확률선형 계획법에 의한 최적 Var 배분 계획에 관한 연구 (II)

송 길 영
고 려 대 학 교

이 희 영
고 려 대 학 교

Optimal Var allocation in System planning by Stochastic Linear Progamming(II)

Kil-Yeong Song
KOREA University

Hee-Yoeng Lee
KOREA University

Abstract

This paper presents a optimal Var allocation algorithm for minimizing power loss and improving voltage profile in a given system. In this paper, nodal input data is considered as Gaussian distribution with their mean value and their variance.
A stochastic Linear Programming technique based on chance constrained method is applied to solve the probabilistic constraint. The test result in IEEE-14 Bus model system showes that the voltage distribution of load buses is improved and the power loss is more reduced than before Var allocation.

1. 서 론

무효전력원(Var) 배분 계획은 전원계획, 송전망계획과 더불어 장래시점의 전력계통을 안정상태로 유지시키기 위해 매우 중요하다.
특히 년월일시에 따라 수요가 Random 하게 변하는 경우의 조류해 연구와 더불어 해당 경우의 Var 배분계획에 대한 연구는 최근들어 활발하게 진행되고 있다.
수요가 불확실한 경우 각 모선의 전압크기는 확률밀도함수로 나타나지게 되는데 이경우 전압을 허용치 이내로 유지시켜 계통을 안정 상태로 가져가기 위한 Var 필요량을 정량적으로 평가 하는일은 계통 계획상 중요한 문제로 대두되고 있으며 해석에 확률이론의 해석이 불가피 하게 된다. 문헌 [2] 에서는 Var 배분 계획시 확률 조류법을 이용하여 수요의 불확실성을 고려할 수 있도록한 현실적인 Var 배분 계획에 관한 알고리즘을 제시 하였는데 이 방법 에서는 단지 부하모선 전압 크기분포를 미리 지정한 분포로 수렴 시키는데 필요한 Var 요구량 만을 구하도록 하고 있다.
본 연구 에서는 확률 조류법을 이용하여 수요의 불확실성을 고려하고 계통의 감도해석을 통하여 전압 허용치 유지와 손실 최소화를 동시에 실현 시킬수 있는Var 배분 계획에 관한 효과적인 알고리즘을 제시하였다.
최적화 기법으로는 확률 선형 계획법을 이용 하였으며 IEEE-14 bus 모델 계통에 적용하여 제시한 알고리즘의 유효성을 증명 하였다.

2. Var 배분 문제의 구성

2.1 확률론적 조류계산

불확실한 수요가 주어질때, 즉 조류계산의 입력에 해당 하는모선전력의 지정치가 확률값으로 주어질때 각 모선의 전압 크기분포는 문헌[1]의 확률 조류계산 에 의해 다음과 같이 계산된다.
모선전력 방정식은 다음 (1)으로 되며

$$y = f(x) + \varepsilon' \qquad (1)$$

단, y : 모선 지정전력 벡터의 평균치
x : 전압 벡터
f : x 의 비선형 함수
ε′ : error random variable 벡터

(1)식을 선형화 하면

$$\Delta y = J\Delta x + \varepsilon \qquad (2)$$

단, J : f(x)의 자코비안 행렬
ε : E(ε)=0 으로하는 error random 벡터

(2)식에서 $\partial(\varepsilon^T\varepsilon)/\partial\Delta x = 0$ (3)

을 만족 시키는 $\Delta\hat{x}$ 와 $\Delta\hat{x}$의 공분산 $Cov(\Delta\hat{x})$는

$$\Delta\hat{x} = J^{-1}\Delta y \qquad (4)$$
$$Cov(\Delta\hat{x}) = J^{-1}\,Cov(\Delta y)\,(J^T)^{-1} \qquad (5)$$

또한 x의 추정치는

$$x = x_o + \Delta\hat{x} \qquad (6)$$

으로된다.

2.2 전압감도 행렬과 손실감도 행렬 계산

각 부하모선에 투입되는 무효전력원이 부하모선전압의 크기와 계통의 유효전력 손실에 미치는 영향은 선형화된 모선 방정식(4)식 으로부터 감도해석을 통해서 구해진다. (4)식을 구체적으로 나타내 보면 (7)식과 같이된다. [1], [3]

$$\begin{bmatrix}\Delta\Theta \\ \Delta V\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta P \\ \Delta Q\end{bmatrix} \qquad (7)$$

단, ΔΘ, ΔV : 전압의 위상각 및 크기 변화분
ΔP , ΔQ : P, Q 지정치의 변화분

(7)식에서 $\partial P/\partial V = 0$, $\partial Q/\partial\Theta = 0$ 이라 가정 하면

$$\Delta V = J_4^{-1}\Delta Q \qquad (8)$$

으로 근사화된다. 또한 어떤 부하모선에서 무효전력원 Q 가 미소량 변할때 계통 유효전력 손실 P_L 에 미치는 영향은 다음 (9)식 으로 표시된다.

$$\left[\partial P_L/\partial Q\right] = \begin{bmatrix} J_{L3} & J_{L4}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\partial P_L/\partial\Theta \\ \partial P_L/\partial V\end{bmatrix} \qquad (9)$$

단, J_{L3} , J_{L4} : $(J^T)^{-1}$의 부분행렬

앞서의 (8), (9)식에서 $(J_4)^{-1}$과 $(\partial P_L/\partial Q)$는 각각 부하모선에 투입되는 무효전력원에 대한 전압감도 S_V와 S_L

로서 다음 정식화 과정에 이용 된다.

2.3 문제의 정식화

각모선의 전압크기 분포를 허용폭 이내로 유지하면서 계통 손실을 최소화 시킬수 있는 각 부하모선 에서의 무효전력량을 구하는 문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\text{목적함수} \quad F = S_L^T \Delta Q \tag{10}$$

$$\text{제약조건} \quad \Delta Q^{min} \le \Delta Q \le \Delta Q^{max} \tag{11}$$

$$\Delta \tilde{V}^{min} \le S_V \Delta Q \le \Delta \tilde{V}^{max} \tag{12}$$

단, ΔQ^{min} : $Q^{min} - Q^{o}$
ΔQ^{max} : $Q^{max} - Q^{o}$
$\Delta \tilde{V}^{min}$: $\tilde{V}^{min} - \tilde{V}^{o}$
$\Delta \tilde{V}^{max}$: $\tilde{V}^{max} - \tilde{V}^{o}$
max, min, o : 각각 상, 하한치, 초기치
$Q, \Delta Q$: 투입 무효전력원 벡터및 변화분벡터
$\tilde{V}$: 부하모선 전압크기 분포 벡터

즉 (11)식의 제약조건과 (12)식의 확률제약 조건하에서 (10)식을 최소화 하는 LP문제로 반복시켜 해를 구한다.

2.4 확률 선형 계획법의 응용

선형계획문제의 일반적 형태는 다음과 같다.

$$\text{Minimize} \quad f(x) = C^T x \tag{13}$$

$$\text{Subject to} \quad A x \ge \tilde{B} \tag{14}$$

(14)식에서 우변의 벡터 $\tilde{B}$가 확률적인 값으로 될 경우 Chance constrained method 를 적용시켜[8] 다음 (15)식으로 표현할 수 있다

$$P[\,\Sigma a_{ij} x_j \ge b_i\,] \ge P_i \tag{15}$$

단, P_i : i번째 제약조건 만족확률

(15)식을 표준정규 분포 로 정규화 시키면

$$P[(\Sigma a_{ij} x_j - \bar{b}_i)/(\sqrt{Var(b_i)}) \ge (b_i - \bar{b}_i)/(\sqrt{Var(b_i)})\,] \ge P_i \tag{16}$$

단, $(b - \bar{b}_i)/(\sqrt{Var(b_i)})$:표준 정규분포변수

(16)식에서 $(\Sigma a_{ij} x_j - \bar{b}_i)/(\sqrt{Var(b_i)})$를 표준정규 분포E 로 놓으면 (17)식과 같이 나타낼 수 있다

$$\emptyset\{(\Sigma a_{ij} x_j - \bar{b}_i)/(\sqrt{Var(b_i)})\} = \emptyset(E_i) \tag{17}$$

(17) 에서 $\emptyset$는 표준정규분포의 CDF를 나타낸 것으로 (18)식과 동일한 의미를 지닌다.

$$P[\,\Sigma a_{ij} x_j \ge b_i\,] = \emptyset(E_i) \tag{18}$$

따라서 (15)식의 조건은 (19)식이 실현될때 만족된다.

$$(\Sigma a_{ij} x_j - \bar{b}_i)/(\sqrt{Var(b_i)}) \le E_i \tag{19}$$

$$\Sigma a_{ij} x_j \le \bar{b}_i + E_i \sqrt{Var(b_i)} \tag{20}$$

결국 (13), (14)식 으로 표시된 확률 LP문제는 (13), (20)식 으로 등가화 된다 .

2.5 Var 배분량의 분산 결정

임의의 i번째 부하모선 전압분포의 분산 σ^2은 (5)식으로 부터

$$\sigma_{Vi}^2 = \Sigma \; \sigma_{\theta j}^2 \, (J_{ij}^{-1})^2 \tag{21}$$

단, $\sigma_{\theta j}^2$: $Cov(\Delta Q)$의 j번째 대각항

으로 되며 (21)식에서 $\sigma_{\theta j}^2$ 의 미소변화에 대한 $\Delta\sigma_{Vi}^2$ 의 변화는 (22)식으로 근사화 시킬수 있다.

$$\Delta\sigma_{Vi}^2 = (\partial\sigma_{Vi}^2 / \partial\sigma_{\theta j}^2) \cdot \Delta\sigma_{\theta j}^2 \tag{22}$$

$$\left[\frac{\partial \sigma_V^2}{\partial \sigma_Q^2}\right] = \begin{bmatrix} (J_{11}^{-1})^2 & \cdots & (J_{1n}^{-1})^2 \\ \vdots & & \vdots \\ (J_{n1}^{-1})^2 & \cdots & (J_{nn}^{-1})^2 \end{bmatrix} \tag{23}$$

한편 Var설치후 각 부하모선 전압분포를 목표치 σ_V^{*2} 이내로 유지하도록 하기 위해서 앞서의(23)식을 이용하여 설치할 Var 의 분산을 다음과 같이 구한다.

$$\sigma_{\Delta Q}^2 = \{(\sigma_{Q_o}^2 + \Delta\sigma_Q^2)^{\frac{1}{2}} - \sigma_{Q_o}\}^2 \tag{24}$$

단, $\Delta\sigma_Q^2 = [\partial\sigma_V^2 / \partial\sigma_Q^2]^{-1} [\sigma_V^{*2} - \sigma_V^2]$
σ_V^2 : $(Q^o + \Delta\bar{Q})$ 일때 해석된 전압분포 분산
Q^o : 모선 지정전력 Q의 초기치
$\Delta\bar{Q}$: 설치할 Var의 평균치

2. 6 적용 사례

본 연구에서 제시한 알고리즘을 IEEE-14 모선 계통에 적용 검토한 결과는 다음과 같다.

표1. IEEE-14 모선에 대한 적용결과의 일례

bus	전압분포 μ		전압분포 σ		Var 배분량	
	I	II	I	II	μ	σ
1	.9684	1.0063	.1268E-02	.1153E-02	0.30	.1521E-04
2	.9705	1.0021	.1065E-02	.1061E-02	0.30	.9004E-04
3	.9858	1.0615	.1336E-02	.1041E-02	0.30	.1160E-03
4	.9639	1.0754	.2382E-02	.1079E-02	0.30	.1573E-03
5	.9586	1.0758	.2197E-02	.1052E-02	0.23	.1327E-04
6	.9654	1.0530	.1187E-02	.1014E-02	0.30	.3086E-04
7	.9637	1.0325	.8163E-03	.1009E-02	0.30	.1844E-04
8	.9583	1.0234	.1121E-02	.1034E-02	0.30	.5768E-05
9	.9417	1.0608	.2615E-02	.1204E-02	0.25	.2500E-04

I: Var투입전 I: Var 투입후
σ: 표준편차 μ: 평균치

표 1의 결과는 각모선전력의 확률 data를 문헌[2]를 참고하여 10(%)의 표준편차가 있는 것으로 가정하고 Var 배분량의 상하한 제약을 0.3 으로 하였을 때의 계산 결과로서 각모선의 전압분포는 허용폭 0.95-1.1 사이로 수렴되었으며 분포의 편차도 목표치인 .1E-02 로 가깝게 접근되어 알고리즘의 유효성을 확인 할 수 있었다.

3. 결 론

본연구에서 제시한 알고리듬을 Ward-Hale 6 모선 계통과 IEEE-14 모선 모델계통에 적용하여 검토하였으며 그 주요 결과를 요약하면 다음과같다

1. Var 배분 계획시 수요의 불확실성을 고려할 수 있도록 하였다
2. 확률선형 계획법을 사용하므로서 확률 제약조건의 처리 를 용이하게 하였다
3. 주요모선 전압의 크기 분포를 허용폭 이내로 유지 시키는 동시에 계통손실 최소화를 도모할 수 있는 Var 배분량을 구할 수 있도록 하였다
4. 모선전압 분포의 분산을 개선 시키기 위한 Var의 분산값 을 계산하므로서 모선전압의 질 향상을 위한 Var투입량 분포를 예상할 수 있도록 하였다

참 고 문 헌

1. J.F DOPAZO, et al., "STOCHASTIC LOAD FLOWS", IEEE Trans., vol. PAS-94, NO. 2, March/April, 1975

2. H. Mori, et al, 'Var Allocation Using Stochastic Load Flow", Trans. IEE of Japan , vol 105-B, No. 9 , Sep., 1985

3. A. Venkataramana, et al., "Optimal Reactive Power Allocation, IEEE Trans, vol. PWRS-2, No. 1, Feb., 1987.

4. V. Vkolbin, "STOCHASTIC Programming", D. Reidel Publishing company, p9-p36

5. A. Garzillo, et al., "How to supply appropriate Var Compensation Programs to the planning of An Electric Network by the solution of Linear" Proc. 9th PSCC Portugal, Aug. 1987