

경쟁적 전력시장에서 혼잡을 고려한 송전설비계획 기준설정에 관한 연구

김종만*, 한석만, 김발호
한국전력공사*, 홍익대학교

A Study on a Criterion of Transmission Planning
in a Competitive Electricity Market

Kim J.M*, Han S.M, B.H Kim
Korea Electric Power Corporation*, Hong-ik University

Abstract - In a competitive environment of electric power industry, developing the technological criterions and methodologies on transmission planning is becoming new challenge to transmission system planner. The use of a locational signal and the provision of a indicative plan to control the transmission investment reasonably is very important in the viewpoint of a regulator. The main target of this study is to develop a systematic criterion of transmission expansion planning. And system congestion cost is considered. The proposed methodology was demonstrated with several case studies.

1. 서 론

미래 발전원의 위치 및 용량이 기존에는 확정적 정보였으나 구조개편에 의한 발전경쟁의 도입으로 미래 발전원에 대한 불확실성이 증대되어 송전회사는 기술적 측면뿐만 아니라 경제적 측면에서 유리한 계통계획을 수립하여야 한다. 송전사업자의 송전설비계획이 적정근거와 기준이 없이 추진될 경우, 사업자간의 분쟁유발 및 막대한 경제적 손실이 우려되기 때문에 이와 같은 혼란과 낭비를 최소화하기 위해 계획 수립에 지침이 될 수 있는 기준 설정이 필요하다. 기존의 송전설비계획은 통합자원계획(Integrated Resource Planning)의 일환으로 수요예측을 통해 공급신뢰도를 유지하면서 가장 경제적인 설비계획을 수립하는 것이었다[1]. 하지만 시장경쟁의 도입으로 인해 송전설비계획은 공학적 신뢰도 측면에서 경제학적 비용관점으로의 전환이 요구되고 있기에, 계통의 안정적 운영과는 별도로 계통참여자 또는 계통에 이익이 되는 설비계획을 수립할 필요가 있다. 즉, 향후 송전설비계획은 안정적 전력거래의 보장과 계통의 경제적 효율성을 극대화할 수 있는 방향으로 수립되어야 한다.

본 논문에서는 계통계획과 계통운영의 차이를 감소시키고 효율적인 계통운영을 도모하기 위해 송전혼잡으로 인해 발생한 비용에 대해 정량화 한 후 이를 반영하여 계획기준을 설정하고자 하였다. 송전혼잡으로 인한 계통 운영상의 비용 상승 및 전력거래비용의 증가가 혼잡비용이며 이는 송전망 즉, 송전설비계획의 건설 기준이 될 수 있다. 송전선로의 건설로 계통혼잡비용 절감의 효과를 얻을 수 있는 계획기준을 제안하며 이때의 최적선로와 용량을 찾고자 한다.

2. 본 론

2.1 송전 혼잡과 혼잡비용

송전혼잡의 발생은 발전비용 또는 사회적 비용을 증가시킨다. 계통에 혼잡이 없다면 값이싼 발전기들부터 차례로 출력을 증가시켜 부하 조건을 만족시키며 전체적으

로 모든 발전기들의 한계비용이 같아지는 점에서 출력이 결정된다. 그러나 계통에 발생하는 혼잡은 이러한 발전기들의 출력을 변화시키며 이로 인해 추가적인 비용이 발생한다. 이를 혼잡비용(Congestion Cost)이라 하며, 송전혼잡으로 인해 계통에 추가적으로 발생하는 재급전 비용을 말한다. 일반적으로 손실을 무시할 경우 모선별 한계비용 또는 지역별 한계비용에서 혼잡비용이란 모선 또는 지역(zone)간의 가격 차이 ($\rho_i - \rho_j$)와 그 사이에 흐르는 조류 f_{ij} 를 곱한 값을 의미한다.

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n (\rho_i - \rho_j) \times f_{ij} \quad (1)$$

여기서, i, j : 모선 또는 지역(zone) index ($i=1, 2, \dots, n$)
 n : 모선 또는 지역(zone) 총 수
 ρ_i, ρ_j : i, j 모선 또는 지역(zone) 가격
 f_{ij} : i 와 j 모선 또는 지역(zone)간의 선로 조류

즉, 각 모선간의 가격 차이가 그 사이를 흐르는 조류의 곱을 모든 선로에 대하여 구한 것이 계통에 발생한 혼잡비용이다.

2.2 송전혼잡을 고려한 송전선로 건설기준

경제적 측면에서의 설비증설계획의 판단기준은 두 가지가 있다. 첫째 총비용관점에서의 기준으로 설비를 증설함으로써 얻는 효과가 설비증설비용보다 크다면 설비를 증설하는 것이며, 둘째 한계비용관점에서의 기준으로 설비의 한계투자비용이 설비건설의 한계편익과 같아지는 점까지 설비를 증설하는 것이다.

본 논문에서는 송전선로 건설 기준을 건설에 드는 비용보다 설비로 인해 절감되는 비용이 큰 총비용 관점에서의 접근을 시도하였다. 즉, 선로를 건설함으로써 얻는 혼잡비용의 절감효과(A-B)가 송전설비 투자비용(C)보다 크다면 설비건설계획에 인센티브가 있다고 본다.[2]

$$\begin{aligned} \text{건설전의 혼잡비용(A)} &: \sum_{i=1, i \neq j}^n (\rho_i - \rho_j) \times f_{ij} \\ \text{건설후의 혼잡비용(B)} &: \sum_{i=1, i \neq j}^{n_{\text{post}}} (\rho_i^{\text{post}} - \rho_j^{\text{post}}) \times f_{ij}^{\text{post}} \\ \text{송전선로 건설비용(C)} &: f_{ij}^{\text{new}} \times C' \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, post : 선로건설 후 index f_{ij}^{post} : 건설용량
 C' : 용량당 건설비용

따라서 송전회사는 향후 수요예측 및 발전설비계획을 고려하여 계통혼잡의 증가 혹은 혼잡비용의 증가가 예상

된다면, 미리 적정수준의 선로를 확보하여 혼잡의 증가로 인한 계통의 피해를 줄일 수 있어야 한다. 여기서는 선로건설의 최적입지와 건설용량 및 건설비용에 중점을 두어 가장 큰 계통효과를 갖는 경우의 건설계획을 수립하고자 하였다. 본문의 사례 연구에서는 학술적 차원으로 건설비용을 MW당 건설비를 고려하였으며 비용평가 기간은 송전선 건설에 따른 경제성 분석기간 또는 선로 수명으로 보기로 한다.

송전설비계획 문제를 다음과 같이 주문제(Master Problem)와 부문제(Sub Problem)로 나누는 알고리즘을 제안한다. 주문제는 임의의 선로 건설로 발생하는 계통이익의 효과를 구하는 문제이며, 부문제는 각 선로의 투입으로 평가기간동안 수행될 최적조류계산 문제이다.

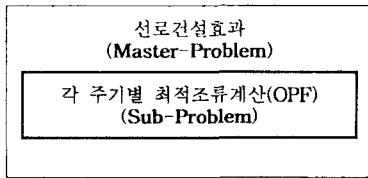


그림 1 송전설비계획 문제

이러한 송전설비계획문제를 수식으로 간단히 정식화하면 다음과 같다.

master problem

$$\max_{f_j^{new}} \left[\sum_{p=1}^P \left\{ \sum_{i=1}^{8760} (A-B) \right\} - C \right] \quad (4)$$

sub problem

$$\min_{g_{i,m}} \sum_{i=1}^{m^{max}} \sum_{m=1}^{N_g} f(g_{i,m})$$

단, $f(g_{i,m}) = a_{i,m} + \beta_{i,m} \cdot g_{i,m} + \gamma_{i,m} \cdot g_{i,m}^2$ (5)

subject to

$$G(x) = 0$$

$$H(x) \leq 0 \quad (6)$$

여기서, p : 연도 index($p=1, 2, \dots, P$)
 P : 총 비용평가기간(설비수명)
 t : 시간 index($i=1, 2, \dots, 8760$)
 f_j^{new} : p 모선을 연결하는 신규 선로의 용량
 N_g : 총 발전기 대수
 m : 발전기 index($m=1, 2, \dots, N_g$)
 $g_{i,m}$: 모선 m 번째 발전기의 발전량
 $f(g_{i,m})$: 모선 m 번째 발전기의 발전비용
 $a_{i,m}, \beta_{i,m}, \gamma_{i,m}$: 모선 m 번째 발전기의 발전비용계수

Master Problem은 설비계획 전체의 목적함수로 선로 건설 효과가 가장 큰 입지와 선로를 찾는다는 의미이다. Sub Problem의 식 5는 최적조류계산식의 목적함수로 i 모선 g 번째 발전기의 발전비용 $f(g_{i,m})$ 을 최소화하는 식이다. 식 6의 등식제약조건 $G(x)$ 는 각 모선에서의 전력수급 방정식을 나타내며, 부등식 제약조건 $H(x)$ 는 발전기의 출력제약 및 선로용량제약, 모선 전압제약등을 표현한다. 따라서 송전설비계획 문제는 수많은 최적조류계산의 결과 중에서 계통전체의 설비건설 효과가 가장 높은 선로를 찾는 문제로 간단히 귀속될 수 있다.

2.2.1 알고리즘

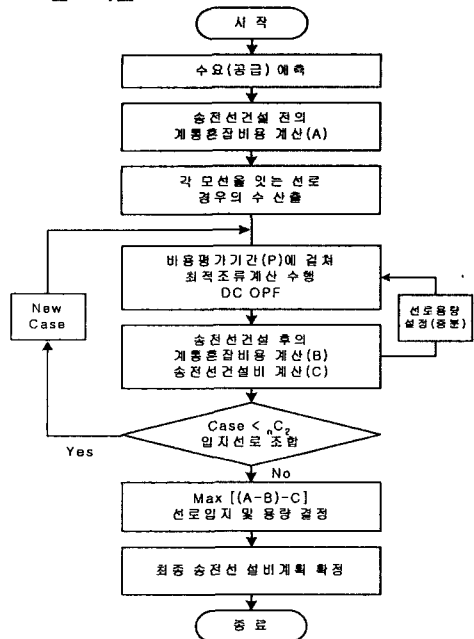


그림 2 송전회사의 송전설비계획 기준 설정 메커니즘

2.3 사례연구

문제의 간략화를 위해 사례계통으로 7모선, 8선로를 가정하였고 GAMS 최적화 프로그램을 이용하였다.

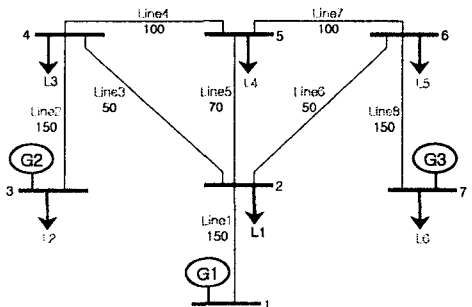


그림 3 사례연구 계통

또한 계통의 손실은 없으며 선로용량 제약만을 고려한다. 발전기 비용함수 및 수요 데이터는 다음과 같다.

표 1 발전기 데이터

	발전용량제약 (MW)		Coefficient of generator cost function		
	Max	Min	a	b	c
G1	300.0	0.00	556.00	13.191	0.006300
G2	300.0	0.00	720.00	14.510	0.015501
G3	300.0	0.00	650.00	13.904	0.003524

표 2 수요예측 데이터(단위: MW)

L1	L2	L3	L4	L5	L6	Total
50.000	50.000	150.000	150.000	50.000	50.000	500.000

부하 비율: 전년도 대비 1%씩 증가

우선은 선로건설비를 반영하지 않고 선로를 건설함으로써 얻을 수 있는 최대 효용을 구하여 보았다.

표 3 각 사례연구 결과 (건설비 : 고려안함, 평가기간 : 5년)

Case	수립 여부	from bus	to bus	혼잡절감이득 (\$)	선로용량 (MW)	혼잡선로
Case_01	O	1	3	36,120.327E+3	17.0	7, 9
Case_02	O	1	4	31,779.558E+3	120.0	7, 9
Case_03	O	1	5	41,614.698E+3	106.0	3, 8
Case_04	X	1	6	.	.	.
Case_05	O	1	7	905.084E+3	15.0	1, 7
Case_06	Δ	3	2	-29,164.300E+3	74.0	3, 7
Case_07	O	3	5	13,752.517E+3	74.0	3, 8
Case_08	Δ	3	6	-180,786.000E+3	91.0	1, 7
Case_09	O	3	7	36,863.470E+3	2.0	1, 9
Case_10	O	7	2	3,012.094E+3	111.0	3, 5
Case_11	O	7	4	31,464.142E+3	120.0	1, 9
Case_12	O	7	5	40,401.799E+3	120.0	3, 9
Case_13	O	4	6	28,792.009E+3	18.0	1, 9
Case_14	O	1	2	32,752.553E+3	19.0	3, 7
Case_15	O	5	6	35,145.920E+3	11.0	3, 8

혼잡절감이득 항목은 선로를 건설한 후의 혼잡비용 감소분(건설전 혼잡비용 - 건설후 혼잡비용)을 수치로 나타낸 것이다. 여기에 선로 건설용량만큼의 비용을 절감하게 되면 건설로 인해 계통이 얻게 되는 올바른 건설효과를 구하게 된다. 표 3의 결과에서 'X'로 표시된 Case_04의 경우에는 최적조류계산을 통한 해를 찾지 못하였다. 이것은 이 선로의 투입은 특정모선의 부하를 발전기가 공급하지 못하는 결과를 초래하기 때문이다. 또한 'Δ'로 표시된 Case_06, 08은 오히려 선로건설로 인해 역효과가 발생한 경우이다. 해당 선로에 대해서는 가장 좋은 결과를 도출하였지만, 건설로 인한 계통 전체 조류의 변화로 계통의 혼잡비용이 선로건설 전보다 증가한 결과이다. 일반적으로 생각하기에 혼잡이 걸린 선로의 용량을 늘리는 것이 가장 합리적인 방법이라 여기지만 실제로는 그렇지 않다. 어느 정도 혼잡이 걸린 선로의 용량을 증가시켜(Case_14, 15) 많은 이득을 보지만, 위의 결과를 볼 때 이보다 효용이 더 높은 신규선로 Case_03이 존재한다는 것을 알 수 있다.

이것은 큰 부하군으로 형성되어 있는 L3, L4 중에서 L3의 경우에는 인근의 G2에서 전력이 쉽게 공급이 되지만, L4의 경우 여러 선로를 거쳐야만 전력을 공급받을 수 있기 때문에, 직접 G1에서 전력 공급을 받는 것이 가장 효과적인 방법으로 결과가 도출 된 것이다. 그러므로 건설비를 반영하지 않았을 때의 최적 선로건설 입지는 bus 1과 bus 5를 잇는 106MW 용량을 갖는 선로가 된다.

표 4 각 사례연구 결과 (건설비 : \$50,000/MW, 평가기간 : 5년)

Case	수립 여부	혼잡절감이득 (\$)	선로용량 (MW)	건설효과 (\$)	혼잡선로
Case_01	O	36,120.327E+3	17.0	35,270.327E+3	7, 9
Case_02	O	31,779.558E+3	120.0	25,779.558E+3	7, 9
Case_03	O	41,614.698E+3	106.0	36,314.698E+3	3, 8
Case_04	X
Case_05	O	905.084E+3	15.0	155.084E+3	1, 7, 9
Case_06	Δ	-29,164.300E+3	75.0	-32,914.300E+3	3, 7
Case_07	O	13,752.517E+3	74.0	10,052.517E+3	3, 8
Case_08	Δ	-180,786.000E+3	91.0	-185,336.000E+3	1, 7
Case_09	O	36,863.470E+3	2.0	36,763.470E+3	1, 9
Case_10	O	3,012.094E+3	120.0	-2,987.906E+3	3, 4, 5
Case_11	O	31,464.142E+3	120.0	25,464.142E+3	1, 9
Case_12	O	40,401.799E+3	120.0	34,401.799E+3	3, 9
Case_13	O	28,792.009E+3	18.0	27,892.009E+3	1, 9
Case_14	O	32,752.553E+3	19.0	31,802.553E+3	3, 7
Case_15	O	35,145.920E+3	11.0	34,585.920E+3	8

표 4는 건설비용을 반영하여 실질적인 설비계획을 수립한 것으로 선로 MW당 비용을 \$50,000으로 하였을 때의 결과이다. 단, 신규선로의 최대용량은 120MW로 제한하였다. 표 3과 비교하여 볼 때 표 4에서 Case_10의 건설효과 값이 음의 비용이 나온 것은 선로건설로 인한 혼

잡비용 절감효과를 보긴 하나 건설비용보다 그 효과가 미미하기 때문에 전체적으로 음의 비용효과를 나타내게 된 것이다. 이번 사례연구는 의외의 결과를 냈다.

Case_09의 건설용량 2MW만으로 가장 좋은 결과를 보여 주고 있다. 이것은 추가된 선로로 인하여 기존에 용량제약이 걸렸던 2번 선로의 혼잡이 제거되어, 계통의 혼잡비용을 가장 크게 절감하는 효과를 보았기 때문이다. 꼭 대용량 선로를 건설해야만 높은 효과를 얻는 것이 아니라, 이처럼 아주 적은 용량의 계통선로 연결만으로도 계통 전체 송전혼잡 해소의 이득을 크게 볼 수 있음을 나타낸 것이다. 최적 건설 후보지 Case_09의 급전 결과를 그림 4에 나타내었다.

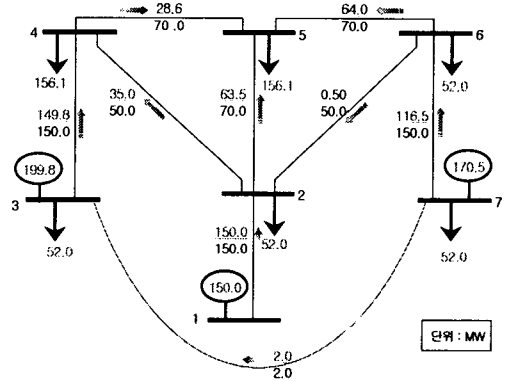


그림 4 사례연구 결과

선로 용량은 연속적으로 결정되지 않는다. 표준 규격에 따라 일정한 간격으로 건설된다. 그러므로 현실에서는 선로 용량을 규격에 따라 건설해야 할 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 송전설비의 건설로 얻는 혼잡비용 절감효과를 비교하는 선로계획 기준을 설정하여 기술적 측면뿐만 아니라 경제적 측면도 고려할 수 있는 송전설비계획 기준 방안을 제시하였다.

또한 사례연구를 통해 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 유용성을 시험하였다. 다만 본 연구에서는 복수의 대안 선로를 고려하지 않고, 단일 대안 선로만을 고려하였다는 한계가 있으나, 본 연구에서 개발된 알고리즘을 확장하는 데에는 어려움이 없을 것으로 판단된다. 또한 송전설비계획 단독이 아닌 발전설비계획과의 연계방안[3]도 점차적으로 해결해야 할 난제이며, 설비계획의 주체가 상이할 수 있는 경쟁적 전력시장에의 적용방안을 마련하는 것도 본 연구와 관련한 주요 연구라 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] "통합자원계획의 수립절차 및 적용체제에 관한 연구", 한국전력공사 전력경제처, 에너지경제연구원, 1997.9
- [2] 김종만 외, "경쟁적 전력시장에서 혼잡을 고려한 송전설비계획에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회, 2004
- [3] 김발호 외, "발전소 건설계획과 계통계획과의 연계방안 검토", 연구보고서, 한국전력거래소 수급계획처, 2001
- [4] Narayan S. Rau, "Transmission Congestion and Expansion Under Regional Transmission Organizations",
- [5] K. Okada, "Cost-Benefit Analysis of Reliability Management by Transmission Expansion Planning in the Competitive Electric Power Market", IEEE Power System Technology, International Conference on Proceedings Power Con Vol 2, pp. 709-714, 2000