

### 송전선로 신설로 인한 혼잡해소에 대한 경제성 평가

최영도\*, 서철수\*, 윤기갑\*, 박상호\*, 김창우\*, 신제석\*\*, 김진오\*\*  
한국전력공사 전력연구원\*, 한양대\*\*

### The economic evaluation for the congestion Obliteration by Installation of transmission line

Young-do Choy\*, Chul-soo Seo\*, Gi-gab Yoon\*, Sang-ho Park\*, Chang-woo Kim\*, Je-seok Shin\*\*, Jin-o Kim\*\*  
KEPCO KEPRI\*, HanYang University\*\*

**Abstract** - 전력 수요가 기하급수적으로 증가함에 따라 발전설비들의 신설의 필요성뿐 아니라 효율적인 전력수송 및 배분을 위한 송전설비의 신설의 필요성 또한 높아지고 있다. 이에 송전설비의 신설에 대한 계획 단계에서 건설비용뿐 아니라 운영비용에 대한 경제적 효과를 고려하여야 한다. 경제적인 운영비용의 평가를 수행하기 위하여, PSS/E 최적조류계산(OPF)을 활용하여 제약비용, 혼잡비용, 손실비용을 산정하는 명확한 절차를 제시한다.

#### 1. 서 론

최근 에너지 자원 공급의 불확실성이 높아지고 고유가 시대가 됨에 따라 국가적인 사업인 전기에너지의 수송체계의 중요성이 더욱 증대되고 있으며 나아가 이는 적정설비 투자에 대한 기술이 요청되고 있다. 따라서 현재의 전력계통 상황을 기본으로 하고, 향후 수요증가 및 발전소 건설 계획 등과 연계하여 검토가 이루어져야 하며, 이러한 검토를 근거로 원활한 전력수송 및 배분을 위한 송전선로 신설에 대한 기술적으로 적정하고 경제성을 감안한 계획이 되어야 한다. 하지만 송전설비 확충계획과 관련된 현행 절차에는 손실비용 및 혼잡비용의 산정에 관하여 명확하게 마련되어 있지 않다.

국내 계통의 송전시스템에서 특히 중요한 부분이 수도권과 비수도권을 이어주는 북상선로이다. 많은 수요들이 수도권에 집중되어 있는 것과 반대로 많은 발전기들이 수도권과 지리적으로 멀리 떨어진 비수도권 지역에 분포되어 있는 국내 계통의 특징으로 인하여 수도권의 높은 수요를 원활하게 공급하기 위해서는 비수도권으로부터 많은 전력의 송전이 필요하다. 효율적인 전력수급을 위하여 6개의 345kV 및 765kV의 북상선로들이 건설되어 운영되고 있다. 하지만 북상선로로 송전할 수 있는 전력량은 전압안정도와 관련하여 제한된다.[3] 따라서 경제적이고 효율적인 계통의 운영을 위해서는 북상선로 제약을 개선시킬 수 있는 송전선로의 신설설 계획이 경제적으로 고려되어야 하고, 그 과정은 명확한 절차에 의해서 수행될 필요가 있다.

이에 PSS/E이라는 계통해석 프로그램의 최적조류계산(OPF) 기능을 활용하여 송전설비 신설 계획단계에서 경제성 평가를 위한 절차를 제안하고, 사례연구를 통해 절차에 대한 검증을 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 경제성 평가 요소

본 논문에서 송전선로 신설에 대한 경제성 평가는 KEPCO관점에서 수행되며, 이를 위한 평가요소들은 다음과 같다.[2]

##### 2.1.1 구매비용

KEPCO가 발전사들에게 지불하는 총 전력량에 대한 구매비용을 말한다.

$$[KEPCO의 구매비용] = [전체 발전량] \times [계통 한계 증분비용] - [COFF 발전비용] + [CON 발전비용] \quad (1)$$

“CON”은 제약으로 인해 발생하는 제약발전량을 나타내며, “COFF”는 제약으로 인해 발생하는 제약비(非)발전량을 나타낸다. 비제약 계통에서는 제약이 적용되지 않으므로 CON, COFF에 해당하는 발전비용이 발생하지 않는다. 북상선로 제약이 적용되는 제약계통의 경우, 제약에 의해 CON, COFF에 대한 발전비용이 발생하게 되고, 이를 다음의 제약비용을 통해 산정한다.

##### 2.1.2 제약비용

북상선로 제약 전/후의, KEPCO의 구매비용 변화량으로 산정한다.

$$[제약비용^1] = [제약 상태의 구매비용^1] - [비제약 상태의 구매비용^0] \quad (2)$$

$$[제약비용^2] = [제약 상태의 구매비용^2] - [비제약 상태의 구매비용^0]$$

송전선로 신증설 전/후의 제약비용의 차이로 송전선로 신증설에 대한 제약비용 효과를 산정할 수 있다.

$$[제약비용 효과] = [제약비용^2] - [제약비용^1] \quad (3)$$

##### 2.1.3 손실비용

손실비용은 계통의 손실량과 계통의 한계 증분비용의 곱으로 나타내며, 송전선로 신설에 대한 손실비용 효과는 다음과 같다.

$$[손실비용 효과] = [손실비용^2] - [손실비용^1] \quad (4)$$

##### 2.1.4 혼잡비용

혼잡비용은 북상선로 제약 전/후의 총 발전량에서 손실량 부분을 제외한, 순수한 수요량에 대한 구매비용의 변화량이다.

$$[혼잡비용^1] = [전체 구매비용 변화량] - [손실비용 변화량] \quad (5)$$

$$= [구매비용^1 - 구매비용^0] - [손실비용^1 - 손실비용^0]$$

$$[혼잡비용^2] = [구매비용^2 - 구매비용^0] - [손실비용^2 - 손실비용^0]$$

송전선로 신설에 대한 혼잡비용 효과는 다음과 같다.

$$[혼잡비용 효과] = [혼잡비용^2] - [혼잡비용^1] \quad (6)$$

상위 첨자는 각각 0: 북상선로 제약을 고려하지 않은 비제약 계통,

- 1: 선로 신설 전에 북상선로 제약을 고려한 계통,
- 2: 선로 신설 후에 북상선로 제약을 고려한 계통을 나타낸다.

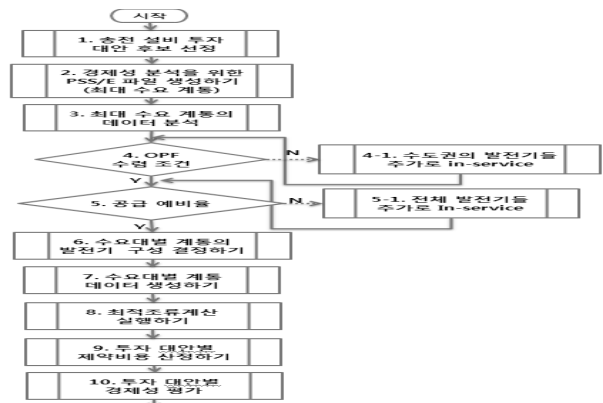
#### 2.2 PSS/E 최적조류계산(OPF)

일반적인 OPF의 개념은 기술적, 물리적, 환경적 제약조건하에서의 경제급전계획을 의미하며, 실제적으로는 경제급전계획과 전력조류계산을 동시에 수행하는 것을 의미한다.

이러한 OPF를 통해 각 발전기의 한계비용을 계산할 수 있으며, 이 한계비용의 계산을 통해 각 모선에서의 잠재비용(Shadow price)을 계산해 낼 수 있기 때문에, 각 전력산업의 경제주체별 편익을 산정할 수 있는 유용한 수단이 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 다수의 목적함수와 제어변수를 가지고 OPF를 수행할 수 있는 전력계통 해석 프로그램인 PSS/E를 활용한다.

#### 2.3 경제성 분석을 위한 PSS/E 최적조류계산(OPF) 절차

다음은 PSS/E OPF를 활용하여 경제성 평가를 수행하는 알고리즘이다.



〈그림 1〉 PSS/E 최적조류계산(OPF) 절차

PSS/E OPF는 조류계산 파일과 비용 및 제약에 대한 데이터를 담고 있는 OPF 데이터 파일을 필요로 한다. 이를 위해 최대 수요 경우에 대한 조류계산 파일과 선로 신설 전/후의 복상선로 제약량 그리고 발전기별 비용합수 정보 등을 준비해야 한다.

사전 데이터 및 파일들이 준비되면, 수요대별 경우에 대하여 먼저 조류계산 파일을 먼저 생성 하고나서 OPF 데이터 파일을 생성해야 한다. 생성 완료 후에는 두 파일을 묶어서 하나의 PSS/E 파일로 저장하고 사용한다. 최대 수요계통에 대한 PSS/E 파일을 먼저 생성한 후에 최대 수요계통을 기준으로 나머지 수요대별 계통을 생성한다. 수요대별 구간을 작게 하면, 좀 더 정확한 경제성 평가를 수행할 수 있지만, OPF의 수행횟수 및 계산의 양이 많아지므로 적절히 설정한다.

일관된 OPF 결과를 얻기 위해, 발전기들의 구성에서 고려해야 할 조건들은 다음과 같다.

가. 수요대별 수요들은 선형관계에 있다고 가정한다.

나. 양수발전기와 수력발전기들의 투입특징을 고려한다.

**<표 1> 수력발전기의 투입 특징**

70%수요까지	모든 수력발전기들 투입
60%수요	절반의 수력발전기들만 투입

**<표 2> 양수 발전기의 투입 특징**

최대 수요, 90%수요	모든 양수발전기 투입
80%수요	절반의 양수발전기만 투입
70%, 60%수요	모든 양수발전기 제외

다. 나머지 발전기들은 최대출력시점에서의 증분비용을 기준으로

증분비용이 높을수록 투입되는 우선순위가 낮게 적용한다.

라. 투입된 발전기들은 전체 수요와 발전(공급) 가능용량간의 전체 공급예비율을 고려해야 결정되어야 한다.

$$\text{공급예비율}(\%) = \frac{\text{공급 가능용량} - \text{수요량}}{\text{수요량}} \times 100\% \quad (7)$$

마. 수도권의 공급예비력과 복상선로 제약량간의 다음의 조건을 만족하도록 발전기들을 투입하여야 한다.

$$|\text{수도권 공급예비력}| \leq \text{복상선로 제약량} \quad (8)$$

OPF를 실행하는 단계에서는 [선로 신설 전]의 제약을 고려한 경우에서 사용한 수렴방법을 나머지 경우에도 동일하게 적용하여 수행한다.

각 수요대별 계통의 한계 증분비용은 무손실(R=0), 무제약 조건에서 산정되어야 하며, OPF 실행 후, 비용의 결과들은 수요유지곡선(LDC)에 의해서 연간비용으로도 산정될 수 있다.

**3. 사례연구**

사례연구는 2016년 국내 계통계획에서, 신안성-신가평간의 765kV 송전선로 신설에 대한 경제성 평가를 수행하였다.

2016년 계통의 최대 수요계통과 60%수요계통에 대한 PSS/E Raw파일은 [한전 계통계획처]에서 작성한 것을 사용하였고, 발전기별 비용 데이터는 [한국전력공사 전력거래시스템]의 “운전비용 기본자료(2010년5월)”을 사용하였다.

전체 공급예비율은 15%로 가정하였다. 부하유지곡선(LDC)은 2009년도를 기준으로 최대수요, 90%, 80%, 70%,60% 수요대별 유지시간을 산정하였다. 최적조류계산의 목적함수로는 “최소발전비용”을 사용하였다.

제안한 PSS/E OPF 절차를 활용한 사례연구의 결과는 다음과 같다.

**<표 3> 2016년 수요대별 계통의 구성 상태**

2016년		지역별/전체 발전 가능용량(MW)	지역별/전체 수요량(MW)
최대수요 계통	수도권	22819.7	31927.75
	비수도권	66195.87	45061.48
	전체	89015.57	76989.23
90%수요 계통	수도권	16078.5	27889.87
	비수도권	63451.87	41054.2
	전체	79530.37	68944.07
80%수요 계통	수도권	11067.61	23927.8
	비수도권	59299.87	37056.3
	전체	70367.48	60984.1
70%수요 계통	수도권	7818.601	20056.99
	비수도권	54358.88	33683.66
	전체	62177.48	53740.66
60%수요 계통	수도권	5198	16195.89
	비수도권	49144.78	30110.36
	전체	54342.78	46306.25

**<표 4> 수요대별 계통의 발전량과 손실량**

	총 발전량(MW)			손실량(MW)		
	비제약 <sup>0</sup>	제약 <sup>1</sup>	제약 <sup>2</sup>	비제약 <sup>0</sup>	제약 <sup>1</sup>	제약 <sup>2</sup>
최대 수요	78,080.7	78,077.5	78,085.3	1,091.5	1,088.2	1,096.1
90%	70,055.5	69,945.5	69,958.8	1,111.5	1,001.5	1,008.8
80%	61,921.2	61,896.1	61,904.6	937.2	912.0	920.5
70%	54,477.9			737.3		
60%	46,910.3			604.0		

**<표 5> 수요대별 계통의 한계 증분비용(천원/MWh)**

계통 한계 증분비용	최대 수요	90%	80%	70%	60%
	90.33	44.65	39.24	31.57	28.56

**<표 6> 수요대별 선로 신설에 대한 비용 효과**

KEPCO 관점	신안성-신가평 선로 신설 효과 (천원)		
	계약비용	손실비용 변화량	혼잡비용
최대 수요	-9,479.89	713.36	-10,193.25
90% 수요	-10,103.39	325.95	-10,429.35
80% 수요	-10,257.50	333.56	-10,591.06
70% 수요	복상선로 조류량의 제약이 걸리지 않으므로, 선로 신설에 대한 효과가 발생하지 않는다.		
60% 수요	복상선로 조류량의 제약이 걸리지 않으므로, 선로 신설에 대한 효과가 발생하지 않는다.		

**<표 7> 신안성-신가평 선로의 신설에 대한 연간비용 효과**

연간비용 효과	선로 신설 전	선로 신설 후	비용 효과
구매비용(백만원)	18,589,008.8	18,546,149.1	-42,859.7
계약비용(백만원)	279,799.5	236,939.8	-42,859.7
혼잡비용(백만원)	287,742.4	243,465.2	-44,277.2
손실비용(백만원)	257,797.2	259,214.7	1,417.5

제안한 PSS/E OPF 절차를 이용하여 2016년 계획계통의 수요대별 발전량과 손실량, 계통의 한계 증분비용을 산정할 수 있었다. 이 데이터들을 바탕으로 2.1절의 경제성 평가 요소들을 산정하여 선로 신설에 의해 개선되는 혼잡해소에 대한 경제성 평가하였다. 결과적으로 신안성-신가평간의 선로를 신설함으로써, 손실비용은 증가하나 혼잡비용이 크게 감소하여, KEPCO는 최소한 연 429억원의 제약비용을 감소시킬 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

**4. 결 론**

본 논문에서는 송전선로 신증설 계획과 관련된 현행 절차에서 손실비용 및 혼잡비용의 산정에 관하여 명확한 절차를 마련하고자 PSS/E 최적조류계산(OPF)을 활용하는 방안을 제안하였다.

제안한 절차의 최적조류계산 결과는, 수요대별 계통에서 투입되는 발전기들의 구성에 따라 차이를 보일 수 있다. 하지만 발전기들의 구성하는 과정에서 발전기들의 최대출력 시점에서의 증분비용을 고려하여, 증분비용이 낮은 발전기를 우선으로 투입하여 계통을 구성하였기 때문에, “최소 발전비용”목적이 충분히 고려되었다고 볼 수 있다. 따라서 선로 신설에 대한 PSS/E 최적조류계산의 결과는 경제성 평가를 최저비용으로 수행한 것으로 볼 수 있다.

계획 단계에서 고려되어야 하는 다른 여러 조건들이 고려되도록 절차를 보완한다면 장기계통계획에 있어 기존의 방법보다 좀 더 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

**[참 고 문 헌]**

[1] Daniel Kirschen Goran Strbac, “Fundamentals of power system Economics”, John Wiley& Sons, Ltd 2004, pp.79-83.  
 [2] Kepco “A study on application and development of reliability worth assessment technology for optimal transmission planning”, Kepri report , 2010.(in Korean), pp.118-151.  
 [3] Masoud Esmaili, Heidar Ali Shayanfar, Nima Amjady, “Congestion management considering voltage security of power systems”, Energy Conversion and Management, Volume 50, Issue 10, October 2009, Pages 2562-2569.  
 [4] Hadi Saadat, “Power System Analysis” Second Edition, Mc Graw Hill, 2004.