

급전계획을 반영한 송전설비계획에 관한 연구

한 석 만 , 정 구 형 , 강 동 주* , 신 영 균** , 김 발 호
홍익대학교 , 한국전기연구원* , 한국전력**

A study on a transmission planning considering dispatch

Seok-Man Han, Koo-Hyung Chung, Dong-Ju Kang*, Young-Gyun Shin**, Balho H. Kim
Hongik University , KERI* , KEPCO**

Abstract - The introduction of competition in the electricity market requires a new paradigm in the capacity planning. This paper presents a methodology on a transmission planning considering dispatch in the government view point. The proposed model is mixed integer programming that minimized operation and construction costs. The proposed idea is exercised on a case study.

1. 서 론

전력산업 구조개편으로 시장경제의 논리에 따라 전력계통의 전반적인 운용 및 계획 체계는 시장기능에 의해 수립된다. 개별 발전사업자들은 자신의 수익을 극대화하기 위해 발전량과 판매가격을 결정하고, 송전사업자는 경쟁적 시장거래가 가능하도록 충분한 송전용량을 확보하면서 국가의 규제 하에 송전계통을 계획, 유지보수하며, 이에 대한 대가로 송전선 이용료를 지불 받는다. 경제학적 측면에서 시장내의 계획, 생산, 유지보수, 판매 등의 모든 사업은 전적으로 시장참여자에 의해 이루어지는 것이 가장 바람직하다. 하지만, 전력사업의 운영을 위해서는 수많은 발전소와 변전소, 그리고 전국 각지를 연결하는 송배전선로 등 방대한 규모의 설비가 필요하다. 이러한 전력설비, 특히 발전설비 부문은 설비의 규모가 대단히 클 뿐만 아니라, 고도의 정밀성, 내구성, 신뢰성이 요구되는 대단히 고가의 설비로서 막대한 투자비가 필요하다. 또한, 건설에 있어서도 보통 수년 또는 10년 이상의 장기간이 소요되며, 전원구성의 형태에 따라 발전소 건설, 운영에 따른 여러 가지 파급효과가 발생하고, 국가적인 장기 에너지 수급 및 가격체계에 커다란 영향을 미친다. 따라서, 전력사업에 경쟁이 도입되더라도 국가적 차원의 원활한 전력수급과 시장참여자의 투자유인을 제공하는 설비계획 가이드라인이 필요하며, 이러한 가이드라인을 제시하는 계통계획이 매우 중요하다.

최근 미국의 대정전 사태로 설비계획의 중요성이 강조되기 시작했으며 시장참여자에 투자유인을 제공하는 여러 가지 기법들이 개발되고 있다. 특히, 미국의 경우 과거 시장 기능 위주의 설비계획 보다는 국가적 차원의 장기 설비계획 로드맵(Grid2030)을 완성 중에 있으며 전력회사의 투자 위험을 줄이기 위한 제도적 장치들을 개발하고 있다. 또한 환경문제의 관심 증가로 친환경 설비 및 신재생에너지를 이용한 대규모 설비를 유도하도록 규제가 강화되고 있으며, 미래 수요 패턴, 입지 문제, 국가간/지역간 전력수급 불균형을 해소 하기 위한 대규모 계통의 연계를 위한 신뢰도 지수 개발에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

우리나라의 계통계획은 발전설비계획시안을 바탕으로 계통구성 방안을 검토하는 데 목적이 있다. 전력수요 및 전원개발계획을 기준으로 계통구성 방안을 수립하고, 계통분석용 전산모형을 운용해 기술적 타당성을 검토한다. 그 이후 송배전 설비계획이 만들어지면 이를 이행하는데 소요되는 투자재원, 입지 등 사업추진 여건을 검토하고 최종적으로 장기 송배전 설비계획이 확정된다. 다시 말해, 현행 계통계획은 발전설비계획 확정 이후, 결정된 시안을 바탕으로 수행된다. 즉, 계통의 확장 및 이후의 계통운영은 발전소 건설 입지에 직접적인 영향을 받음에도 불구하고, 전원입지의 유연성 결여로 인해 상호 연계를 통한 협조 체계가 미흡한 실정이다. 또한, 현행 계통계획은 경쟁적 전력시장의 시장참여자에게 정확한 경제적 효과를 제공하지 못해 투자유인을 저해할 수 있다.

본 논문에서는 경쟁시장에서 시장참여자에게 정확한 경제적 시그널을 제공하도록 송전설비계획에 발전설비의 확장계획과 급전계획을 고려하는 방안을 제시하였다. 또한, 기존의 설비계획 모형이 송전선로의 회선 수 및 발전기 대수와 같은 정수를 실수로 제공하는 것과는 달리 제안하는 설비계획 모형에서는 이들이 정수 해로 제공되어 계통계획자에게 정확한 정보를 제공할 수 있다.

2. 본 론

2.1 송전설비계획 방법론

수학적 측면에서 설비계획은 송전선로와 발전설비의 입지 및 수량을 결정하는 문제이다. 하지만, 전력설비의 지리적 입지를 고려하는 수학적 모델은 문제의 복잡화, 대형화로 해를 구하기가 쉽지 않다. 또한 입지문제 수학적 정확한 해가 도출되더라도 정책적으로 결정되는 사항으로 공학적인 접근방법이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 입지는 이미 결정되어 있다고 가정하였다.

전력설비는 대규모이고 고가의 설비들이며, 송전설비계획은 전원의 구성과 급전계획에 따라 달라지기 때문에 이를 모두 고려하기 위해서 건설비용 뿐만 아니라 운전비용도 설비계획에 함께 고려되어야 한다. 그리고, 송전선로는 전압 유형(765, 345, 154kV)에 따라 건설비용 및 송전용량, 회선 수가 달라지고, 송전설비 운전비용(송전비용)은 송전선로에 흐르는 조류량에 비례하는 특징을 가지고 있다.

본 논문에서는 이들을 고려하기 위해, 송전선로의 회선 수 및 발전기 대수를 정수로 결정하고, 시간대별 발전기 출력 및 선로 조류량을 실수로 결정하는 혼합정수계획 모델을 제안한다.

2.2 수학적 정식화

$$\text{Minimize}_{pf_{i,g,t}, df_{i,j,t}, Ng_{i,g}^N, Nt_{l,g}} \quad GOC + TOC + GCC + TCC \quad (\text{식1})$$

s. t.

$$\sum_k pg_{i,g,t}^{old} + \sum_k pg_{i,g,t}^{new} - \sum_j df_{i,j,t} = Load_{i,t}, \quad \forall i,t \quad (\text{식2})$$

$$|df_{i,j,t}| = PF_{i,t}^{obs}, \quad \forall i,j,l,t \quad (\text{식3})$$

$$PF_{i,t}^{obs} \leq \sum_k Nt_{l,g} \cdot Cap_{i,g}^T, \quad \forall l,t \quad (\text{식4})$$

$$0 \leq pg_{i,g,t}^{old} \leq Cap_{i,g}^{GO} \cdot Ng_{i,g}^O, \quad \forall i,g,t \quad (\text{식5})$$

$$0 \leq pg_{i,g,t}^{new} \leq Cap_{i,g}^{GN} \cdot Ng_{i,g}^N, \quad \forall i,g,t \quad (\text{식6})$$

$$Ng_{i,g}^N \leq N^{Lim}, \quad \forall i,g \quad (\text{식7})$$

$$pg_{i,g,t}, df_{i,j,t} \geq 0$$

$$Ng_{i,g}^N, Nt_{l,g} \geq 0, \quad \forall \text{integer} \quad (\text{식8})$$

여기서,

i, j : 모선 index

l : 선로 index

t : 주기 index

g : 발전기 또는 선로의 종류

$Ng_{i,g}^O$: 기존 발전기 대수

$Ng_{i,g}^N$: 신규 발전기 대수

$Nt_{l,g}$: 신규 송전선로의 회선 수

GOC : 발전설비 운전비용

$$= \sum_i \sum_k \sum_t pg_{i,g,t}^{old} \cdot KOG_{i,g}^{old} + \sum_i \sum_k \sum_t pg_{i,g,t}^{new} \cdot KOG_{i,g}^{new}$$

TOC : 송전설비 운영비용

$$= \sum_l \sum_t PF_{l,t}^{obs} \cdot KOT$$

GCC : 발전설비 건설비용

$$= \sum_g \sum_k Ng_{i,g}^N \cdot KCG_{i,g}$$

TCC : 송전설비 건설비용

$$= \sum_l \sum_k Nt_{l,g} \cdot KCT_{l,g}$$

KOG : 발전기 출력단가

KOT : 송전설비 운영비용 계수

KCG : 발전설비 건설비용

KCT : 송전설비 건설비용

$pg_{i,g,t}^{old}$: 기존 발전기 출력량

$pg_{i,g,t}^{new}$: 신규 발전기 출력량

$Cap_{i,g}^{GO}$: 기존 발전기 용량

$Cap_{i,g}^{GN}$: 신규 발전기 용량

N^{Lim} : 발전설비의 입지제한

$df_{i,j,t}$: 선로 조류량

$PF_{i,t}^{obs}$: 선로 조류량의 절대값

$Load_{i,t}$: 목표년도의 부하

(식1)의 목적함수는 크게 발전설비 운전비, 송전설비 운전비, 발전설비 건설비, 송전설비 건설비로 구성되어 있다. 발전설비 운전비는 기존 설비운전비와 신규설비 운전비로 구성된다. 송전설비 운전비는 송전선로의 조류량에 비례한다. 하지만, 선로조류는 정방향, 역방향에 있기 때문에 절대값에 비례하도록 정식화하였다(식3과 TOC 참조). 발전설비 건설비는 신규 발전기의 종류별 건설 대수에 따라 달라진다. 송전설비 건설비도 발전설

비 건설비와 유사하게 신규 선로의 종류와 회선 수에 따라 달라진다.

(식2)의 제약식은 각 모선별, 시간별 전력수급방정식이다. 선로조류는 계산의 편의상 네트워크 모델을 참고하여 모델을 만들었다. (식4,5,6)의 제약식은 각각 발전기 출력제약과 선로 용량제약이다. (식7)은 발전기의 입지 제약조건이다. 본 연구에서는 발전기의 종류별 제약만을 반영하였다. (식8)의 제약조건은 발전기 수와 선로 회선 수는 실수가 아닌 정수 해로 제한한다는 조건이다.

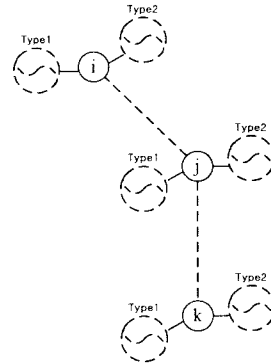
3. 사례연구

3.1 가정

본 논문에서는 문제의 간략화를 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 목표년도의 부하를 현재 설비로는 감당할 수 없어 발전/송전계통의 건설이 필요하다.
- 송전선로와 발전설비의 입지는 이미 결정되어 있다.
- 신규 발전설비의 종류별 대수 및 송전설비의 회선 수는 미지수이다.
- 신규 발전설비는 모선별로 2가지 종류의 발전기를 건설할 수 있으나, 입지제약으로 종류별로 3대 까지만 건설할 수 있다.
- 기존 송전설비는 존재하지 않는다.
- 신규 송전설비는 입지별로 2가지 종류의 선로를 건설할 수 있다.
- 모든 회계가치는 현재가치로 환산된 값이다.
- 목표년도는 3주기로 구분된다.

3.2 입력데이터



[그림1] 사례연구 계통도(입지)

- 목표년도의 부하데이터[MW]

주기	1	2	3
모선			
i	770	935	847
j	1,210	1,463	1,342
k	1,650	2,222	1,705

- 기존 발전설비

구분	발전기 종류	용량 (MW)	발전단가 (원/MW)	발전기 대수
i	type1	200	8	2
	type2	150	16	1
j	type1	100	12	2
	type2	300	16	1
k	type1	200	25	2
	type2	300	18	2

- 신규 발전설비

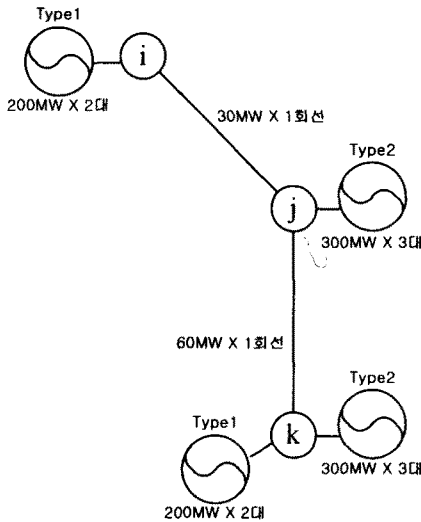
구분 모선	발전기 종류	용량 (MW)	발전단가 (원/MW)	건설비용 (원)
i	type1	200	8	30,000
	type2	150	16	25,000
j	type1	100	12	40,000
	type2	300	16	32,500
k	type1	200	25	25,500
	type2	300	18	35,000

- 송전설비 데이터

구분 선로	송전선로 종류	설비용량 (MW)	건설비 (원/MW)
i-j	type1	30	1,000
	type2	60	2,000
j-k	type1	30	1,000
	type2	60	2,000

- 송전설비 운영비용 계수 : 5 [원/MW]

3.3 사례연구 결과



[그림2] 증설될 설비용량

- 비용일람

구분	비용(원)
발전설비 운전비	208,767
송전설비 운전비	1,055
발전설비 건설비	313,500
송전설비 건설비	3,000
총 비용	526,322

본 모형을 실행한 결과는 (그림2)와 같다. i모선에서는 200MW 발전기 2대, j모선에서는 300MW 발전기 3대, k모선에서는 200MW, 300MW 발전기 각각 2대와 3대가 건설되며, 송전선로는 i-j, j-k를 연결하는 선로를 각각 30MW, 60MW의 용량으로 1회선씩 건설된다. 이러한 설비로 목표년도의 부하를 충분히 감당할 수 있다. 이러한 설비를 건설한 비용과 설비 운전비용은 (비용일람)과 같다.

4. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 송전설비계획 모형에 발전설비계획과 시간대별 급전계획을 모두 고려한 모형을 제안하였다. 설비 입지가 정해져 있을 경우 발전기의 대수 및 송전선로의 회선 수가 정수로 정해지므로, 시장참여자와 계통계획자에게 정확한 경제적 시그널을 줄 수 있다. 또한, 여러 가지 종류별 발전기 및 선로를 고려할 수 있다. 따라서, 국가적 차원에서 목표년도의 모든 비용을 최소화하는 가이드라인을 제공할 수 있는 설비계획을 수립할 수 있다.

본 논문에서는 전력조류를 편이상 네트워크 모델로 가정하였다. 실제 전력조류는 위상각과 임피던스의 함수로 나타나기 때문에 이를 반영하여야 할 것이다. 또한, 송전설비의 리액턴스는 건설용량 및 거리에 따라 달라짐에도 불구하고 이를 고려하지 않았고, 신뢰도를 고려하지 못했다. 이와 같은 것을 고려해야만 전력수급계획에 활용될 수 있으리라 판단된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업 (과제번호:R-2004-0-145)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] 전력경제(전력설비 투자이론), 한국전력공사 전력경제연구실, 1996
- [2] 발전계통 공급신뢰도, 한국전력공사 전력경제 연구실, 1989
- [3] 장기전력수급계획 수립 절차 및 방법, 한국전력공사 전원계획처, 1999
- [4] Modern Power System Planning, X.Wang & J.R.McDonald, McGraw-Hill Book Company, 1994
- [5] Fundamentals of Power System Economics, Daniel Kirschen & Goran Strbac, John Wiley & Sons, Ltd, 2004
- [6] Least-Cost Electric Utility Planning, Harry G.Stoll, John Wiley & Sons, Ltd, 1989
- [7] Optimization in Operations Research, Ronald L.Rardin, Prentice-Hall International, Inc., 1998
- [8] The question of generation adequacy in liberalized electricity markets, de Vries L.J. & Hakvoort R.A., Proceedings of the 26th IAEE Annual Conference, June 2003
- [9] Global Transmission Expansion: Recipes for Success, Woolf F, Pennwell, Tulsa, 2003
- [10] National Transmission Grid Study, U.S.Department of Energy, 2002
- [11] Survey on the Status of Integrated Resource Planning, EPRI, 1995
- [12] 경쟁적 전력시장에서 혼잡을 고려한 송전설비계획 기준설정 에 관한 연구, 김종만, 한석만, 김발호, 대한전기학회 논문지, Vol 54A, No. 7, 2005.
- [13] 발전소 건설계획과 계통계획과의 연계방안 검토, 한국전력 거래스 수급계획처, 2001.
- [14] 통합자원계획의 수립절차 및 적용체제에 관한 연구, 한국전력공사 전력경제처, 에너지경제연구원, 1997.