

**OPF를 이용한 중장기 전력계통 조상설비 계획수립**

유현수, 배주천

한국전력거래소 전력계획처 계통계획팀

**Long-term Shunt VAr Planning using Optimal Power Flow**

Heon-Su Ryu, Ju-Cheon Bae

Power System Planning Team, Korea Power Exchange

**Abstract** - This paper presents long-term shunt capacitor planning using optimal power flow. OPF allows the planning engineer to find feasible solution with minimal amount of engineering time. We used OPF for Shunt capacitor planning to get an optimal solution. The result of OPF is compared to the analysis by the conventional loadflow method and it is proved that OPF gives more cheaper and better planning solution. With the result, we analyzed the operational perspective for the reactive power supply and demand.

**1. 서 론**

최적조류계산(OPF)은 1960년대 소개된 이후로 전력 계통을 효율적으로 운영하기 위한 도구로서 지속적으로 사용되어 오면서 선형계획법, Newton method, Interior point method 등 다양한 최적화기법이 개발되었다[5]. 이로 인해 현재 OPF는 수렴속도와 수렴성이 향상된 알고리즘을 적용하고 있다. OPF는 제어변수를 직접 조정하여 최적해를 빠르게 찾기 때문에 강력한 계통해석 툴로 사용되고 있으며, 특히 송전혼잡관리, Nodal pricing 등 전력시장 운영에 많이 활용되고 있다. BPA에서는 조상설비 계획, 송전용량 결정 등에 OPF를 활용하고 있으며[6], EMS에서의 실시간 전압/무효전력 제어에도 활용되고 있다.[7]

본 논문에서는 중장기 전력계통 조상설비 계획수립에 OPF를 활용하여 기존 검토 방식보다 정확성과 효율성을 향상시켰다. 현재 중장기 전력계통 조상설비 운영방안 수립을 위한 기술검토는 조류계산에 의해 수행되고 있으며, 검토검토자는 조류계산 프로그램을 이용하여 다양한 방안을 조사하고 최상의 해를 구한다. 본 논문에서는 전압유지범위를 제약조건으로 하고 조상설비 소요 비용을 목적함수로 하는 OPF를 구성하여 최적의 조상설비 계획 방안을 수립하였다. '06-'17년 하계피크 계통에 대하여 조상설비 설치변전소 선정 및 최적의 설치량을 계산하였고 기존 조류계산에 의한 검토결과와 비교하여 OPF의 타당성을 검증하였다. 또한 검토결과를 분석하여 우리나라 중장기 전력계통 무효전력 수급 전망을 고찰하였다.

**2. 조상설비계획 문제정식화**

전력계통에서 규정된 계통전압을 유지하려면 무효전력 수급이 균형을 이루어야 하고, 이를 위해 중장기 계통검토시 조상설비 필요량을 계산한다. 이 때 조상설비 설치 위치와 소요량에는 다양한 방안이 존재한다. 여러 방안 중 최적의 방안을 찾는 데 최적조류계산법을 활용하면 보다 빠르고 효율적인 조상설비 계획을 수립할 수 있다.

**2.1 목적함수**

변전소에 설치되는 Shunt Capacitor/Reactor의 비용을 최소화 하는 것을 목적으로 한다. 목적함수는 다음과 같다

$$f(B) = \sum_{i=1}^{NVARs} |B_i| C_i$$

여기서 B = 모선 shunt susceptance(p.u.)

C = 비용/p.u. MVar

NVARs = 설치후보 변전소 수

목적함수는 각 변전소에 설치되는 조상설비 비용의 선형적 합으로 정의하였다.[8]

**2.2 제약조건**

조상설비 위치조건은 154kV 변전소에 설치되는 것으로 하였고, 조상설비의 상·하한량과 각 모선의 전압유지 범위를 제약조건으로 하였다.

위치조건 : 154kV 변전소

$$B_{IND,MAX,i} \leq B_i \leq B_{CAP,MAX,i}$$

$$V_{MIN,i} \leq V_i \leq V_{MAX,i}$$

여기서  $B_{CAP,MAX,i}$  = 최대 Shunt Capacitor

$B_{IND,MAX,i}$  = 최대 Shunt Reactor

$V_{MIN,i}, V_{MAX,i}$  = 전압의 최소 최대값

**3. 중장기 조상설비 계획 검토**

본 절에서는 중장기('06-'15,'17) 전력계통의 조상설비 계산에 OPF를 활용하여 최적 방안을 검토하였다. 또한 OPF 결과와 기존 조류계산에 의한 결과[3]를 비교하여 OPF 결과의 타당성을 검토하였다. 전력계통 해석시 널리 사용되는 PSS/OPF를 이용하여 최적의 조상설비계획을 수립하였다.

**3.1 검토조건**

검토계통 기본케이스 모델링 및 데이터는 다음과 같다

- 전력수요/역율 : 제2차 전력수급기본계획 년도별 최대전력/전국 평균 91% 적용[1]
- 발전기운전 : 연료비에 의한 merit order
- 전압유지범위[2]
  - 345kV 모선 : 336-360kV
  - 154kV 모선 : 156-164kV
- 조상설비 운전
  - '04년까지 기설분 전부 가동
  - 765kV 변전소 리액터 가동
- 변압기 탭
  - 765kV 변압기 탭 고정
  - 345kV 변압기 탭 조정

### 3.2 OPF에 의한 조상설비 검토

OPF에 의한 조상설비(S.C) 소요량을 계산한 결과 '06에는 17,000MVA, '17에는 23,700MVA가 필요한 것으로 나타났다. 연도별 세부 소요량은 표1과 같다

표 1 연도별 조상설비 소요량 [MVA]

지역 \ 연도	'04기설	'06	'08	'10	'15	'17
수도권	5925	6640	7190	6900	8470	9040
영동권	2035	2310	2160	2440	2455	2610
중부권	1340	1430	1590	1700	1860	2170
호남권	1920	2080	2300	2420	2870	3330
영남권	3470	4550	5400	5520	6725	6625
합 계	14690	17010	18640	18980	22380	23770

수도권은 발전력이 적고 수요가 많으므로 전체 소요량의 약40%를 차지하고, 영남권은 30%정도를 차지한다. 발전력이 많은 기타 지역에서 비교적 적게 필요한 것으로 나타났다.

연도별 소요량 추이를 살펴보면 2017년까지 지속적으로 증가하는 추세이나 2011년에는 전년대비 줄어드는 현상이 발생한다. 이는 당해에 765kV 선로가압 등으로 충전용량이 크게 증가하기 때문이다. 그림1에 소요량 추이를 나타내었다.

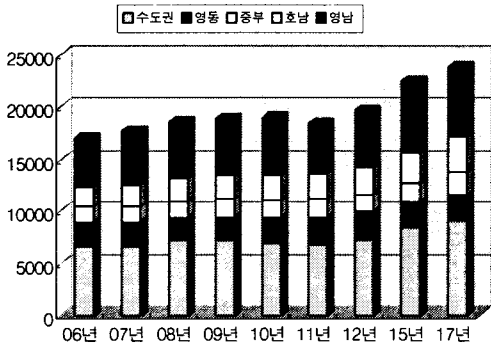


그림 1 연도별 조상설비(S.C) 소요량 추이

표 2는 위에서 계산된 조상설비가 설치되었을 때 연도별 345kV 모선전압을 나타낸다. 영동지역의 전압이 대체로 높게 나타나지만 전국적으로 전압이 모두 정격범위[2]를 유지하고 있음을 알 수 있다.

표 2 연도별 345kV 대표모선 전압 [kV]

지역 \ 연도	'06	'08	'10	'12	'15	'17
양 주	354	355	354	358	355	359
신제천	362	362	362	360	359	359
아 산	355	353	354	353	353	354
신광주	353	353	354	353	353	353
서대구	355	356	356	354	354	355
북부산	356	356	355	356	357	357

OPF에 의해 제공되는 중요한 정보 중 하나는 제약변수에 대한 목적함수의 민감도이다. 즉 조상설비 비용 최소화 문제에서는 모선별 무효전력 변화에 대한 조상설비 비용의 민감도를 활용하여 어느 지역에 S.C가 설치되었을 때 가장 효과가 좋은가에 대한 직관력을 제공한다

것이다. 예를 들면 2011년 계통에 대해 민감도를 조사한 결과 표 3과 같이 나타났다. 해당연도의 모의결과를 보면 여수지역에 300MVA, 신인천지역에 150MVA, 신은양에 300MVA 정도로 다른지역보다 많은 조상설비가 설치된 것으로 나타났다.

표 3 2011년 모선별 무효전력 민감도

모선명	전압레벨(kV)	민감도(λ)
여수T/P	345	-113.0
신인천	345	-110.6
신은양	345	-105.4
신은산	345	-103.8
신수원	345	-102.8
서 창	154	-96.7
방어진	154	-96.7
⋮	⋮	⋮

### 3.3 OPF와 일반조류계산의 결과 비교

OPF를 활용한 조상설비 계획결과의 타당성을 검증하기 위하여 2005년 5월에 전력거래소에서 발표된 중장기 전력계통 운영계획[3]의 조상설비 계획과 비교하였다. 표 4에 OPF와 일반조류계산에 의한 소요량을 비교하였다.

표 4 조상설비 소요량 결과비교 [MVA]

연도 \ 방법	'06	'08	'10	'12	'15	'17
OPF	17010	18640	18980	19690	22380	23770
조류계산	17280	18810	19290	19880	22530	24200
차 이	-270	-170	-310	-190	-150	-430

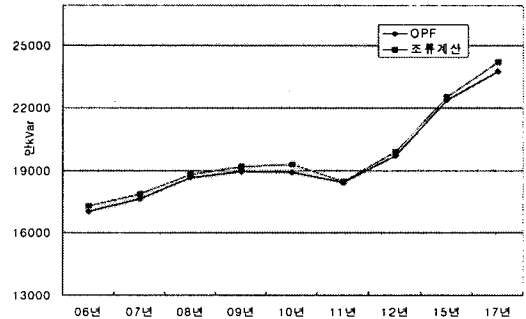


그림 2 OPF와 조류계산간 결과비교

그림 2를 보면 두 방식 모두 비슷한 추세를 보이고 있지만 OPF 방식에 의한 조상설비가 조류계산방식보다 150~430MVA 정도 적게 소요되는 최적의 결과를 얻었음을 알 수 있다. 표 5는 각각 방식에 대한 대표모선 전압의 차이를 나타낸다.

표 5 연도별 345kV 대표모선 전압 [kV]

모선	'06			'12		
	OPF	조류계산	차 이	OPF	조류계산	차 이
양 주	354	354	0	358	355	+3
신제천	362	362	0	360	359	+1
아 산	355	355	0	353	353	0
신광주	353	354	-1	353	355	-2
서대구	355	356	-1	354	354	0
북부산	356	356	0	356	354	+2

표 5을 살펴보면 OPF 방식과 조류계산 방식 사이의 전압차이는 -2~+3kV 정도로 정격범위를 유지한다.

이상의 결과로부터 OPF 방식은 조류계산 방식보다 적은 조상설비를 가지고 조류계산방식과 거의 비슷한 전압범위를 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 수많은 후보방안 가운데 최적 방안을 수학적으로 빠르게 찾으므로 업무 효율성을 높일 수 있었으며, 모선별 무효전력 민감도를 제공하여 검토자에게 설치위치에 관한 계통특성을 제시한다. 그러나 OPF 결과를 실제계에 적용하기 위해서는 설치공간이 확보된 변전소를 파악하고, S.C.투입블록 단위로 설치량을 조정하는 등 검토자에 의한 세부 조정 과정이 병행되어야 한다.

### 3.4 무효전력 수급분석

본 절에서는 앞에서 제시한 OPF에 의한 조상설비 검토결과를 토대로 우리나라 중장기 전력계통의 지역별 무효전력 수급을 분석하였다.

표 6 지역별 무효전력 수급상황 [MVar]

지역	년도	'06	'08	'10	'15	'17
		수	운전출력 <sup>1)</sup>	15640	17150	17960
도	소 비 <sup>2)</sup>	15400	16600	17500	19790	20540
권	지역간 흐름	+240	+550	+460	+1020	+1180
영동권	운전출력	5080	4890	5140	6410	648
	소 비	4500	4410	4540	6380	637
	지역간 흐름	+580	+480	+600	+30	+110
중부권	운전출력	5930	7000	7320	7400	754
	소 비	6280	7600	7900	8070	837
	지역간 흐름	-350	-600	-580	-670	-830
호남권	운전출력	5460	5780	6060	6630	6840
	소 비	5960	6180	6430	6750	6970
	지역간 흐름	-500	-400	-370	-120	-130
영남권	운전출력	13220	14140	14600	17150	17430
	소 비	13190	14170	14710	17410	17760
	지역간 흐름	+30	-30	-110	-260	-330
합계	운전출력	45330	48960	51080	58400	60010
	소 비	45330	48960	51080	58400	60010

1) 운전출력은 발전기, 조상설비, 충전용량 출력의 합

2) 소비는 부하와 손실의 합

수도권지역은 지중송전선로에 의한 충전용량이 다른 지역보다 많아 소비원보다 운전출력이 많으며, 이 현상은 2012년 이후 점차 증가하는 것으로 나타났다. 영동권지역은 송전망의 충전용량, 조상설비 등이 무효전력 손실보다 커서 운전출력이 소비원보다 많다가, 2015년 이후 울진원자력 후속기(7.8호기)병입으로 손실이 증가하여 운전출력과 소비가 균형을 이룬다. 중부권지역은 발전기 공급원은 많으나 수도권으로 용통전력을 송전하면서 발생하는 선로 손실량이 크기 때문에 지역 전체적으로 무효전력 소비가 운전출력보다 많으며, 이 현상은 2012년 이후 심화된다. 호남권지역은 영광원자력 발전용통 손실에 따라 중기적으로 소비원이 공급원보다 많으나, 2011년 이후 장기적으로는 조상설비의 확충으로 수급에 균형을 이룬다. 영남권지역은 무효전력 공급, 소비가 균형을 이루나 2011년 이후 월성원전, 신고리원전 후속기 병입에 따라 송전선로 손실의 증가로 공급원보다 소비원이 증가한다.

조상설비는 2017년까지 지속적으로 증가하는 추세이나, 특기할 만한 사항으로 2011년에는 조상설비가 전년과 대비하여 약 800MVar 줄어드는 현상이 발생하였다. 이는 당해에 765kV 선로가압 등으로 충전용량이 크게 증가하기 때문이다. 표7에 '10-'12의 충전용량을 비교하였다. 11년을 보면 10년대비 2340MVar 나 증가하였다.

표 7 '10, '11 및 '12 충전용량 증감비교 [MVar]

년 도		전 압 레 벨			
		765kV	345kV	154kV	합계
'10	충전용량	2170	9660	7850	19680
	'09대비 증감	(+10)	(+290)	(+210)	(+510)
'11	충전용량	2800	10410	8810	22020
	'10대비 증감	(+630)	(+750)	(+960)	(+2340)
'12	충전용량	2810	10530	8810	22020
	'11대비 증감	(+10)	(+120)	(+0)	(+130)

따라서 안정적인 전압유지를 위해서는 지속적으로 적정 조상설비를 확보하는 것이 중요하다. 즉 최종년도 필요량을 감안하여 매년 일정량을 증설하여 필요량을 미리 확보하는 것이다. 예를 들어 최종년도 소요량을 맞추기 위해 년평균 증설량을 계산하면 다음과 같다.

$$\text{평균증설량} = (\text{최종소요량} - \text{기설치량}) / \text{계획년수}$$

$$730\text{MVar} \approx (24200 - 14690) / 13\text{년}$$

## 4. 결 론

본 논문에서는 중장기 전력계통 검토시 OPF 활용 방안에 대하여 연구하였다. 특히 조상설비 소요량 계산과 같이 다수의 방안이 존재하는 경우 OPF를 이용하여 최적 방안을 빠르고 정확하게 구할 수 있었다. 기존 조류계산에 의한 결과와 비교하였을 때 보다 적은 소요량으로 동일한 전압을 유지함을 확인하였고, 비슷한 추세의 결과를 얻어 OPF결과의 타당성을 검증하였다. 또한 OPF는 모선별 무효전력 민감도를 제공하기 때문에 검토자에게 조상설비 설치 위치에 관한 계통특성을 파악하는데 도움을 준다. 그러나 OPF결과 적용에 있어서 실제 변전소의 조상설비설치 공간확보여부, 설비블록단위로 투입량 미세 조정과 같은 검토자의 세부검토가 병행되어야 할 사항이다. 계통검토시 OPF 방식과 조류계산 방식에 의한 수급을 병행한다면 상호보완적 기능과 검증기능으로 보다 정확하고 효율적인 계통검토가 가능할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, "제2차 전력수급기본계획(2004~2017)", 산업자원부 공고 제2004-285호, 2004년 12월
- [2] 산업자원부, "전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준", 산업자원부고시 제2005-11호, 2005년 1월
- [3] 한국전력거래소 전력계획처 계통계획팀, "중장기('06-'17) 전력계통 운영계획", 2005년 5월
- [4] 한국전력공사 송변전사업본부 계통계획실, "장기 송변전설비계획(2004~2017)", 2005년 3월
- [5] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley&Sons, 1996
- [6] J.A. Momoh, et al., "Challenges to Optimal Power flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.1, Feb, 1997, pp444-454
- [7] S.K. Chang, et al., "Optimal real-time Voltage Control", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.5, No.3, Aug, 1990, pp750-758
- [8] PTI, PSS/E Ver.29 Manual