

전력산업 구조개편 환경 하에서 무효전력 보조서비스 운용을 위한 최적조류계산법 개발

송태웅, 정민화, 이병준
고려대학교 전기공학과

남궁재웅, 문영환
한국 전기연구원

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

T.Y. Song, M.H. Jeong, B. Lee
Korea University

J.Y. Namgoong, Y.H. Moon
KERI

Abstract - Under restructuring, not only real power pricing but also reactive power pricing is important for the system operation. Especially, 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 generation that exceeds the power factor. To apply this method to an optimization problem, we developed optimal power flow based on interior point method. By using this IPM for the power system, the System operator can use this strategy for reactive power generation pricing and also the Generators can get the motivation to generate reactive power.

1. 서 론

최근 전력산업 구조개편으로 독립으로 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]. 이러한 상황 하에서 대표적 보조서비스로 구분되고 있는 발전기무효전력출력에 대해서 현재의 국내의 발전경쟁단계에서는 합리적인 운용이 유지되고 있다고 사료된다.

한편, 향후 전력산업 구조개편은 보다 강도 높은 효율성 및 경쟁력 제고를 위해 도매경쟁형을 거쳐 소매경쟁형 체제로의 단계적 추진이 가속화될 것이고 동시에 완전한 민영화에 의한 독립발전사업자의 경쟁체제가 확립될 것으로 기대된다[2]. 이러한 향후의 전력산업 발전방향을 고려할 때, 보조서비스로서 무효전력에 대해 적절하고 합리적인 가격보상체제가 만들어지지 않는다면, 많은 발전사업자들은 무효전력을 가능한 한 자발적으로 생산하지 않으려는 경향이 고조될 것이며 이것에 의해 전력계통의 안정운용측면에서 부정적 영향이 초래될 가능성도 배제할 수 없는 상황이라고 사료된다. 따라서, 급변해 나갈 것으로 예상되는 전력계통의 안정운용 목적을 계속해서 달성해 나가기 위해서는 이러한 무효전력 보조서비스의 영향을 경제적 측면에서 분석해서 공정·투명한 가격체제가 이를 도출해 낼 수 있는 계통해석법의 연구가 조기에 필요한 실정이라 사료된다. 특히, 이러한 경제성 추구를 위한 계통해석분야의 연구에서는 고수성·수렴성이 확보되어 최근 실계통으로의 적용이 가능해진 최적조류계산(OPF : Optimal Power Flow)의 활용을 고려해 볼 수 있으며 이것에 의해 무효전력과 같은 Ancillary Service의 가격적 요소를 경제적 관점의 최적성 논리에 의해 해석해 보려는 다양한 시도가 요구되고 있는 실정이다[3].

한편, 계통운용에 있어 핵심이라 할 수 있는 경제부하 배분에서는 송전손실을 고려하여 계통의 경제적 발전 패

턴을 결정할 수 있다. 여기에, 송전계통의 특성인 전압분포, 무효전력 조류 등까지 고려해서 최적화 원리에 의해 계통을 해석하려고 하는 계통해석 tool로서 최적조류계산 문제가 다루어지고 있다[4]. 이러한 최적조류계산 문제는 계통운용에서 실제로 필요한 각종 예비력 제약, security 제약, 이산치 제약을 고려하는 것이 용이하지 않기 때문에 real-time 제어에서는 사용되고 있지 않으며 계통계획이나 운용계획 등에서 주로 효과적 계통해석의 tool로서 도입이 기대되고 있다. 이러한 최적조류계산 문제는 다양한 해법이 제시되어 왔으나, 본 연구에서는 실규모 계통으로의 적용에 있어 계산속도 및 수렴성 등에서 가장 실용적 결과를 보이고 있는 비선형 주·쌍대내점법(primal-dual interior point Method)의 해법을 적용하여 최적조류계산 문제를 연구하는 것으로 하였다[5].

본 연구에서는 발전기무효전력출력에 대한 합리적인 가격설정 개념을 제시하기 위해 발전기의 역할을 고려한 무효전력의 보조서비스 운용을 가상하고 이를 최적조류계산 문제에 근사적으로 적용하여 계통해석을 수행한 결과를 보이기로 한다. 그 개념은 발전단으로 사전에 설계된 규약 역할을 부과하고 그 역할 내의 무효전력출력은 발전사업자가 의무적으로 공급하도록 하고 그 역할을 넘어서는 무효전력출력에 대해서만 인센티브로서 가격을 보상하는 방법이다. 즉, 본 연구의 최종목적은 역할에 기반한 무효전력출력의 pricing법을 최적조류계산법 기반의 계통해석을 통해 무효전력에 관한 보조서비스의 가격설계나 운용전략 등을 합리적으로 도출할 수 있는 근거를 제시하는 것이나, 본 논문은 그 중간단계의 결과로서 우선 무효전력의 보조서비스 운용을 고려한 최적조류계산법을 제시하고자 한다.

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.

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

여기서, x : 변수의 벡터 ($x \in R^m$)

$F(x)$: 목적함수

$G(x)$: 등식제약 (n 개)

$H(x)$: 부등식 제약 (r 개)

\bar{h}, h : 부등식 제약에 대한 상하한 제약

등식제약 $G(x)$ 는 유효 및 무효전력의 조류방정식이며 부등호제약 $H(x)$ 는 계통의 각종 운전제약으로서 발전기

유효·무효 출력제약, 선로제약, 모선 전압제약, 무효전력보상기 제약 등이다.

2.2 비선형 주·쌍대 내점법

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 $(1, u) \in \mathbb{R}^n$ 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.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && F(x) - \mu \sum \ln 1 - \mu \sum \ln u \\ & \text{subject to} && G(x) = 0 \\ & && H(x) - 1 - \underline{h} = 0 \\ & && H(x) + u - \bar{h} = 0 \\ & && (1, u) \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\mu : \mu > 0$ 으로 내점법의 Barrier파라미터

배리어 파라미터 μ 는 어떤 변수도 그 다면체의 경계(제약값)값에 도달하지 않도록 조정하는 역할을 하게 되며 최종적으로 비선형 내점법에서는 μ 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.

$$\begin{aligned} L(x, 1, u, \lambda, z, w) = & F(x) - \mu \sum \ln 1 - \mu \sum \ln u \\ & - \lambda^T G(x) - z^T (H(x) - 1 - \underline{h}) - w^T (H(x) + u - \bar{h}) \\ & \lambda \in \mathbb{R}^n, \quad (z, w) \in \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, λ, z, w : 라그랑지 승수벡터

$x, 1, u$ 와 라그랑지 승수벡터의 합성벡터를 $p = (x, 1, u, \lambda, z, w)$ 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.

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

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

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

이 식(5)의 Newton수정량 Δp^k 를 풀고 반복과정을 수행하면 최적해를 얻게 된다.

결국, 쿤터커 조건식에 의해, 최종적으로 다음 식(6)과 같이 요약할 수 있는 수정량이 x 와 λ 만으로 축약된 수정방정식이 얻어지게 된다.

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

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 Δx 와 $\Delta \lambda$ 에 대해 풀고 구해진 Δx 와 $\Delta \lambda$ 를 이용하여 순차적으로 $\Delta 1, \Delta u, \Delta z, \Delta w$ 를 얻어서 모든 변수의 수정량을 계산할 수 있다. 이와 같은 내점법의 계산과정은 크게 초기치 설정, 상보값(complementary gap) 계산, 수렴판정, 배

리어 파라미터 계산, 수정방정식 계산, 변수 최대스텝길이 계산, 변수수정 등의 단계로 구성되며 각 단계별 설명은 문헌[6]을 참고하고 여기서는 생략하기로 한다.

3. 무효전력의 보조서비스에 관한 해석

3.1 무효전력 보조서비스의 해석

발전기에서의 무효전력공급은 유효전력과 달리 가격보상이란 관점보다는 계통의 전압조정과 관련하여 관심의 대상이 되어 왔다. 또한, 현재 국내의 전력산업 경쟁체제의 pool 모델에서는 각 발전회사가 고가 및 저가 연료비 특성의 발전기를 적정히 배분하여 운용하고 있기 때문에 유효전력에 대한 계통한계가격 중심의 가격적용이 충분히 유효하다고 할 수 있다. 그러나, 전력산업 구조개편의 지속적 전개에 따라 발전기무효전력출력은 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 특성상 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 역할을 정하여 그 역할 내의 무효전력에 대해서는 추가적 보상 없이 의무적으로 무효전력을 발전할 수 있도록 하고 그 역할을 넘어서는 무효전력에 대해서만 보조서비스로서 일정가격을 근사적으로 보상하는 방안을 검토하였다. 즉, 발전기 i 가 P_{Gi} 의 유효전력을 생산하고 이때 계통의 규약 역할이 pf 라면 규약된 Q_{G0} 의 양은 $P_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1} pf)$ 가 되며 무효전력 발전량 Q_{Gi} 가 규약 무효전력량을 넘으면 $(Q_{Gi} - Q_{G0})$ 의 양만큼을 가격을 보상하고 Q_{Gi} 가 Q_{G0} 이하이면 의무적으로 공급해야 할 무효전력량으로 간주하여 보상하지 않는 방법이다. 만약, 유효전력 발전량 P_{Gi} 가 변한다면, 이 P_{Gi} 에 따라 규약 무효전력량 Q_{G0} 도 변화하게 된다. 현 연구단계에서는 이를 최적조류계산에서 근사적으로 고려할 수 있도록 하는 정식화를 수행해서 그 개념을 보인 결과를 제시하기로 한다.

3.2 무효전력 보조서비스의 정식화

무효전력 보조서비스를 발전기역률 기반으로 해석하는 개념을 정확히 보이기 위해서는 그림 1의 L_1 과 같은 가격화 함수를 고려해야 한다. 그러나, 본 연구에서는 무효전력 보조서비스를 고려한 내점법 해법의 최적조류계산법을 적용해서 Q_{G0} 점에서 미분 불가능한 점이 존재하게 되므로 그림 1의 곡선 L_2 와 같은 지수함수를 사용하여 다음 식(7)과 같이 가격화함수를 근사화하기로 한다.

$$\begin{aligned} \text{Cost}(Q_{Gi}) = & A \cdot \exp[B \cdot (Q_{Gi} - C \cdot Q_{G0})] \\ = & A \exp[B \cdot (Q_{Gi} - CP_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1} pf))] \end{aligned} \quad (7)$$

즉, 그림 1에서와 같이 Q_{GiU} 를 발전하면 이때의 무효전력 가격은 P_1 이고 Q_{GiL} 를 발전하면 의무규약 무효전력량 내에 있기 때문에 가격은 0에 가까운 값이 된다.

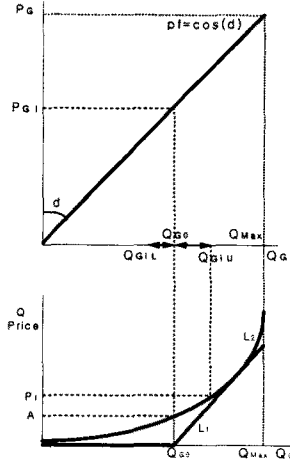


그림 1. 역률과 무효전력 가격곡선

상기 식(7)과 같이 A, B, C 파라미터를 조절하여 적절한 근사함수를 얻고 최적조류계산 해법에 이를 적용하여 무효전력 보조서비스를 근사적으로 고려하는 계통해석의 개념을 보이고자 한다.

식(7)과 관련하여 내점법에서 추가적인 자코비안 성분과 헤시안 성분은 다음 식(8)~식(12)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \text{Cost}(Q_{Gi})}{\partial P_{Gi}} = -A \cdot B \cdot C \cdot \tan(\cos^{-1}pf) \cdot \exp[(B \cdot (Q_{Gi} - C \cdot P_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1}pf)))] \quad (8)$$

$$\frac{\partial \text{Cost}(Q_{Gi})}{\partial Q_{Gi}} = A \cdot B \cdot \exp[(B \cdot (Q_{Gi} - C \cdot P_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1}pf)))] \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \text{Cost}(Q_{Gi})}{\partial P_{Gi} \partial P_{Gi}} = A \cdot B^2 \cdot C^2 \cdot \tan^2(\cos^{-1}pf) \cdot \exp[(B \cdot (Q_{Gi} - C \cdot P_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1}pf)))] \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \text{Cost}(Q_{Gi})}{\partial Q_{Gi} \partial Q_{Gi}} = A \cdot B^2 \cdot \exp[(B \cdot (Q_{Gi} - C \cdot P_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1}pf)))] \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \text{Cost}(Q_{Gi})}{\partial Q_{Gi} \partial P_{Gi}} = -A \cdot B^2 \cdot C \cdot \tan(\cos^{-1}pf) \cdot \exp[(B \cdot (Q_{Gi} - C \cdot P_{Gi} \cdot \tan(\cos^{-1}pf)))] \quad (12)$$

상기와 같은 추가적인 자코비안과 헤시안을 고려하는 방법을 참고로 간단히 설명하기로 한다. 내점법은 대규모 계통에 적용할 수 있도록 행렬소성(sparsity)과 행렬 구성 시 외측부를 소거하는 기법을 도입하여 구성되어 있다. 따라서, 헤시안을 구성할 때 원 헤시안 구성 시 생기지 않는 $\frac{\partial^2 \text{Cost}(Q_{Gi})}{\partial Q_{Gi} \partial P_{Gi}}$ 항이 생기게 되고 이것을 행렬소성(sparsity) 형태에 맞도록 헤시안을 수정해 주어야 한다. 또, $\psi(p, \mu)$ 구성 시에도 식(8), (9)에 해당하는 $\nabla f(x)$ 부분도 추가해 주어야 한다.

3.3 무효전력 가격화 함수의 파라미터

본 연구에서는 보조서비스의 개념으로서 무효전력 가격곡선을 얻기 위해 지수함수에 파라미터를 도입해서 그림 1의 함수 L2와 같이 근사화하였다. 이러한 가격곡선의 근사화에 사용된 각 파라미터 A, B, C에 대해 설명하면, 식(7)의 비용곡선에서 파라미터 A는 Q_{G0} 에서 가격이 부과되기 시작할 때의 초기값을 결정하고 B는 곡선의 기울기의 정도를 조절하고 파라미터 C는 곡선 전체를 Q_G 축에 대해 이동하게 한다. 따라서, 체계적인 계통해석을 통해 이들 파라미터를 유동적으로 조정 가능하다고 한다면, 보조서비스로서의 효과적인 가격함수를 얻을 수 있다고 사료된다.

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)[7]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 계통(bus 13, 15, 16, 18, 21, 22, 23)은 RTS 계통의 기종별 특성에 준용하여 저가의 연료비 계수를 부과하였다. 이 연료비 계수는 발전기 종별(LNG, 중유, 유연탄, 원자력 등)에 대한 상대적인 연료비 계수의 의미를 갖도록 1 차식으로 구성한 것이다. 여기서, bus 22는 수력발전소로서 운용특성을 고려하여 출력을 용량의 70%로 고정하였다.

발전기무효전력 출력은 본 연구에서 지수함수를 도입하였기 때문에 최대 무효전력을 발전하더라도 유효전력 비용의 10%를 넘지 않도록 표 2와 같이 무효전력출력에 가상적으로 가격계수를 부과하였다. 또한, 무효전력 흡수본(진상역률)에 대해서도 동일한 원칙에 의해 가격계수를 고려해야 하나, 본 연구는 최대부하의 중부하 시점을 고려하고 있으므로 해석의 단순성을 위해 무효전력 공급본(지상역률)에 대해서만 가격계수를 고려하였다.

한편, 발전기 모선의 전압계약은 1.0(pu)을 기준으로 $\pm 1\%$ 이내에서 조정되도록 상한한 계약을 고려하였다. 기타, 제약들은 RTS 원계통의 data를 그대로 준용하였다.

표.1 발전기 모선별 유효전력출력제약 및 연료비계수

| 유효전력 (Pg) | 모선 1 | 모선 2 | 모선 7 | 모선 13 | 모선 15 | 모선 16 | 모선 18 | 모선 21 | 모선 22 | 모선 23 |
|-----------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 총출력 [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 |

표.2 발전기 모선별 무효전력출력제약 및 가격화 계수

| 무효전력 (Qg) | 모선 1 | 모선 2 | 모선 7 | 모선 13 | 모선 15 | 모선 16 | 모선 18 | 모선 21 | 모선 22 | 모선 23 |
|------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 총출력 [MVar] | 80 | 80 | 180 | 240 | 110 | 80 | 200 | 200 | 160 | 310 |
| A | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.35 | 0.15 | 0.14 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.18 |
| B | 4.8 | 4.8 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 3.5 | 2.2 | 2.2 | 0.0 | 2.6 |
| C | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 1.0 |

(주) 무효전력출력에 대한 특성곡선은 고려하지 않음

4.2 무효전력의 보조서비스를 고려한 OPF의 결과

먼저, 다음 표 3, 4는 무효전력 보조서비스의 가격화 개념의 유무에 따라 최적조류계산의 결과를 각각 요약하여 나타낸 것이다. 표 3과 같이 기본적 최적조류계산에서는 merit-order의 결과(bus 7이 한계발전기)를 얻었으나, 무효전력 보조서비스의 개념을 적용한 경우 7번과 13번의 유효전력 발전량이 shift하게 된다. 이는 본 연구에서 제시한 무효전력 보조서비스 개념으로 계통의 최적운전을 고려하였을 때, 계통의 종합적 경제성 측면에서 유효전력의 출력배분이 변경되어야 함을 나타낸다.

표.3 무효전력 보조서비스를 고려하지 않은 경우

| 발전기 모선번호 | 유효전력출력 (MW) | 무효전력출력 (MVar) | 유효전력 가격(₩) |
|----------|-------------|---------------|------------|
| 1 | 62.4 | 79.92 | 3,432 |
| 2 | 62.4 | 54.25 | 3,432 |
| 7 | 158.2 | 93.27 | 6,327.2 |
| 13 | 591.0 | 212.90 | 20,685 |
| 15 | 215.0 | 110.0 | 3,440 |
| 16 | 155.0 | 80.0 | 2,170 |
| 18 | 400.0 | 94.10 | 2,000 |
| 21 | 400.0 | 17.62 | 2,000 |
| 22 | 210.0 | -30.71 | 0 [수력] |
| 23 | 660.0 | 56.12 | 9,240 |
| 총합 | 2,913.98 | 767.46 | 52,726.2 |

표.4 무효전력 보조서비스를 고려한 경우

| 모선번호 | 유효전력 (MW) | 무효전력 (MVar) | 의무발전 무효전력 | 유효전력 가격[₩] | 무효전력 가격[₩] | 가격비 Qg/Pg |
|------|-----------|-------------|-----------|------------|------------|-----------|
| 1 | 62.4 | 64.74 | 30.22 | 3,432 | 209.7 | 6.11 % |
| 2 | 62.4 | 63.25 | 30.22 | 3,432 | 195.3 | 5.69 % |
| 7 | 191.9 | 86.56 | 92.94 | 7,675.7 | 42.6 | 0.50 % |
| 13 | 553.7 | 201.68 | 268.18 | 19,380.2 | 4.8 | 0.025 % |
| 15 | 215.0 | 110.0 | 104.13 | 3,440 | 18.4 | 0.535 % |
| 16 | 155.0 | 80.0 | 75.07 | 2,170 | 16.6 | 0.766 % |
| 18 | 400.0 | 92.5 | 193.73 | 2,000 | 1.1 | 0.054 % |
| 21 | 400.0 | 14.59 | 193.73 | 2,000 | 0.2 | 0.01 % |
| 22 | 210.0 | -30.92 | 101.71 | 0.0 | 0.0 | - |
| 23 | 660.0 | 51.4 | 319.65 | 9,240 | 0.02 | 0.0 % |
| 총합 | 2,910.41 | 733.80 | - | 52,769.9 | 488.7 | 0.926 % |

[주] 해석의 단순성을 위해 지상역률에 대해서만 고려

이와 같이 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 부하집중지역의 고가 연료비 특성의 발전사업자들이 유효전력뿐만 아니라, 무효전력에 대해서도 적절한 보상을 받을 수 있게 된다. 상기 결과는 수도권 지역의 독립발전회사들이 시장참여자의 충분한 merit를 가질 수 있도록 하는 다양한 요소 중에서 무효전력 보조서비스에 관한 개념을 단편적으로 보인 것이다.

4.3 규약역률의 설정변경에 의한 OPF의 결과

특히, 계통의 규약역률이 변하게 되면, 그에 따라 의무적으로 발전할 수 있는 규약 무효전력 출력량도 변하게 된다. 본 연구에서 제안한 방법으로 무효전력의 보조서비스의 가격화를 고려하였을 때, 상정한 역률에 따라 계통해석의 결과를 간단히 검토해 보기로 한다.

즉, 표 5에서 보인 것과 같이 규약역률이 0.85에서 0.95까지 0.25씩 증가하였을 때, 유효전력에 대한 무효전력의 비를 계통전체, 발전단 계통의 bus 15 발전기, 부하단 계통의 bus 1 발전기에 대해 각각 계산하였다.

표 5에서 요약한 것과 같이 계통의 의무 규약역률을 어떻게 부과하느냐에 따라 무효전력의 발전량에도 차이가 나며 특히, 부하단 계통의 경우 무효전력 발전비용이 부과된 규약역률에 따라 상대적으로 크게 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 의무 규약역률을 어떻게 정하느냐에 따라 계통의 무효전력 가격이 크게 변하게 되며 그 영향은 부하단 계통의 고가 연료비 특성의 발전기가 주로 영향을 받음을 확인할 수 있다.

따라서, 무효전력 보조서비스에 관한 적절한 파라미터 및 역률 등을 설정해서 보조서비스의 가격설정이나 운용

전략 등을 합리적으로 수행해 나가기 위해서는 최적조류 계산법과 같은 계통해석 tool을 효과적으로 응용해서 충분한 계통해석의 단계를 체계적으로 수행해야 할 것으로 사료된다.

표. 5 규약역률 조정에 따른 무효전력 가격의 변화

| 규약역률 | 총 P _g 발전가격 | 총 Q _g price (Qg/Pg) | bus 1 Q _g price(Qg/Pg) | bus 15 Q _g price(Qg/Pg) |
|-------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 0.850 | 52751.6 | 322.45 (0.61%) | 144.35 (4.21%) | 6.65 (0.19%) |
| 0.875 | 52759.7 | 393.78 (0.75%) | 173.43 (5.05%) | 10.96 (0.32%) |
| 0.900 | 52769.9 | 488.71 (0.93%) | 209.71 (6.11%) | 18.42 (0.54%) |
| 0.925 | 52782.4 | 627.09 (1.19%) | 256.97 (7.49%) | 31.74 (0.92%) |
| 0.950 | 52800.4 | 862.15 (1.63%) | 326.97 (9.53%) | 41.92 (1.22%) |

5. 결론

본 연구에서는 보조서비스로서 발전기무효전력의 가격 설계나 운용전략 등을 합리적으로 도출할 수 있는 근거를 제시하기 위하여 그 중간단계의 결과로서 규약역률에 기반하여 무효전력의 보조서비스 운용을 고려한 최적조류계산법을 제시하였다. 본 연구의 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 발전기무효전력에 규약역률의 개념을 제안하고 이를 최적조류계산법에 의해 보조서비스의 영향을 검토하였다. 이와 같은 계통전체의 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) 발전단에 의무 규약역률의 개념을 적용할 때, 그 역률 및 각종 가격과 파라미터의 설정에 따라 비용 면에서 무효전력 보조서비스의 영향이 크기 때문에 최적조류계산을 기반으로 한 계통해석을 통해 적절한 규약역률 및 필요한 파라미터를 설계할 수 있을 것으로 기대된다.
- 4) 마지막으로 본 연구의 결과를 IEEE 신뢰도 시험제통에 적용하여 제안한 최적조류계산 기반의 계통해석법의 유용성을 검증하였다.

(참고 문헌)

- [1] 한국전력 연구보고서, "플/탁송 모형에서의 Ancillary 서비스 확보 및 송전선 혼잡 시 전력계통 운용방안에 관한 연구, 2001. 1
- [2] 김영창, "전력산업 구조개편 추진", 대한전기학회지, Vol. 49, No. 6호, 2000. 6
- [3] H.W. Dommel and W.F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Trans. on PAS, Vol. 87, No. 10, 1968
- [4] N.H. Dandachi, et al., "OPF for Reactive Pricing Studies on the NGC System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, 1996
- [5] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, 1994
- [6] 정민화, 이병준, 송길영, "비선형 주-쌍대내점법을 이용한 부하공급능력의 산정에 기반한 전력수송능력의 평가", 대한전기학회논문지-A, Vol. 49, No. 4, 2000. 4
- [7] IEEE Committee Report, "IEEE Reliability Test System", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-98, No. 6, 1979