

전력수급기본계획 수립을 위한 발전전 전력설비의 최적구성 방안 분석

류현수, 조강욱, 김태훈, 이조련  
전력거래소 전력계획처 계통계획팀

Analysis of Optimal Long-term Planning for Korea Power Systems

Heon-Su Ryu, Kang-Wook Cho, Tae-Hoon Kim, Jo-Lyeon Lee  
Power System Planning Team, Korea Power Exchange

**Abstract** - 현재 전력수급기본계획은 전국을 단일권으로 하여 발전계획을 수립하고 송변전설비계획을 수립하고 있다. 그러나 발전설비와 송변전설비는 하나의 망으로 연결되어 상호 보완적 영향을 주기 때문에 수급계획시 두 설비를 동시에 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 논문에서는 혼합정수형 선형계획법(MIP)을 이용하여 발전전 전력설비를 통합적으로 최적 구성할 수 있는 방안 에 대하여 분석하였다. 전력수급기본계획 수립시 제출된 건설의향설비에 대해 송변전설비와 통합하여 적정 예비율을 갖는 최적설비 구성방안을 수립하고, 이때의 설비 투자비와 운전비를 분석하였다.

1. 서 론

현재 우리나라는 전국을 단일권으로 하여 발전설비 중심으로 발전용량의 적정성을 확보한 후, 송전계통의 공급신뢰도 기준에 맞추어 송변전설비를 수립하는 순차적 설비계획을 수립하고 있다. 이 순차적 방식은 각각 설비에 대해 최적 설비계획을 따로 수립하기 때문에 준 최적화 개념의 설비계획이라 할 수 있다. 발전설비계획의 경우 발전사업자로부터 발전기 건설의향을 접수한 후, 이 용량 중에서 예측된 장기 부하에 전력을 안정적으로 공급할 수 있는 최적의 발전용량을 결정한다. 이때 WASP(Wien Automatic System Planning Package)이란 전산모형을 이용하여 공급지장확률(LOLP) 0.5일/년을 만족하는 설비조합을 계산한다. 송변전설비계획의 경우 확정된 발전설비의 전력을 원활히 전송할 수 있도록 해당 연도마다 전력계통 신뢰도 기준[7]에 만족하는 설비계획을 수립한다. 즉 단년도(Static planning) 단위의 최적화된 설비계획을 전체 계획기간 동안 반복하는 설비계획이다.

그러나 하나의 망으로 연결된 발전설비와 송변전설비는 상호 보완적 영향을 주는 설비로서 두 설비간 결합성을 반영하는 것은 매우 중요하며, 임의 한 년도에 투자되는 설비가 다음 년도의 설비투자에 어떤 영향을 주는가에 대한 다년적(Dynamic planning) 영향분석은 투자비용 최소화를 위해 필수평가 요소라 할 수 있다. 현재 LP를 이용한 송전망투자계획 기법[1], 확률적 기법을 이용한 송전망확장계획[3] 등 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 전력거래소[8]에서는 혼합정수형 선형계획법을 이용하여 발전전 통합의 전력계통계획 수립용 알고리즘을 개발한 바 있으며, 샘플계통 및 실제계통에 적용하여 타당성을 검증하였다.

본 연구에서는 우리나라 전력수급기본계획 수립시 발전설비와 송변전설비간 결합성을 반영하여 최적 전력설비 구성방안에 대하여 분석하였다. 기 개발된 전력계통계획용 전산모형을 이용하여 수급계획기간에 대하여 건설비와 발전기 운전비를 계산하였으며, 수요 변동성 및 송전선로 용량변화에 대한 시나리오 분석을 하였다. 특히 송전계통망이 연계되지 않은 WASP에 의한 결과와 본 전산모형의 결과를 비교 분석하였다.

2. 전력계통계획 최적화 전산모형

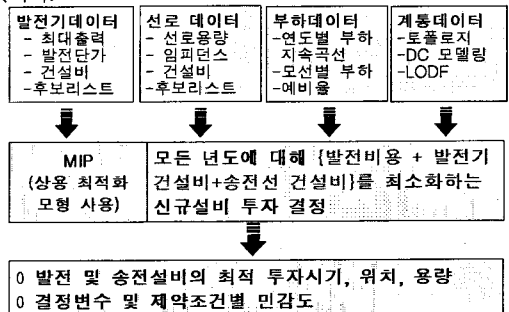
2.1 계통계획 문제의 정식화

계통계획의 문제는 신규설비(발전 및 송변전설비)의 건설 여부를 결정짓는 이진수(binary) 문제로서 혼합정수 선형계획법(MIP)을 이용하여 정식화할 수 있다. 목적함수는 발전설비와 송변전설비의 건설비에 이진수형 결정변수를 곱하는 항, 그리고 발전기의 출력과 발전단가를 곱하는 항으로 이루어진다. 다시 말해 발전전설비 중 건설이 선택(즉 결정변수  $w=1$ )되면 건설비가 목적함수에 포함되게 되고, OPF 알고리즘에 의해 발전기 출력을 결정된 후 발전단가와 곱하여 운전비용이 포함된다. 제약 조건에는 345kV 이상 계통을 DC조류방정식으로 모델링하였고, 발전기 출력상한 및 송전선로 용량상한 제약을 반영하였다. 또한 선로별 송전손실을 선형화하여 포함하였으며, 상정고장을 반영하였다.

- 0 목적함수:  $\min((\text{발전}+\text{송전})\text{신규자원 투자비} * w + \text{발전기출력} * \text{단가})$  for 계통계획 전기간
- 0 제약조건: 1. 모선별 조류방정 방정식  
2. 선로별 DC 조류방정식  
3. 선로별 송전손실 방정식  
4. 발전기 상한 출력제한  
5. 송전선로 상한 용량제한  
6. 송전손실 상한 조류제한  
7. 신규 및 폐지설비(발전+송전)지속조건  
8. 상정고장을 반영한 조류상한한 제한  
9. 발전설비 예비율 제약조건

2.2 최적화 전산모형 구조

전산모형의 입력데이터로는 발전기데이터, 송전선로 데이터, 부하데이터, 송전계통 데이터 등이 있다. 특히 발전기 데이터 중에는 건설의향 설비에 해당하는 후보리스트가 있고, 선로데이터에도 역시 송변전설비 건설 대상이 되는 후보리스트가 있어서, 최적화 전산모형은 이들 후보 중에서 가장 최소의 비용을 갖는 전력설비 조합을 찾는 것이다.



전산모형의 출력으로는 발전기 및 송변전설비의 최적 건설 시기와 위치 등이 있다. 단위기별 용량은 고정된 값을 사용하였기 때문에 전체 수요에 적정한 예비율을 가질 수 있는 총 발전용량을 결정하게 된다.

### 2.3 연도별 부하 반영방법

부하데이터는 계획기간동안 각 모선별 부하값을 시간대별 패턴으로 입력하는 것이 가장 정확하다. 하지만 모선별 부하를 시간대별로 예측하는 것이 매우 힘든 일이며, 실령 예측하였다하더라도 전체계획기간(대개 약 15년) 동안 시간단위 모의를 하는데는 엄청난 시간이 소요된다. 본 전산모형에서는 연도별로 부하지속곡선을 작성하고 곡선상에서 n개 구간으로 나누었다. 각 부하수준(L0 L1 ~)마다 발전기 운전비용을 계산한 후, 이 값에 부하지속시간을 곱하여 가중시켰다. 예를 들어 그림 1에서 부하 수준이 L2라면 발전기 운전비용은

발전기 출력(Pg)×발전단가(λ)×(P2-P1)로 계산된다.

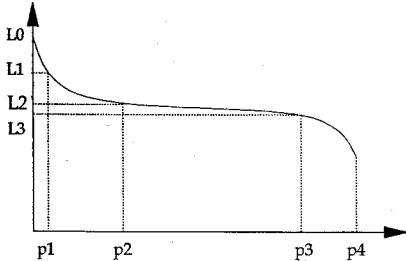


그림 1 부하지속곡선 구분

### 2.4 발전기 모델링 방법

발전기의 출력에는 상하한이 존재하며, 기동정지계획을 수립하여야 하나, 장기 계획에서는 발전기 기동정지를 정확히 수립하기에는 계산상의 어려움이 존재하기 때문에 대개 발전기 최소출력을 0으로 설정한 후 발전단가 우선순위에 의해 기동되는 것으로 가정한다. 그밖에 발전기 건설비용, 그리고 발전기에는 최소 건설기간이 소요되므로 투입가능한 연도와 폐지되는 연도 데이터 등이 포함되어 있다.

### 2.5 송전망 DC 모델링 방법

현재 우리나라 전력계통은 154kV 이상 설비에 대해 연도별로 AC 모델링되어 각종 장단기 전력계통 해석에 사용된다. 하지만 전력수급기본계획 기간 전체에 대해 통합적으로 최적설비계획을 수립하려면 수많은 최적조류계산을 수행하기 때문에 정밀한 모델사용에 한계가 있다. 통상 장기 계획에서는 DC형태의 해석을 통해 계산상의 한계를 해결하는 것이 대부분이다. 본 전산모형에서는 345kV 이상 설비에 대해 DC모형을 사용하였다.

### 2.6 발전설비 예비율 반영방법

전력수급기본계획에 있어서 적절한 발전설비 예비율을 확보하는 것은 경제적 설비투자 문제에 있어서 중요한 일이다. 우리나라는 예비율을 결정하는 공급지장확률(LOLP)을 현재 0.5일/년으로 삼고 있다. 이 기준에 만족하는 발전설비계획을 수립하기 위하여 현재 WASP이란 전산모형을 사용하고 있다. 본 전산모형에서는 WASP에 의해 미리 계산된 발전설비 예비율을 입력값으로 제약조건을 생성한다. 향후 전산모형 내부적으로 기준LOLP에 부합하는 설비필요량을 계산하는 알고리즘이 요구된다.

### 3. 발전전 전력설비의 최적구성 방안 사례연구

본 절에서는 상기 설명한 전산모형을 이용하여 전력수

급기본계획 수립시 최적 전력설비 구성방안을 도출하는 사례를 검토하고자 한다. 여기의 데이터는 과거 전력수급기본계획시 사용한 데이터를 주로 이용하였으며 일부는 제4차 수급계획 수립용 데이터를 이용하였다.

### 3.1 모의 전제

다음은 사례연구를 위한 기본 데이터 및 전제조건이다.

- 수립기간: 09'22년(총 14년)

- 연도별 부하:

① 제4차 전력수급기본계획의 최대전력 및 전력 소비량 예측치(14년치)

② 매년 부하지속곡선을 4개구간으로 나눔

- 발전기 데이터: 제4차 전력수급기본계획 자료

- 송전선로 데이터: 2007년 장기송변전설비계획 자료

표 1은 연도별 최대수요와 기설발전기 및 건설의향 발전기 용량이다. 단 발전기 용량은 실효용량 기준이다. 전산모형은 예측된 수요에 대해 안정공급을 할 수 있는 발전기를 이 건설의향설비 중에서 선택한다.

표 1 연도별 수요 및 발전설비 용량

연도	수요예측 (MW)	기설설비 (누적MW)	건설의향설비 (누적MW)
2009	67,226	72,192	0
2011	71,324	77,283	500
2015	77,214	84,847	14,990
2020	81,151	86,274	35,080
2022	81,805	85,574	36,480

표 2 송변전설비 주요 후보리스트

지역	구간	수송대상 전력
수도권	수도권 추가 유통선로 6개	수도권 유통전력
영동	의정부-신대백 공지방-신대백	울진, 신울진/NP
서해안	평택T/P-신당진 화성-신서산	태안, 당진, 보령
전국	기타 접속선로	발전기, 신규변전소

표 2의 송변전설비 후보는 시공가능성을 고려하지 않았고 단순히 발전설비와 송변전설비간 결합성을 분석하기 위한 목적으로 선택된 리스트이다

### 3.2 발전설비와 송전설비 결합성 분석

가. 시나리오 구성

시나리오	발전기 후보	송전선로 후보	특징
1안	제4차 수급계획 건설의향 제출설비	- 발전기 접속선로 - 신규변전소 접속선로 - 계통보강 선로 (선로열적 용량 반영)	발전기와 송전선로의 결합성 분석가능
2안	제4차 수급계획 건설의향 제출설비	- 발전기 접속선로 - 신규변전소 접속선로 - 계통보강 선로 (선로무한용량 반영)	선로 용량제약을 없애 송전망 미고려(제3안) 결과와 비교
3안	제4차 수급계획 건설의향 제출설비	- 후보리스트 없음 (송전망 미고려)	WASP에 의한 결과

제1안은 발전설비 후보와 송전선로(계통보강용) 후보리스트를 입력하여 두 설비간 결합성을 분석할 수 있고, 제2안은 제1안과 같으나 송전선로의 송전용량을 무한대로 높인 경우로서 송전계통 제약조건이 없는 제3안과 결과를 비교해 볼 수 있다.

나. 모의 결과

그림 2는 각 시나리오별로 예비율을 나타낸다. 우선 공급지장확률 0.5일/년에 해당하는 예비율을 WASP에서 구한 후 이 값을 최적화 전산모형에 제약조건으로 입력하였다. 그림 4에서 보듯이 제1,2안의 예비율이 제3안의 예비율보다 높게 나타나고 있으며, 이는 공급신뢰도가 확보되었음을 의미한다.

그림 3은 계획 최종년도인 2022년 추가 발전설비 용량을 나타낸다. 제1안은 7,980MW의 가스복합 발전기

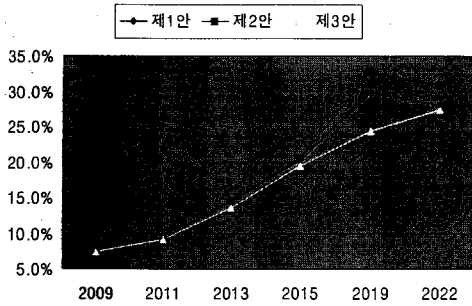


그림 2 연도별 예비율

를 수도권에, 11,100MW의 석탄 및 원자력을 비수도권에 건설하는 반면, 제2안은 7,230MW의 가스복합을 수도권에, 14,500MW의 석탄 및 원자력을 비수도권에 건설하는 것으로 나타났다. 이는 제2안이 선로용량의 제약을 받지 않기 때문에 발전단가가 싼 발전기를 비수도권에 많이 지어 수도권으로 용통하기 때문으로 분석된다. 제3안은 수도권에 6,240MW, 비수도권에 12,440MW를 건설하여 총설비비용이 다른 안보다 제일 적게 나타났으며, 기저발전기 비용은 비교적 높은데, 이는 송전계통을 고려하지 않았기 때문으로 분석된다.

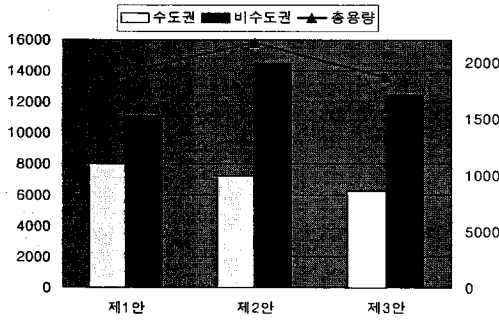


그림 3 최종년도 건설 발전설비량

표 3을 보면 제1안은 '17년 송전선로 보강이 이루어진다. 전산모형에서 송전설비와 발전설비간 경합성 분석을 통해 17년 울진지역에 신규발전기가 건설과 이의 전송선로도 동시에 건설되는 것이 다른 건설대안보다 최적인 것으로 판단했기 때문이다.

표 3 송전설비 선택리스트

시나리오	구간	년도	수송대상 전력
제1안	신안성-신진천 1회선 의정부-신태백 2회선	'17	용통선로 울진,신울진N/P
제2안	무		무
제3안	해당사항 없음		해당사항 없음

표 4은 안별 건설비(후보발전기만)와 운전비를 나타낸다. 제2안은 비수도권에 석탄 및 원자력 발전기 같이 건설비가 높은 발전기를 건설하여 총 건설비가 높으나 이들 발전기의 운전단가가 싸기 때문에 운전비용을 낮추는 효과가 더 크게 나타나 총비용 측면에서는 더 유리한 조합인 것으로 판단된다. 제1안은 송전선로 제약으로 인해 신규 선로 건설비가 높게 나타남을 확인할 수 있다.

표 4 건설비 및 운전비 [단위:10억원]

시나리오	발전설비		송전선로 건설비	합계
	건설비	운전비용		
제1안	12,946	132,698	1,192	146,836
제2안	14,293	129,047	851	144,191
제3안	13,666	124,578	-	138,244

### 3.2 수요의 변동성 시나리오

가. 시나리오 구성

제4차 전력수급기본계획 수립을 위한 기준,상한,하한 수요예측 데이터를 적용하였다.

시나리오	수요	발전기 후보	송전선로 후보
1안	상한 수요	제4차 수급계획 건설의향 제출설비	- 발전기 접속선로 - 신규변전소 접속선로 - 계통보강 선로
2안	하한 수요	제4차 수급계획 건설의향 제출설비	- 발전기 접속선로 - 신규변전소 접속선로 - 계통보강 선로
3안	기준 수요	제4차 수급계획 건설의향 제출설비	- 발전기 접속선로 - 신규변전소 접속선로 - 계통보강 선로

나. 모의 결과

그림 4에서 상한수요 경우를 보면 기준안 대비 높아진 수요의 대부분을 비수도권 발전기(석탄 원자력)에서 담당하고, 나머지 부분은 수도권 발전기로 담당함을 알 수 있다. 반면 하한수요일 때는 수도권 발전기가 대부분 줄어들고 비수도권의 기저발전기는 큰 변동이 없음을 확인할 수 있다.

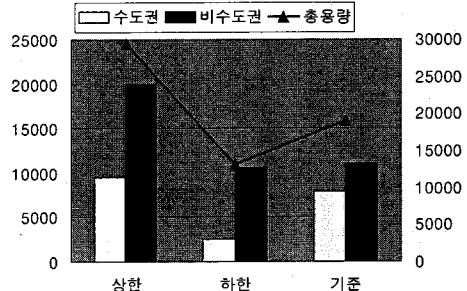


그림 4 최종년도 건설 발전설비량

### 4. 결 론

본 논문에서는 전력수급기본계획을 수립하는데 발전설비와 송전설비의 최적 구성방안에 대하여 시나리오별로 분석하였다. 기 개발된 선형계획법 기반 전산모형을 활용하여 발전기와 송전선로를 동시에 경합성을 평가하고, 계획전체 기간 동안 투자되는 총비용을 최소화할 수 있는 구성에 대하여 모의를 하였다. 현행 수급계획 수립 모형인 WASP과 비교하여 송전계통이 제약으로 포함될 경우 수급계획의 변동성 정도를 확인할 수 있으며 상호보완적 관계로 수급계획에 활용할 수 있을 것이다. 향후 운전비용 계산 알고리즘을 좀 더 정교화하고 전력계통의 비선형성을 좀 더 반영하여 결과의 정확성을 높일 수 있도록 발전시켜야 한다.

### [참 고 문헌]

- [1] Natalia Alguacil, et al., "Transmission Expansion Planning : A Mixed-Integer LP Approach", IEEE Trans. on Power System, Aug. 2003
- [2] Gerardo Latorre, "Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning", IEEE Trans. on Power System, May. 2003
- [3] Pedro Sanchez-Martin, et al., "Probabilistic Midterm Transmission Planning in a Liberalized Market", IEEE Trans. on Power System, Nov. 2005
- [4] Richard D. Christie, et al., "Transmission Management in the Deregulated Environment", Proceedings of the IEEE, Feb. 2000
- [5] 산업자원부, "제3차 전력수급기본계획", 2006. 12
- [6] 한국전력공사, "장기 송전설비계획", 2007. 1
- [7] 산업자원부고시 제2005-11호, "전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준", 2005. 01
- [8] 류현수, 조강욱, 이조련, 김태훈, 김진이, 박만근 "선형계획법을 활용한 장기 전력계통 계획수립 기법개발", 대한전기학회 2007년 추계학술대회