

무효전력시장 구축을 위한 효율적인 발전전압 결정에 관한 연구

정승완, 송성환, 윤용태, 문승일
서울대학교

A Computation of Efficient Generation Voltage for Reactive Power Market

Seung-Wan Jung, Sung-Hwan Song, YongTae Yoon, Seung-Il Moon
School of Electrical Engineering Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 먼저 유효전력 시장과 무효전력 시장을 분리하여 운영한다는 가정하에서 발전기의 무효전력 생산을 위한 최적의 전압값을 산정하고자 한다. 유효전력 시장에서 경제 급전(Economic Dispatch)을 통해 발전기의 유효전력 생산 비용을 최소화시키는 최적의 무효전력량 결정원리를 응용하여, 무효전력 시장에서의 발전기 전압 profile을 결정하는 무효전력시장 구축 알고리즘을 제시한다. 이 알고리즘에는 기본적으로 무효전력-전압의 조류방정식과 목적함수로서 무효전력 비용의 최소화 문제, 그리고 부하측 전압과 관련된 부등식제약조건 선형화 문제 등이 포함된다. 이렇게 산출된 발전전압에 의한 무효전력의 가격은 실제 전압제어에 의한 가격산정이라는 측면에서 그 의미를 찾아볼 수가 있다.

1. 서 론

전력산업의 구조개편이 진행됨에 따라 그간 수직 통합적으로 운영되어 오던 계통운영에 새로운 환경변화를 겪게 되었다. 일례로, 과거 많은 발전회사들은 계통의 안정 운영 일환으로 무부수로 무효전력을 생산하고 소비하는 역할을 담당해 왔다. 즉, 발전기 전압조정을 통한 무효전력 생산은 계통운영자의 경험을 통하여 계통전압이 유지되는 범위 내에서 그 양이 결정되었고 여기에 대해서 어떠한 금전적인 보상체계가 없었다.

이와 달리, 앞으로 시장체제에서는 안정적인 계통운전을 위해서 발전기의 무효전력 생산에 대한 가격 산정이 필수적인 요소가 될 것이다. 하지만 발전기의 무효전력 생산에 대한 가격을 산정하는 데 있어서 아직까지 이를 평가할 수 있는 확실한 기준이 없는 상태이다.

물론 구조개편을 통해 전력시장체제를 도입한 일부 선진 국가에서는 무효전력 생산(소비)과 관련된 서비스를 계통운영보조서비스로 분류하여 이의 가격을 산정하고 있다. 미국(New York ISO, California ISO)과 호주(NEMMCO)의 경우 유효전력출력 감소에 따른 발전기의 수입 감소를 기회비용손실(Lost Opportunity Cost, LOC)의 개념으로 금전적으로 보상하는 체계를 구축하고 있다. 그리고 영국(NGC)의 경우 용량요금(Capability Component : price/MVAr)과 사용요금(Utilization Component : MVAr Price Curve)을 통해 무효전력요금이 산정된다.[1] 그리고 일부 연구[2]에서는 실제 발전기가 내고 있는 유효발전량과 역률과의 관계를 통해 무효전력요금을 산정하는 방법을 소개하고 있다.

이렇게 실제 각국의 전력시장에서 개발되어 적용되고 있는 무효전력 요금제에는 발전기의 한계용량 범위내에서 유효전력출력과 관계된 등가적인 요금체계를 고려하고 있음을 알 수 있다.

이에 대해 본 연구에서는, 발전모선의 직접적인 전압제어에 대해 무효전력출력의 실질 비용을 환산하는 메카니즘을 제안하고자 한다. 이는 발전기의 무효전력 생산 비용을 최소화시키기 위한 최적의 발전기 전압 profile을 결정하는 알고리즘을 포함한다.

2. 본 론

2.1 각 모선에서의 무효전력량 계산

일반적으로 모선 i에 유입되는 무효전력에 대한 전력 조류 방정식은 다음과 같다.

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k|(G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.1)$$

위 식에서 $G_{ik} \ll 1$ 이라 가정하면

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |V_i||V_k|B_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (2.2)$$

로 표현된다.

발전모선의 전압을 $X = [V_{g1}, V_{g2}, \dots, V_{gN-1}]'$ 와 같이 벡터로 정의하면, 각 모선에서의 무효전력-전압(Q-V)의 관계를 다음과 같이 전개할 수가 있다.

$$Q_i = g(V_d, V_e, \dots, V_{gN-1}, V_{gN}, V_d, V_e, \dots, V_{dM}) = g(X, V_d, V_e, \dots, V_{dM}) \quad (2.3)$$

이 때, N은 발전모선의 총 개수이고, M은 부하모선의 총 개수이다. N개의 발전모선 중에서 N번째 모선이 슬랙모선이다.

$j = d_1, d_2, \dots, d_M$ 이라 하면 부하모선에 유입되는 무효전력량은 다음과 같다.

$$Q_{d_j} = g(X, V_{d_1}, V_{d_2}, \dots, V_{dM}) \quad (2.4)$$

전력 조류계산시에 부하모선에서 Q값은 주어지는 상수이므로,

$$V_{d_j} = g'(X, Q_{d_1}, Q_{d_2}, \dots, Q_{dM}) = h(X) \quad (2.5)$$

와 같이 표현이 가능하다. 이는 부하모선의 전압은 발전모선의 전압과 부하모선에 유입되는 무효전력량에 관한 함수이고, 결국은 발전모선의 전압에 관한 함수로 표현할 수 있음을 의미한다.

반면, 발전모선 Q_i 에 유입되는 무효전력량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{g_i} = U(X, V_{d_1}, V_{d_2}, \dots, V_{dM}) = U(X, h(X)) = U'(X) \quad (2.6)$$

발전모선에 유입되는 무효전력량은 발전모선의 전압과, 부하모선의 전압에 관한 함수이고, 결국 발전모선의 전압에 관한 함수로 표현이 가능하다.

따라서 발전모선에서 생산하는 총 무효전력량을 다음과 같이 비용으로 계산할 수 있다.

$$TC_{gi} = f(Q_{gi}) = f(U'(X)) = f'(X) \quad (2.7)$$

결국, 발전기의 무효전력에 대한 총 비용은 벡터 X 즉 발전 모선의 전압값에 대한 함수로 나타낼 수가 있다.

2.2 목적함수

2.1에서 제시된 식에 의해서 발전기에서 생산되는 총 무효전력량에 대한 비용을 최소화시키는 식은 다음과 같이 정의할 수가 있다.

$$\min_{V_{gi}} \sum_{gi} TC_{gi}(Q_{gi}(V_{gi})) \quad (2.8)$$

TC_{gi} : 발전기에서 생산하는 무효전력의 총 비용

이에 대한 제약조건으로 부하모선의 전압값에 대하여 다음 식(2.9)와 같은 부등식 제약조건이 존재한다. 이는 발전단 전압의 함수로 표현된다.

$$V_{di}^{\min} \leq V_{di}(V_{gi}) \leq V_{di}^{\max} \quad (2.9)$$

2.3 비선형 제약 조건의 선형 분석

위의 식 (2.8)의 목적함수는 식(2.9)와 같은 부등식 제약조건(inequality constraints)을 가지고 있다. 이 때 부등식 제약조건에서는 수렴의 불확실성이 존재하므로 안정적인 수렴을 위하여 위의 비선형 제약 조건을 선형화하는 작업이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 선형화 과정을 통해 비선형 제약 조건을 선형 분석(linear analysis)하였다.

부하모선의 전압과 무효전력량은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{di} &= f(V_{gi}) \\ Q_{di} &= g(V_{gi}, V_{di}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

이 때, 부하모선에서의 전압변동량은 다음과 같이 선형화 시킬 수가 있다.

$$\Delta V_{di} = \frac{\partial f}{\partial V_{gi}} V_{gi} + \Delta V_{gi} \quad (2.11)$$

식 (2.11)을 통해서 각 모선으로 유입되는 무효전력량에 대한 계산을 통해서 부하모선에서의 전압 변동량과 발전 모선에서의 무효전력 변동량을 다음과 같이 선형화된 식으로 나타낼 수가 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_{gi} + \Delta Q_{gi} \\ Q_{di} + \Delta Q_{di} \end{bmatrix} = [g(V_{gi}, V_{di})] + \begin{bmatrix} J_{gg} & J_{gd} \\ J_{dg} & J_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{gi} \\ \Delta V_{di} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

이때,

$$J_{gg} = \frac{\partial Q_{gi}}{\partial V_{gi}}, J_{gd} = \frac{\partial Q_{gi}}{\partial V_{di}}, J_{dg} = \frac{\partial Q_{di}}{\partial V_{gi}}, J_{dd} = \frac{\partial Q_{di}}{\partial V_{di}}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{gi} + \Delta Q_{gi} \\ Q_{di} \end{bmatrix} = [g(V_{gi}, V_{di})] + \begin{bmatrix} J_{gg} & J_{gd} \\ J_{dg} & J_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{gi} \\ \Delta V_{di} \end{bmatrix} \quad (\because \Delta Q_{di} = 0)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{gi} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{gg} & J_{gd} \\ J_{dg} & J_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{gi} \\ \Delta V_{di} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

따라서 부하모선에서의 전압 변동량과 발전모선에서의 무효전력 변동량을 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{di} &= -(J_{dd}^{-1} J_{dg}) \Delta V_{gi} \\ \Delta Q_{gi} &= J_{gg} \Delta V_{gi} + J_{gd} \Delta V_{di} \\ &= (J_{gg} - J_{gd} J_{dd}^{-1} J_{dg}) \Delta V_{gi} \end{aligned} \quad (2.14)$$

3. 무효전력 요금산정 알고리즘

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 그림 1과 같다.

Step 1에서는 Step 2의 최적화 과정을 대비하여 필요한 각 모선의 전압값과 위상각을 구하는 과정이다. 따라서 전력 조류계산식을 통해 계산된 전압과 위상각의 값을 초기값으로 설정하게 된다.

Step 2는 Step 1의 결과 데이터를 이용한 무효전력 비용의 최소화 과정이다. Step 1의 발전 전압인 V_{gi} 를 입력변수로 설정하여 이에 대하여 Q-V Flow를 통해 부하모선 전압 V_{di} 를 계산한다. 새롭게 계산된 부하모선의 전압값과 발전모선의 전압값으로 발전모선의 무효전력 Q_{gi} 를 계산하고, 본 논문에서 임의로 설정한 무효전력 비용함수를 이용하여 총 비용을 계산하게 된다. 이 때, 입력 변수인 V_{gi} 와 총 비용사이의 gradient를 구하여 총 비용을 최소화시키는 발전 전압을 계산하게 된다.

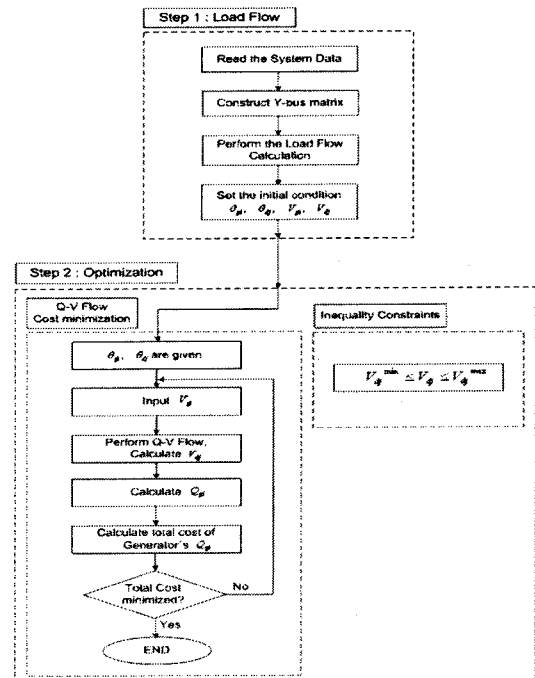


그림 1. 발전기의 무효전력 생산비용을 최소화시키는 알고리즘

4. 사례연구

본 논문에서 시험 계통은 그림 2와 같은 3기 5모선 시스템을 사용하였다.

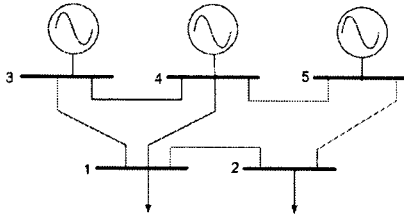


그림 2. 3기 5모선 시스템

Step 1에서 얻은 조류계산 결과값은 표 1과 같다. 모선 5는 슬랙모선으로 지정하였고, 합리적인 결과를 위하여 1.07pu로 정하였다.

표 1. Step 1에서의 조류계산 후의 전압(p.u.)

모선	#1	#2	#3	#4	#5
	0.8353	0.8372	1.0605	1.0185	1.0700

표 1의 결과에서 볼 수 있듯이, 부하 모선의 전압이 제약조건인 $V_{d1}^{\min}=0.95pu$, $V_{d1}^{\max}=1.05pu$ 사이에서 유지되지 못함을 알 수 있다.

이를 위해 Step 2에서는 발전 모선뿐만 아니라 부하 모선의 전압값이 정해진 제약 조건 안에서 결정되고, 무효전력 비용을 최소화시키기 위한 절차들이 시행된다.

이에 대해 Step 2에서 발전기의 무효전력 생산에 대한 비용은 그림 3과 같이 유효전력의 생산 비용 산정 방식과 유사한 2차 곡선의 $TC_{gr} = \alpha Q_{gr} (V_{gr})^2$ 식을 이용하였고, 무효전력의 생산하고 소비하는 모든 비용을 산정하였다. 따라서 $TC_{gr} = \alpha Q_{gr} (V_{gr})^2 + b(Q_{gr} (V_{gr}))^2$ 식을 이용하였고, 본 논문에서 $a=1$, $b=5$ 라는 계수를 가정하고 비용을 산정하였다.

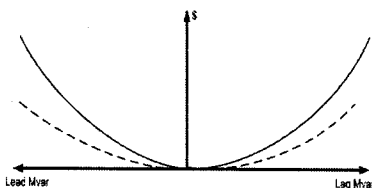


그림 3. 무효전력 비용 산정 곡선

표 2. Step 2에서의 변화된 전압(p.u.)

모선	#1	#2	#3	#4	#5
전압	1.0375	0.9500	1.3389	1.1696	1.0700

표 2에서 볼 수 있듯이, 모선 1과 모선 2의 전압은 $V_{d1}^{\min}=0.95pu$, $V_{d1}^{\max}=1.05pu$ 에서 유지됨을 확인할 수 있다. 무효전력 생산 비용을 최소화시키기 위해서 제약조건인 모선 2의 전압을 0.95pu에서 결정됨을 확인할 수 있다.

표 3. 발전 모선에서의 전압 변화량(p.u.)

	모선 3	모선 4
ΔV_{gr}	0.2784	0.1511

표 3은 무효전력 발전비용을 최소화시키는 발전기의 전압 변동량이다. 발전 비용 계산식에서 모선 4의 발전 비용 계수가 크기 때문에, 발전 비용을 최소화시키기 위해서 모선 4의 발전기의 전압 변동량이 모선 3의 전압 변동량보다 작음을 볼 수 있다.

표 4. 발전비용의 최소화 과정

Iteration	회수	발전 비용(\$)
1		5.67514
2		0.733162
3		0.728774
4		0.728774
5		0.728774

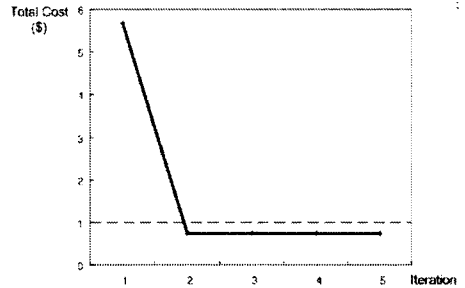


그림 4. 발전 비용의 수렴 과정

Step 2의 최적화 과정은 표 4와 그림 4에서 나타난바와 같이 총 5회의 iteration 과정을 통해서 얻어진 0.728\$가 최소화된 비용임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 최적의 발전전압 profile을 결정하여 무효전력시장을 구축하는 알고리즘을 제시하였다. 이를 위해 발전기의 무효전력 생산 비용 최소화를 원칙으로 하는 목적함수를 적용하였다.

현재 전력시장에서는 유효전력량만 입찰을 받아 소비자에게 공급하고 있다. 한편, 무효전력은 계통의 상황에 따라 계통운영정보조서서비스에 의해 제공되고, 이의 요금체계가 구축되고 있는 실정이다.

하지만 무효전력 공급도 운영서비스 차원이 아니라 유효전력과 같이 그 생산량이 결정되어 입찰을 통한 시장체계가 구축되어야 할 것이다. 이러한 시장 체계에서는 본 논문에서 제안된 알고리즘을 적용하여 무효전력량 및 요금 체계가 구축될 것이라 판단된다. 즉, 실제 발전전압에 의해서 무효전력량이 결정되고, 거기에 따른 무효전력 가격이 산정된다. 이는 유효전력량의 요금 체계와 같이 실제로 공급된 무효전력량에 의해 평가되기 때문에 합리적인 요금 체계 방안이라 할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] Kankar Bhattacharya, Jin Zhong, "Reactive Power as an Ancillary Service", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 2, pp. 294-300, May 2001 John W.
- [2] Lamont, Jian Fu, "Cost Analysis of Reactive Power Support", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 890-895, August 1999
- [3] Young-Hyun Moon, Jeong-Do Park, "Cost Evaluation for Capacitive Reactive Power under the Deregulation Environment", IEEE 2001
- [4] Arthur R. Bergen, Vijay Vittal, "Power System Analysis" 2nd Edition, Prentice Hall, 2000