

경쟁적 전력시장에서 혼잡을 고려한 송전설비계획에 관한 연구

김종만\*, 이동진, 한석만, 김발호  
홍익 대학교

A Study of Transmission Planning with Congestion under Competitive Environment

Kim J.M\*, Lee D.J, Han S.M, B.H. Kim  
Hong-ik University

2. 본 론

**Abstract** - In a competitive environment of electric power industry, the level of uncertainty increase due to generation investment decisions creating 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 emphasize on the necessity for considering simultaneously both transmission expansion plan and congestion cost. This paper demonstrate the many case studies to make certain of the necessity for transmission planning with congestion cost.

1. 서 론

경쟁과 선택의 도입으로 전력산업은 과거의 독점적 특징들이 더욱 복잡한 것으로 나타나고 있다. 기존의 신규 발전 설비 및 송전망 건설 등 전력수급 전반에 대한 모든 계획이 정부의 규제 하에서 이루어져 왔으나, 전력산업에 시장경제를 도입함에 따라 전력계통의 전반적인 운용 및 계획을 수립함에 새로운 개념들이 적용되어야만 한다.

국내의 경우 발전과 송전이 분리된 새로운 전력산업의 도래로 송전회사의 설비계획 목적 및 절차에 대한 전면적인 검토가 필요하게 되었다. 과거 송전회사는 통합자원계획의 일환으로 공학적 신뢰도 기준 및 총 운용비용을 최소화하는 발전설비계획에 맞추어 설비계획을 수립 하였으나, 향후 송전설비계획은 안정적 전력 수급 및 이익극대화를 추구하는 각 시장참여자의 다양한 전력거래를 보장하면서, 사회효용을 극대화 할 수 있는 방향으로의 변화를 모색해야 한다. 이를 달성하기 위해 송전회사는 계통의 신뢰도를 유지하며 전력수송을 원활히 공급해야 할 뿐만 아니라 신규 선로를 계획함에 있어서도 사업자별 경쟁을 저해하지 않아야 한다. 하지만 경쟁적 전력시장의 불확실성으로 인해 송전설비계획의 예측이 어려워지고 있다. 특히 국내 전력시장처럼 계통계획과 계통운영의 주체가 구별되어 있는 체제하에서는 효율적인 송전설비계획 및 절차수립에 관한 이론적 정립이 더욱 쉽지 않다. 국내의 전력시장체제에서 이러한 문제들을 객관적이고 투명하게 해결할 수 있는 방안이 필요한 시점이다.

송전회사는 전력시장에 효율적인 경쟁체제를 도입하기 위해서, 계통의 효율적 운용과 적정가격신호를 반영할 수 있는 설비계획을 수립해야 한다. 본 연구에서는 계통운영의 효율성을 높이고자 송전혼잡 비용을 정량화한 후에 이를 설비계획에 반영하고자 한다. 송전혼잡으로 인한 계통운용상의 비용 상승 및 전력거래비용의 증가가 혼잡비용이며 이는 송전망 즉, 송전설비계획의 건설 유인이 될 수 있다.

2.1 송전선 건설의 효과

대부분의 상품과 달리 전기에너지는 생산자로부터 최종배전계통으로 전기를 수송하기 위해 일정한 송전설비를 필요로 한다. 이러한 전력수송 필요에 의한 건설되는 송전선로의 효과는 다음과 같다. 첫째, 효율적인 전원과 부하를 연결하여 전체발전비용을 줄일 수 있으며, 둘째, 계통의 안정도 및 신뢰도 등을 향상시킬 수 있고 마지막으로, 신규발전소 건설을 대체하는 효과를 갖는다.

2.2 송전혼잡과 혼잡비용

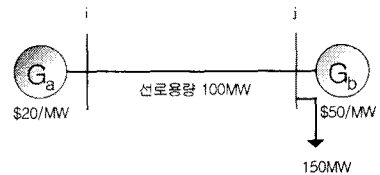
송전혼잡(Transmission Congestion)이란 어느 2 지점간의 전력조류(Power Flow)가 그 지점간의 송전능력(Transfer Capability)을 초과하는 현상을 말한다. 혼잡의 발생은 발전비용 또는 사회적 비용을 증가시킨다. 계통에 혼잡이 없다면 저비용발전기들이 차례로 출력을 증가시켜 전체적으로 모든 발전기들의 한계비용이 같아지는 점에서 급전이 이루어진다. 그러나 계통에 발생하는 혼잡은 이러한 발전기들의 출력을 변화시켜 급전비용의 증가 즉, 재급전비용이 발생시키는데, 이를 혼잡비용(Congestion Cost)이라 한다.

2.2.1 혼잡비용의 계산

일반적으로 모선한계비용에서 혼잡비용이란 모선간의 가격차이와 그 사이를 흐르는 선로 조류를 곱한 값이다.

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

(그림 1)에서 선로제약이 없을 시에는 i모선 Ga발전기가 부하 150MW를 모두 공급하지만, 선로용량제약으로 인하여 Ga는 100MW, Gb는 50MW씩 급전하게 된다.



(그림 1) 혼잡비용의 정태적 모드

선로고려(X)	급전비용 : \$20/MW * 150MW = \$3,000
	지불비용 : \$20/MW * 150MW = \$3,000
선로고려(O)	급전비용 : \$20/MW * 100MW + \$50/MW * 50MW = \$4,500
	지불비용 : \$50/MW * 150MW = \$7,500

이때의 혼잡비용은 (50 - 20) \* 100 = \$3,000 이며, 이는 송전제약을 고려할 경우의 부하 지불비용과 발전기 급전비용의 차액과 같다. 이는 단일요금제의 경우의 혼잡비용 의미와 같다.

### 2.2.2 송전선로 건설비

전력 계통의 송전설비를 충분히 확보하는 것이 혼잡의 발생을 줄이는 가장 쉬운 방법이겠지만, 엄청난 건설비용 때문에 오히려 계통은 어느 정도의 혼잡을 떠안고 있다. 이러한 송전선 건설비용은 자재비 외에도 토지보상비, 인건비등 고려해야 할 변수가 많아 현재까지도 비용산정에 대한 확실한 방법이 제시되고 있지 않고 있다. 현재 송전선 건설비용은 물가변동이나 노임상승에 따라 매년 약간씩 증가하는 추세이며, 한전에서는 km당 단가로 건설비를 산정하고 있다. (표 1)은 현재 한전의 각 전압별 평균적인 송전선 건설비용이며 설계조건에 따라서도 많은 차이를 낼 수 있다.

(표 1) 평균적인 송전선로 건설비용(억/km)

전압별	재료비/노무비/ 제비용	건설비용
154kV	30% / 43% / 27%	6억/km
345kV	33% / 47% / 20%	12억/km
765kV	48% / 27% / 25%	37억/km

### 2.2.3 송전선로 건설기준

총비용 관점에서의 송전선로 건설 기준은 건설에 드는 비용보다 설비로 인해 절약되는 비용이 클 경우에 설비를 증설하는 방법이며, 한계비용 관점에서의 기준은 송전설비의 한계투자비용이 한계편익과 같아지는 지점까지 설비를 증설하는 것이다. 본 연구에서는 송전혼잡비용을 절약비용으로 하는 총비용관점에서의 접근을 시도하였다. 즉, 선로를 건설함으로써 얻는 혼잡비용의 절감효과(A-B)가 송전설비 투자비용(C)보다 크다면 설비건설계획에 인센티브가 있다고 본다.

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

따라서 송전회사는 향후 수요예측 및 발전설비계획을 고려하여 계통혼잡의 증가가 예상된다면, 미리 적정수준의 선로를 확보하여 혼잡의 증가로 인한 계통의 피해를 줄일 수 있어야 한다. 혼잡비용의 절감효과와 선로입지와 선로용량에 큰 영향을 받게 되며 이때 같이 고려해야 할 사항이 선로 건설비용이다. 본 연구에서는 선로건설의 최적입지에 중점을 두어 가장 큰 계통효과를 갖는 경우의 입지 및 용량을 결정하였다. 송전선로 건설비용(MW비용고려)과 이러한 혼잡비용절감에 대한 비용평가기간을 P라고 할 때 다음과 같은 방법으로 최적입지 및 용량을 결정하게 된다.

$$\max_{f_{ij}^{new}} \left[ \sum_{p=1}^P \left\{ \sum_{i=1}^{8760} (A - B) \right\} - C \right] \quad (3)$$

향후 선로건설 전후 혼잡비용의 절감정도를 비용평가기간 P(year)동안 계산을 한 후 이때의 선로입지 및 선로용량에 대한 건설비용과 비교하여, 총비용관점에서 가장 큰 비용절감 효과를 보이는 최적입지(i모선과 j모선 연결선로)를 선택하는 것이다.

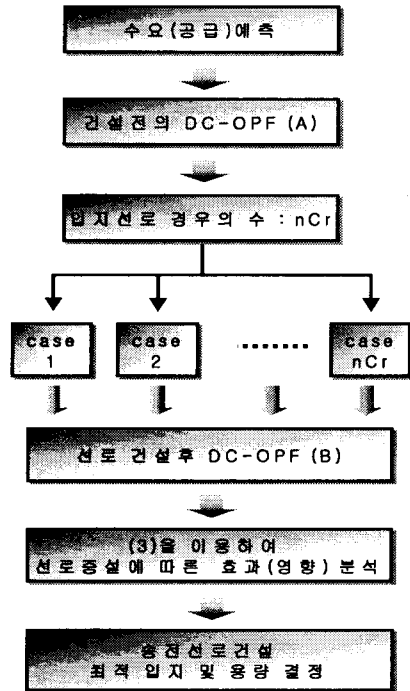
### 2.3 최적조류계산

경쟁적 전력시장에서 공급자 및 소비자를 고려한 송전설비계획 전후의 혼잡비용은 최적조류계산(OPF : Optimal Power Flow)을 이용하였으며, 다음과 같이 정식화 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Max(Min)} \quad & \text{Social Welfare(Cost)} \\ \text{s.t.} \quad & G(x) = 0 \\ & H(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

### 2.4 알고리즘

수요(공급)예측 후 선로증설의 필요성은 전체되었고 가장 중요시되는 선로를 우선적으로 건설하며, 이때의 건설비용은 MW당 비용으로 가정한다. 또한 송전혼잡비용의 정확한 계산을 위해 DC-OPF를 이용하기로 한다.



(그림 2) 제안 Algorithm

- step 1. 수요예측을 통한 선로건설의 필요성 인식
- step 2. 건설전의 계통전체의 혼잡비용 A 계산
- step 3. 각 모선을 있는 가능한 선로입지 산출(조합)
- step 4. 각 경우별로 차례로 급전을 하되 이때의 가상선로 용량은 크게 잡는다.
- step 5. 선로 조류량으로 건설비용 산정
- step 6. 식(3)을 이용하여 효율적인 최적입지 및 용량을 결정

### 2.5. 사례연구

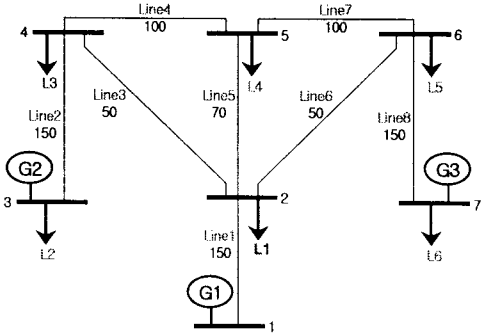
본 연구에서는 GAMS 최적화 프로그램으로 사용하여 최적조류계산을 수행하였으며 사례계통으로 (그림 3)의 7모선, 8선로 계통을 이용하였다. 수요예측 후 적용된 발전기 비용함수 및 부하 효용함수는 다음과 같다.

(표 2) 발전기 데이터

	발전용량제한		비용함수 계수(2차)		
	MAX	MIN	a	b	c
G1	300.0	0.00	0.00	0.001719	0.00015390
G2	300.0	0.00	2.00	0.013590	0.00004058
G3	300.0	0.00	1.50	0.003600	0.00004244

(표 3) 부하 데이터

		L1	L2	L3	L4	L5	L6
		a	18.0	14.0	17.0	20.0	18.0
b		-0.2745	-0.1728	-0.0900	-0.0846	-0.1809	-0.1710
c	$\times 10^{-3}$	0.11907	0.02106	0.10773	0.01377	0.24300	0.06237



(그림 3) 사례연구 계통 : 7-Bus, 8-Line

계통의 손실은 없으며 선로열용량제한만 다를 뿐 모든 선로데이터는 동일하다.

우선 단일선로계획을 고려하자. 최초 수요예측 후 case\_00의 혼잡비용은 \$923,620이 발생하고 1,2,8번의 선로에 혼잡이 발생한다. 혼잡비용의 절감을 위해 선로의 입지를 선택하면 혼잡이 발생하지 않은 선로를 제외하고 총 16가지(16=C<sub>2</sub>-8+3)의 입지가능지지역이 생긴다.(case\_01~case\_16) 비용평가기간을 5년으로 하고 MW당 건설비용을 \$40만/MW로 하여 차례로 가상 급전을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(표 4) 단일선로계획 결과 데이터

Results - 단일선로계획											
from-to	congestion cost	social welfare	difference congestion	line capacity	construction cost B	P-period A	total effect A-B	congestion line			
Case_00	923,620	5,526,365	0.000						1, 2, 8		
Case_01	1-2	734,943	5,518,826	186,676	11,9499	1,194,960.00	8,264,028.07	7,069,038.07	2, 8		
Case_02	1-3	504,696	5,494,470	18,921	25,8796	2,587,800.00	826,738.49	-1,759,121.51	2, 8		
Case_03	1-4	442,195	5,532,072	481,425	54,6578	6,465,780.00	21,096,396.17	12,620,616.17	2, 8		
Case_04	1-5	442,195	5,532,072	481,425	101,2822	10,128,220.00	21,096,396.17	10,958,176.17	2, 8		
Case_05	1-6	442,195	5,532,072	481,425	68,4142	6,841,420.00	21,096,396.17	14,244,976.17	2, 8		
Case_06	1-7	943,636	5,508,153	-19,916	3,5070	360,700.00	-872,317.73	-1,223,017.73	1, 2, 8		
Case_07	3-2	1,086,491	5,406,374	-182,871	54,3174	5,431,740.00	-7,133,789.07	-12,568,509.07	5, 8		
Case_08	3-4	597,740	5,519,813	329,880	22,4821	2,248,210.00	14,273,523.85	12,025,313.85	1, 5, 8		
Case_09	3-5	442,097	5,488,110	481,322	59,7576	5,975,760.00	21,096,480.24	12,111,920.24	3, 8		
Case_10	3-6	510,522	5,511,947	412,697	50,4674	5,046,740.00	18,076,141.74	13,027,401.74	3, 5, 8		
Case_11	3-7	563,783	5,540,839	30,164	38,5202	3,852,020.00	-1,321,199.18	-5,274,369.18	1, 2, 8		
Case_12	7-2	966,194	5,437,125	-42,575	80,8074	8,080,740.00	-1,964,767.48	-9,945,507.48	2, 5		
Case_13	7-4	159,965	5,607,536	763,955	104,0461	10,404,010.00	33,461,228.12	23,057,218.12	3, 5		
Case_14	7-5	73,830	5,611,274	949,790	124,9405	12,494,050.00	37,822,800.00	24,726,752.00	1		
Case_15	7-6	156,231	5,604,616	767,356	64,7540	6,475,400.00	33,611,613.23	27,136,213.23	3, 5		
Case_16	4-6	923,620	5,526,365	0.000	19,6200	1,960,200.00	0.00	-1,960,200.00	1, 2, 8		

위의 결과에서 case\_02는 혼잡비용의 절감효과가 있음에도 선로건설비의 영향으로 음의 비용효과 값을 갖게 되며, case\_06,07,11,12의 경우는 오히려 잘못된 선로의 입지로 선로건설전보다 더 높은 혼잡비용을 발생하게 된다. 혼잡비용을 가장 줄이는 case\_14는 선로건설비의 부담으로 건설 우선순위에서 밀리게 되며, 단일 선로계획을 고려할 경우 6,7번 모선을 잇는 case\_15의 절감효과가 가장 크고 이때의 혼잡선로도 3번,5번으로 계통에서의 중요도가 덜한 지역에 혼잡이 걸리게 되므로 선로 신뢰도 측면에서도 좋은 결과를 도출하였다.

(표 5) 발전설비계획을 고려한 결과 데이터

Results - 발전설비계획 고려											
from-to	congestion cost	social welfare	difference congestion	line capacity	construction cost B	P-period A	total effect A-B	congestion line			
Case_00	910,818	5,659,098	0.000						2, 5, 8		
Case_01	1-3	566,216	5,687,865	-45,368	21,3326	2,133,360.00	-1,968,452.56	-4,121,712.56	3, 5, 8		
Case_02	1-4	353,093	5,770,304	567,725	85,7823	8,578,230.00	24,428,345.80	15,850,115.80	5, 8		
Case_03	1-5	233,982	5,773,540	706,836	100,6633	10,066,330.00	30,969,368.21	20,893,068.21	8		
Case_04	1-6	456,727	5,748,789	454,000	58,5656	5,856,580.00	19,889,156.02	14,033,576.02	3, 5, 8		
Case_05	1-7	855,980	5,647,688	54,838	14,1471	1,414,710.00	2,401,886.07	967,179.07	3, 5, 8		
Case_06	2-3	1,258,772	5,469,416	-347,964	47,3846	4,738,460.00	-15,240,403.60	-19,978,863.60	3, 5, 8		
Case_07	2-5	396,294	5,738,147	516,554	16,8281	1,682,810.00	22,561,264.78	20,868,464.78	2, 5, 8		
Case_08	2-7	1,135,235	5,490,294	-224,417	66,1413	6,614,130.00	-9,829,483.87	-16,443,613.87	2, 8		
Case_09	3-4	898,308	5,659,115	12,509	1,1500	11,500.00	447,913.47	432,913.47	5, 8		
Case_10	3-5	456,482	5,582,803	454,336	90,5706	9,057,060.00	19,890,806.95	10,842,236.95	3, 8		
Case_11	3-6	746,260	5,618,584	164,566	48,8662	4,886,620.00	7,207,627.70	2,317,707.70	2, 5, 8		
Case_12	3-7	601,960	5,606,212	-21,173	44,5962	4,459,620.00	-627,359.44	-5,367,279.44	2, 5, 8		
Case_13	7-4	524,926	5,717,542	365,891	100,8664	10,086,640.00	16,902,042.88	6,812,102.88	3		
Case_14	7-5	103,968	5,753,411	926,948	105,1999	10,519,990.00	35,344,374.52	24,824,384.52	3		
Case_15	7-6	467,478	5,706,187	413,342	47,5697	4,756,970.00	18,104,370.40	13,348,400.40	3, 5		
Case_16	4-6	910,818	5,659,098	0.000	22,9522	2,290,220.00	0.00	-2,290,220.00	2, 5, 8		

이번에는 발전설비계획과 같이 고려해 보자. (그림 3) 계통에서 향후 2번 모선으로 발전설비가(G<sub>4</sub>) 들어올 때, 선로건설의 최적입지 및 용량을 결정해보자.

$$P(G_4) = 5.00 + 0.010233G_4 + 0.00046899G_4^2 \quad (5)$$

(표 5)의 결과로 최초 급전결과인 case\_00과 비교하여 볼 때 5,7번 모선을 잇는 case\_14의 절감효과 및 사회효용이 모든 영역에서 높은 결과를 나타내고 있다.

위 두 사례연구의 결과를 종합하면 (표 6)과 같다. 그러나 위의 송전설비계획에서 비용평가기간 및 송전설비 건설비용 반영정도에 따라 위의 결과는 다르게 도출될 수 있기에, 송전회사는 상황에 따라 주의하여 적절한 선로입지 및 용량을 선택해야 한다.

(표 6) 송전설비계획 최적입지 및 용량 결정

단일선로 계획	• 최적입지 : Bus6&Bus7을 연결하는 선로건설
	• 건설용량 : 64.754MW
발전설비 계획변영	• 혼합선로 : Line1,2,8 ⇒ Line3,5
	• 최적입지 : Bus5&Bus7을 연결하는 선로건설
	• 건설용량 : 105.2MW
	• 혼합선로 : Line2,5,8 ⇒ Line3

### 3. 결 론

본 연구에서는 전력산업 구조개편을 효율적으로 추진하고, 나아가 진보된 전력시장 창출을 위해서 계통계획에 계통운용을 반영한 송전혼잡비용을 고려하였으며, 수요예측을 통해 계통의 혼잡비용을 줄일 수 있는 최적의 입지와 송전용량(MW건설비)을 고려한 송전설비계획을 제안하였다. 향후 본 연구에 근거한 송전설비계획에 대하여 실제계통 및 건설비를 연구에 반영하는 것이 다음 과와 같이 몇 가지 생각을 더 제시하고자 한다. 송전회사는 단일 선로계획 아니라, 계통의 효율적 운용을 위해 다중 선로계획을 고려하는 방향으로의 개선을 해야 한다. 여러 지역에 동시다발적 혹은 추후의 계획까지 고려할 수 있는 설비계획을 수립하여야 한다는 것이다. 또한 경쟁적 전력시장에서의 공평한 송전망 사용을 통해 특정 사업자의 이익(또는 피해)이 돌아가는 것을 미연에 방지하기 위해, 이에 대한 처리 메커니즘을 개발하여 경쟁적 거래가 가능하게 하여야 한다. 마지막으로 발전설비계획과의 연계를 통해 효율적인 송전설비계획이 수립될 수 있는 커뮤니케이션 과정을 계획에 반영하여 통합적인 계획수립이 이루어 질수 있어야 한다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(02-전-01) 주관으로 수행된 과제임

### [참 고 문 헌]

- [1] Narayan S. Rau, "Transmission Congestion and Expansion Under Regional Transmission Organizations", IEEE, Power Engineering Review, 2002
- [2] Kwang Y.Lee, "Network Congestion Assessment for Short-term Transmission Planning under Deregulated Environment", IEEE Transaction & Power System, 2001
- [3] 신영근 외, "발전설비계획과 계통계획 연계에 대한 필요성 검토", 대한전기학회 추계학술대회, 2001
- [4] 김발호 외, "발전소 건설계획과 계통계획과의 연계방안 검토", 연구보고서, 한국전력거래소 수급계획처, 2001
- [5] 발전설비계획 실무위원회 회의자료, 한국전력거래소 수급계획처, 2003
- [6] 장기송전선 설비계획, 송변전사업본부 계통계획실, 2002