

CPLEX를 이용한 동북아 연계 경제성 평가 프로그램 개발

이상규 이병준 송화창 김발호 윤재영 남정일
고려대학교 군산대학교 홍익대학교 한국전기연구원 (주)KD Power

**Development of Economy Assessment Program
for Interconnection of North-East Asia systems Using CPLEX**

Sangkyu Lee, Byongjun Lee Hwachang Song Balho Kim Jeayoung Yoon Jungil, Nam
Korea Univ. Kunsan National Univ. Hongik Univ. KERI KD Power

Abstract - 본 논문에서는 지금까지 각각 독립적으로 운전되었던 동북아시아(대한민국, 북한, 러시아) 전력시스템이 계통 연계를 통하여 얻을 수 있는 경제적 효과에 대한 평가 프로그램의 개발에 대하여 설명한다. 본 평가 프로그램의 목적은 향후 동북아 전력시스템의 계통 연계시 각 나라들의 발전소 건설 및 운용, 그리고 연계설비(Tie line)의 투자비용을 최소화할 수 있는 방안을 찾아내는 것이다. 이를 통해 독립적으로 운전되는 것에 비해 계통연계를 통한 것이 보다 높은 경제적인 효과를 거둘 수 있음을 최종적으로 보이고자 한다.

문제를 좀 더 쉽고 빠르게 효과적으로 풀기 위하여 신규 발전설비와 연계선로에 대한 계획측면의 변수와 발전량과 선로에 흐르는 조류량의 제약 그리고 각 노드에서의 전력수급 조건 등의 운전측면의 변수를 함께 포함시킨 선형 계획법(LP, Linear Programming) 모델로 정식화한 뒤 최적화 프로그램인 CPLEX를 통하여 해를 구한다.

1. 서 론

북아메리카, 유럽 남미등과 같은 지역에서 전력계통의 연계를 통한 경제적 이익을 추구하고 있는 반면, 현재 동북아시아 지역에서는 국가간의 전력계통에 대한 연계는 수행되지 않은 상황이다. 그러나 국가간의 전력계통의 연계는 높은 잠재적 효과와 이익을 가지고 있다. 그 이유는 국가간의 서로 다른 사용가능한 자원, 경제적 특성, 기술 발전정도과 같이 고려해야할 것들이 많이 존재하기 때문이다. 이 중에서도 전력수급의 측면에서 가장 눈여겨 봐야할 것은 바로 국가간의 서로 다른 부하 특성이다. 즉, 대한민국의 경우에는 여름철에 최대 전력수요를 가지고 있는 반면, 러시아나 북한의 경우는 여름보다는 겨울철에 최대 전력수요를 가지고 있어 이러한 특성을 효과적으로 이용할 경우 발전단가 측면에서 상당한 이익이 얻을 수 있다.

국가간의 전력계통 연계를 통하여 얻을 수 있는 다양한 이득은 다음과 같은 것들이 있다[1-2].

- 최대 전력 수요의 차이로 인한 발전비용의 절감이 가능하다. 인접지역이 서로 간에 상이한 전력수요를 보인다면 이것은 더욱 큰 이득을 볼 수 있다.
- 전력공급이 수요를 따라가지 못할 경우, 전력 수입을 통하여 수요를 충족시킬 수 있다.
- 최대 전력 수요나 전체 전력 예비력의 마진의 차이로 인하여 발전설비의 새로운 설치를 줄일 수 있다. 때로는 추가 설치를 하지 않아도 되는 경우도 생길 수 있다.
- 전력계통 연계를 통한 최적 운용을 통하여 연료 절감의 효과를 얻을 수 있다.
- 특정 지역의 발전소 입지난이나 환경문제가 심각한 경우 발전소의 건설을 대체하는 효과를 거둘 수 있다.

그러나 위와 같은 이점들이 국가간의 전력연계 건설비용보다 클 경우 전력계통 연계는 효과적이라고 할 수 있으므로 이에 대한 적절한 경제성 평가에 관한 연구가 필수적이다.

계통 연계설비의 투입의 관점에서, 동북아시아 지역의 경우, 많은 전력 연계선로들은 장거리 선로이며 따라서 상당한 건설비용이 요구된다. 또한 고려하는 설비의 확충문제는 국가간의 이익이 관련되어 있기 때문에, 계통연계의 효율성은 모든 상황에 대하여 신중하게 연구되어야 한다.

2. 계통 연계 경제성 평가 프로그램

2.1 전력계통 연계의 효과.

기본적인 전력계통 연계는 크게 두 가지로 측면에서 고려될 수 있다. 첫째, 전력계통을 연계하는 국가들의 최대 전력 수요 시기가 같은 시즌(계절)에 일어나는 경우에는 전력계통 연계 이전의 각각 가지고 있던 예비량보다 연계이후 전체적인 예비량이 많기 때문에 전력 예비량의 절감 효과를 얻을 수 있다. 만약 부하의 최대 수요 시간이 연계된 나라 간에 다르게 나타나게 된다면 추가적으로 peak용량이 절감되게 된다. 전력계통의 연계는 연계 이전보다 5~10%정도 증가된 효과를 볼 수 있다. 둘째, 전력계통을 연계하는 국가들의 최대 전력 수요시기가 다른 시즌(계절)에 일어나는 경우(현재 대한민국, 북한, 러시아를 포함한 동북아시아의 경우는 여기에 해당한다) 이와 같은 경우 부하 최대 수요를 가진 전력계통의 연계를 통하여 충분한 예비력을 확보할 수 있다. 또한 한 지역의 전력계통에서의 부하 증가를 다른 지역에서 발전한 전력을 연계선로를 통한 전력 공급에 의하여 충족시킬 수 있다. 전력계통의 연계는 연계 이전보다 30~40% 정도 증가된 효과를 볼 수 있다.

시기가 다른 시즌(계절)에 국가들의 최대 전력 수요가 일어나는 경우, 또 다른 이점을 가지고 있으며, 이것은 신규 발전설비의 건설과 관계가 있다. 연계 이전에는 증가되는 부하 수요에 맞추어 발전설비를 신규 건설해야 되었지만, 전력계통의 연계 이후에는 증가되는 부하를 연계선로를 통한 전력공급으로 추가적인 신규 발전설비의 투입을 줄일 수 있거나, 혹은 상황에 따라서 추가 건설이 필요하지 않을 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 이것은 현재 우리나라의 상황에서 본다면 상당히 고무적인 결과로 받아들여 질 수 있으며, 이와 같은 경우에는 추가적인 연계선로의 건설도 함께 고려해 보아야 할 것이다. 추가적인 발전설비의 건설은 그 나라의 부하 뿐만 아니라 연계되어있는 다른 나라의 부하에 대한 전력공급을 위하여 이루어 질 수 있다.

2.2 계통 연계의 경제성 평가 모델

전력계통 연계의 수학적 모델은 시간 단위별로 이루어져야한다. 그리고 하나의 나라는 하나의 노드로 생각한

다.

시간별 부하는 일년을 사계절로 나누었고, 하루를 24시간으로 나누었으며, 평일과 주말의 부하를 다르게 보았다. 결과는 기준년도에서 목표연도에 해당하는 부하에 대비한 목표연도까지의 신규 설치되는 각 노드에서의 발전량과 연계선로량으로 나타낸다.

2.2.1 정식화

본 논문에서는 [3-4]에서 제시된 ORIRES 모형을 개발 프로그램에 적절하게 변형하여 다음과 같이 정식화를 수행하였다.

목적함수: 연계계통을 구성하는 전체 국가의 연간 발전비용과 연계선로 연간비용의 합계를 최소화하는 연계선로 용량과 각 국가별 발전설비용량을 구하는 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$Min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t_y} C_i \tau_{ty} x_{ity} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I K_i (r + b_i) X_i + \sum_{j=1}^J \sum_{j'=2}^J K_{jj'} (r + b_{jj'}) X_{jj'} \quad (1)$$

제약조건: 제약 조건으로 다음과 같은 부등식 제약이 적용된다.

각 노드에서의 발전력 수급 조건:

$$\sum_{i=1}^I x_{ity} - \sum_{j=1}^J x_{jity} + \sum_{j=1}^J x_{jity} (1 - \pi_{jj}) = P_{jty} + R_{jty} \quad (2)$$

($j = 1, \dots, J; t_y = 1, \dots, T_y; y = 1, \dots, Y$)

발전설비 신규계획:

$$0 \leq X_i \leq N_{Mi} - N_{0i} \quad (3)$$

($i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J$)

연계선로의 신규계획:

$$0 \leq X_{jj'} \leq \Pi_{Mjj'} - \Pi_{0jj'} \quad (4)$$

($j = 1, \dots, J; j' = 2, \dots, J; j' \neq j$)

발전설비의 작동용량:

$$N_{miy} \leq x_{ity} \leq a_{iy} (N_{0i} + X_i) \quad (5)$$

($i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; y = 1, \dots, Y$)

연계선로의 송전용량:

$$\Pi_{mjj'} \leq x_{jity} \leq \Pi_{0jj'} + X_{jj'} \quad (6)$$

($j = 1, \dots, J; j' = 1, \dots, J; j' \neq j$)

전체 발전설비의 연간 발전력 상한:

$$\sum_{y=1}^Y \sum_{t_y} \tau_{ty} x_{ity} \leq E_i \quad (7)$$

위 정식에서 각 파라미터에 대한 정의는 다음과 같다.

- jj': 상호 연결된 전력계통에서의 노드
- i: i 노드에서의 발전설비
- y: 1년의 계절의 수
- t_y: 시간격 y에서의 working day와 holiday의 시간의 수 (1-24는 working day, 25-48은 holiday)
- τ_{ty}: working day or holiday의 수
- P_{jty}: 시간 t_y에 j 노드에서의 부하량
- R_{jty}: 시간 t_y에 j 노드의 발전설비에서 요구되는 예비력
- N_{0i}: 발전설비 i의 최초 설치용량
- N_{Mi}: 발전설비 i의 최대설치용량 (kW)
- N_{miy}: y시간에서 발전설비 i의 최소 허용 용량 (kW)
- a_{iy}: y시간에서 발전설비 i의 이용지수
- E_i: 제한된 에너지 자원을 가진 발전설비에 의한

일년의 전력 발전량 (kWh)

Π_{0jj'}: 노드 j와 j'사이의 연계선로의 최초 전송용량 (kW)

Π_{Mjj'}: 연계선로의 최대 전송용량 (kW)

Π_{mjj'}: 노드 j와 j' 사이의 연계선로의 최소 허용 부하 (kW) (0이 될 수 있다)

π_{jj'}: 노드 j와 j'사이의 송전 손실율

X_{ity}: t_y 시간에 발전설비 i의 작동용량 (kW)

x_{jity}: t_y 시간에 노드 j에서 j'으로 흐르는 조류량 (kW)

X_i: 차년도 발전설비 i의 신규설치용량 증가량 (kW)

X_{jj'}: 차년도 노드 j와 j'사이의 송전용량 증가량 (kW)

C_i: 발전설비 i의 비용변수 (USD/kW)

K_i: 발전설비 i의 신설 및 확장 투자액 (USD/kW)

K_{jj'}: 노드 j와 j' 사이의 연계선로의 신설 및 확장 투자액 (USD/kW)

b_i: 투자부분에서 발전설비 i의 고정 비용

r: 할인율

여기에서 x_{ity}, x_{jity}, X_i, X_{jj'} 값들은 본 LP 모델의 상태변수에 해당한다.

2.2.2 CPLEX를 적용한 해법

본 논문에서는 위에서 구성된 LP 모델에 대한 해를 구하기 위하여 ILOG사에서 제공하고 있는 CPLEX 알고리즘을 이용하여 최적해를 구하였다. 그리고 DLL (Dynamic Link library) 형태의 CPLEX 라이브러리 및 데이터 베이스에 대하여 접근하기 위해 그림 1에서와 같은 구조를 사용하였다. LP문제의 기본적인 입력 데이터를 읽고 LP 문제를 구성하는 프로그램은 FORTRAN 언어를 사용하였다. 또한 CPLEX 라이브러리에 대한 접근을 위해 C++ 언어를 사용하여야 함으로 FORTRAN과 C++의 다언어 프로그래밍 기법을 적용하였다.

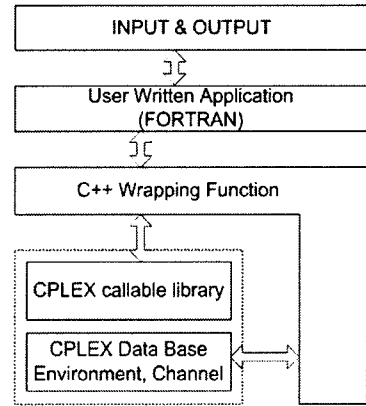


그림 1. CPLEX 라이브러리 접근 구조

3. 사례연구

모델 해석을 위한 입력 데이터의 기본적 전제조건은 다음과 같다.

기준연도 : 2004년

분석기간 : 2004년 ~ 2025년

할인율 : 발전설비 - 6%, 연계선로 - 8%

연계루트 : 대한민국-북한-극동러시아-동시베리아

발전설비 : 수력, 양수, 화력(석탄, 석유, 가스복합), 원자력, 신재생

부하곡선 : 계절별 특성을 반영한 평균치이며 모델에서 고려한 방법은 각 계절별 최대치를 선정하여 그것을 기준으로 정규화하는 방법 적용한다.

위의 데이터를 기본으로 하여 (1)~(7)까지의 LP 문제

를 구성한 뒤 CPLEX 라이브러리를 적용하여 해를 구하였다. 그림 2에서 그림 6까지 최적해를 결과 중 설비 투자에 관련된 부분을 설명하고 있다.

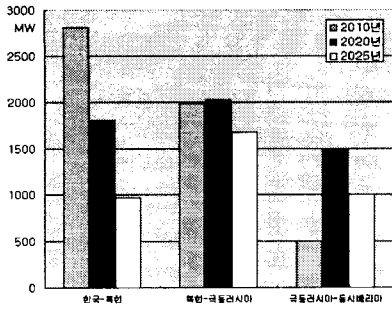


그림 2. 신규선로 증설

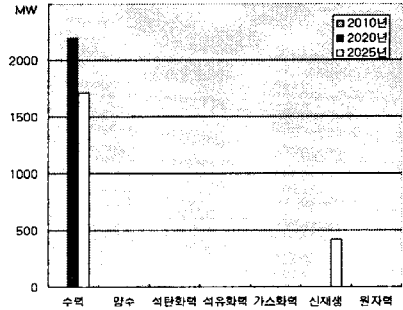


그림 6. 동시베리아 발전설비 증설

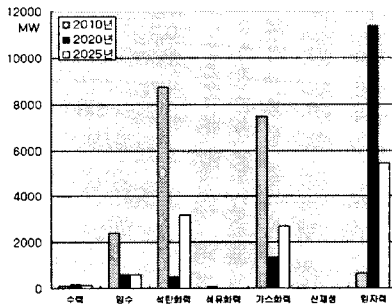


그림 3. 대한민국 발전설비 증설

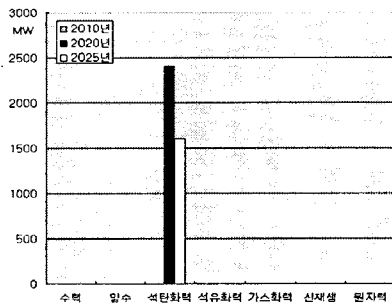


그림 4. 북한의 발전설비 증설

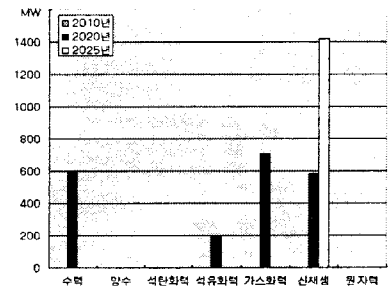


그림 5. 극동러시아 발전설비 증설

위의 결과들을 살펴보면 대한민국 노드와 관련된 발전 설비와 연계선로의 신규 증설량이 가장 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 입력 데이터의 특성 상 대한민국의 전반적인 시간에서 부하량이 가장 큰 값을

보이고 있으며, 각 기준 년도별 부하증가량도 크게 형성되었기 때문이다. 또한 발전단가가 대체로 낮은 원자력이나 신재생, 수력 등의 증가가 많이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 동북아시아의 전력계통 연계에 의한 경제적 효과에 대한 평가를 수행하기 위한 LP 문제로 정식화하고 이를 CPLEX 라이브러리를 적용하여 해를 구하였다. 일반적으로 설비투입과 관련된 계획측면에서의 문제는 운영과 관련된 목적함수와 함께 신규 또는 추가 투입의 결과로 나온 자료들은 각 나라간의 선로와 발전 설비의 신규 건설 용량에 관한 목적함수를 포함하는 다목적함수로 제시되며 이를 분해법을 적용하여 해를 구하는 것이 일반적인 해법에 해당한다. 본 논문에서는 모든 계획 및 운영의 목적함수 및 변수들을 하나의 LP 문제로 구성된 OIRES 모형을 적용함으로써 빠른 해를 구할 수 있었다.

본 연구에서의 문제점으로는 현재 가지고 있는 데이터들이 우리나라 계통을 제외한 다른 계통들의 경우 추정치이거나 오래된 자료들에 의한 것으로 결과에 대한 적합성은 입력데이터의 신뢰성에 의존하게 된다. 그리고 각 나라간의 비용 산출 방법이나 발전설비들의 사용연한과 같은 것들이 다르기 때문에 이와 같은 것들을 나라간의 협조를 통하여 적절한 입력데이터를 구성하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업(과제번호:R-2002-1-319-0-00)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.S. Drolet, J.S. McConach, "Benefits and pitfalls of international interconnection", IEEE Power Eng. Rev., vol.13, no.7, pp.22-24, 1993.
- [2] 에너지경제연구원, "에너지경제연구", 제3권2호, pp39-59, 2004.
- [3] L.S. Belyaev, L.U. Chudinova, S.V. Podkvalnikov, V.A.Saveliev, "A mathematical model for the effectiveness assessment of interstate electric ties in north-east asia"
- [4] L.S.Belyaev, G.F.Kovalev, L.M.Lebedeva, S.V. Podkvalnikov, "Ties in North-Eastern Asia", Perspectives in Energy, vol.3, Pion Publication, pp.321-330. 1994-1995.