경쟁적 전력시장에서 혼잡을 고려한 송전설비계획 기준설정에 관한 연구

論 文
54A-7-6

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

金 鍾 萬† · 韓 錫 萬* · 金 發 鎬**
(Jong-Man Kim · Suck-Man Han · B.H. Kim)

Abstract - Transmission networks play an important role which transfer generated electric power to a consumer in power system operation. 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.

Key Words : Transmission Planning, Transmission Congestion, Congestion Cost

1. 서 론

발전과 송전이 분리된 새로운 전력산업 환경 하에서는 송전회사는 새로운 발전기의 전력수송을 가능하게 하고, 장기적으로 경쟁체제를 유지하며, 신뢰도를 유지하여 발전과 송전투자를 고려한 송전설비계획을 수립하여야 한다. 특히 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 계획수립에 지침이 될 수 있는 기준 설정이 필요하다.

기존의 송전설비계획은 통합자원계획(IRP, Integrated Resource Planning)의 일환으로 수요예측을 통해 공급신뢰도를 유지하면서 가장 경제적인 설비계획을 수립하는 것이었다[1]. 하지만 시장경제의 도입으로 인해 송전설비계획은 공학적 신뢰도 측면에서 경제학적 비용관점으로의 전환이 요구되고 있기에, 계통의 안정적 운영과는 별도로 계통참여자 혹은 계통에 이익이 되는 설비계획을 수립할 필요가 있다. 즉, 향후 송전설비계획은 안정적 전력거래의 보장과 동시에 계통의 경제적 효율성을 극대화할 수 있는 방향으로 수립되어야 한다. 발전 및 수요의 불확실성으로 인해 송전설비계획에서 요구되는 장기간의 시뮬레이션은 복잡화되고 예측하기 어려워지고 있으므로 송전설비계획을 객관적으로 결정할 수 있는 방안이 전 세계적으로 연구되고 있지만 아직 국내는 그렇지 못하는 실정이다. Rau[2]는 기존 설비의 용량을 추가하는 송전설비계획을 수립하여 총괄적인 혼잡비용 절감효과를 얻었으며, Lee[3]는 계통설비로 인한 혼잡비용 발생의 정도를 인덱스화한 설비계획을 제안하였다. 이외에도 경쟁시장에서 비용효과적인 설비계획방안[4]등 다양한 방향으로의 연구가 현재 수행 중에 있다.

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 계통운용상의 비용상승 및 전력거래비용의 증가가 혼잡비용이며 이는 송전망 즉, 송전설비계획의 건설 기준이 될 수 있다. 송전선로의 건설로 계통혼잡비용 절감의 효과를 얻을 수 있는 계획기준을 제안하며 이 때의 최적선로와 용량을 찾고자 한다.

2. 송전설비계획의 기준설정 방법

2.1 송전혼잡과 혼잡비용

송전혼잡(Transmission Congestion)이란 어느 두 지점간의 전력조류(Power Flow)가 그 두 지점간의 송전능력(Transfer Capability)을 초과하는 현상을 말한다[5]. 혼잡의 발생은 발전비용 또는 사회적 비용을 증가시킨다. 계통에 혼잡이 없다면 값이 싼 발전기들부터 차례로 출력을 증가시

† 교신저자, 學生會員 : 弘益大 工大 電氣情報制御學科 工學碩士卒業
E-mail : jjongmani@kepco.co.kr
* 正 會 員 : 弘益大 工大 電氣情報制御學科 博士課程
** 正 會 員 : 弘益大 工大 電子電氣工學科 副敎授 · 工學博士
接受日字 : 2005年 3月 7日
最終完了 : 2005年 7月 6日

켜 부하 조건을 만족시키며 전체적으로 모든 발전기들의 한계비용이 같아지는 점에서 출력이 결정된다. 그러나 계통에 발생하는 혼잡은 이러한 발전기들의 출력을 변화시키며 이로 인해 추가적인 비용이 발생한다. 이를 혼잡비용(Congestion Cost, 또는 Congestion Charge)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. 다음의 식과 같이 계통혼잡비용을 일반화 할 수 있다.

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

여기서,

i, j : 모선 또는 지역(zone) index$(i\cdots, n)$

n : 모선 또는 지역(zone) 총 수

ρ_i, ρ_j : i, j 모선 또는 지역(zone) 가격

f_{ij} : i와 j모선 또는 지역(zone)간의 선로 조류

즉, 각 모선간의 가격 차이에 그 사이를 흐르는 조류의 곱을 모든 선로에 대하여 구한 것이 계통에 발생한 혼잡비용이다. 그에 반해 단일요금제에서 혼잡비용이란 송전 제약조건들을 고려하지 않은 비제약급전과 제약급전 사이의 비용차이를 의미한다.

일반적으로 혼잡비용을 최소화하기 위해서는 다음의 방법을 취한다. 첫째, 적절한 송전선로의 건설로 혼잡이 증가하는 것을 억제해야 한다. 그러나 송전선로를 지나치게 건설하는 것은 막대한 투자비용으로 인해 사회적 비용이 증가하여 오히려 손해가 될 수 있다. 둘째, 송전망의 운영과 관리를 효율적으로 하여야 한다. 송전선로도 보수가 필요하며 적절한 보수계획과 사고에 대한 효율적인 예방은 송전혼잡으로 인해 발생하는 비용을 감소시킬 수 있다. 셋째, 시장에 적절한 가격신호를 주어서 부하와 전원설비가 효율적인 위치에 입지되게끔 하여 시장참여자들이 가격에 적절한 반응을 보일 수 있게 하는 것이다.

2.2 송전선로 건설비

송전혼잡을 해결하기 위한 가장 좋은 방법은 혼잡이 발생하지 않도록 충분한 송전설비를 건설하는 것이다. 그러나 송전선의 건설비용과 송전혼잡으로 인해 발생하는 비용을 고려했을 때 건설비용이 더욱 크다면 혼잡을 감수하는 것이 비용 효과적일 수 있다. 그러므로 전력계통에서 발생하는 혼잡은 어느 정도 불가피하다 할 수 있다. 송전선 건설비용을 구성하고 있는 것은 자재비 외에도 토지보상비, 인건비 등 고려해야 할 변수가 많아 현재까지도 비용 산정에 대한 확실한 방법이 제시되고 있지 않고 있다. 현재 송전선 건설비용은 물가변동이나 노임 상승에 따라 매년 약간씩 증가하는 추세이며, 한전에서는 km당 단가로 건설비를 산정하고 있다. 표 1은 현재 한전의 각 전압별 평균적인 건설비용이며 설계조건에 따라서도 많은 차이를 낼 수 있다.

표 1 평균적인 송전선로 건설비용
Table 1 The Average Construction Cost

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

2.3 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 절약되는 비용이 큰 총비용 관점에서의 접근을 시도하였다. 즉, 선로를 건설함으로써 얻는 혼잡비용의 절감효과(A-B)가 송전설비 투자비용(C)보다 크다면 설비건설계획에 인센티브가 있다고 본다.

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

여기서,

post : 선로건설 후 index

f_{ij}^{new} : 건설용량

C' : 용량당 건설비용

따라서 송전회사는 향후 수요예측 및 발전설비계획을 고려하여 계통혼잡의 증가 혹은 혼잡비용의 증가가 예상된다면, 미리 적정수준의 선로를 확보하여 혼잡의 증가로 인한 계통의 피해를 줄일 수 있어야 한다. 혼잡비용의 절감효과는 선로입지와 설비용량에 큰 영향을 받게 되며 이때 같이 고려해야 할 사항이 선로 건설비용이다. 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 비용평가기간은 송전선 건설에 따른 경제성 분석기간 또는 선로수명으로 보기로 한다. 송전선로 건설비용과 혼잡비용절감 효과를 측정하기 위한 비용평가기간을 P라고 할 때 다음과 같은 방법으로 최적입지 및 용량을 결정하게 된다.

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

여기서,
p : 연도 index($p = 1, 2, \cdots, P$)
P : 총 비용평가기간(설비수명)
t : 시간 index($t = 1, 2, \cdots, 8760$)
f_{ij}^{new} : i와 j모선을 연결하는 신규 선로의 용량

향후 선로건설 전후 혼잡비용의 절감정도를 비용평가기간 P(year)기간동안 반영한 후에 이때의 선로입지 및 선로용량에 대한 건설비용과 비교하여, 총비용관점에서 가장 큰 비용절감 효과를 보이는 최적입지(i모선과 j모선연결선로)를 선택하는 것이다. 원칙적으로는 이러한 건설계획에 대한 투자평가로 미래 P(year) 기간동안의 할인율을 적용한 순현재가치(NPV, Net Present Value) 값을 비교해야한다. 즉, 식 3의 혼잡비용 절감 값에 할인율을 적용하여 여러 NPV중 가장 큰 양(+)의 값의 대안을 찾아야 하는 것이다. 하지만 여기서는 정확한 값의 차이보다는 비교관계 그 자체에 관심을 두고 문제를 전개하였기에 할인율을 배제하였다.

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.

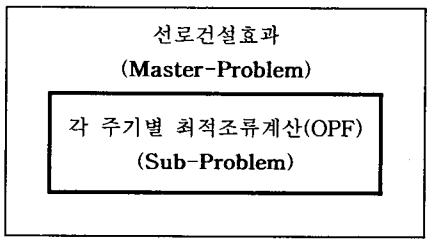

그림 1 송전설비계획 문제
Fig. 1 A Problem of Construction

이러한 송전설비계획문제를 수식으로 간단히 정식화하면 다음과 같다.

master problem

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

sub problem

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

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

subject to

$$G(x) = 0$$
$$H(x) \le 0 \quad (6)$$

여기서,
N_g : 총 발전기 대수
m : 발전기 index($m = 1, 2, \cdots, N_g$)
$g_{i,m}$: i모선 또는 지역(zone)의 m번째 발전기 발전량
$f(g_{i,m})$: i모선 또는 지역(zone)의 m번째 발전기 발전비용
$a_{i,m}$, $\beta_{i,m}$, $\gamma_{i,m}$: i모선 또는 지역(zone)의 m번째 발전기 발전비용계수

Master Problem인 식 4는 설비계획 전체의 목적함수로 선로건설 효과가 가장 큰 입지와 선로를 찾는다는 의미이다. Sub Problem의 식 5는 최적조류계산식의 목적함수로 i모선 g번째 발전기의 발전비용 $f(g_{i,m})$을 최소화하는 계산식을 의미한다. 식 6은 Sub Problem의 제약식으로 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.

2.4 최적 선로 입지 및 용량 기준 설정

2.4.1 주요전제

전력시장형태의 형태는 수직통합적 독점체제를 제외한 개별 시장참여자(발전, 송전, 배전, 계통운영자)가 존재하는 경쟁적 전력시장을 기반으로 하고, 이때의 시장은 각 모선(지역)별 한계가격을 이용하는 LMP(Locational Marginal Price) 요금체계로 하여야 혼잡비용 계산이 용이하다. 또한 이미 선로증설의 필요성이 전제되었으며 사례연구의 편의를 위해 오직 한기의 선로 건설만을 고려하기로 한다. 경쟁적 전력시장을 기반으로 하기에 공급신뢰도보다 경제적 효율성 측면에서의 설비계획을 중시한다. 비용평가기간의 시작은 선로건설이 완료된 이후부터 비교하며 건설비용은 $/MW의 총비용으로 한다.

2.4.2 적용방법

Step 1 : 수요예측 데이터를 이용하여 연도별 혼잡비용을 우선적으로 계산한다. 이 기간동안의 시장에 참여하는 새로운 참여자(발전, 부하)의 발생뿐만 아니라 송전설비의 계획도 반영할 수 있다.

Step 2 : 송전설비계획을 수립할 때 가장 중요한 부분은 입지선정이다. 여기서의 입지는 환경지리적인 입지 조건(평지, 산악지대)이 아니라 모선과 모선을 연결하는 선로 연결상태를 말한다. 각 모선을 잇는 가능한 선로의 경우의 수는 무수히 많다. 하지만 송전설비계획 수립이 실시간 연산을 필요로 하지 않기에 모든 가능한 경우에 대해서 조사한다면 가장 좋은 방법이 될 수 있다. 이때의 입지 순서와 상관없이 경우의 수를 구하는 가장 대표적인 방법이 조합(Combination)이다.

- 조합 : ${}_nC_2$ n개의 모선에서 순서에 상관없이 2개의 모선을 잇는 선로 수

Step 3 : Step 2에서 구한 선로 입지별로 비용평가기간(P) 동안 최적조류계산(OPF)을 수행한다. 이때 선로 건설비

를 반영하여 건설 전의 혼잡비용과 건설 후의 혼잡비용의 절감효과가 가장 클 때의 최적 용량을 각 케이스별로 찾아낸다. 실제 프로그램 수행시에 입지에 대해서 최초 선로용량을 0에서부터 점차 증가시키며 최적조류계산을 수행하게 된다. 실제 계통에 맞게끔 실제 국내 일정규격(765, 345, 154kV)을 설정할 수도 있다.

Step 4 : Step 3의 각 케이스별 최적조류계산 결과 중에서 가장 효율적인(선로건설 이득이 가장 좋은) 입지와 용량을 갖는 선로를 최종 결정한다. 이상의 제안된 방법을 도식적으로 표현하면 다음 그림과 같다.

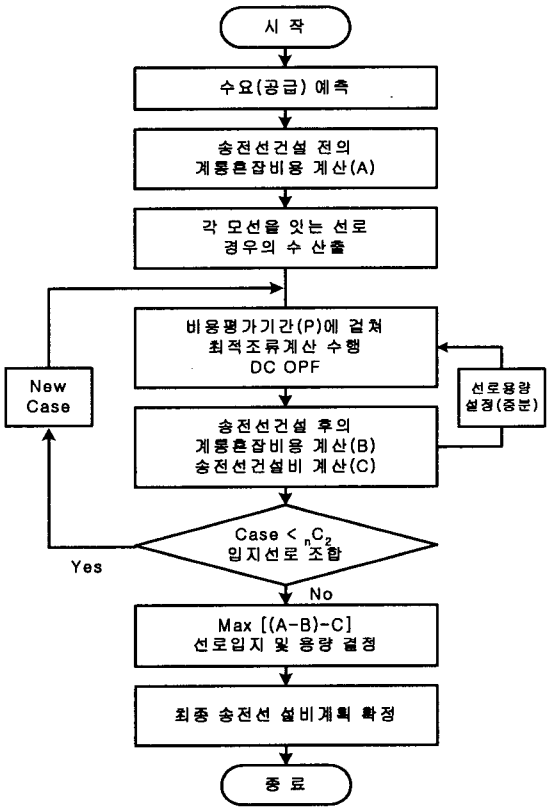

그림 2 송전회사의 송전설비계획 기준 설정 메커니즘

Fig. 2 The Mechanism of a Criterion of Transmission planning

3. 사례연구

문제의 간략화를 위해 사례계통으로 7모선, 8선로 계통을 가정하였으며 GAMS[6] 최적화 프로그램을 이용하였다.

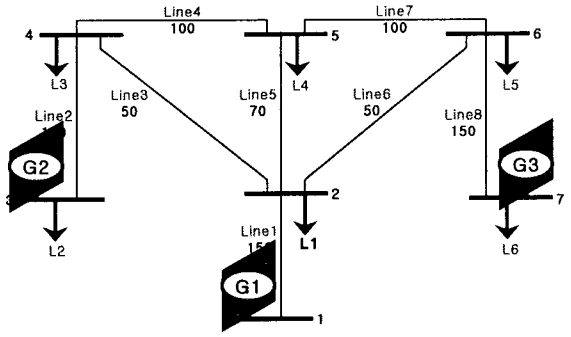

그림 3 사례연구 계통

Fig. 3 The Example of Case Study

문제의 간략화를 위해 다음을 가정한다.

(i) 계통의 손실은 없으며 선로열용량 제약만 다를 뿐 모든 선로 데이터는 동일하다.

(ii) 송전선건설에 대한 비용평가 기간 및 건설비는 송전회사에서 다양하게 결정 할 수 있다. 본 사례연구에서는 5년의 비용평가기간과 MW당 건설비를 고려하였다.

(iii) 발전기 비용함수는 매년 동일하며, 부하는 전년도 대비 1%씩 증가한다.

발전기 비용함수 및 수요예측 데이터는 다음과 같다.

표 2 발전기 데이터

Table 2 Generator Data

	발전용량제약 (MW)		Coefficient of generator cost function		
	Max	Min	a	b	c
G1	300.00	0.00	556.00	13.191	0.006300
G2	300.00	0.00	720.00	14.510	0.015501
G3	300.00	0.00	650.00	13.904	0.003524

표 3 수요예측 데이터(단위 : MW)

Table 3 Demand Forecasting Data(unit : MW)

	p	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Total
전년도대비 1%씩 증가	0	50.000	50.000	150.000	150.000	50.000	50.000	500.000
	1	50.500	50.500	151.500	151.500	50.500	50.500	505.000
	2	51.005	51.005	153.015	153.015	51.005	51.005	510.050
	3	51.515	51.515	154.545	154.545	51.515	51.515	515.151
	4	52.030	52.030	156.091	156.091	52.030	52.030	520.302
	5	52.550	52.550	157.652	157.652	52.550	52.550	525.505
	6	53.076	53.076	159.228	159.228	53.076	53.076	530.760
	7	53.607	53.607	160.820	160.820	53.607	53.607	536.068
	8	54.143	54.143	164.429	164.429	54.143	54.143	541.428
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

초기 선로건설전의 최적조류계산의 결과는 다음과 같다.

표 4 선로를 건설하지 않았을 경우

Table 4 Not Considering of New Line

p	부하 (MWh)	발전량(MWh)			혼잡비용 ($/h)	발전비용 ($/h)	혼잡선로
		G1	G2	G3			
1	500.000	150.0	172.5000	177.5000	1198.5663	9589.6147	1, 7
2	505.000	150.0	176.7500	178.2500	1231.2935	9685.6587	1, 7
3	510.050	150.0	181.0425	179.0075	1264.3480	9783.2357	1, 7
4	515.150	150.0	185.3779	179.7726	1297.7330	9882.3723	1, 7
5	520.302	150.0	189.7567	180.5453	1331.4519	9983.0960	1 ,7

부하가 증가함에 따라 계통의 혼잡비용도 증가함을 볼 수 있다. 이러한 혼잡비용을 감소시키기 위해 송전선을 건설하게 되는데, 7모선계통으로 이어질 수 있는 선로의 수는 7 * 6 / 2 = 21개이다. 이중 기존선로 8개중 혼잡이 걸린 1, 7번 선로를 제외하면 21 - 8 + 2 = 15 개의 선로입지의 수가 선정된다.

여기서 주의할 것은 새롭게 연결되는 선로가 13개이고 기존에 존재하는(혼잡에 걸린 1번 7번) 선로의 경우에는 회선을 추가하는 것이 아니라 기존 선로의 용량을 추가하는 형식으로 신규 선로를 투입하였다.

표 5 선로건설이 가능한 입지 경우의 수
Table 5 The Number of Cases enable to Planning

Case	from bus	to bus	line
Case_01	1	3	line9
Case_02	1	4	line9
Case_03	1	5	line9
Case_04	1	6	line9
Case_05	1	7	line9
Case_06	3	2	line9
Case_07	3	5	line9
Case_08	3	6	line9
Case_09	3	7	line9
Case_10	7	2	line9
Case_11	7	4	line9
Case_12	7	5	line9
Case_13	4	6	line9
Case_14	**1**	**2**	**line1**
Case_15	**5**	**6**	**line7**

입력데이터에 위의 선로입지 경우의 수만큼 새로운 선로 데이터를 입력해주면 프로그램에서 선로입지를 결정하고 그 때마다 비용평가기간(P)년 동안의 급전 결과 및 혼잡비용을 산출한다. 이때 이전의 선로용량 값과 비교해 더 좋으면 최적값을 바꾸고 그렇지 않으면 선로용량을 1MW 증분하여 반복한다. 또한 이를 각 사례연구별로 수행하여 가장 효율적인 값, 즉 선로건설의 최적입지와 용량을 결정하는 것이다. 위의 모든 일련의 과정은 GAMS 프로그램 내에서 구현된다.

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

표 6 각 사례연구 결과 (건설비 : 고려안함, 평가기간 : 5년)
Table 6 The Results of Case Study (Construction Cost : No, Period : 5years)

Case	수렴 여부	from bus	to bus	혼잡절감이득 ($)	선로용량 (MW)	혼잡 선로
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	△	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	△	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 6의 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 '△'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 것(Case_03)이 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.

다음에는 건설비용을 반영하여 실질적인 설비계획을 수립하기로 한다. 선로 MW당 비용을 $50,000으로 하였을 때의 결과를 표 7에 정리하였다. 단, 신규선로의 최대용량은 120MW로 제한하였다.

표 7 각 사례연구 결과(건설비 : $50,000/MW, 평가기간 : 5년)

Table 7 The Results of Case Study(Construction Cost : $50,000/MW, Period : 5years)

Case	수렴 여부	혼잡절감이득 ($)	선로 용량 (MW)	건설효과 ($)	혼잡 선로
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	△	-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	△	-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	□	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	34,595.920E+3	8

표 6과 비교하여 볼 때 표 7에서 Case_10의 건설효과 값이 음의 비용이 나온 것은 선로건설로 인한 혼잡비용 절감 효과를 보긴 하나 건설비용보다 그 효과가 미미하기 때문에 전체적으로 음의 비용효과를 나타내게 된 것이다. 앞의 결과와 비교하여 볼 때 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 송전혼잡 해소의 이득을 크게 볼 수 있음을 나타낸 것이다.

Case_09의 급전결과를 그림 4에 나타내었다.

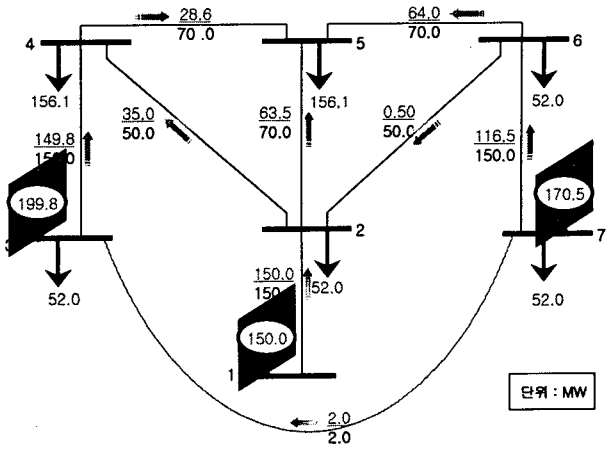

그림 4 사례연구 결과

Fig. 4 The Results of Case Study

그러나 선로용량은 연속적으로 결정될 수 있는 것이 아니다. 어느 표준규격에 따라 일정한 간격으로 건설된다. 다음은 선로용량의 규격이 10MW 단위로 정해진 경우의 경제성 평가 결과이다.

표 8 각 사례연구 결과(건설비 : $50,000/MW, 평가기간 : 5년, 규격 10MW)

Table 8 The Results of Case Study(Construction Cost : $50,000/MW, Period : 5years, standard : 10MW)

Case	수렴 여부	혼잡절감이득 ($)	선로 용량 (MW)	건설효과 ($)	혼잡 선로
Case_01	O	35,590.473E+3	20.0	34,590.473E+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**	**110.0**	**36,114.698E+3**	**3, 8**
Case_04	X	•	•	•	•
Case_05	□	905.084E+3	20.0	-94.915E+3	1, 9
Case_06	△	-29,164.300E+3	80.0	-33,164.300E+3	3, 7
Case_07	O	13,752.517E+3	80.0	9,752.517E+3	3, 8
Case_08	△	-180,786.000E+3	100.0	-185,786.000E+3	1, 7
Case_09	O	**35,386.861E+3**	10.0	34,886.861E+3	1, 9
Case_10	□	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	28,411.561E+3	20.0	27,411.561E+3	1, 9
Case_14	O	32,752.553E+3	20.0	31,752.553E+3	3, 7
Case_15	O	35,145.920E+3	20.0	34,145.920E+3	3, 8

앞선 결과와 달리 표 8에서는 Case_03이 최적이 대안으로 선정이 되었다. 선로용량 정격설비로 인해 바로 윗 규격을 선택함으로 인해 발생하는 전반적인 건설비용 증가분이 건설효과에 반영되었기 때문이다. 이뿐 아니라 앞서 최적 후보지로 결정된 Case_09의 혼잡절감이득이 경감되었는데, 이것은 앞서 표 7에서 Case_09가 선로용량으로 인한 혼잡절감이득이 최대가 되는 임계값에 있었지만 강제적인 선로규격제약 증가(2MW→10MW)가 선로조류를 변화 시켜 Case_09의 계통혼잡비용을 상승시켰기 때문이다. 위의 두 영향 때문에 Case_09보다 Case_03의 경제성이 더 높게 평가되었고 Case_03이 최적 건설후보지로 결정되었다. Case_01, Case_13도 같은 이유로 혼잡절감이득이 경감된 것이다.

3. 결론 및 향후 연구

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 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 또한 송전설비계획 단독이 아닌 발전설비계획과의 연계방안[7],[8]도 점차적으로 해결해야 할 난제이며, 설비계획의 주체가 상이할 수 있는 경쟁적 전력시장에의 적용방안을 마련하는 것도 본 연구와 관련한 주요 연구 분야라 할 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] "통합자원계획의 수립절차 및 적용체제에 관한 연구", 한국전력공사 전력경제처, 에너지경제연구원, 1997.9

[2] Narayan S. Rau, "Transmission Congestion and Expansion Under Regional Transmission Organizations", IEEE Power Engineering Review Vol 22, pp. 47-49, September 2002

[3] Kwang Y. Lee, "Network Congestion Assessment for Short-term Transmission Planning under Deregulated Environment", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Vol 3, pp. 1266 -1271, 2001

[4] 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 PowerCon Vol 2, pp. 709-714, 2000

[5] "송전선 혼잡처리 비용 및 송전선 이용료 설정에 관한 연구", 한국전력공사 송변전처, 기초전력공학공동연구소, 2000.2

[6] Richard E. Rosenthal, "GAMS A User's Guide", GAMS Development Corporation, 1998

[7] 김발호 외, "발전소 건설계획과 계통계획과의 연계방안 검토", 연구보고서, 한국전력거래소 수급계획처, 2001

[8] 신영균 외, "발전설비계획과 계통계획 연계에 대한 필요성 검토", 대한전기학회 추계학술대회, pp. 44-47, 2001

[9] Kankar Bhattacharya, Math H. J. Bollen, Jaap E. Daalder, "Operation of Restructured Power Systems", Kluwer Academic Publishers, Chapter 1-3, 2001

[10] R. Romero, "A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning", IEEE Transaction on Power System Vol 9, pp. 373-380, 1993

저 자 소 개

김 종 만 (金 鍾 萬)

1978년 12월 14일생. 2003년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 2005~현재 한국전력공사 남서울전력관리처 동서울사업소 근무.

Tel : 02-320-1462
Fax : 02-320-1110
E-mail : jjongmani@kepco.co.kr

김 발 호 (金 發 鎬)

1962년 7월 12일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공박). 1999년~현재 홍익대학교 전기정보제어공학과 부교수

Tel : 02-320-1462
Fax : 02-320-1110
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr

한 석 만 (韓 錫 萬)

1976년 12월 5일생. 2002년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 02-338-1621
Fax : 02-320-1110
E-mail : hseokman@gmail.com