

# 전력산업 구조개편 환경 하에서 무효전력 보조서비스 운용을 위한 최적조류계산법 개발

論 文

51A-1-6

## Development of Optimal Power Flow for the Ancillary Service of Reactive Power Generation under Restructuring Environment

李昇烈\* · 李炳峻\*\* · 宋太庸\*\*\* · 鄭珉和<sup>§</sup> · 文英煥<sup>§§</sup>

(Seung-Ryul Lee · Byongjun Lee · Tae-Yong Song · Min-Hwa Jeong · Young-Hwan Moon)

**Abstract** - This Paper suggests reasonable pricing method for Reactive Power in Optimal Power Flow for the system analysis. Under restructuring, not only real power pricing but also reactive power pricing is important for the system analysis and operation. If people just focus on real power pricing, the Generators may not generate reactive power voluntarily, because the Generators may not recover the cost of the reactive power generation. So making a reasonable reactive power pricing is becoming more important than any other time. In this paper, the authors set a proper power factor and price the portion of the reactive power that exceeds the power factor using Interior Point Method. By applying this method, the System operator can use this strategy for the analysis of reactive power generation pricing and the Generator can get the motivation to generate reactive power. The author develops fully optimized fast Primal Dual Interior Point Method with sparsity technique and applies this method to Reliability Test System (RTS24) and KEPCO 684 bus system (684 buses, 1279 lines). It shows adaptability and usefulness.

**Key Words** : Ancillary service, Interior point method, KEPCO system, Reactive power pricing, Optimal power flow

### 1. 서 론

최근 전력산업 구조개편으로 독점으로 운영되었던 전력산업이 발전경쟁체제로 변하게 되었고 이로 인해 기존 전력사업자가 자체적으로 운용할 수 있었던 주파수제어, 예비력 운용, 전압·무효전력제어와 같은 보조적 운용요소들이 분할된 발전사업자에 의해 공급되어야 하는 보조서비스 (Ancillary Service)로 변하게 되었다[1]~[4]. 한편, 향후 전력산업 구조개편은 보다 높은 효율성 및 경쟁력 제고를 위해 도매경쟁형을 거쳐 소매경쟁형 체제로의 단계적 추진이 가속화될 것이고 동시에 완전한 민영화에 의한 독립발전사업자의 경쟁체제가 확립될 것으로 기대된다[5]. 이러한 향후의 전력산업 발전방향을 고려할 때, 보조서비스로서 무효전력에 대해 적절하고 합리적인 가격보상체계가 만들어지지 않는다면, 많은 발전사업자들이 무효전력을 가능한 한 자발적으로 생산하지 않으려는 경향이 고조될 것이며 이로 인해 전력계통의 안정 운용 측면에서 부정적 영향이 초래될 가능성도 배제할 수 없는 상황이라고 생각된다. 따라서, 급변해 나갈 것으로 예상되는

전력계통의 안정 운용 목적을 계속해서 달성해 나가기 위해서는 이러한 무효전력 보조서비스의 영향을 경제적 측면에서 분석해서 공정·투명한 가격체계 이론을 도출해 낼 수 있는 계통해석법의 연구가 조기에 필요한 실정이라 할 수 있다. 따라서 이러한 연구를 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 최적조류계산에 적용하였다.

본 연구의 개념은 발전단에 사전 설계된 규약 역률을 부과하고 그 역률 내의 무효전력 출력은 발전사업자가 의무적으로 공급하도록 하고 그 역률을 넘어서는 무효전력 출력에 대해서만 인센티브로서 가격을 보상하는 것이다. 본 연구에서는 발전기 무효전력 출력에 대한 합리적인 가격설정 개념을 제시하기 위해 발전기의 역률을 고려한 무효전력의 보조서비스 운용을 가상하고 이를 최적조류계산 문제[7]~[10]에 근사적으로 적용하여 계통해석을 수행하였다. 따라서, 무효전력과 같은 보조서비스의 가격 요소를 경제적 관점의 최적화 논리에 의해 해석하기 위해 본 연구에서는 실규모 계통으로의 적용에 있어 계산속도 및 수렴성 등에서 가장 실용적 결과를 보이고 있는 비선형 주·쌍대내점법(primal-dual interior point Method)의 해법[11]~[15]에 적용하여 무효전력 보조서비스를 고려한 최적조류계산 문제를 연구하였다.

본 논문에서는 제 2 장에서는 다양한 최적화 기법 중 본 논문에서 사용할 비선형 내점법에 대하여 자세히 알아보고 그 내점법의 정식화와 알고리즘에 대해 조사하였다. 제 3 장에서는 본 논문의 핵심이랄 수 있는 무효전력 가격산정 방법에 대해 규약 역률에 대해 그 해석 모델과 정식화에 대해 다루었다. 제 4 장의 사례연구에서는 제 3 장에서 제안한 가격산정 방법을 IEEE 신뢰도 시험계통(RTS 24)과 1997년도 한전 실계통(684 모선, 1279 선로)에 적용하여 그 유용성

\* 正 會 員 : 高麗大 電氣工學科 · 博士課程

\*\* 正 會 員 : 高麗大 電氣工學科 副教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 韓國電力去來所 研究員

§ 正 會 員 : 産業資源部 技術標準員 研究官

§§ 正 會 員 : 韓國電氣研究所 研究員

接受日字 : 2001年 10月 19日

最終完了 : 2001年 11月 29日

과 적용 가능성을 보였다. 마지막으로 제 5 장 결론 부분에서는 본 연구를 얻어진 결과를 요약하였고 향후 연구과제에 대하여 언급하였다.

**2. 비선형 내점법을 사용한 최적조류계산**

**2.1 최적조류계산 문제**

최적조류계산(OPF) 문제는 전력계통의 해석문제에서 최적의 계통상태를 결정하도록 운전제약을 만족시키면서 목적함수를 최소화하는 해를 구하는 문제이다. 이와 같이, 계통해석을 위해 비선형 최적조류계산 문제를 정식화하면, 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && F(x) \\ & \text{subject to} && G(x)=0 \\ & && h^{\min} \leq H(x) \leq h^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x$  : 변수의 벡터 ( $x \in R^m$ )

$F(x)$  : 목적함수

$G(x)$  : 등식제약 ( $n$ 개)

$H(x)$  : 부등식 제약 ( $r$ 개)

$\bar{h}, \underline{h}$  : 부등식 제약에 대한 상하한 제약

등식제약  $G(x)$ 는 유효 및 무효전력의 조류방정식이며 부등호 제약  $H(x)$ 는 계통의 각종 운전제약으로서 발전기 유효·무효 출력제약, 선로제약, 모선 전압제약, 무효전력보상기 제약 등이다.

**2.2 비선형 주·쌍대 내점법**

본문 비선형 주·쌍대 내점법은 부등식 제약의 취급에 다소 약점이 있는 Newton법에 기반하며 Barrier법을 도입하여 부등식 제약을 효과적으로 다룰 수 있게 한 비선형 최적화 기법이다[6]. 우선, 슬랙변수 벡터( $l, u$ ) $\in R^{(r)}$ 를 각각 하한의 부등식, 상한의 부등식에 넣어 부등식제약을 등식제약으로 변환한 뒤 Barrier 파라미터를 도입하여 최적조류계산 문제 식(1)을 다시 구성하면, 다음 식(2)와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && F(x) - \mu \sum \ln l - \mu \sum \ln u \\ & \text{subject to} && G(x)=0 \\ & && H(x) - h^{\min} - l = 0 \\ & && H(x) - h^{\max} + u = 0 \\ & && (l, u) \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\mu$  :  $\mu > 0$ 으로 내점법의 Barrier 파라미터

배리어 파라미터  $\mu$ 는 어떤 변수도 그 다면체의 경계(제약값)값에 도달하지 않도록 조정하는 역할을 하게 되며 최종적으로 비선형 내점법에서는  $\mu$ 가 0에 접근하면서 최적 해를 얻게 된다.

이러한 최적화 문제에 대해 라그랑지 미정승수법을 적용하면, 다음 식(3)과 같이 확대 라그랑지 함수  $L$ 이 얻어진다.

$$\begin{aligned} L(x, l, u, \lambda, z, w) = & F(x) - \mu \sum \ln l - \mu \sum \ln u \\ & - \lambda^T G(x) - z^T (H(x) - h^{\min} - l) - w^T (H(x) - h^{\max} + u) \\ & \lambda \in R^{(n)}, \quad (z, w) \in R^{(r)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda, z, w$  : 라그랑지 승수벡터

위식의  $x, l, u$ 와 라그랑지 승수벡터의 합성벡터를  $p=(x, l, u, \lambda, z, w)$ 라 하면, 최적화 문제는 라그랑지 함수  $L(p)$ 을 최소화하는  $p$ 를 찾는 것이 된다. 여기서,  $p^*$ 를 최적점이라고 가정하면, 쿤터커 정리로부터 다음 식(4)와 같은 식이 성립된다.

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial p} = 0 \quad (4)$$

식(4)에 대해 Newton법을 적용하면 즉, 반복해  $p^k$ 가 최적해  $p^*$ 의 근방에 있다고 가정하고 테일러 전개 1차까지의 근사를 수행하면 다음 식(5)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial L(p^k)}{\partial p} + \frac{\partial^2 L(p^k)}{\partial^2 p} \cdot \Delta p^k = 0 \quad (5)$$

식(5)의 Newton수정량  $\Delta p^k$ 를 풀고 반복과정을 수행하면 최적해를 얻게 된다.

결국, 쿤-터커 조건식에 의해, 최종적으로 다음 식(6)과 같이 요약할 수 있는 수정량이  $x$ 와  $\lambda$ 만으로 축약된 수정방정식이 얻어지게 된다.

$$\begin{bmatrix} H & J^T \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \psi(p, \mu) \\ G(x) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, 행렬요소  $H$ 는 식(6)과 같이 표현한 수정방정식의 헤시안 요소이며  $J$ 는 자코비안 요소이고  $\psi(p, \mu)$ 는 우변항을 벡터로 표현한 것이다. 이와 같이 구해진 수정방정식을  $\Delta x$ 와  $\Delta \lambda$ 에 대해 풀고 구해진  $\Delta x$ 와  $\Delta \lambda$ 를 이용하여 순차적으로  $\Delta l, \Delta u, \Delta z, \Delta w$ 를 얻어서 모든 변수의 수정량을 계산할 수 있다. 이와 같은 내점법의 계산과정은 크게 초기치 설정, 상보갭(complementary gap) 계산, 수렴판정, 배리어 파라미터 계산, 수정방정식 계산, 변수 최대스텝길이 계산, 변수 수정 등의 단계로 구성된다.

**3. 무효전력의 보조서비스에 관한 해석**

**3.1 무효전력 보조서비스의 해석**

발전기에서의 무효전력공급은 유효전력과 달리 가격보상이란 관점보다는 계통의 전압조정과 관련하여 관심의 대상이 되어 왔다. 그러나, 전력산업 구조개편의 지속적 전개에 따라 발전기무효전력출력[16]~[18]은 다음과 같은 논리에 의해 향후 대표적 보조 서비스의 형태로 그 중요성이 부각될 것으로 전망되고 있다.

○ 민영화 된 독립발전소로서는 유효전력과 달리 판매의 개념이 적은 무효전력은 출력하고 싶지 않을 것이다.

- 특히, 부하집중지역의 고가발전기는 연료비 특성 상 유효전력 출력은 대체로 적게 내지만, 계통의 무효전력 수급 면에서 중추적 역할을 하고 있으므로 다양한 보조서비스 보상원리의 도입을 희망할 것이다.
- 반대로, 소비자 측면에서는 발전소로부터 생산되는 무효전력에 특별히 비용을 지불하고 싶지 않을 것이다.
- 따라서, 이러한 괴리를 합리적으로 좁히기 위해서는 보조서비스의 보상체계를 공정·투명하게 설계해야 하고 이를 위해 계통의 최적성 원리에 기반하여 충분한 계통해석방안이 마련되는 것이 유용할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 효과적인 계통해석을 위해 보조서비스를 고려한 최적조류계산법을 제시하고자 한다. 그 개념을 도입하기 위한 방안으로서 발전단 계통으로 어떤 규약 역률을 정하여 그 역률 내의 무효전력에 대해서는 추가적 보상 없이 의무적으로 무효전력을 발전할 수 있도록 하고 그 역률을 넘어서는 무효전력에 대해서만 보조서비스로서 일정가격을 근사적으로 보상하는 방안을 검토하였다. 본 논문에서는 이를 최적조류계산에서 근사적으로 고려할 수 있도록 하는 정식화를 수행해서 그 개념을 보인 결과를 제시하기로 한다.

### 3.2 규약 역률 적용 모델

이러한 발전기 용량 곡선에 규약 역률을 적용하는데는 다양한 방법이 존재할 것이다[20]. 따라서 본 논문에서는 [20]에서 제안하는 발전기 용량 곡선에 규약 역률을 부과하는 대표적인 방법인 Vertical Line 형과 본 논문에서 제안한 Modified Wedge 형에 대하여 각각의 장점과 단점에 대해 설명하도록 한다.

#### 3.2.1 Vertical Line 형

이 방식은 유효전력의 최대 발전량에 대해 규약 역률을 적용하여 일정한 의무 무효전력량을 구하여 모든 운전점에 적용하는 방식이다.

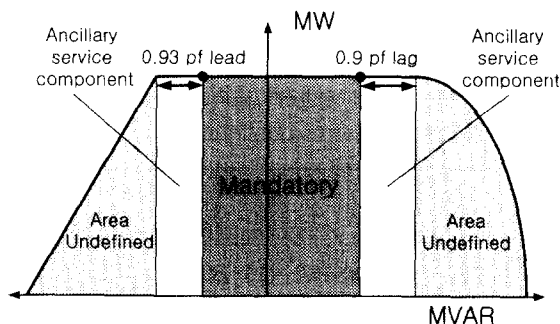


그림 1 Vertical Line 형  
Fig. 1 Vertical line type

이 방식은 모든 운전점에 대해 의무 무효전력량이 일정하므로 적용하기 쉽고 비정의 영역을 어느 정도 줄일 수 있으므로 계통을 비교적 안정하게 운용할 수 있다. 하지만 발전

사업자들, 특히 부하지역에 위치하여 유효전력을 적게 출력하고 무효전력을 많이 출력해야하는 발전 사업자들은 이러한 모델에 반대할 것이다.

#### 3.2.2 Modified Wedge 형

본 논문에서 제안한 이 방식은 Wedge형과 Vertical형을 조합한 방식이다. Vertical 방식과 같이 비정의 영역을 줄임으로써 계통의 불확실한 영역을 줄일 수 있으며 Wedge 방식에서와 같이 적은 유효전력을 출력하는 발전 사업자들도 규약 역률을 넘어서는 무효전력에 대해 보상을 받을 수 있다.

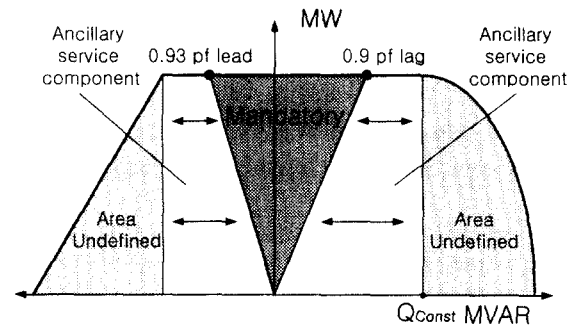


그림 2 Modified Wedge 형  
Fig. 2 Modified wedge type

이 방식은 무효전력을 계약할 때 일정량을 계약하기보다는 최대 발전할 수 있는  $Q_{const}$ 를 정하여 무효전력 발전량에 따라 보상을 하는 방법이다. 그리고 보상의 정도는 무효전력 가격곡선으로 그 정도를 조절할 수 있다.

### 3.3 무효전력 보조서비스 가격산정의 정식화

무효전력 가격산정 시 그림 3과 같이 의무 무효전력 발전 영역과 보조 서비스 영역으로 나눌 수 있다. 따라서 운전점  $P_{Gi}$ 가 정해진다면  $Q_{G0}$ 를 중심으로 무효전력발전 의무 영역과 보조서비스 영역으로 나누어진다.

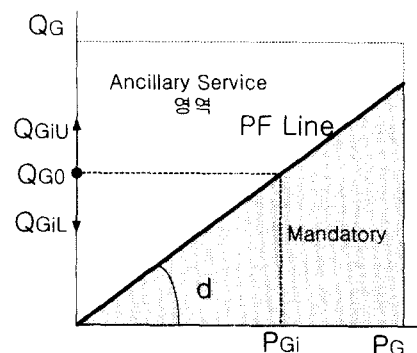


그림 3 보조서비스 영역과 의무 영역  
Fig. 3 Mandatory area and ancillary service area

이때 그림 3의  $P_{Gi}$  운전점에서 규약 역률을 초과하는 무효전력  $Q_{GiL}$ 에 대해서는 가격을 부과하고 규약 역률 내의 무효

전력  $Q_{GiL}$ 에 대해서는 의무 무효전력으로 생각하여 가격을 부과하지 않는 것이다. 이러한 방법으로 그림 4에서  $L_1$ 과 같은 가격 곡선을 구할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 내점법을 사용하였기 때문에 모든점에서 미분 가능해야 하나,  $Q_{G0}$ 점에서 미분 불가능하므로 자코비안과 헤시안을 구할 수 없게 된다.

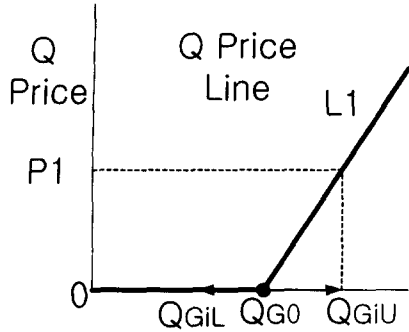


그림 4 규약 역률을 적용한 무효전력 가격곡선  
Fig. 4 Reactive power price curve applying power factor code

따라서 본 논문에서는 그림 5의 곡선  $L_2$ 와 같이 지수 함수를 사용하여 근사화 하였다. 만약 발전기  $i$ 가  $Q_{GiU}$ 를 발전하면 이때의 무효전력 가격은  $P_1$ 이 되고  $Q_{GiL}$ 를 발전하면 의무 규약 무효전력량 내에 있기 때문에 가격은 0에 가까운  $E_r$ 가 된다.

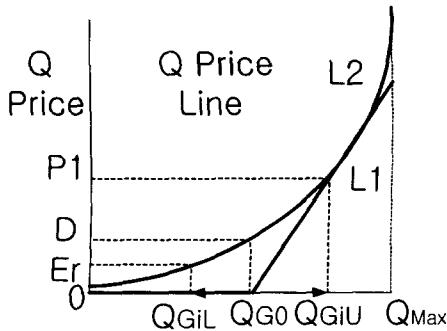


그림 5 무효전력 가격 곡선 근사화  
Fig. 5 Approximation of reactive power price curve

본 논문에서는  $L_2$ 와 같은 지수함수를 식 (7)과 같이 정식화하여 최적조류계산에 적용하였다.

$$\begin{aligned} \text{Cost}(Q_{Gi}) &= D \cdot \exp(E \cdot (Q_G - F \cdot Q_{G0})) \\ &= D \cdot \exp[E \cdot (Q_{Gi} - F \cdot P_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1} \text{pf}))] \end{aligned} \quad (7)$$

즉 식(7)과 같이  $D, E, F$  파라미터를 조절하여 적절한 근사함수를 얻고 최적조류계산 해법에 이를 적용하여 무효전력 보조서비스를 근사적으로 고려하는 계통해석의 개념을 보이고자 한다.

이러한 가격 곡선에 사용된 각 파라미터  $D, E, F$ 에 대해 간단히 설명하면 먼저 식 (7)의 비용곡선에서 파라미터  $D$ 는  $Q_{G0}$ 에서 가격이 부과되기 시작할 때의 초기값을 결정한다. 다음으로 파라미터  $E$ 는 곡선의 기울기의 정도를 조절한다. 마지막으로 파라미터  $F$ 는 곡선 전체를  $Q_G$  축에 대해 이동하게 한다. 따라서 체계적인 계통해석을 통해 이들 파라

미터를 유동적으로 조정하여, 보조서비스로서의 무효전력에 대한 적절한 가격함수를 얻을 수 있다고 생각된다. 이와 같이 무효전력이 보조서비스로서 가격보상을 고려하게 된다면, 부하집중지역에 위치하여 유효전력보다 무효전력을 많이 공급하게 되는 발전사업자 입장에서는 무효전력 발전에 대한 동기부여를 받을 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 사례연구

##### 4.1 IEEE 신뢰도 시험계통

IEEE 신뢰도 시험계통(RTS 24bus)[19]은 10개의 발전기 모선으로 총 3,405MW의 설비용량을 가지고 있으며 최대부하는 2,850MW이다. 이 계통의 특징은 발전단 계통과 부하단 계통으로 크게 구분되며 최대부하 기준단면에서 발전단 계통은 발전설비용량 2,721MW, 부하 1,518MW이며 부하단 계통은 발전설비용량 684MW, 부하용량 1,332MW이다. 발전기 모선별 발전용량 및 연료비 특성은 다음 표 1과 같이 정리하였다. 부하단 계통의 발전기(bus 1, 2, 7)는 고가의 연료비 계수를 부과하였고 부하단 계통은 RTS 계통의 기종별 특성에 준용하여 저가의 연료비 계수를 부과하였다. 이 연료비 계수는 발전기 종별에 대한 상대적인 연료비 계수의 의미를 갖도록 1차식으로 구성한 것이다. 여기서, bus 22는 수력발전소로서 운용특성을 고려하여 출력을 용량의 70%로 고정하였다.

표 1 발전기 모선별 유효전력출력제한 및 연료비계수  
Table 1 Active power output limits and cost coefficients

유효 전력	모선 1	모선 2	모선 7	모선 13	모선 15	모선 16	모선 18	모선 21	모선 22	모선 23
$P_G$ 상한 [MW]	192	192	300	591	215	155	400	400	300	660
연료비 계수	55.0	55.0	40.0	35.0	16.0	14.0	5.0	5.0	0	14.0

발전기무효전력 출력은 본 연구에서 지수함수를 도입하였기 때문에 최대도 무효전력을 발전하더라도 유효전력 비용의 10%를 넘지 않도록 표 2와 같이 무효전력출력에 가상적으로 가격계수를 부과하였다.

표 2 발전기 모선별 무효전력출력제한 및 가격화 계수  
Table 2 Reactive power output limits and cost coefficients

무효 전력	모선 1	모선 2	모선 7	모선 13	모선 15	모선 16	모선 18	모선 21	모선 22	모선 23
$Q_G$ 상한 [MVar]	80	80	180	240	110	80	200	200	160	310
$D$	0.4	0.4	0.5	0.35	0.15	0.14	0.1	0.1	0.0	0.18
$E$	4.8	4.8	2.5	3.0	3.5	3.5	2.2	2.2	0.0	2.6
$F$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0

##### 4.1.1 무효전력의 보조서비스를 고려한 OPF의 결과

먼저 무효전력 가격산정을 하지 않고 유효전력만을 고려하

여 최적조류계산을 수행한 결과는 다음 표 3과 같다. 표 3에서 보이듯이 유효전력만을 고려했을 경우 표 1의 연료비 계수 때문에 싼 발전기들이 상한을 발전하고 비싼 발전기들은 하한을 발전하는 Merit Order의 결과(모선7이 한계발전기)를 얻었으며, 이때 무효전력들은 가격이 없기 때문에 계통의 최적값을 구성하도록 상하한 내에서 자유롭게 발전되고 있음을 확인할 수 있다.

표 3 유효전력 연료비 최소화 최적조류계산  
Table 3 Result of active power cost minimization

모선번호	유효전력 (MW)	무효전력 (MVar)	유효전력 최대출력(MW)	유효전력 가격
1	62.4	79.92	192.0	3,432
2	62.4	54.25	192.0	3,432
7	158.2	93.27	300.0	6,327
13	591.0	212.90	591.0	20,685
15	215.0	110.0	215.0	3,440
16	155.0	80.0	155.0	2,170
18	400.0	94.10	400.0	2,000
21	400.0	17.62	400.0	2,000
22	210.0	-30.71	210.0	0
23	660.0	56.12	660.0	9,240
총합	2,913.98	767.46	3,405.0	52,726

다음으로 유효전력뿐만 아니라 무효전력의 가격도 고려할 경우 표 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 표 4에서 살펴보면 먼저 무효전력 가격산정을 하지 않은 경우와 비교해 보면 7번과 13번 발전기의 유효전력 발전량이 변한 것을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서 제시한 무효전력 보조서비스 개념으로 계통의 여러 운전 제약을 동시에 만족하는 최적 운전점을 고려하였을 때, 계통의 종합적 경제성 측면에서 유효전력의 출력배분이 변경되어야 함을 나타낸다. 그리고 무효전력 보조서비스를 최적조류계산법에 기반해서 고려하게 될 경우, 부하단 계통의 발전기들이 발전단 계통의 발전기들과 비교하여 대체적으로 많은 무효전력 보상을 받게 됨을 알 수 있다. 그 결과 계통의 무효전력 공급 면에서 상대적으로 유효한 부하집중 지역의 발전사업자들이 유효전력뿐만 아니라, 무효전력에 대해서도 적절한 보상을 받을 수 있게 된다.

표 4 무효전력 보조서비스를 추가한 경우

Table 4 Result with reactive ancillary service cost

모선번호	유효전력 (MW)	무효전력 (MVar)	의무발전력 무효전력	유효전력 가격	무효전력 가격	Pg/Qg 가격비
1	62.4	64.74	30.22	3,432	209.714	6.11 %
2	62.4	63.25	30.22	3,432	195.259	5.69 %
7	191.9	86.56	92.94	7,675.72	42.631	0.50 %
13	553.7	201.68	268.18	19,380.21	4.760	0.025 %
15	215.0	110.0	104.13	3,440	18.422	0.535 %
16	155.0	80.0	75.07	2,170	16.637	0.766 %
18	400.0	92.5	193.73	2,000	1.078	0.054 %
21	400.0	14.59	193.73	2,000	0.194	0.01 %
22	210.0	-30.92	101.71	0.0	0.0	
23	660.0	51.4	319.65	9,240	0.017	0.0 %
총합	2,910.41	733.80	1409.58	52,769.93	488.713	0.926 %

상기 결과는 수도권 지역의 독립발전회사들이 시장참여로의 충분한 merit를 가질 수 있도록 하는 다양한 요소 중에서 무효전력 보조서비스에 관한 개념을 단편적으로 보인 것이다.

4.1.2 규약역률의 설정변경에 의한 OPF의 결과

계통의 규약 역률이 변하게 되면, 그에 따라 의무적으로 발전할 수 있는 의무 무효전력 출력량도 변하게 된다. 즉, 표 5에서 보인 것과 같이 규약 역률이 0.85에서 0.95까지 0.25씩 증가하였을 때, 유효전력에 대한 무효전력의 가격 비를 계통전체, 발전단 계통의 모선 15 발전기, 부하단 계통의 모선 1 발전기에 대해 각각 계산하였다.

표 5에서 요약한 것과 같이 계통의 의무 규약 역률을 어떻게 부과하느냐에 따라 무효전력 발전 비용이 차이가 나며 특히, 부하단의 경우 무효전력 발전 비용이 발전단에 비해 매우 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

표 5 규약 역률 변화에 따른 무효전력 가격의 변화

Table 5 Change of reactive power price with respect to change of power factor code

규약 역률	총 Pg 발전 가격	총 Qg 가격 (Qg/Pg %)	1번 발전기 Qg가격 (Qg/Pg %)	15번 발전기 Qg가격 (Qg/Pg %)
0.850	52751.58	322.45 (0.61%)	144.35 (4.21%)	6.65 (0.19%)
0.875	52759.74	393.78 (0.75%)	173.43 (5.05%)	10.96 (0.32%)
0.900	52769.92	488.71 (0.93%)	209.71 (6.11%)	18.42 (0.54%)
0.925	52782.38	627.09 (1.19%)	256.97 (7.49%)	31.74 (0.92%)
0.950	52800.42	862.15 (1.63%)	326.97 (9.53%)	41.92 (1.22%)

따라서, 의무 규약 역률을 어떻게 정하느냐에 따라 계통의 무효전력 비용이 크게 변하게 되며 그 영향은 부하단 계통의 고가 연료비 특성의 발전기가 주로 영향을 받음을 확인할 수 있다. 그러므로, 무효전력 보조서비스에 관한 적절한 파라미터 및 역률 등을 설정해서 무효전력 보조서비스의 가격설정이나 운용전략 등을 합리적으로 수행해 나가기 위해서는 최적조류계산법과 같은 계통해석 도구를 효과적으로 응용해서 충분한 계통해석의 단계를 체계적으로 수행해야 할 것으로 생각된다.

4.1.3 규약 역률 모델에 따른 변화

다음으로 무효전력 가격 산정 시 규약 역률 모델에 따른 무효전력 가격 변화를 살펴보도록 하겠다. 앞서 소개한 Vertical Line형과 Modified Wedge형을 적용하여 규약 역률 모델에 따른 무효전력 가격 변화를 규약 역률의 변화(0.85~0.95)에 따라 RTS24 시험 계통에서 살펴보았다. 표 6에서 보듯 예를 들어 규약 역률이 0.9일 때 Modified Wedge형은 무효전력 가격이 488.71이고 Vertical Line형은 66.86으로 Modified Wedge형의 무효전력 가격이 높게 나왔다. 이는 앞장의 규약 역률 모델에서 설명하였듯이 Vertical Line형의 경우 의무 무효전력 발전량이 Modified Wedge형보다 높기 때문이다.

표 6에서 보듯 두 모델 중에서 발전 사업자들은 무효전력 가격이 높게 나오는 Modified Wedge형을, 계통 운영자는 무효전력 가격이 낮게 나오는 Vertical Line형을 선호하리라는 것을 알 수 있다. 따라서 현재 우리나라와 같이 무효전력 가격 산정에 어느 모델을 적용할지 확정되지 않은 경우 본 연구에서 개발한 OPF를 사용한다면 규약 역률 모델에 따른 영향을 연구하는데 도움이 될 것이다.

표 6 규약 역률에 따른 모델간 무효전력 가격 비교

Table 6 Comparison result of two models

규약 역률	Modified Wedge형			Vertical Line형		
	총Pg 가격	총Qg 가격	Qg/Pg 가격비	총Pg 가격	총Qg 가격	Qg/Pg 가격비
0.850	52,751.60	322.45	0.61%	52,726.30	27.00	0.05%
0.875	52,759.70	393.78	0.75%	52,728.08	42.89	0.08%
0.900	52,769.90	488.71	0.93%	52,734.20	66.86	0.13%
0.925	52,782.40	629.09	1.19%	52,737.16	123.05	0.23%
0.950	52,800.40	862.15	1.63%	52,751.91	250.46	0.47%

이와 같이 규약 역률을 적용하여 무효전력 발전 가격을 산정 할 때 규약 역률을 어떤 값으로 선정하고, 또 어떤 모델을 적용하느냐에 따라 그 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 앞으로 보조서비스로서 무효전력 가격을 산정 할 경우 이 두 가지의 영향을 미리 연구해야 할 것이며 이때 본 연구에서 개발된 OPF를 이용할 수 있을 것이다.

4.2 한전 실계통에 대한 사례 연구

한국전력의 1997년도 684 모선 1,279 선로의 시험 계통을 이용하여 사례연구를 수행하였다. 1997년 시험 계통은 148 개의 발전기로 구성되었으며 총 공급능력 35,390 MW, 총 부하 34,671 MW인 중부하를 기준으로 하였다.

이때 부하 34,671 MW는 1997년 최대부하의 98%로서 이 부하를 기준으로 70%, 80%, 90%, 100%의 부하 수준에서 각각 최적화를 수행하였다. 전압은 하한 0.9, 상한 1.1의 제약을 두었고 유·무효전력의 상·하한은 원 PSS/E OPF 자료를 그대로 사용하였다. 마지막으로 선로 조류제약은 이번 사례연구에서 편의상 추가하지 않았다. 본 사례연구는 Pentium III 450MHz 컴퓨터를 사용하였고 각 시뮬레이션별 CPU Time을 측정하였다.

4.2.1 실계통에서 PSS/E OPF와 비선형 내점법 비교

본 본문에서 사용한 비선형 내점법과 상업용 PSS/E OPF를 비교하여 다음 표 7와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 두 Tool의 비교를 위해 비선형 내점법에서 보조서비스 부분을 제거하여 시뮬레이션을 수행하였고 그때 각 부하 수준별 유효전력 발전량, 무효전력 발전량, 유효전력 발전가격(목적함수), 그리고 CPU Time을 각기 측정하였다. 이때 표 7에서 알 수 있듯이 모든 부하수준에서 총 유효전력 가격, 유효전력 발전량, 무효전력 발전량이 매우 유사한 것을 쉽게 알 수 있다. 또 비선형 내점법의 경우 PSS/E OPF에 비해 반

복횡수(Iteration)는 약간씩 더 많았으나 CPU Time은 두 OPF 사이에 큰 차이가 없었다. 따라서 본 사례연구에서 상업용 Tool인 PSS/E OPF와의 비교를 통해 본 논문에서 개발된 비선형 내점법을 이용한 OPF 프로그램이 실계통 적용 가능성이 나타낸 결과이다.

표 7 한전계통에서 PSS/E OPF와 비선형 내점법 비교

Table 7 Comparison of PSS/E OPF and the developed OPF

부하수준		70%	80%	90%	100%
PSS/E OPF	Pg발전량 MW	24,610	28,170	31,650	35,090
	Qg발전량 Mvar	1,682	4,636	6,563	7,891
	총Pg가격	412,733	470,330	591,609	746,681
	Time (Iter)	1.1 s (19)	1.2 s (20)	1.0 s (18)	1.1 s (19)
비선형 내점법	Pg발전량 MW	24,602	28,167	31,652	35,090
	Qg발전량 Mvar	1,668	4,705	6,810	7,947
	총Pg가격	410,591	465,604	588,964	746,643
	Time (Iter)	1.1 s (29)	0.89 s (21)	1.02 s (26)	1.36 s (37)

4.2.2 실계통에서 규약 역률 모델에 따른 비교

무효전력 보조서비스를 비선형 내점법에 추가하여 Modified Wedge형과 Vertical Line형 모델별 사례연구를 1997년 한전 실계통에서 수행하였다. 이때 규약 역률은 0.9로 선정하였고 실계통 적용 시 무효전력 가격곡선은 아직 무효전력 가격곡선에 대해 정해진 바 없기 때문에 시뮬레이션 시 모든 무효전력 발전에 대해 동일한 가격곡선을 사용하였다. 결과를 살펴보면 표 8에서 알 수 있듯이 무효전력 보조서비스를 추가하더라도 반복횟수와 CPU Time에는 큰 영향이 없었다. 또 유효전력 가격이 무효전력 발전 비용을 고려하지 않았을 때와 0.5%내로 거의 유사하였다.

표 8 한전 계통에서의 모델별 비교

Table 8 Comparison result of two models in KEPCO study

부하수준		70%	80%	90%	100%	90% (NoQc)
Pg연료비 최소화	Pg가격	410,591	465,604	588,964	746,643	—
	Time (Iter)	1.1s (29)	0.89s (21)	1.02s (26)	1.36s (37)	—
Modified Wedge형	Pg가격	411,100	467,578	593,124	746,918	591,593
	Qg가격	1,170	1,680	1,808	1,383	12,534
Vertical Line형	Time (Iter)	1.1s (25)	0.83s (19)	0.99s (24)	1.35s (36)	1.03s (26)
	Pg가격	410,633	465,692	589,151	746,913	590,739
Vertical Line형	Qg가격	435	545	794	1,304	6,371
	Time (Iter)	1.01s (25)	0.83s (19)	0.96s (23)	1.41s (38)	1.1s (28)

무효전력 발전 가격의 경우 두 모델을 비교했을 때 Modified Wedge형이 약간 높게 나왔으나 이는 각 모선에서 모든 무효전력 발전량이 의무 무효전력 발전량 내에 있었기 때문에 단지 Modified Wedge형이 Vertical Line형에 비해 무효전력 가격이 높게 산정될 수 있다는 것만을 나타낸다고 할 수 있다. 이렇듯 한전 계통은 무효전력 발전량에 있어 그 공급 능력이 여유 있게 운전되고 있음을 알 수 있다. 따라서 실계통에서 각 모델 별 영향을 좀 더 자세히 보일 수 있도록 90% 부하수준에서 임의로 계통의 Shunt Capacitor를 모두 제거하여 무효전력량이 부족하도록 만들어 규약 역할 모델별 무효전력 가격을 비교하여 보았다. 표 8의 최우측 열에서 보듯 역시 Modified Wedge형이 Vertical Line형에 비해 무효전력 가격이 높게 나왔으며 실계통에서도 무효전력 보조서비스에 대한 영향을 규약 역할 모델별로 살펴볼 수 있었다.

이와 같이 본 사례연구에서는 무효전력 보조서비스에 대한 실제 가격을 산정하기보다는 본 연구에서 개발된 최적조류계산을 사용하여 무효전력 보조서비스에 대한 규약 역할 모델에 따른 영향을 살펴볼 수 있었으며 이 최적조류계산(OPF)의 실계통 적용 가능성을 보여주었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 보조서비스로서 발전기 무효전력의 가격설계나 운용전략 등을 합리적으로 도출할 수 있는 근거를 제시하기 위하여 먼저 규약 역할을 지정하고, 다음으로 그 규약 역할을 초과하여 무효전력을 생산하는 발전기에게 초과한 양만큼의 무효전력에 대해서만 보조서비스로서 가격 산정 해주는 방법을 최적조류계산법에 적용하였다. 본 연구의 주요 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 발전기무효전력에 규약 역할의 개념을 제안하고 이를 최적조류계산법에 의해 무효전력 보조서비스의 영향을 검토하였다. 이와 같은 계통 전체의 경제적 최적출력배분을 해석하는 최적조류계산의 결과에 의해 무효전력 보조서비스를 고려했을 때 유효전력의 배분에도 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.
- 2) 이로부터, 계통의 무효전력 공급 면에서 상대적으로 유효한 부하집중지역의 고가 연료비 특성의 발전사업자들이 유효전력뿐만 아니라, 무효전력에 대해서도 적절한 보상논리를 적용 받을 수 있을 것으로 기대된다. 이는 독립발전회사들의 발전참여를 부하지역에서 촉진하는 역할을 하게 될 것이다.
- 3) 계통에 의무 규약 역할의 개념을 적용할 때, 그 역할 및 각종 가격화 파라미터의 설정, 또 규약 역할 적용 모델에 따라 비용 면에서 무효전력 보조서비스의 영향이 크기 때문에 최적조류계산을 기반으로 한 계통 해석을 통해 적절한 규약 역할 및 필요한 파라미터, 규약 역할 모델 등을 설계할 수 있을 것으로 기대된다.
- 4) 마지막으로 본 연구의 결과를 IEEE 신회도 시험계통과 한전 실계통에 적용하여 제안한 최적조류계산 기반의 계통해석법의 유용성을 검증하고 그 실계통으로의 적용 가능성을 보였다.

본 논문에서는 무효전력 가격곡선을 지수 함수로 근사화하여 이론을 전개해 나갔으나 향후 실제 곡선을 사용하여 보다 정확한 해석을 할 수 있도록 방법을 수정해 나가야 할 것이다. 또한 그럴 경우 합리적인 계통의 가격 산정을 위해 규약 역할을 어떻게 정할 것인가와 어떠한 규약 역할 모델을 적용할 것인가에 대해서도 보다 심도 깊은 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음. ( 과제번호 : E00143 )

### 참 고 문 헌

- [1] 송길영, "신편 전력계통공학", 동일출판사, 1998년
- [2] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Willy & Sons, Inc., 1996년
- [3] John J. Grainger, William D. Stevenson, JR. "Power System Analysis", McGRAW-HILL, 1994년
- [4] 한국전력 연구보고서, "폴/탁송 모형에서의 Ancillary 서비스 확보 및 송전선 혼잡 시 전력계통 운용방안에 관한 연구, 2001. 1
- [5] 김영창, "전력산업 구조개편 추진", 대한전기학회지, Vol. 49, No. 6호, 2000.6
- [6] 정민화, 이병준, 송길영, "비선형 주·쌍대내점법을 이용한 부하공급능력의 산정에 기반한 전력수송능력의 평가", 대한전기학회논문지-A, Vol. 49, No. 4. 2000. 4
- [7] H. W. Dommel and W. F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-87, October 1968
- [8] R. C. Burchett, H. H. Happ, D. R. Vierath and K. A. Wirgau, "Developments in Optimal Power Flow", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, February 1982
- [9] James A. Momoh, M. E. El-Hawary, Ramababu Adapa, "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part I: NonLinear and Quadratic Programming Approaches", IEEE Trans. on PS, Vol.14, No. 1 February 1999
- [10] James A. Momoh, M. E. El-Hawary, Ramababu Adapa, "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods", IEEE Trans. on PS, vol.14, No. 1 February 1999
- [11] L. S. Vargas, V. H. Quintana, and A. Vannelli, "A Tutorial Description of an Interior Point Method and Its Applications to Security-Constrained Economic Dispatch", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993
- [12] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994

- [13] Y.C. Wu, A. S. Debs, and R. E. Marsten, "A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3, August 1994
- [14] X. Yan and V. H. Quintana, "An Efficient Predictor-Corrector Interior Point Algorithm for Security Constrained Economic Dispatch", 96 SM 506-6 PWRS, IEEE/PES Summer Meeting, 1996
- [15] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, and R. Yokoyama, "An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998
- [16] Martin L. Baughman, Shams N. Siddiqi, "Real-Time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results", IEEE Trans. on PS, vol.6, No.1, Feb. 1991
- [17] A.A. El-Keib, X. Ma, "Calculating Short-Run Marginal Costs of Active and Reactive Power Production", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May 1997
- [18] N.H. Dandachi, et al., "OPF for Reactive Pricing Studies on the NGC System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, 1996
- [19] IEEE Committee Report, "IEEE Reliability Test System", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-98, No. 6, 1979
- [20] 호주 NEMMCO (<http://nemmco.com.au/>)

## 저 자 소 개



**이 승 열(李昇烈)**

1975년 9월 23일생. 1999년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학중.

Tel: (02) 3290-3697

E-mail: srlee@elec.korea.ac.kr



**정 민 화(鄭珉和)**

1965년 2월 22일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년~1992년 삼성전자 종합연구소근무. 1998년 10월 ~ 2000년 3월 일본 히로시마대 외국인연구생. 1999년 4월~2001년 3월 고려대 공학기술연구소 선임연구원. 2001년 4월~

현재 산업자원부 기술표준원 연구관.

Tel: (02) 509-7404

E-mail: mhjeong@ats.go.kr



**이 병 준(李炳峻)**

1961년 7월 16일 생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 미국 Iowa State Univ. 전기공학과 졸업(석사), 1994년 동 대학원 졸업(공학박). 1994년~1995년 Iowa State Univ. Post Doc. 1995년 ~1996년 일본 미쯔비시 전기 근무. 현재 고려대 전기·전자·전과공학부 부교수.

Tel : 02-3290-3242, Fax : 02-921-1325/0544

E-mail : leeb@elec.korea.ac.kr



**문 영 환(文英煥)**

1956년 5월 13일 생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 Univ. of Texas (Arlington) 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어 연구그룹장, 책임연구원. 관심분야 : 발전기/

제어계 모델링, HVDC 제어, EMS 프로그램 개발, 전력구조 개편, 실계통 AVR/PSS 정수 튜닝, 디지털 PSS 개발

Tel : 0551-280-1311, Fax : 055-280-1390

E-mail : yhmoon@keri.re.kr



**송 태 용(宋太庸)**

1972년 3월 15일생. 1999년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력거래소 연구원.

Tel: (02) 3456-6765

E-mail: popsong92@kpx.or.kr