CGE) 모형 등이 있는데, 거의 대부분 국가에서는 CGE 모형을 이용하고 있다[7]. CGE 모형은 일반 균형 하에서 다양한 부문 및 경제주체로 구성된 시장에서의 수요, 공급, 가격 등의 균형을 분석하는 모형으로, 배출권 거래제 도입, 탄소세 도입 등 다양한 시나리오 하에서 온실가스 감축 효과에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 보여 주게 된다[2, 3, 6].

반면 상향식 모형은 다양한 부문(Sector)과 하위부문의 주어진 수요를 만족시키기 위한 다양한 기술(에너지 공급원, 에너지 전환기술, 수요를 만드는 수요기술 등)을 정의하고 이 기술들의 에너지 흐름을 구하게 되는데, 상향식 모형을 구현하는 방법은 선형계획모형(Linear Programming, LP)를 이용하는 최적화 모형(Optimization Model)과 어카운팅에 중점을 둔 시뮬레이션 모형으로 크게 나뉜다. 대표적인 시뮬레이션 모형으로는 Stockholm Environment Institute (SEI)에서 개발한 LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning) 모형을 들 수 있으나, 대부분의 경우 LP를 이용하는 최적화 모형이 많이 적용된다. 최적화 모형의 대표적인 형태로는 IEA 산하기관인 ETSAP의 MARKAL(MARKet ALlocation), IAEA의 MESSAGE(Model for Energy Supply's Strategy Alternatives and General Environmental effect), 일본 NIES의 AIM(Asia-Pacific Integrated Model) 등이 대표적이다[8, 9, 10, 11, 12].

이들 최적화 모형은 UI(User Interface), 구현 방식, LP Solver 등에서 일부 차이를 보여주고 있지만 근본적으로는 동일한 형태의 LP 모형에 근간을 두고 있다. 본 연구에서는 LP 기반 상향식 모형을 이용하여 전력부문의 온실가스 감축잠재량을 예측하는 방법론에 대해서 알아보기로 한다[4, 5]. 전력부문은 온실가스 배출량이 가장 많으면서 다양한 발전원들을 포함하고 있으며, 또한 여타 부문과 다르게 수요가 계절/요일/시간대별로 다르게 나타나며, 특히 매우 짧은 기간이지만 동절기 및 하절기의 피크기간이 존재하므로 가장 복잡한 상향식 모형이 되게 된다. 상향식 모형에서 다른 부문들은 수요를 1년 단위로

보고 모형을 구축하여도 큰 문제가 없지만, 전력부문의 경우 최대전력 수요는 동절기 및 하절기의 매우 짧은 기간(peak period)에 발생하며 이러한 피크기간을 고려하여 발전설비용량 및 운용을 하여야 된다는 특징이 있다. 이처럼 1년의 수요를 적당한 기간(timeslices)으로 나누고, 각 기간별 수요를 다르게 설정하는 것을 구간부하(load region)라고 한다.

본 연구에서는 전력부문 상향식 모형 구축방안을 알아보기 위해, 2장에서는 전력부문 상향식 모형 구축을 위한 개요를 살펴보고, 3장에서는 구간부하(load region)의 특성 분석 및 이를 반영한 발전설비별 모형화 방안을 제시하고, 4장에서는 실제 국내 발전부문을 고려한 상향식 모형 구축방안을 제시하기로 한다.

2. 전력부문 상향식 모형 구축 개요

상향식 모형을 구축하기 위해서는 Figure 1과 같이 공통모수(General Parameter) 및 수요(Demands)를 입력하는 부분, RES(Reference Energy System) 구축, 시나리오 작성, LP 최적화 등의 과정을 거치게 된다. 이러한 시스템의 구조는 LP를 이용하는 MESSAGE, MARKAL/TIMES, AIM, LEAP/OSeMOSYS 등도 기본 구조는 거의 동일하다[8, 9, 10, 11].

공통모수(General Parameter)는 상향식 모형 구축을 위해서 가장 기본적으로 수행하게 되는 것으로, 할인율(discount rate)은 미래에 발생할 현금흐름에 대한 현재가(NPV, Net Present Value)를 계산하는데 사용하는 할인율이다. 상향식 모형에서 분석기간(model year)을 설정하는데, 현금흐름의 현재가를 설정하기 위한 기준년도(base year), 그리고 분석대상의 시작년도(first model year) 및 마지막년도(last model year)를 입력하게 된다. 이때 기존에 생산된 재고(historic capacity) 또는 설비들이 존재하게 되는데, 이 중에서 수명기간이 다 되지 않은 것들은 model year에 기존재고로 입력이 되게 된다.

수요는 최종수요(end user demand) 또는 유효수요(useful demand)라고 하는데, 상향식 모형에서는 이 수요가 주어지면, 이 수요를 만족시키기 위한 에너지 흐름을 구하게 된다. 이러한 최종 수요는 연도단위로 주어지게 되는데, 자동차 주행거리(대·km), 난방(m^2), Joule 등 다양한 형태로 주어지게 된다. 전력부문의 경우 수요는 MWyr, GWh 등을 이용하게 된다. 수요가 고정된 값으로 분석기간 동안 연간단위로 주어지면 이를 위한 에너지 흐름을 구한다는 것은 상향식 모형의 기본적인 틀이지만,

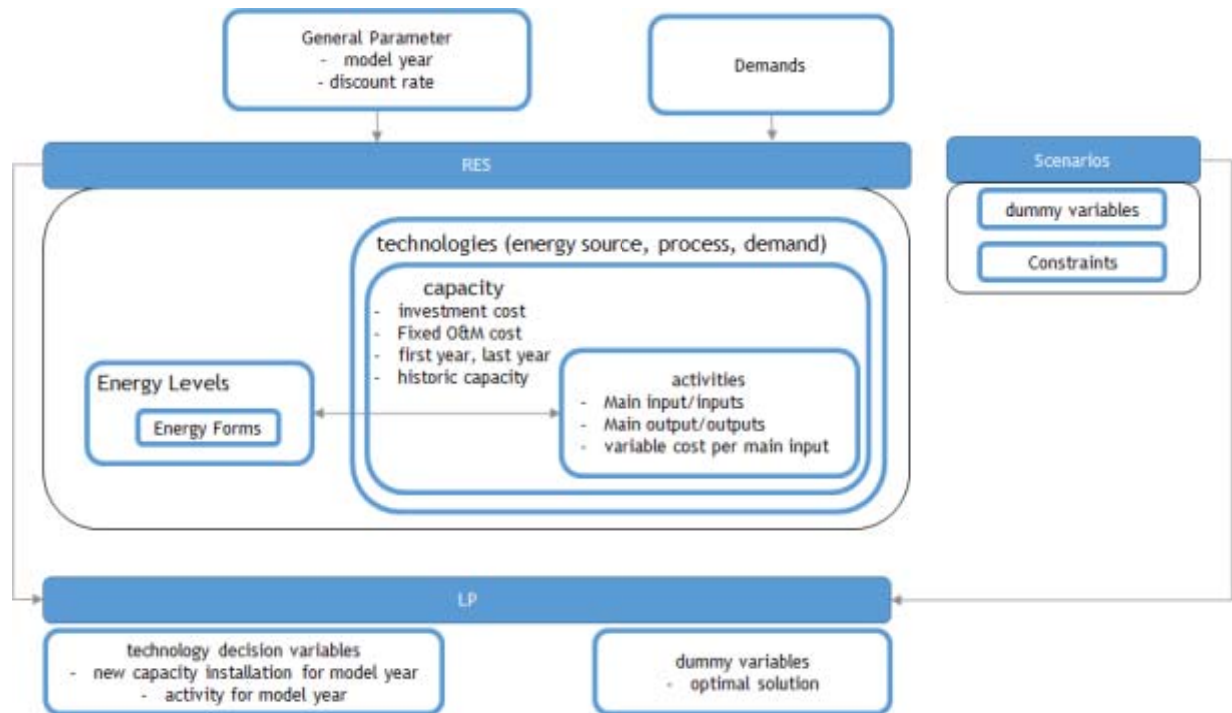


Figure 1. 상향식 모형의 구성

이것이 상향식 모형이 가지는 단점이기도 하다[4, 5]. 전력부분의 경우는 1년을 여러 개의 기간으로 분할하여 분석을 하게 되는데 이를 timeslice, load region, time duration 등으로 나타내어 혼용되어 사용되고 있는데, 본 연구에서는 구간부하(load region)로 나타내기로 한다. RES는 주어진 수요를 만족시키는 에너지흐름을 표현하기 위한 것으로, 에너지폼(energy form)과 기술(technology)로 이루어진다. Figure 2의 예는 수송부분의 RES를 보여주고 있는데, 수직선으로 표시된 것은 에너지의 입력과 출력을 나타내는 것으로 에너지 폼이라 하고, 맨 오른쪽에 위치하는 것은 에너지폼이 아니고 최종수요를 나타내는데, 이 경우 'car demand'에 2,000억 km/year가 주어져 있다. RES 상에서 기술(technology)은 사각형으로 표시되며, 에너지나 물질을 입력으로 받아 에너지나 최종수요를 산출하게 된다. RES 상에서의 기술(technology)은 크게 3가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 에너지를 생산하는 에너지원기술(energy source technology)인데, 입력 에너지가 없이 에너지 출력만을 가지게 된다. Figure 2에서 'oil carrier', 'bio ethanol carrier', 'electricity carrier' 가 이에 해당한다. 둘째, 전환기술(process technology)로서 에너지를 입력을 받아서 다른 형태의 에너지를 변환(transformation)하는 것을 말한다. 세째는 수요기술(demand technology)이라 하는데 에너지를 받아서 수요(effective de-

mand)를 만들어내는 기술로서, Figure 2에서는 'middle car', 'plug-in hybrid', 'electric car'가 이에 해당된다.

Figure 2에서 plug-in hybrid를 제외하면 모두 하나의 모드(activity or mode)만을 가지고 있는데, 모드(activity)는 공장이나 공정 또는 자동차와 같은 기술을 운용하는 방식을 나타내며, 서로 다른 방식의 모드로도 운용될 수 있다. 즉 Figure 2에서 'plug-in hybrid'의 경우 'plug-in mode'와 'elec mode' 두가지의 모드를 가지며, 이 두가지 모드는 연료사용량 및 효율에서 차이를 보이고 있다.

상향식 모형에서 시나리오는 BAU(Business as usual) 시나리오를 설정하고, 이에 상응하는 다양한 감축시나리오들을 구성하게 된다. 또한 시나리오별로 대개 BAU 대비 감축잠재량을 비교하여 제시하게 되는데, 이때 MAC(Marginal Abatement Cost)를 이용하여 감축수단별로 단위CO₂당 비용을 서로 비교하게 된다. 상향식 LP 모형에서 시나리오는 다양한 변수들 및 제약식으로 구성되는데, 이의 구현을 위해서는 상향식 LP모형에 대한 심도 있는 지식이 필요하다.

상향식 모형에서 공통모수(General Parameter) 수요, RES, 시나리오를 구축한 후에 특정 시나리오에 대한 에너지사용량 또는 온실가스배출량을 구하게 되는데, 이를 위해서는 먼저 시나리오에 대한 LP를 생성하게 되고, 이 LP의 최적해를 LP Solver를 이용해 구하게 된다. TIMES

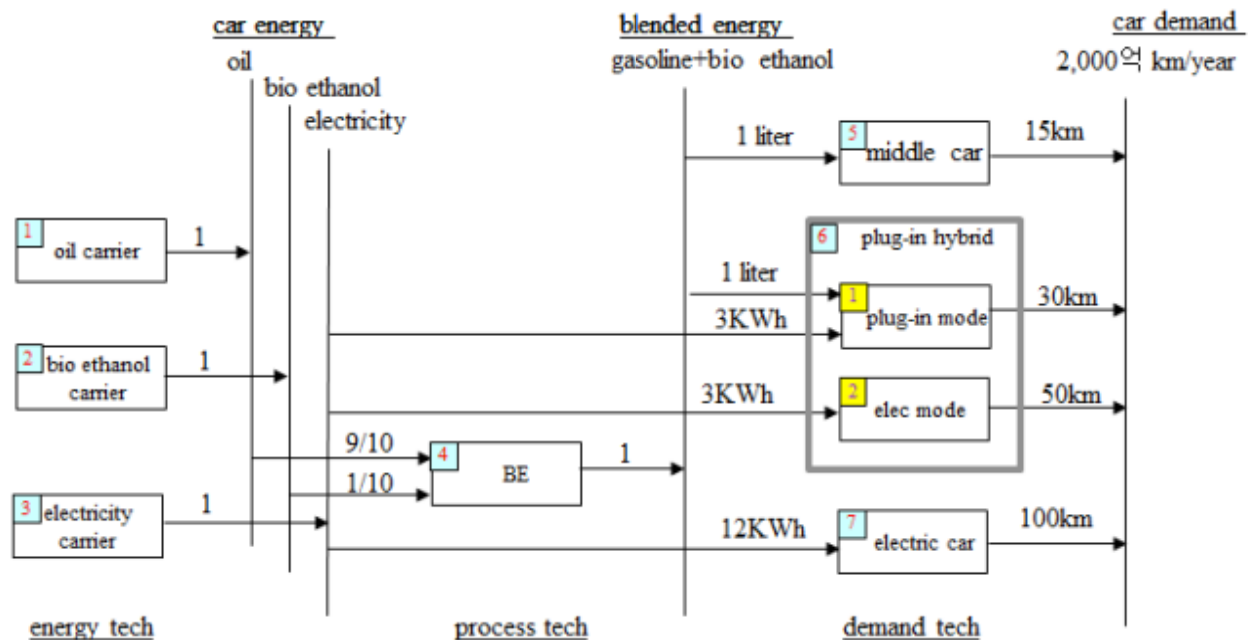


Figure 2. 상향식 모형의 RES의 예

의 경우 생성되는 LP의 형식은 MPS가 되고, LP Solver로는 CPLEX 및 glpk를 지원한다[10].

3. 전력부문 구간부하(load region)에 대한 수리적 특성분석

전력부문의 가장 큰 특징은 수요가 일정한 것이 아니라, 계절, 주중/주말, 주간/야간 등에 의해 급격하게 변하게 된다. 이러한 전력수요의 변동으로 인해, 최대전력수요에 맞추어 발전설비 용량을 설치하여야 되며, 그 기간이 비록 1년 중에서 매우 짧은 기간이라 하더라도 블랙아웃 발생이 되지 않도록 피크수요에 대응하면서 적절한 예비설비용량을 가지도록 발전설비용량을 설치하여야 된다. 또한 피크수요에 발전원별(또는 발전설비별) 설비예비율, 운영예비율, 피크기여율 등에 대한 결과도 상향식 모형에서 제시되어야 한다.

3.1 구간부하가 설비용량에 미치는 영향

상향식 모형에서 1년 단위로 주어진 수요를 몇 개의 구간부하(load region, timeslice, length)로 나눌 것인지에 대해 알아보도록 하자. 만약 구간부하를 나누지 않는다면, 설비용량은 평균에 의해 결정되게 될 것이다. 다음 Figure 3의 예는 일년을 두 개의 구간부하로 나눈 간단한 예를 보여주고 있다.

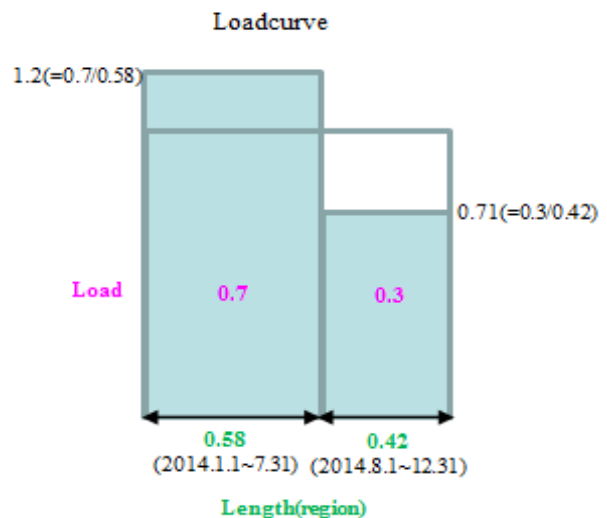


Figure 3. 두 개의 구간부하의 예

즉 1년을 두 개의 구간분하로 나누고, 첫 번째 구간은 2014년 1월1일~7월31일로 두 번째 구간은 나머지 기간으로 설정하고, 첫 번째 구간의 부하는 전체의 70%를 두 번째 구간의 부하는 전체의 30%로 정하고 있다. 이처럼 두 개의 구간부하를 나눈 경우, 첫 번째 구간에 의해 설치되어야 할 용량은 원래 전체수요를 처리하는데 필요한 설비용량의 1.2(=0.7/0.58)배가 되게 된다. 반면 두 번째 구간은 0.71(=0.3/0.42)로 설비용량을 증가시키지는 않음을 알 수 있다.

여러 개의 구간부하를 가지는 경우, 피크기간의 구간부하의 크기와 피크기간의 부하에 의해 설비용량이 결정되게 되는 것이므로, 만약 피크기간을 넓게 설정하면 설비용량이 줄어들게 되고, 피크기간을 좁게 설정하면 설비용량은 증가하게 된다. 따라서 현실 및 피크기간을 반영하여 적절하게 구간부하를 분할하여야 현실성 있는 상향식 모형이 되게 된다.

3.2 구간부하를 고려한 수력/양수/ESS에 대한 수리 모형화

화석연료를 이용하는 기존의 발전설비의 경우 언제든 지 가동을 할 수 있다고 가정할 수 있지만, 신재생발전 설비의 경우 기존의 발전설비와 다르게 필요에 의해서 언제든 발전을 할 수가 없다. 따라서 구간부하를 나누는 경우 신재생을 고려하여, 구간부하를 나누어야 한다. 특히 구간부하(timeslice)간에 시간적 선후 관계가 발생하는 경우가 있게 되는데, 이러한 신재생발전설비로는 수력/양수/ESS 등이 있다. 수력의 경우 이전 구간부하에 유입된 물을 이용하여 다음 구간부하에 발전을 하게 되고, 양수발전의 경우도 이전에 양수를 통해 상부댐에 물을 저장한 후에 발전이 가능하며, ESS도 양수와 동일하게 미리 전력을 충전하여야만 발전이 가능하게 된다. 이처럼 구간부하의 시간상 우선순위를 고려하는 경우는 유량보존제약(water conservation equation)으로 표현되는데, 가장 단순한 형태는 다음과 Figure 4와 같이 유입, 유출, 잔여유량의 관계를 나타낼 수 있다.

$X^{(t,r)}$: t 년도 r 구간부하의 잔여유량
 $I^{(t,r)}$: t 년도 r 구간부하의 유입유량
 $f^{(t,r)}$: t 년도 r 구간부하의 유출유량

위의 예를 유량보존제약으로 나타내면 다음의 4가지 식으로 나타내게 된다.

(simple water conservation equation)

$$X^{(1,1)} = I^{(1,1)} + X^{(0,v)} - f^{(1,1)}, \quad t = 1, r = 1 \quad (w1)$$

$$X^{(t,1)} = I^{(t,1)} + X^{(t-1,v)} - f^{(t,1)}, \quad t = 2, 3, \dots, \tau, r = 1 \quad (w2)$$

$$X^{(t,r)} = I^{(t,r)} + X^{(t,r-1)} - f^{(t,r)}, \quad t = 1, 2, 3, \dots, \tau, r = 2, 3, \dots, v \quad (w3)$$

$X^{(0,v)}$ 는 편의상 $t = 1, r = 1$ 이전에 존재하는 잔여유량을 나타내고, (w1)은 모델링을 처음으로 시작하는 경우에 $X^{(0,v)}$ 을 반영하여 $t = 1, r = 1$ 에 대한 유량보존을 위한 것이고, (w2)는 <그림 1-10>에서 보듯이 $t = 2, 3, \dots, \tau - 1, r = v$ 의 잔여유량 $X^{(t-1,v)}$ 은 다음 구간부하인 $t, r = 1$ 에서의 잔여유량 $X^{(t,1)}$ 에 영향을 미침을 나타내는 것이고, (w3)은 (w1)과 (w2)를 제외한 나머지 $t = 1, 2, \dots, \tau, r = 2, 3, \dots, v$ 에 대한 유량보존을 위한 것이다.

수력 댐을 모델링하는 방법은 여러 가지가 존재하지만, 가장 일반적인 형태는 다음의 <그림 6>과 같이 나타낼 수 있다. Figure 5에서 보면 ‘River1’의 연간 가능 유량이 R_U 이므로, 구간부하 r 에 보낼 수 있는 유량은 $l_r \cdot R_U$ 로 주어지고, 댐로 흘러들어가는 유량은 I_r^t 로 주어진다. 이때 댐의 저수용량은 S_U 로 주어지며, 댐으로부터 전력을 생산하는데 투입한 유량은 f_r^t 이고, 버려진 유량(spillage)은 V_r^t 이다. 이때 터빈은 전력생산설비는 y_r^t 이고 $l_r \cdot y_r^t$ 는 구간부하 r 에 이용가능한 설비용량이 되며, 전력을 생산하는 효율은 e_1 으로 주어져 있다.

이때 ‘River1’, ‘Dam’, ‘Turbine’은 유량보존제약(water conservation equation)으로 상호 표현될 수 있다. 본 연구에서는 Figure 5와 같이 수력댐 모형을 표현하지 않고, 이를 매우 단순화한 Figure 6과 같은 수력댐 모형화를 이용하기로 한다.

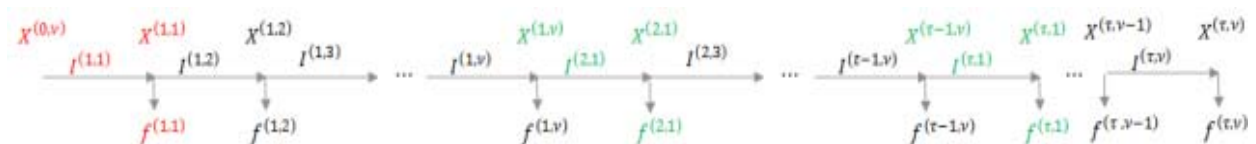


Figure 4. 단순한 유량보존의 예

$f^{(t,r)}$: Hydro1의 투입량(m^3) $I^{(t,r)}$: r 기간동안의 river1의 수량(m^3)
 $X^{(t,r)}$: storage1의 저수량(m^3) $V^{(t,r)}$: river1에서 발전에 사용되지 않은 수량(spillage) (m^3)
 S_U : Dam 저수량(m^3)

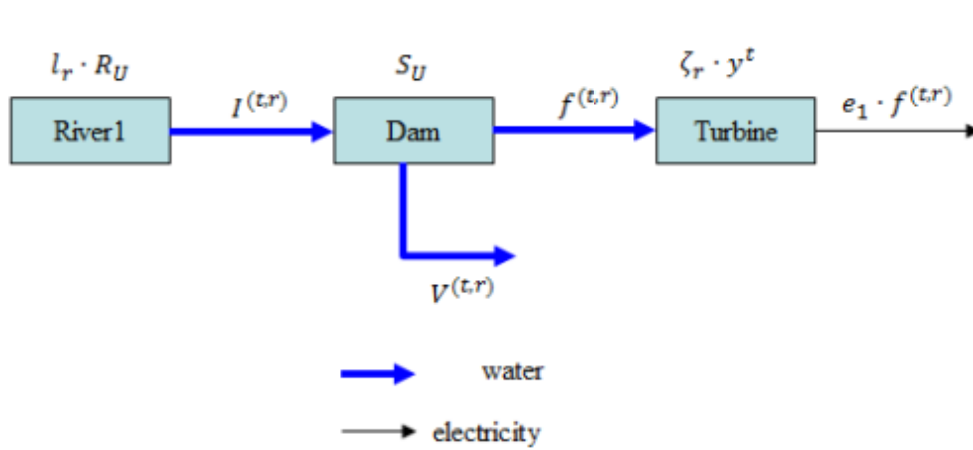


Figure 5. 수력댐의 운영예

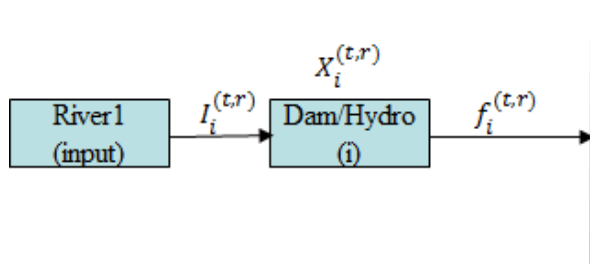


Figure 6. 단순화된 수력댐 모형화

Figure 5에서 보면 River1이 있고, River1에서 전력을 생산하는 발전기술인 Dam/Hydro(i)으로 t 년도 r 구간 부하에 $I_i^{(t,r)}$ 은 유입유량, $X_i^{(t,r)}$ 은 잔여유량, $f_i^{(t,r)}$ 은 전력생산을 위한 유출유량을 나타내고 있다. 이때 Figure 6과 달리 유량들의 단위는 m^3 이 아니고, 모두 MWyr를 나타낸다. 즉 수력댐으로 유입되는 $I_i^{(t,r)}$ 을 MWyr로 표시하고, 만약 t 년도 r 구간부하에 유입유량에 대한 제약식이 있으면 이를 추가제약식으로 처리하면 되는 것이다. 또한 잔여유량 $X_i^{(t,r)}$ 의 경우도 MWyr로 환산한 최대용량이나 추가제약식을 이용하여 처리할 수 있으며, 발전에 사용된 발전유량은 $f_i^{(t,r)}$ 로 정의하면 되는 것이다.

양수발전은 발전설비용량은 적지만 피크에 즉각적으로 대응할 수 있기 때문에, 피크 대응전력으로 매우 중요하다. Figure 7은 양양 양수발전소의 예로 보여주고 밤에 전력을 이용하여 상부저수지로 물을 옮기고(양수), 낮에



Figure 7. 양수발전소의 예

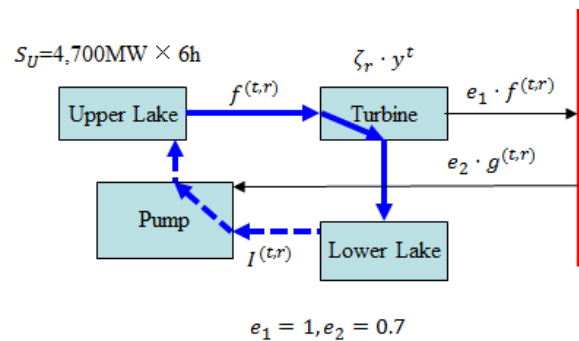


Figure 8. 양수발전소의 수리모형화의 예

양수된 물을 낙차를 이용하여 발전에 이용하고 하부저수지로 흘려보내는 구조이다. 현재 국내에는 4,700MW의 양수발전용량을 가지고 있다.

양수발전의 수리모형화하는 여러 가지 방법이 있지만,

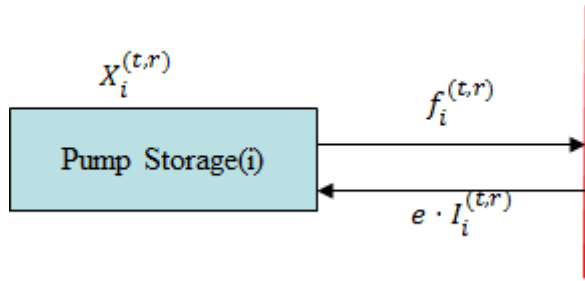


Figure 9. 단순화된 양수발전 모형화

Figure 8에서처럼 t 년도 r 구간부하에 $I_i^{(t,r)}$ 은 ‘Lower Lake’에서 ‘Upper Lake’로의 유입유량을 이때 필요한 전력은 $e_2 \cdot g^{(t,r)}$ 이고, $X_i^{(t,r)}$ 은 ‘Upper Lake’의 잔여유량, $f_i^{(t,r)}$ 은 전력생산을 위한 유출유량을 이때 $e_1 \cdot f_i^{(t,r)}$ 은 전력생산효율을 나타내며, $\zeta_r \cdot y^t$ 는 양수발전설비용량 제약을 나타내고 있다.

본 연구에서는 앞의 수력댐의 예와 마찬가지로 Figure 8과 같이 양수발전 모형을 표현하지 않고, 이를 매우 단순화한 Figure 9와 같이 ‘Pump Storage(i)’ 하나의 발전 기술만 존재하는 양수발전 모형화를 이용하기로 한다. 이때 Figure 8과 달리 유량들의 단위는 m^3 이 아니고, 모두 MWyr를 나타낸다. 즉 양수를 위해 유입되는 전력은 $I_i^{(t,r)}$ 로 MWyr로 표시되며 이때 양수효율은 $e \cdot I_i^{(t,r)}$ 이 된다. 또한 잔여유량 $X_i^{(t,r)}$ 의 경우도 MWyr로 환산한 최대용량이나 추가제약식을 이용하여 처리할 수 있으며, 실제 양수발전을 통한 발전유량은 $f_i^{(t,r)}$ 로 정의하면 되는 것이다.

단순화된 양수발전은 수력댐에서와 마찬가지로 (simple water conservation equation)의 변형된 형태로 나타낼 수 있는데, $I_i^{(t,r)}$ 대신에 양수효율에 따른 효율계수만을 곱해서 $e \cdot I_i^{(t,r)}$ 로 나타내면 된다.

(water conservation equation for pumping storage)

$$\begin{aligned} X_i^{(1,1)} &= e \cdot I_i^{(1,1)} + X_i^{(0,v)} - f_i^{(1,1)}, & t=1, r=1 \\ X_i^{(t,1)} &= e \cdot I_i^{(t,1)} + X_i^{(t-1,v)} - f_i^{(t,1)}, & t=2,3,\dots,\tau, r=1 \\ X_i^{(t,r)} &= e \cdot I_i^{(t,r)} + X_i^{(t,r-1)} - f_i^{(t,r)}, & t=1,2,3,\dots,\tau, r=2,3,\dots,v \end{aligned}$$

ESS는 양수발전과 마찬가지로 피크에 즉각적으로 대응할 수 있으면서, 양수발전과 달리 자연환경에 관계없이 어디서나 설치할 수 있다는 점 때문에 최근에 많은 기술발전이 이루어지고 있다. 또한 풍력이나 태양열과 같이 전력생산의 불규칙성으로 생기는 신재생발전에 같이

설치하므로 전력수급 안정에 기여할 수 있다는 장점 때문에 기술발전에 따른 원가경쟁력을 갖추게 되면, 향후 그 사용이 급속히 늘어날 수 있다. ESS를 수리모델링하는 것은 원리상으로 Figure 9의 단순화된 양수발전 모형과 동일하고, 단지 충전효율 e 만이 다른 값으로 입력되면 된다.

3.3 구간부하 분석

전력부문의 경우 구간부하를 포함하고 있다는 것이 가장 큰 특징 중 하나이다. 상향식 모형의 경우 구간부하를 어떻게 나누느냐에 따라서 발전설비용량 및 발전전력에서 큰 차이가 발생하게 된다. 구간부하가 없으면 전력수요가 연간 모든 기간에 동일하다고 가정하는 것이 되므로, 연간전력수요를 모든 기간에 걸쳐 나누어지게 되는 것과 같게 된다. 따라서 발전설비용량이 피크기간의 최대전력수요에 의해 결정되어야 하는데도 불구하고, 연간수요의 평균전력에 의해 결정되므로, 이는

(최대전력수요를 위한 설비용량 - 평균전력수요를 위한 설비용량)

만큼의 차이가 발생하게 된다. 또한 운영에 있어서도 양수는 LNG처럼 피크전력에 대응하는 발전설비들의 가동이 일어나지 않게 되는 모순이 발생하게 된다. 2014년 전력거래소의 ‘일별 로드 예측치’ 데이터를 바탕으로 구간부하를 어떻게 상향식 모형에서 반영할 것인지 알아보기로 한다.

상향식 모형에서는 구간부하를 세분화하면 할수록 현실에 가까운 최적해가 나오지만, 이때 의사결정변수의 수는 이에 비례하여 증가하게 된다. 분석기간 $T = \{1, 2, \dots, \tau\}$, 구간부하의 집합 $R = \{1, 2, \dots, \nu\}$, 기술의 집합 I 로 주어지는 경우 의사결정변수의 수는 $O(\tau \cdot \nu \cdot |I|)$ 가 되게 된다. 2014년 전력거래소의 ‘일별 로드 예측치’ 데이터는 1시간 평균전력을 예측한 것으로 연간으로는 8760시간에 대한 평균 부하(를 제공하고 있는데, 이 데이터를 그대로 이용하여 구간부하를 나누면 8760개의 구간부하가 대상이 된다. 예를 들어 분석기간이 2015년부터 2050년까지 36기간이고, 기술의 수가 30개, 구간부하를 8760이면, 의사결정변수의 수는 $36 \cdot 30 \cdot 8760 = 9,460,800$ 이 되어 약 천만개의 의사결정변수를 다루어야 하므로 이는 LP 모형화하더라도 거의 다루기가 불가능하다. 따라서 현실을 적절히 반영하면서 구간부하를 나누것이 필요함을 알 수 있다. 먼저 2014년 전력거래소의 ‘일별 로드 예측치’ 데이터를 시간별 부하를 보면 Figure 10과 같이 된다.

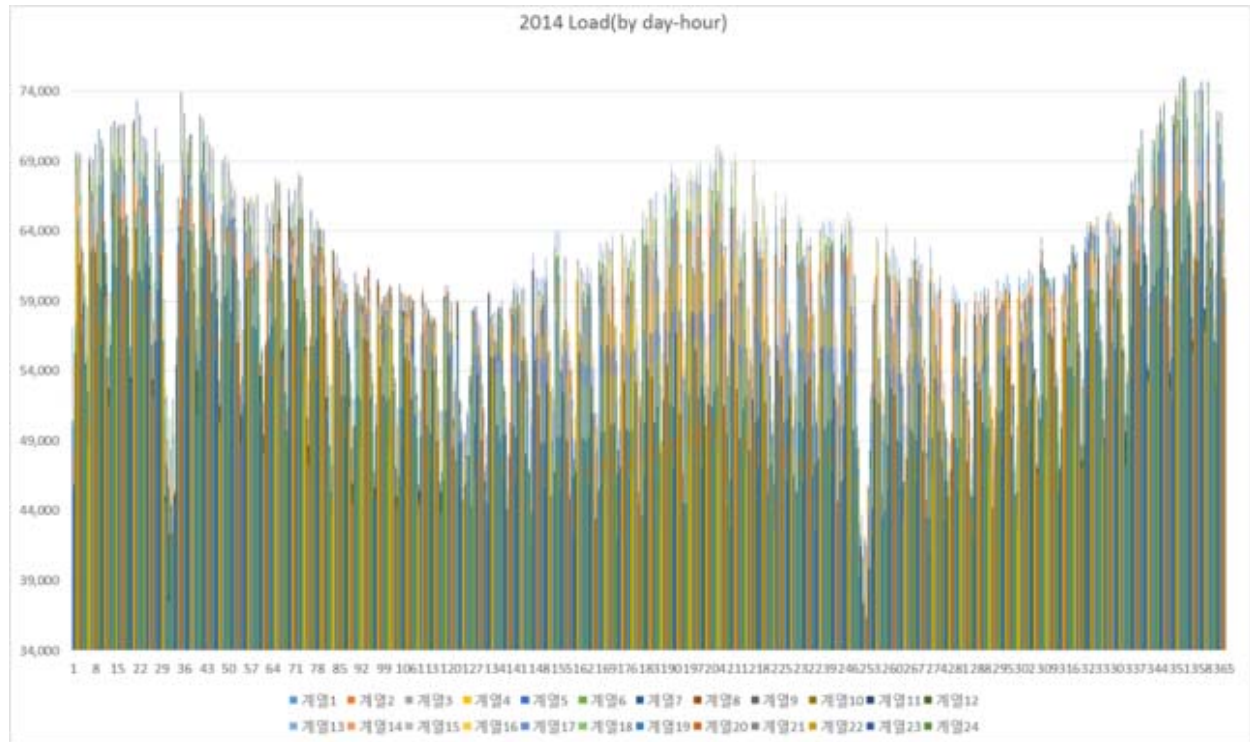


Figure 10. 2014년 전력거래소의 ‘일별 로드 예측치’ 데이터

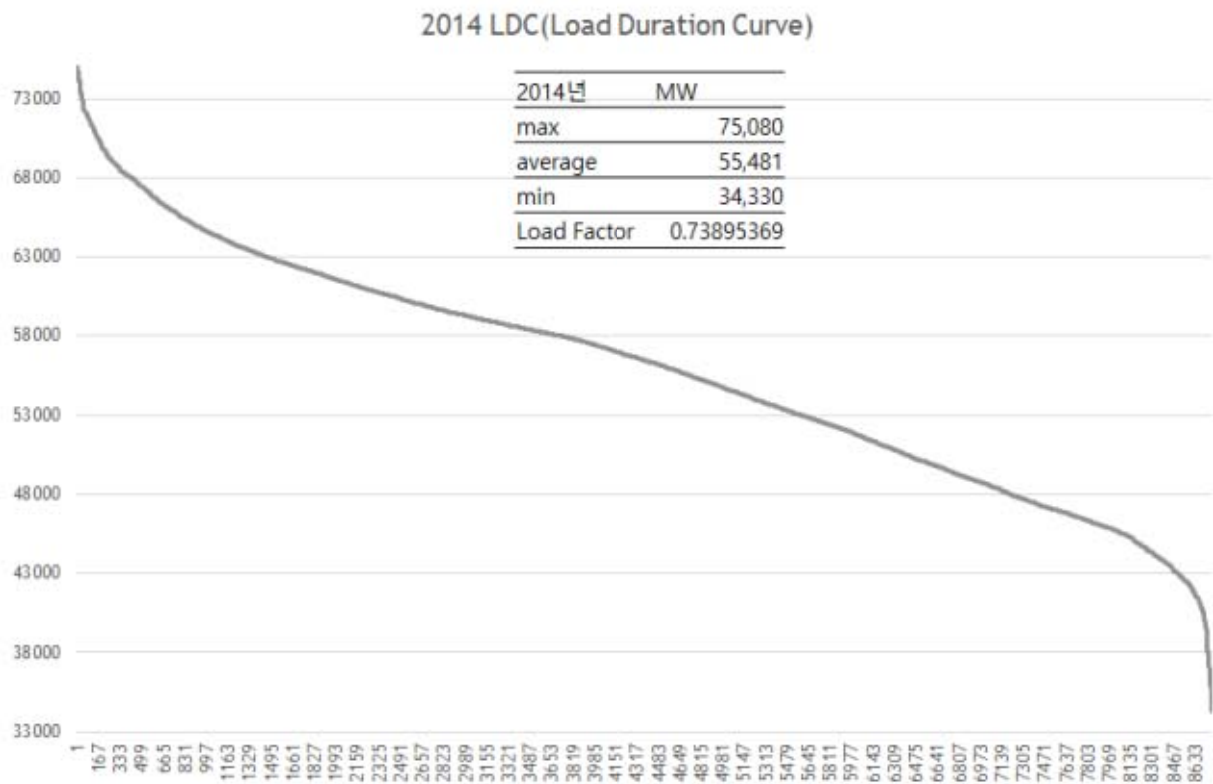


Figure 11. 2014년 Load Duration Curve

전력평균 (1000MW)	빈도수 (시간)	비율
~37	20	0.23%
~40	35	0.40%
~43	206	2.35%
~46	577	6.59%
~49	1036	11.83%
~52	933	10.65%
~55	1056	12.05%
~58	1179	13.46%
~61	1505	17.18%
~64	1054	12.03%
~67	596	6.80%
~70	376	4.29%
~73	150	1.71%
~76	37	0.42%
	8760	

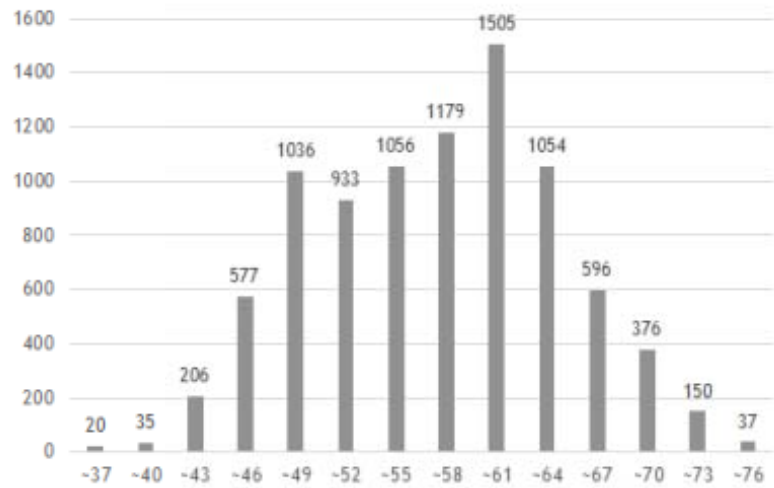


Figure 12. 구간부하에 대한 빈도분석

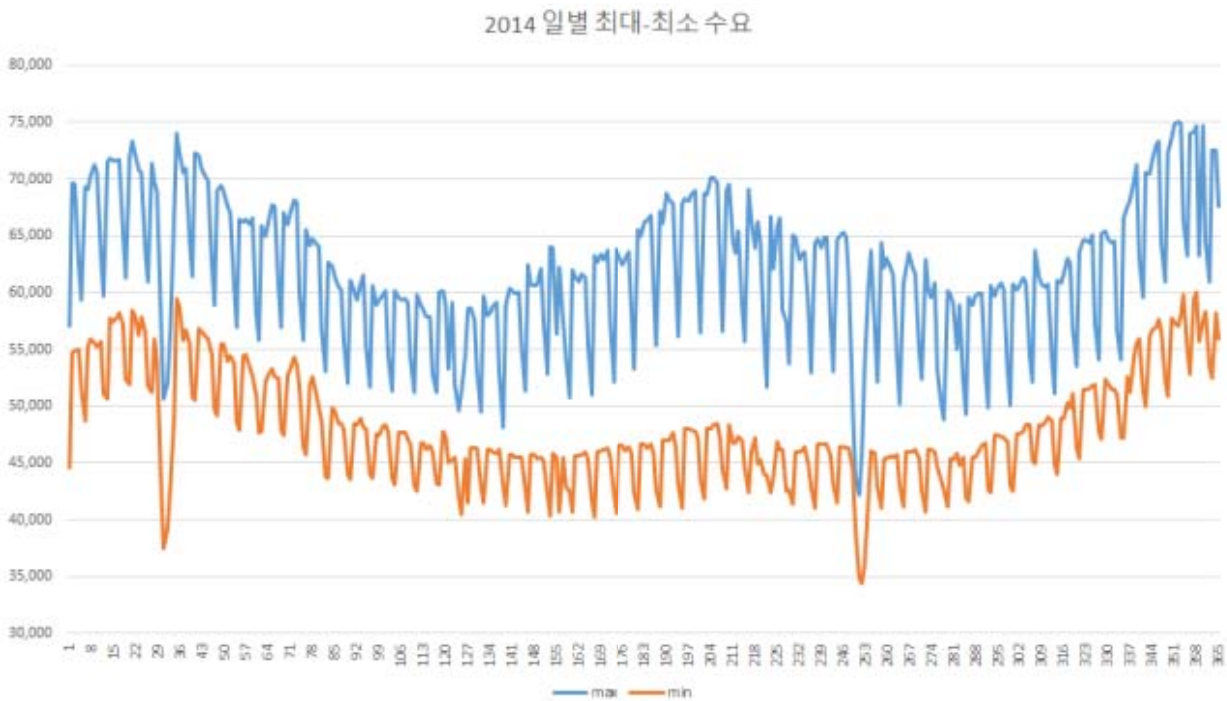


Figure 13. 일별 최대-최소 수요 분석

8760개의 데이터에서 최대값은 75,080MW, 평균은 55,481MW, 최소값은 34,330MW이다. Figure 10으로부터 가장 큰 값부터 작은 값까지 순차적으로 정리한 그림을 LDC(Load Duration Curve)라 하는데, Figure 11은 이를 보여주고 있다. LDC를 보면 왼쪽 부분이 피크를 나타내는데, 피크기간이 매우 짧은 기간에 나타난다는 것

을 알 수 있다. Figure 12는 2014년 전력거래소의 ‘일별 로드 예측치’ 데이터에 대한 빈도분석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 73,000MW이상을 피크로 보고, 이를 만족하는 피크기간을 보면 37시간으로 전체 8,760시간에서 약 4.2%정도 밖에 되지 않음을 알 수 있다.

Figure 13은 8,760시간으로부터 일 최대전력시간 및

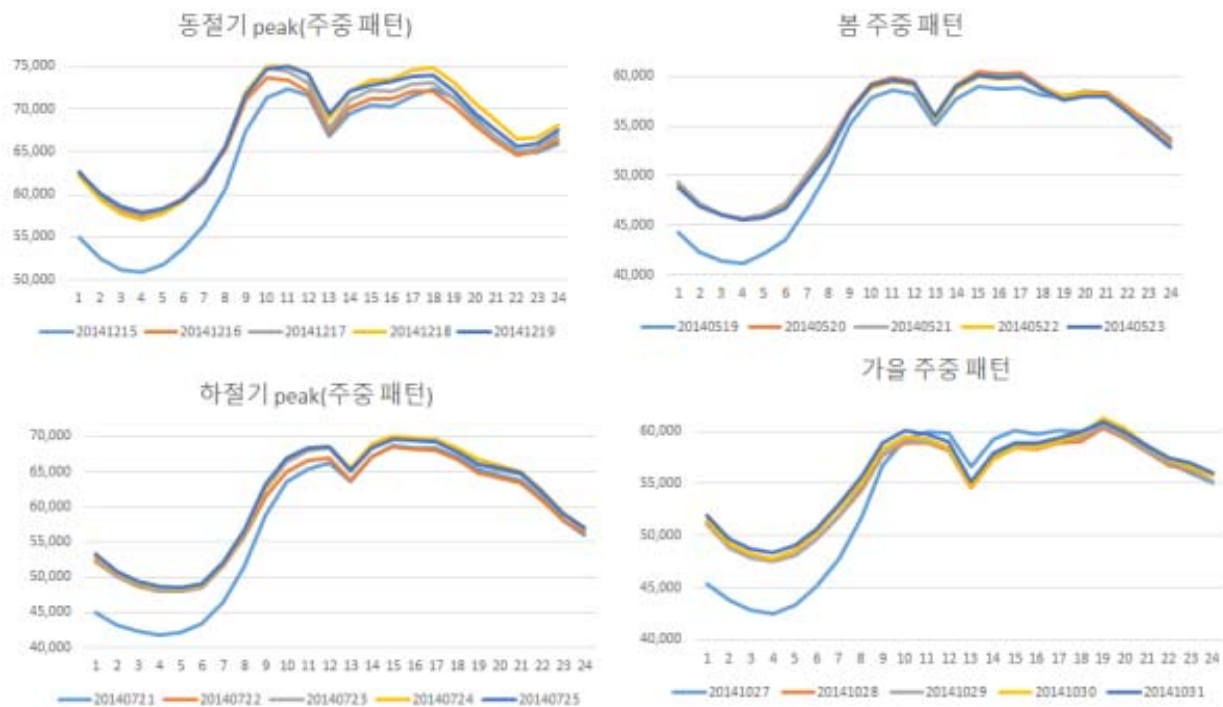


Figure 14. 계절별 주중 전력 패턴 분석

최소전력시간의 평균전력만을 나타내고 있다.

Figure 13을 살펴보면, 주중과 주말에 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 계절적 특성에 의해 겨울 및 여름은 최대전력시간 및 최소전력시간의 평균전력이 봄 및 가을에 비해 높음을 알 수 있다. 즉 겨울 및 여름에 피크전력이 발생한다는 것을 알 수 있다. 이로부터 계절 및 주중/주말을 나누어야 됨을 알 수 있다. 주말전력수요는 주중에 비해 매우 적은 편이므로, 주중을 대상으로 시간대별 패턴을 살펴보자.

Figure 14는 계절별 주중 전력 패턴을 알아보기 위해, 대표적인 날짜들을 계절별로 5개씩 선정하여 보여주고 있다. 동절기/하절기의 경우 오전 9시부터 수요가 올라가기 시작하여 점심때까지 계속 증가하다가, 점심시간이후 감소하다 다시 저녁 6시까지 증가하고, 이후에는 감소하는 형태를 보이고 있다. 동절기는 피크가 오전 10시전후 및 저녁 6시 전후로 두 번 발생하고 있고, 하절기는 오후 3시 전후에 피크가 발생하고 있다. 봄 및 가을의 경우에도 동절기/하절기와 패턴은 유사하지만, 전력수요 자체가 적어서 피크에는 영향을 미치지 않고 있다.

구간부하를 모든 시간대별로 나누게 되면 너무나 많은 의사결정변수를 필요로 하므로, 적당한 기간들을 분할하여 나누어야 한다. 구간부하를 나누는 방안은 크게 두 가

지를 고려할 수 있는데 첫째, 계절, 주중/주말, 일별시간대 등으로 계층화하여 구간부하를 나누는 방법이 있을 수 있고, 두 번째는 부하가 큰 것부터 작은 것으로 정렬한 LDC를 이용하여 적당히 구간을 나누는 방안이 있을 수 있다. LDC를 이용하는 구간을 몇 개의 구간부하로 나누는 경우의 문제점은 양수/ESS처럼 밤(이전 구간부하)에 양수/충전을 그 다음 낮(다음 구간부하)에 이용하게 되는 경우와 유사하게 수력처럼 그 전 구간부하에 담으로 유입된 유량이 다음 구간부하에서 이용할 수 있는 경우처럼, 구간부하간 시간에 의해 제약을 받는 경우를 반영하지 못한다는 단점이 있다. 즉 제약식에 언급한 것처럼 수력/양수/ESS를 위한 (simple water conservation equation)을 구현할 수 없게 되는 것이다. 반면에 계층화로 구간부하를 나누는 경우 너무나 많은 구간으로 나누어질 수 있는데, 본 연구에서는 (simple water conservation equation)을 고려하면서, 구간부하의 수를 최소화할 수 있는 방안을 알아보도록 한다.

Figure 15. 계층화방법1은 겨울과 여름은 주중/주말로 나누고 각 일을 night/day로 나누며, 봄과 가을 주중/주말을 하나의 합치고 그 아래계층에 night/day를 두는 것이다. 즉 피크가 발생하는 겨울과 여름은 세분화하고, 나머지 계절은 주중 주말만으로 나누는 방안이다. Figure 16>

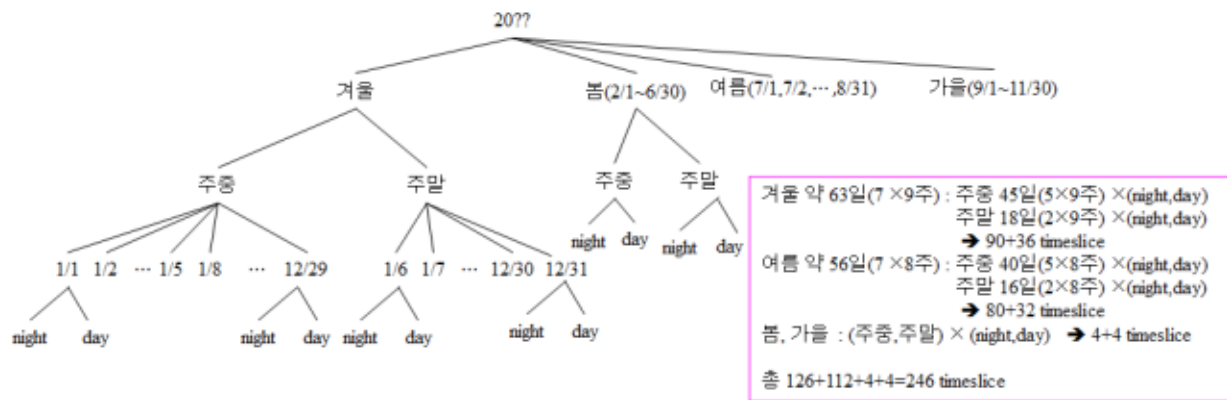


Figure 15. 계층화 방법1

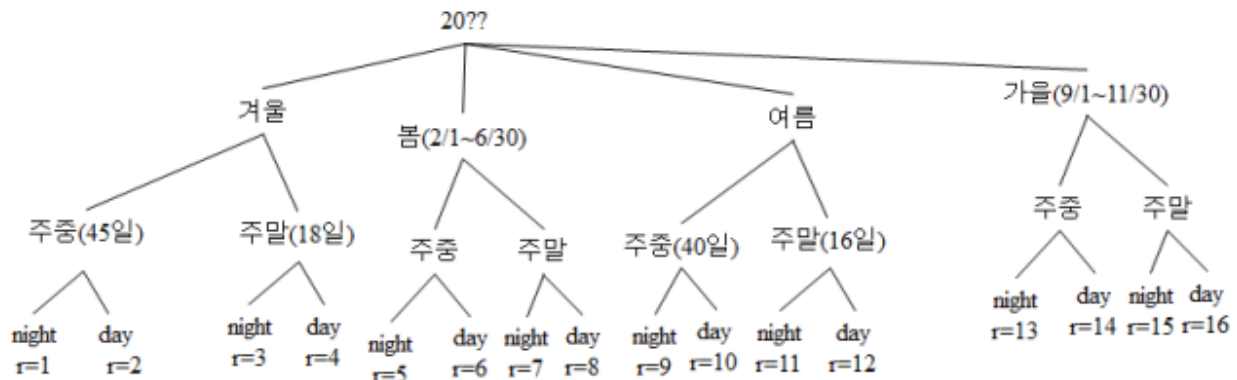


Figure 16. 계층화 방법2

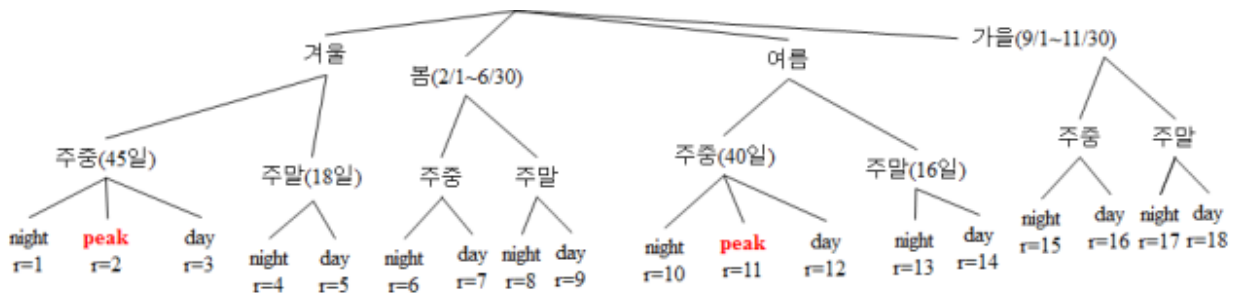


Figure 17. 계층화 방법3

에서 night가 day의 앞에 위치하는데, 이는 양수발전/ESS의 경우 밤에 이루어진 양수/충전을 이용하여 낮에 전력공급이 이루어지는 것을 반영하기 위한 것이다. 또한 일자를 개별적으로 365개로 나누는 것이나, (봄, 가을)처럼 (주중, 주말)×(night, day)의 4개로만 나누어도 수리적으로 동일하게 된다. 즉 3/3(월), 3/4(화), ..., 3/7(금)에 각 날짜의 night에 양수를 하고 day에 전력을 공급하는

경우, 이를 하나로 묶어서 3/3(월)~3/7(금) 전체 night와 전체 day를 두 개의 구간부하로 설정하고 전체 night에서 양수를 하고 전체 day에 전력을 공급한다고 하여도 수리 모형에서는 동일한 해를 제공하게 된다. 따라서 계층화 방법1은 (simple water conservation equation)과 피크기간을 어느 정도 반영할 수 있지만, 총 246개의 구간부하를 필요로 한다는 단점이 있다. Figure 16은 계절별 일자

에 관계없이 (봄, 여름, 가을, 겨울)×(주중, 주말)×(night, day)로 나누는 것이다. 이렇게 되면 16개의 구간부하를 필요로 하지만, 피크 기간을 제대로 반영할 수 없다는 단점이 있다.

Figure 17은 day를 세분화하여 (겨울, 여름)에 peak와 day로 나누는 것이다. 이 계층화방안3은 구간부하의 개수를 18개로 작게 하면서, 피크기간을 반영하고, 또한 (simple water conservation equation)을 반영할 수 있는 것이다.

4. 전력부문 상향식 BAU 모형 구축 방안

4.1 RES(Reference Energy System) 구축방안

전력부문을 상향식으로 모형화하기 위해서는 에너지 원 기술, 발전기술, 송배전 기술 등을 정의하여야 된다. 본 연구에서는 전력부문의 상향식 모형화를 하는 방법에 중점을 두고 있으므로, 실질적으로 RES 구축에 필요한 데이터의 수집 방법이나 데이터의 의미 등에 대해서는 자세한 설명을 생략하기로 한다.

전력부문 특히 발전기술의 경우 매우 세분화하면 발전소별로 나눌 수도 있지만, 이렇게 되면 너무나 많은 기술들을 열거하여야 하므로, 본 연구에서는 발전원별로 나누기로 한다. 구축되는 전력부문 상향식 모형은 국내 발전현황을 어느 정도 반영하면서 전력부문 상향식 모형의

기반이 될 수 있도록 하였다. Figure 18은 상향식 기본 모형의 RES(Reference Energy System)을 보여주고 있다.

Figure 18에서 보면 에너지 기술은 한전의 전력통계와 동일하게 되도록 Coal_gen(1), HCoal_gen(2), LNG_gen(3), oil_gen(4), uranium(5) 등의 5가지가 있고, 이들 기술에는 변동비가 주어지게 된다. 여기에서 HCoal은 유연탄을 나타내고, Coal은 무연탄을 나타내고 있다. 또한 발전기술의 경우 기존 기술들인 원자력 및 화력은 원자력은 Nuclear_PP(6)의 1종, 기력은 Steam_P_LNG(7), Steam_P_oil(8), Steam_P_coal(9), Steam_P_HCoal(10)의 4종, 복합화력은 CC_oil(11), CC_LNG(12)의 2종, 내연은 Combu_oil(13)의 1종, 열병합은 CHP_LNG(14), CHP_oil(15), CHP_coal(16)의 3종으로 총 11개로 분류하였다. 물론 원자력 및 화력의 경우 발전소별로 세분화하여 나누어도 되지만 장기전망을 위해 단순화하였다. 수력의 경우 수력댐인 Hydro_Dam(17)와 소수력인 Hydro_river(18)으로 구분하였다. 수력을 제외한 대체에너지(신재생)의 경우 Renew_Solar(19) 및 ESS(29) 등의 11가지 발전기술로 나누었다. 물론 발전기술을 구분하는 방법은 매우 다양할 수가 있지만, 온실가스감축모형은 장기모형인 점을 감안하여야 한다.

그리고 (simple water conservation) 제약식을 만족시켜야 하는 기술인 Hydro_Dam(17), Hydro_river(18), Pumping(28), ESS(29)의 4가지는 노란색으로 표시되어

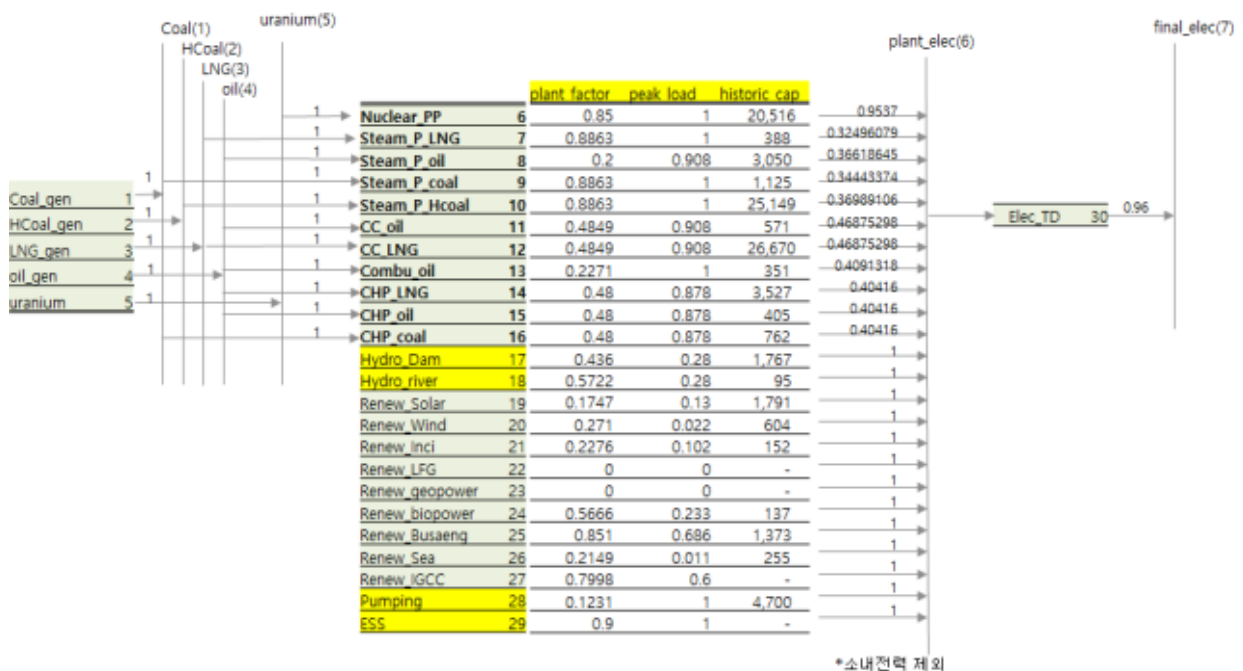


Figure 18. 전력부문 상향식 기본 모형의 RES

있다. 발전기술의 경우 plant factor(연간평균가동률(%)), peak load(피크기여율(%)), historic capacity(기존 발전 설비 용량(MW)) 등이 표시되어 있다. 그리고 발전기술들의 효율이 화살표 위에 표시되어 있는데, Nuclear_PP(6)는 0.9537이다. 마지막으로 송전망기술로 Elec_TD(30)가 있고, 이때 효율은 0.96으로 되어 있다. 그리고 에너지 품은 에너지기술로부터 만들어진 에너지를 나타내는 Coal(1), HCoal(2), LNG(3), oil(4), uranium(5) 등의 5가지가 있고, 발전설비로부터 생산된 전력을 나타내는 plant_elec(6)이 있으며, 마지막으로 전력수요를 나타내는 final_elec(7)이 주어져 있다.

4.2 BAU 시나리오 설정

상향식 모형의 경우 분석기간은 통상 20년 이상으로 하며, 때로는 100년까지도 고려하기로 한다. 본 연구에서는 구축된 전력부문 상향식 모형이 현실과 얼마나 정합하는지를 보기 위해 2010년부터 2030년까지로 설정하였다. 실제 2010년부터 2014년까지의 설비용량(MW) 및 발전전력량(MWyr)은 이미 확정되어 있고, 또한 7차 전력수급계획에 의해 2029년 설비용량 및 발전전력량도 알려져 있으므로, 본 상향식의 BAU 모형에서는 2014년 실측 데이터 및 2029년 수급계획을 어느 정도 반영한 BAU를 산정하는데 적합하게 된다. 이때 BAU 모형은 첫째, 제약식들이 2014년 실측 데이터 및 2029년 수급계획(실측 및 계획반영)을 반영할 수 있도록 하여야 하며, 둘째, 비용에 의해 결정되는 LP의 목적함수의 특성(비용최소화)도 반영할 수 있어야 한다.

- 구간부하: 전력부문 상향식모형의 테스트를 위해 피크를 반영하면서, 다음과 같이 가장 단순하게 3개의 구간부하로 나누기로 한다. 1.418(=0.1/0.07)은 피크수요를 위한 것으로, 실제 7차 전력수급계획을 보면 피크수요/연간수요 ≈ 1.45 정도를 보이고 있다.

	night	peak	day
$\zeta(r)$: length	0.542	0.007	0.451
$L(r)$: load	0.518	0.010	0.472
	0.955	1.428	1.0465

- 기본 제약식 구조

상향식 BAU 모형을 구축하려면, 매우 다양한 제약식들이 포함되어야 한다. 특히 2014년의 실제 발전 용량 및 7차 전력수급의 목표치와 어느 정도 근사한

BAU 모형이 설정되어야 하므로, 이러한 점을 감안하여 다음과 같은 제약식들을 도입하기로 한다.

- (i) 수명: 수력의 댐 및 소수력, 양수발전의 수명을 100년으로 설정한다. 7차전력수급 계획에 의하면 대부분의 이들은 2029년까지 유지하는 것을 반영하기 위한 것이다.

- (ii) plant factor UB 제약: 연간 발전용량에 대한 상한 제약으로 plant facotr(pf_i)를 이용하여

$$\sum_{r \in R} e_i^t \cdot f_i^{(t,r)} \leq pf_i \cdot Y_i^t, i \in I_0 \cap I_L, t \in T$$

로 나타낸다. plant facotr(pf_i)는 Figure 18에 나와 있는 파라미터를 사용하기로 하는데, 이는 실제 발전설비별로 연간 발전용량에 대한 한전 통계치를 반영하기 위한 것이다.

- (iii) plant factor LB 제약: 연간 발전용량에 대한 하한 제약으로

$$\sum_{r \in R} e_i^t \cdot f_i^{(t,r)} \geq \alpha_i \cdot Y_i^t, i \in I', t \in T$$

로 나타낸다. α_i 는 Steam_P_LNG의 경우 (7 0.6)이고, 나머지 발전설비의 경우 (12 0.48), (14 0.48), (8 0.2), (11 0.48), (13 0.20), (15 0.48), (10 0.88), (9 0.88), (16 0.48)를 이용한다.

- (iv) 피크기여도 제약: 피크기여에 대한 제약식으로, 구간부하 중에서 피크를

$$p = \operatorname{argmax} \{L_r / \zeta_r : r \in R\}$$

라 하자. 그러면 피크 기여도제약은

$$e_i^t \cdot f_i^{(t,p)} \leq \zeta_p \cdot Y_i^t, i \in I_0 \cap I_L, t \in T$$

이 된다. 특히 풍력의 경우 피크기여율이 2.2% 정도 밖에 안되는데, 이러한 점을 반영하기 위한 것이다.

- (v) no new capacity 제약: 용량증설을 허용하지 않는 발전기술을 위한 것으로

$$y_i^t = 0, i \in I', t \in T$$

이 된다. 이는 7차수급계획에 의해 기존 발전설비들 중에서 증설계획이 없는 것에 대한 제약식이므로 Figure 19에 'no new capacity'로 표시되어 있다.

- (vi) 양수발전제약: 양수발전 Pumping(28)의 경우 2011년, 2012년, 2013년, 2014년 200MW 용량이 추가되었고, 2015년 300MW가 추가되었으며, 2025년에 600MW 증설 예정으로 되어 있는데, 이를 반영한 제약식으로

id			수명 (년)	plant factor (plf(i,t))	피크기여도 (peak_contr (i,t))	no new capacity (y_zero(i,t))	Yearly (y_LB(i,t), y_UB(i,t))	Sub Market Share (subMS(i,t=2030))
6	원자력(nuclear)	원자력(nuclear)	60	0.850	1		y_UB<1200	
7	기력(steam plant)	LNG(LNG-steam)	40	0.886	1	y_t=0		
8		유류(Oil-steam)	30	0.200	0.908	y_t=0		
9		무연탄(국내)(Coal-steam)	40	0.886	1	y_t=0		
10		유연탄(수입)(HCoal-steam)	40	0.886	1		y_UB<1500	
11	복합(combined cycle)	유류(Oil-CC)	30	0.485	0.908	y_t=0		
12		LNG(LNG-CC)	30	0.485	0.908		y_LB>900	
13	내연(combustion cycle)	유류(Oil-CC)	40	0.227	1	y_t=0		
14	집단에너지(열병합, Cogeneration)	LNG(LNG-Cogeneration)	40	0.480	0.878		y_LB>100	
15		유류(Oil-Cogeneration)	40	0.480	0.878		y_UB<30	0.154
16		석탄(Coal-Cogeneration)	40	0.480	0.878		y_UB<60	0.290
17	수력(Hydropower)	일반(댐식)(Dam-Hydro)	100	0.436	0.28	y_t=0		
18		소수력(river-Hydro)	100	0.572	0.28	y_t=0		
19	신재생	Solar	40	0.175	0.13		y_LB=600	
20		Wind	20	0.271	0.022		y_UB<300	
21		기타-폐기물소각	20	0.228	0.102	y_t=0		
22		기타-매립가스	20			y_t=0		
23		기타-지열(geopower)	30			y_t=0		
24		기타-바이오(biopower)	20	0.567	0.233	y_t=0		
25		기타-부생가스	20	0.851	0.686		y_UB<150	
26		기타-해양에너지	20	0.215	0.011	y_t=0		
27		기타-IGCC	20	0.800	0.6	y_t=0		
28	양수	Pumping	100	0.123	1			
29	연료전지	ESS	7	0.500	1	y_t=0		

* 양수제약 : y_2011=y_2012=y_2013=y_2014=200, y_2015=300, y_2016=600

Figure 19. 상향식 BAU 모형의 기본 제약식

$$y_{28}^2 = y_{28}^3 = y_{28}^4 = y_{28}^5 = 200, y_{28}^6 = 300, y_{28}^{16} = 600$$

이 된다.

- (vi) 연간 신규증설제약(yearly) : 발전원별 특성에 의해 전체비용 측면에서 원자력<석탄<LNG 순서로 되어 있다. 따라서 제약식을 추가하지 않으면, 원자력만이 증설되게 되는데, 이를 반영하여 상한 제약인

$$y_i^t \leq UB_i^t, i \in I', t \in T$$

와 하한제약인

$$y_i^t \geq LB_i^t, i \in I', t \in T$$

를 둔다. Figure 20>에서 yearly로 표시되어 있는데, 원자력의 경우 'y_UB<1200'으로 되어 있고, LNG의 경우 'y_LB>100'으로 되어 있는 것으로, 7차 수급계획의 2029년도 전원구성을 어느 정도 반영하여 설정하였다.

$$Y_{15}^{21} \leq 0.15(Y_{14}^{21} + Y_{15}^{21} + Y_{16}^{21})$$

$$Y_{15}^{21} \leq 0.3(Y_{14}^{21} + Y_{15}^{21} + Y_{16}^{21})$$

으로 설정하였다.

- (vii) Operation 제약: 구간부하별 발전원의 특성을 반영하기 위한 것이다. 수력 Hydro_Dam(17)와 소수력인 Hydro_rive(18)의 경우 구간부하에 관계없이 연간 일정 수준을 유지하게 되는데, 이를 반영하여

$$\zeta_p \cdot 0.8 \cdot 0.436 Y_i^t \leq f_i^{(t,r)} \leq \zeta_p \cdot 1.2 \cdot 0.436 Y_i^t, r \in R, t \in T$$

로 나타내는데, 여기에서 0.436은 수력의 plant factor이다.

양수 Pumping(28)의 경우 peak(r=2)에 80% 이상 가동하고, day(r=3)에 20% 이상 가동하도록

$$\zeta_p \cdot 0.8 \cdot Y_i^t \leq f_i^{(t,2)}, t \in T$$

$$\zeta_p \cdot 0.2 \cdot Y_i^t \leq f_i^{(t,3)}, t \in T$$

를 제약으로 부여하였고, 양수 Pumping(28) 및 태양열 Renew_Solar(19)의 경우 night(r=1)에 발전을 하지 않도록 하기 위해

$$f_{19}^{(t,1)} = f_{28}^{(t,1)} = 0$$

을 제약식으로 두었다.

Table 1. 상향식 BAU 모형의 실행결과

years(t)	2010	2015	2020	2025	2029	2030
demand(MWyr)	49562	49562	67157	72162	74993	76896
신규설비 증설(MW)						
y(Nuclear_PP ,t)	1200	1200	1200	1200	1200	1200
y(Steam_P_Hcoal ,t)	1500	199	855	205	1500	1500
y(CC_LNG ,t)	3255	900	900	900	900	900
y(CHP_LNG ,t)	100	100	100	100	100	100
y(CHP_coal ,t)	60	60	60	60	60	60
y(Renew_Solar ,t)	600	600	600	600	600	600
y(Renew_Wind ,t)	130	130	130	130	130	130
y(Renew_Busaeng ,t)	150	150	150	150	150	150
y(Pumping ,t)	0	300	0	600	0	2081
설비용량(MW)						
Y_Cap(Hydro ,t)	5518(7)	6618(7)	6618(6)	7218(6)	7218(6)	9299(7)
Y_Cap(Coal ,t)	1185(2)	1485(2)	1060(1)	1360(1)	1600(1)	1660(1)
Y_Cap(HCoal ,t)	24580(32)	22159(24)	28802(27)	28075(24)	27377(23)	27877(22)
Y_Cap(Oil ,t)	1269(2)	1269(1)	1065(1)	840(1)	792(1)	787(1)
Y_Cap(LNG ,t)	23396(31)	28298(31)	28150(26)	26877(23)	26694(22)	26705(21)
Y_Cap(Nuclear ,t)	18916(25)	24916(27)	30916(29)	36916(32)	39800(33)	40050(32)
Y_Cap(Other ,t)	1549(2)	5949(7)	10344(10)	14654(13)	17600(15)	18480(15)
Y_Cap_total(t)	76413	90694	106955	115940	121081	124858
발전량(MWyr)						
sum_f(Hydro ,t)	1091(2)	1196(2)	1196(2)	1254(2)	1254(2)	1663(2)
sum_f(Coal ,t)	1026(2)	1163(2)	669(1)	813(1)	928(1)	959(1)
sum_f(HCoal ,t)	21785(42)	19639(33)	25527(36)	24883(33)	24092(31)	24707(31)
sum_f(Oil ,t)	426(1)	414(1)	363(1)	298(0)	289(0)	288(0)
sum_f(LNG ,t)	11336(22)	13583(23)	13512(19)	12901(17)	12813(16)	12818(16)
sum_f(Nuclear ,t)	16079(31)	21179(36)	26279(37)	31379(41)	33830(43)	34043(43)
sum_f(Other ,t)	418(1)	1756(3)	3094(4)	4408(6)	5354(7)	5622(7)
sum_f_total(t)	52161	58930	70639	75935	78560	80100

4.3 실행결과

전력부문 온실가스 감축을 평가하기 위해 시험적으로 제시한 상향식 모형의 실행결과를 요약하면 Table 1과 같다. Table 1에서 y()는 신설용량으로 예를 들어 ‘y(Nuclear_PP ,t)’는 원자력의 신규설비증설용량(MW)을 나타내고 있으며, Y_Cap()은 설비용량(기존+신설)(MW)을 나타내고, sum_f()는 발전용량으로 MWyr 단위이다. 또한 설비용량과 발전량에서 ()안의 숫자는 발전설비 및 발전용량의 비율을 나타내고 있다.

Table 1의 연구결과는 2014년의 전력설비용량 및 2029년 7차전력수급계획을 반영한 전력부문 상향식 모형의 한 예라고 볼 수가 있다. Table 1의 결과는 실질적인 다양한 데이터나 시나리오를 반영한 결과는 아니며, 단지 본 연구의 주 내용인 전력부문을 어떻게 상향식 방식으로 모형화를 할 수 있는지에 대한 예를 가지고 실행한

결과임에 유의하여야 될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 온실가스 배출량이 가장 많은 전력부문을 대상으로 상향식으로 모형화하는 방안을 제시하고 있다. 실질적으로 모형화를 위해 필요한 방법들을 기술하였으며, 시범적으로 RES를 구축하고 이를 토대로 다양한 제약식들을 추가한 BAU 모형을 제시하였으며, 이의 실행결과도 보여주었다.

이러한 연구를 통해 향후 탄소세 도입, RPS를 통한 배출량 감축, 신재생 에너지 보급계획 등의 다양한 시나리오를 설정할 수 있는 기본연구 방향을 제시한 것이 본 연구의 의의라고 할 수 있다. 향후에는 이러한 다양한 시나리오를 국내 실정을 반영하여 설정하고, 그 결과를 BAU

와 비교할 수 있는 후속연구가 필요할 것이다.

Vol. 44, No. 4, pp.879-90

감사의 글

본 연구는 환경부 2015년 ‘기후변화대응 환경기술개발 사업’에 의해 지원되었음.

References

1. 국가온실가스 종합정보센터, 2011, “2020년 중기 국가 온실가스 감축목표설정”
2. 에너지경제연구원, 2009, “MARKAL 모형과 국내 장기 온실가스 감축잠재량 분석 보고서”
3. 에너지경제연구원, 2010, “저탄소 경제시스템 구축 전략 연구 - 지역별 저탄소 경제시스템 개발”
4. 유종훈, 김후곤, 2011, “손익분기점 분석을 이용한 전기차의 보조금 정책 연구”, 에너지공학, 제20권 제1호
5. 유종훈, 김후곤, 2012, “MESSAGE 모델링을 이용한 승용차 부문의 그린카 도입 전망 분석”, 에너지공학, 제21권 제1호
6. 한국산업환경기술원, 2011, “온실가스 배출 전망 및 감축잠재량 예측 분석 평가 기술 개발”
7. Böhringer, C., 1998, The Synthesis of Bottom-up and Top-down in Energy Policy modeling, Energy Economics 20, p. 233-248
8. EPA U.S. National MARKAL Database: Database Documentation, EPA/ 600/R-06/057, Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.
9. Fishbone, L.G., Abilock, H., 1981, MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. Energy Res. Vol. 5, No. 4, pp.353-75
10. Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtilä, A., Goldstein, G. 2005, : Documentation of the TIMES model, www.etsap.org
11. Hugon Kim, et. al., 2014 Mathematical properties and constraints representation for bottom-up approaches to the evaluation of GHG mitigation policies, Transportation Research Part D 32, pp.48-56
12. Hashim, H., Douglas, P., Elkamel, A., Croiset, E., 2005, Optimization model for energy planning with CO2 emission considerations. Ind. Eng. Chem. Res.