

동북아 전력계통 연계에 따른 경제성 분석

정 구 형 김 경 민 박 중 성 한 석 만 김 발 호
홍익대학교

Economic Analysis on the Interconnected Electric Power System in Northeast Asia

Chung, Koohyung Kim, Kyungmin Park, Jungsung Han, Seokman Kim, Balho
Hongik Univ.

Abstract - Interstate electric power system, as an alternative for energy cooperation under regional economic bloc, has been hotly debated before progressing the restructure in electric power industry and rapidly expanded in many regions after 1990s. Especially, since northeast asia has strong supplementation in resource, load shape, fuel mix etc., interconnection of electric power systems in this region may bring considerable economic benefits.

For the economic analysis, we implement ORIRES model developed by ESI, Russia. ORIRES is a linear programming (LP) model for electric power system operation and planning. Since ORIRES requires data relatively less than other model, it is suitable for northeast asia that has considerable restriction against required data acquisition.

In this paper, we perform an economic analysis on interconnection in northeast asia.

1. 서 론

국가 간 계통연계는 지역 간 경제블록화에 따른 에너지 협력방안의 하나로서 전력산업 구조개편 이전부터 전 세계 지역별로 활발히 적용되고 있으며, 1990년대 이후 급속한 증가추세를 나타내고 있다. 이미 전력계통이 연계되어 운영되고 있는 북미와 유럽지역 외에도 남미, 동남아, 아프리카 등 여러 지역에서 경제적인 전력공급, 계통신뢰도 향상, 환경/입지문제 해결 및 국제적인 긴장완화 등의 이유로 계통연계를 활발하게 추진하고 있다.

동북아 지역 국가 간 전력계통 연계의 필요성에 대해서도 1980년대 후반 이후 꾸준히 논의되어 오고 있다. 이는 동북아 지역이 자원보유, 부하패턴, 전원구성 등의 측면에서 상호 보완성이 높으며 세계 여타 지역보다 계통연계로 인한 경제적 유용성이 클 것이라는 예상에 기인하고 있다.

그러나 동북아 지역의 전력계통 연계는 그 자체의 높은 경제적 효용성에도 불구하고 많은 정치적, 기술적 장애요인이 상존해 있는 정부차원의 국제협력 사안이다. 또한 장기적인 연계계통의 이용을 목적으로 하는 상당한 재원이 소요되는 사안이기 때문에, 충분한 사전 연구조사로 정책 결정과 계획 수립 및 추진 시 시행착오를 최소화시켜야 한다.

이를 위해, 본 논문에서는 동북아 지역에서의 전력계통 연계에 따른 경제성 분석을 수행하였다. 분석 모형으로는 러시아의 ESI에서 개발한 ORIRES 모형을 구현하였으며, 모형을 통해 도출된 계통연계 시의 총비용과 계통이 연계되지 않을 경우의 총비용을 비교함으로써 전력계통 연계 사업의 경제성 여부를 평가하였다.

2. 전력계통 연계의 경제성

일반적으로 경제성 평가는 정책 수립 또는 투자 사업에 대한 타당성 평가의 일부분으로 볼 수 있다. 어떠한 사업 또는 계획의 타당성을 검토하는 단계에서는 여러

가지 대안들을 다양한 원칙과 기준으로 비교/평가함으로써 최적의 의사결정을 달성할 수 있도록 해야 한다.

따라서, 경제성 평가의 결과는 정성적이고 계량적인 방법을 통해, 여러 대안 또는 상호 경쟁적인 대안 가운데 의사결정자에게 가장 많은 경제적 편익을 창출하는 대안을 제시할 수 있어야 한다.

2.1 경제성의 정의 및 개념

어떠한 사업이 '경제적이다' 또는 '경제성이 있다'라는 명제는 그 사업을 완수하고 운영하기 위해 소요되는 총비용보다 이를 통해 얻을 수 있는 경제적 편익이 클 때 즉, '순편익(net benefit)'이 주어진 일정 기간 동안 발생할 것으로 판단될 때 성립한다.

또한, 여러 대안 가운데 최적안을 선택하는 의사결정 과정에서는 각각의 대안이 창출하는 순편익을 비교/검토하여 이 가운데 가장 많은 순편익을 발생하는 대안을 경제성이 있는 것으로 선택하게 된다. 그러나, 일정한 편익이 외생적으로 주어질 경우에는 그 편익을 달성하기 위해 소요되는 비용이 가장 작은 사업 즉, 최소 비용의 대안이 최적안으로 결정될 수도 있다.

따라서, 경제성 평가는 계획된 사업에 대한 '일정 기간 동안의 수익에 대한 비용과의 관계'를 분석하는 것이며, '최소 비용, 최대 효과'의 원칙 하에서 결정되는 것이다.

2.2 전력계통 연계의 경제성 기준

전력분야에서의 국가 간 협력은 여러 가지 형태가 있으나, 가장 대표적인 방안은 송전선 연결을 통한 국가 간 전력계통 연계이다.

이러한 전력계통 연계사업의 경제성 여부는 계통연계 시의 총비용과 연계되지 않을 경우의 총비용을 비교하여 결정하게 된다. 즉, 국가 간 전력계통 연계와 관련된 비용이 계통연계 없이 자국의 전력수요를 충족시키기 위한 설비 투자 및 운영 등에 소요되는 총비용보다 적은 경우에는, 전력계통 연계에 경제성이 있는 것으로 평가될 수 있다.

3. 동북아 전력계통 연계의 경제성 평가를 위한 모형 설계

본 논문에서는 위에서 기술한 경제성 평가 기준을 바탕으로 동북아 지역의 전력계통 연계에 따른 경제성 분석을 수행하기 위해, 러시아의 ESI에서 개발한 ORIRES 모형을 이용하였다. ORIRES 모형은 현재까지 동북아 지역의 전력계통 연계계획 수립과 관련된 연구를 수행함에 있어 가장 많이 사용되었기 때문에, 이 방법으로 프로그램을 개발하여 분석을 수행할 경우 검증할 수 있는 기존의 연구결과가 존재한다. 또한, 자료의 제약이 심한 동북아 지역 국가의 여건 하에서 자료에 대한 요구(data requirement)가 다른 모형에 비해 비교적 적기 때문에, 이와 같은 제약 하에서도 정책적 의사결정을 수행할 수 있는 결과 제시가 가능하다는 장점을 갖는다.

3.1 ORIRES 모형의 특징

ORIRES 모형은 다음과 같은 사항을 고려하여 최적화

문제를 구성한다.

- 동북아 지역 내 계통 간 연간 최대부하 발생 계절 및 일일 최대부하 발생 시간대에서의 비동시성(non-coincidence) 즉, 동북아 지역 국가 간 부하패턴의 차이(load diversity)를 고려해야 한다. 이를 위해, 계절별 근무일 및 비근무일 24시간 각각에 대한 부하를 적용한다.
- 부하수요를 충족시키기 위해서는 신규 발전설비를 증설하거나 인접 지역의 잉여용량을 이용하기 위한 연계선로를 건설할 수 있다. 이 때, 각각의 대안에 대한 경제성 평가를 수행하기 위해서는 비용 관점에서 이를 비교할 수 있어야 한다. 이를 위해, 각 발전설비 및 연계선로 증설용량을 모형의 결정변수로 반영한다.
- 발전설비 및 연계선로와 관련된 비용을 비교하기 위해서는 해당 대안의 투자비용뿐만 아니라 운영비용 또한 고려해야 한다. 따라서, 시간대별 발전출력과 계통 간 송전용량 또한 모형에서 결정될 수 있어야 한다.
- 미래의 부하성장을 고려한 장기 전원계획모형으로써, 목표연도의 필요 발전용량과 송전용량 및 관련 비용을 비교할 수 있도록 해야 한다.

이를 바탕으로 계산의 단순화를 기하기 위해, ORIRES 모형은 목표연도까지의 연도별 신규 설비증설의 최적화를 수행하는 대신 특정 목표연도에서의 최적 설비수준을 도출하는 정적 선형계획문제로 정식화된다.

3.2 ORIRES 모형의 목적함수

ORIRES는 특정 목표연도의 최적 발전용량 및 국가 간 송전용량을 산출하는 모형으로, 다음의 식에서 보여주고 있는 바와 같이 연계성 전체의 기존 발전설비의 운전비용과 신규 발전설비 투자비용 및 송전선로 투자비용 지출을 최소화하는 해를 도출한다.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{t=1}^T c_{ij} \tau_{it} x_{ijt} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} K_{ij} (\gamma_j + b_{ij}) X_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{j_0 > j} K_{j_0 j} (\gamma_{j_0} + b_{j_0 j}) X_{j_0 j} \quad (1)$$

단, j 는 전원유형을 나타내며, j 는 연계된 전력계통의 노드(node) 수를 나타낸다. 이 때, 계통이 연계되는 국가 또는 지역을 하나의 노드로 간주한다. j 는 계절을 나타내는 지수이며, t_j 는 해당 계절 내 근무일 및 비근무일의 각 시간대를 나타낸다. τ_{it} 는 해당 계절의 총 근무일 수와 비근무일 수를 나타낸다. c_{ij} 는 j 노드, i 전원유형 설비의 운전(평균 연료)비용을 나타낸다. K_{ij} 는 j 노드, i 전원유형 설비 증설 시 소요되는 단위용량 당 투자비를 나타내며, $K_{j_0 j}$ 는 j 노드와 j_0 노드 간 송전선로 단위 용량 당 투자비를 나타낸다. γ_j , b_{ij} , $b_{j_0 j}$ 는 각각 j 노드의 투자보수율(rate of return), j 노드, i 전원유형 발전설비의 연간 고정비용, j 노드와 j_0 노드 간 송전선로의 고정비용을 나타낸다.

또한, x_{ijt} , X_{ij} , $X_{j_0 j}$ 는 결정변수로, 각각 기존의 j 노드, i 전원유형 발전설비의 t_j 시간대 운전용량, j 노드, i 전원유형 발전설비의 신규 증설용량 및 j 노드와 j_0 노드 간 신규 송전선로 증설용량을 나타낸다.

3.3 제약조건

ORIRES 모형은 다양한 제약조건 하에서 목적함수를 최소화하는 최적해를 도출한다. 모형 내에서 정식화되는 제약조건은 계통 내 총 설비용량, 연중 첨두부하 수준, 노드별·계절별·시간대별 수급균형 제약, 각 노드의 발전설비 형태별 신규 발전설비의 증설과 송전용량 증설 규모, 각 노드별 발전설비 형태별·계절별 운전용량, 기술적인 특성을 감안한 시간대별 송전용량 차이, 수력발전의 발전량에 대한 제약, 양수발전 설비특성 제약 등을 포함하고 있다.

ORIRES 모형의 최적해는 이러한 제약조건을 고려한 특정 목표연도의 연계계통 운전 결과를 도출하며, 연계

지역 내 각 계통의 계절별·시간대별 발전출력 및 다른 계통과의 송전/수전 전력, 신규 발전설비 및 송전선로 증설용량, 총 연료비용, 그리고 신규 설비에 대한 투자비용 등에 대한 정보를 제공한다.

4. 사례 연구

본 논문에서는 위에서 기술한 ORIRES 모형을 GAMS/CPLEX solver를 이용하여 구현하였으며, 이를 바탕으로 한국, 북한, 극동러시아, 동시베리아 계통을 대상으로 하는 동북아 지역 계통연계의 경제성 평가를 수행하였다. 이 때, 각각의 계통은 하나의 노드로 고려하였다.

본 사례연구에서는 2005년을 기준으로 2010년과 2020년에서의 독립계통 및 계통연계 시의 총 비용을 계산하여 이를 비교함으로써 경제성 분석을 수행하였다. ORIRES 모형을 이용한 경제성 분석을 위해서는 발전소 지표, 계절별 발전 지표 및 부하특성의 입력 데이터를 필요로 한다.

발전소 지표 데이터는 수력, 양수, 석탄, 석유, 가스, 열병합 및 원자력 전원유형별 기존 발전설비용량, 해당 목표연도에서의 각 전원유형에 대한 최대 발전설비용량, 전원유형별 운전비 단가(USD/kWh) 및 신규 설비 투자비 단가(USD/kW), 전원유형별 고정비용 비율, 양수발전 효율 및 양수발전설비의 일일 최대가동시간 등으로 구성되어 있다.

계절별 지표 데이터는 계절성 각 전원유형 발전설비의 가동률, 계절별 양수발전 보장 설비용량, 계절별 각 전원유형 발전설비의 최소가동용량, 기존 수력 발전설비의 계절별 최대가동시간 등으로 구성되어 있다.

부하특성 데이터는 계절별로 근무일과 비근무일로 구분하며, 해당 일의 시간대별 부하를 해당 계절의 첨두부하에 대한 백분율로 표시하여 적용한다.

또한, 계통연계의 경제성 분석을 위해서는 각 노드를 연결하는 연계선로의 최대용량 및 송전손실, 투자비용에 대한 데이터가 필요하다. 본 논문에서는 한국-북한, 북한-극동러시아, 극동러시아-동시베리아를 연결하는 단일 연계선로를 가정하였으며, 각 연계선로의 최대용량은 2010년에는 5GW, 2GW, 1.5GW로, 2020년에는 7GW, 4GW, 3GW로 설정하였다.

<표 1> 발전설비용량 비교결과

(단위: GW)

	2010년			2020년		
	독립	연계	증감율	독립	연계	증감율
한국	70.5	65.6	-6.9%	83.7	76.9	-8.2%
북한	13.6	10.9	-19.9%	16.8	12.6	-25.1%
극동러시아	8.1	8.1	0.0%	9.9	7.5	-24.0%
동시베리아	37.8	37.3	-1.3%	48.4	45.7	-5.7%
계	130.0	121.9	-6.2%	158.8	142.7	-10.2%

<표 1>에서 보여주고 있는 바와 같이, 계통연계를 시행할 경우 모든 지역의 전체 발전설비용량이 독립계통으로 운영할 경우에 비해 상당히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 북한의 경우에는 취약한 발전설비 수준과 한국과 러시아의 중간에 위치하는 지리적인 이점으로 인해, 상당한 수준의 계통연계 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타나고 있다.

<표 2> 한국의 전원유형별 발전설비용량 비교결과

(단위: MW)

		수력	양수	석탄	석유	가스	원자력
		2010년	독립	1,583	4,700	24,265	4,708
	연계	1,583	2,300	21,961	4,708	16,372	18,716
2020년	독립	1,583	4,700	27,040	3,329	17,589	29,437
	연계	1,583	2,300	23,832	3,329	16,372	29,437

한국은 2010년에는 약 6.9%, 2020년에는 약 8.2%의 설비증설 절감효과를 얻을 수 있다. 이러한 설비감소 효과는 양수, 석탄화력 및 가스복합 발전설비에 집중되어 있음을 <표 2>를 통해 확인할 수 있다. 이는 비경제적인 첨두부하용 발전설비의 감소뿐만 아니라 다른 지역으로

부터 보다 저렴한 전력을 공급받음으로써 기저부하용 발전설비의 증설 또한 억제시킬 수 있음을 보여주고 있다.

<표 3> 발전설비 투자비용 비교결과 (단위: 백만\$)

	2010년			2020년		
	독립	연계	증감율	독립	연계	증감율
한국	1,900	1,121	-41.0%	5,732	4,643	-19.0%
북한	1,172	497	-57.6%	1,900	847	-55.4%
극동러시아	0	0	0%	593	52	-91.2%
동시베리아	522	434	-16.8%	2,670	1,973	-26.1%
계	3,595	2,052	-42.9%	10,895	7,515	-31.0%

발전출력과 연료비는 계통연계 시 오히려 상승하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 계통연계 시 연계선로의 송전손실로 인해 독립계통으로 운영할 경우에 비해 발전량 자체가 증가하기 때문이며, 이 때 송전손실량은 용동 전력량에 이에 비례하여 발생한다. 특히, 신규 발전설비 투자비용이 매우 높기 때문에, ORIRES 모형은 계통연계 시 각 지역의 발전설비를 증설하여 전력을 공급하는 대신 연계선로를 통해 기존 발전설비의 이용률을 높여 전력을 공급하는 해가 유도하며 이로 인해 독립계통 운영 시에 비해 연료비용이 높은 발전설비의 발전량이 상당히 증가하게 된다. 연료비가 0인 수력설비는 대부분의 지역에서 포화상태이며, 수력발전 설비용량이 높은 동시베리아 지역에서도 수력설비 자체의 운전계약으로 인해 다른 전원보다 발전량 증가 폭이 그리지 않은 것으로도 출되었다. 이러한 현상이 발생하는 원인은 북한이 부하 수요에 비해 전력공급 설비가 부족하기 때문인 것으로 판단된다.

<표 4> 발전출력 비교결과 (단위: GWh)

	2010년			2020년		
	독립	연계	증감율	독립	연계	증감율
한국	446,038	444,946	-0.2%	531,567	534,164	0.5%
북한	74,875	62,308	-16.8%	112,132	105,770	-5.7%
극동러시아	39,273	51,357	30.8%	49,378	53,199	7.7%
동시베리아	201,784	203,440	0.8%	265,507	274,467	3.4%
계	761,970	762,051	0.01%	958,584	967,600	0.9%

<표 5> 발전설비 운전비용 비교결과 (단위: 백만\$)

	2010년			2020년		
	독립	연계	증감율	독립	연계	증감율
한국	8,226	8,439	2.6%	8,175	8,679	6.2%
북한	494	597	20.7%	558	638	14.3%
극동러시아	338	466	38.1%	416	484	16.6%
동시베리아	600	604	0.7%	874	987	13.0%
계	9,659	10,107	4.6%	10,022	10,789	7.6%

계통연계 시 건설되는 연계선로 용량은 대부분 최대용량까지 증설된다. 한편, 연계선로를 통한 용동전력량은 지역 간 부하패턴과 전원구성 형태에 따라 계절별로 차이가 발생하지만, 전체적으로 북한 지역으로 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이는 위에서 기술한 바와 같이, 북한 지역의 전력공급 설비의 부족이 원인인 것으로 판단된다. 계절별 용동전력량에 대한 결과는 <표 6>에서 보여주고 있다.

<표 7>은 계통연계 시 송전선로 투자비용을 포함한 각 목표연도의 총비용 계산결과를 보여주고 있다. 계통연계를 시행할 경우, 연계선로 건설에 따른 투자비용의 추가적인 지출이 발생하고 연계선로를 통한 전력용동으로 인해 기존 발전설비의 이용률 상승에 따라 발전설비의 연료비용은 증가하지만, 신규 발전설비에 대한 투자비용 측면에서의 비용절감 수준은 이를 충분히 상쇄한다. 그 결과, 한국, 북한, 극동러시아 및 동시베리아 지역의 계통연계를 시행할 경우 각각의 계통을 독립적으로 운영할 경우에 비해 상당한 수준의 경제성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

<표 6> 계절별 용동전력량 비교결과

(단위: TWh)

2010년	한국->북한	북한->한국	북한->RFE	RFE->북한	RFE->ES	ES->RFE
겨울	3.34	-	0.55	2.09	0.77	1.14
봄	0.53	0.02	-	4.17	-	3.24
여름	-	5.19	-	4.26	-	3.31
가을	1.26	0.17	0.01	3.61	0.03	2.58
연 총계	5.13	5.37	0.56	14.13	0.80	10.27
2020년	한국->북한	북한->한국	북한->RFE	RFE->북한	RFE->ES	ES->RFE
겨울	9.53	-	2.16	0.11	0.90	2.16
봄	1.25	0.04	-	6.13	-	6.48
여름	0.02	7.19	-	7.78	-	6.62
가을	6.19	0.00	0.58	0.86	0.04	3.17
연 총계	16.99	7.23	2.74	14.88	0.94	18.43

<표 7> 독립계통 대 연계계통의 경제성 비교결과 (단위: 백만\$)

	연계선로 투자비	발전설비 투자비	발전설비 운전비	총액	
					2010년
2010년	독립	-	3,595	9,659	13,254
	연계	166	2,052	10,107	12,325
2020년	독립	-	10,895	10,022	20,917
	연계	290	7,515	10,789	18,884

5. 결 론

동북아 지역은 자원보유, 부하패턴, 전원구성 등의 측면에서 상호 보완성이 높기 때문에, 세계 여타 지역보다 계통연계로 인한 경제적 유용성이 클 것으로 예상하고 있다. 그러나 동북아 지역의 전력계통 연계를 그 자체의 높은 경제적 유용성에도 불구하고 많은 정치적, 기술적 장애요인이 상존하며, 장기적인 연계계통의 이용을 목적으로 하는 상당한 재원이 소요되는 사안이기 때문에 충분한 사전 연구조사로 정책 결정과 계획 수립 및 추진 시 시행착오를 최소화시켜야 한다.

이를 위해, 본 논문에서는 러시아의 ESI에서 개발한 ORIRES 모형을 구현하여, 동북아 전력계통 연계의 경제성 분석을 수행하였다. 전력계통 연계사업의 경제성 여부는 특정 목표연도에 대한 계통연계 시의 총비용과 연계되지 않을 경우의 총비용을 비교하여 결정하였다. 그 결과, 계통연계를 시행할 경우에는 연계선로 건설에 따른 투자비용의 추가 지출과 전력용동으로 인해 기존 발전설비의 이용률 상승에 따라 발전설비의 연료비용은 증가하지만 신규 발전설비의 투자비용은 상당히 감소하기 때문에, 전체적으로는 경제성을 확보하는 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, 제2차 전력수급기본계획, 2004.
- [2] 에너지경제연구원, 동북아 에너지 협력 연구, 산업자원부, 2003.
- [3] L.S.Belyaev, et al., "A mathematical model for effectiveness assessment of interstate electric ties in northeast asia," Proc. Power Con '98 Beijing, Vol.1, pp.730-734, Aug., 1998.

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