2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

# 규제완화된 전력시장 하에서의 전력계통 신뢰도 할당 방법에 관한 연구

김 홍 식* 임 채 현* 최 재 석* 이 순 영* 차 준 민**
*경상대학교 전기공학과 **대진대학교 전기공학과

# A Study on the Allocation Method of Power System Reliability Level under the Deregulated Electricity Market

Hongsik Kim* Chaehyeun Lim* Jaeseok Choi* Sunyoung Lee* Junmin Cha**
*Gyeongsang National University **Daejin University

**Abstract** - This paper presents a new algorithm for the allocation of the reliability level of composite power system under deregulated electricity market. Under deregulated electricity market, it is required to establish a methodology that can evaluate supply cost and supply reliability of each demand to realize the available priority service reflected a preference of each customer. In this study, a concept of reliability differentiated electricity service as priority service to keep reliability of particular customer within a desirable level is proposed on HLII under deregulated competitive electricity market. The uncertainties of not only generators but also transmission lines are considered for the reliability evaluation in this study. The characteristics and effectiveness of this methodology are illustrated by the case studies on MRBTS and IEEE-RTS.

***Keywords:*** *Deregulated electricity market, Power system reliability, Reliability differentiated electricity service*

## 1. 서 론

최근 급격한 정보통신 기술발달과 이를 바탕으로 한 전력거래방식의 개발에 힘입어 자유 경쟁을 통하여 효율을 향상시킬 수 있는 새로운 전력산업 구조 모델의 완성을 목표로 많은 연구가 진행 중에 있다. 국내적으로도 우리 나라 정부에서는 발전부분을 6개의 발전회사로 분리하는 등 우리 나라 전력산업구조개편을 위한 기본 계획안을 발표한 바 있다. 이에 따라 전력시장의 기존 틀은 필연적으로 불가피하게 변화될 것이며, 더불어 전반적인 전력사업 운영에도 심대한 영향을 끼치게 될 것으로 보인다. 특히, 전력부문에 경쟁체제가 도입되면, 전력회사간 또는 전력회사와 소비자 간 합리적인 전력 거래가 이루어져야 한다. 그러나 전력이라는 상품의 특성상 그 거래형태가 매우 복잡하고 국가기간산업의 성격을 지니므로 그 사회의 실정에 맞는 전력에너지의 신뢰도 및 품질에 관한 규제를 마련해야 하며 나아가 이를 성공적으로 이루어 나가기 위해서는 규제완화 전력시장 하에서의 신뢰도 평가기술의 개발이 선행되어야 한다.

이중, 현재까지 규제완화된 전력시장조건 하에서의 신뢰도 관리 및 유지에 관한 평가기술 연구는 세계적으로 주로 다음과 같은 주제로 진행되고 있다[1-2].

- 송전계통의 신뢰도 제약들이 발전측에 미치는 영향평가 연구
- 송전계통의 혼잡도 평가 연구
- 시장기능 및 송전계통의 신뢰도 제약들을 고려한 부하배분에 관한 연구
- 수용가측에 자유경제체제에 맞는 타당성 있는 신뢰도 할당을 하기 위한 방법의 개발
- 확률론적인 실시간 신뢰도 지수 및 평가방법의 개발에 관한 연구
- 자유경쟁체제 하에서의 안전도측면에서의 신뢰도 평가에 관한 연구

그러나 규제완화된 전력시장조건 하에서의 확률론적인 방법을 이용한 신뢰도 관리 및 유지를 위한 평가기술에 관한 연구는 극히 미미하다고 할 수 있다. 특히 단기계획에 따르는 불확실성을 고려한 신뢰도평가 기술 및 소프트웨어 개발은 극히 미미한 실정이다. 규제완화된 전력시장 하에서는 기존의 공급자에 의하여 일방적으로 결정되는 신뢰도 수준과는 달리 각 수용가가 적극적인 입장에서 상호다른 신뢰도 수준을 요구할 것이다.

본 연구는 규제완화된 전력시장조건 하에서의 발전기 및 송전선로의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 신뢰도 수준을 각 지역별로 어떻게 할당할 것인가에 관한 방법을 제시한다. 이를 토대로 궁극적으로는 차후 규제완화된 자유경쟁체제 하에서 보다 투명성을 갖는 전력시장을 운영에 도움이 되게 한다. MRBTS에 대한 사례연구를 통하여 본 연구에서 개발한 방법의 유용성을 살펴보았다.

## 2. 규제완화된 전력시장에서의 신뢰도 유지

### 2.1 경제부하배분

모든 발전기가 발전시장에 참여하고 수요자는 발전시장으로부터 계통망을 통해 전력을 구매하는 것으로 가정한다. 그러므로 전력시장에서의 정해진 시각 t에서 발전기의 상하한 출력제약조건 그리고 수급제약조건을 고려한 경제부하배분문제를 정식화하면 아래 식과 같다.

$$\left.\begin{aligned} &\textit{Minimize} \quad z = \sum_{i=1}^{NG} C_i(G_i) \\ &\textit{Subject to} \\ &\sum_{i=1}^{NG} G_i = \sum_{j=1}^{ND} D_j \\ &G_{\min i} \le G_i \le G_{\max i} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

단, $NG$ : 발전기의 수
$ND$ : 부하의 수
$G_i$ : $i$번째 발전기의 출력 [MW]
$C_i(G_i) = a_i G_i^2 + b_i G_i + c_i \ (a>0)$ [Won/h]

여기서, $G_{mini}$ 와 $G_{maxi}$는 발전기 출력의 하한 및 상한값을 나타낸다.

### 2.2 공급신뢰도 평가

전력시장에 의해 결정된 발전량대로 각 pool의 경제부하배분이 실시되고 이에 따른 각 부하지점별 및 Bulk계통의 신뢰도를 평가하기 위해서는 HLII에서의 신뢰도 평가를 실시하여야한다. 여기서 발전기들의 기동정지계획은 이미 수립되었다고 가정하고 수요와 공급이 균형을 이루는 임의의 시각 t에서의 신뢰도 할당에 문제의 중점을 두었다. 그러므로 전력계통 신뢰도 지수들 중에서 아래 식으로 표현되는 임의의 시각에서의 공급지장전력기대치를 의미하는 *EDNS(Expected Demand Not Supplied)*를 사용하기

로 한다. *EDNS* 산정을 위해서는 각 상태별로 최대공급가능량을 산정하고 이를 바탕으로 공급지장전력을 구한다. 임의의 계통상태에 대하여 최대공급가능량을 산정 하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같이 부하와 송전선로에 흐르는 전력을 미지변수로 하여 목적함수 및 제약조건을 설정하였다[3-6].

**(1) 목적함수**

송전선로의 손실을 무시하고 유효전력만을 대상으로 하여 최대공급지장전력율을 갖는 부하지점의 공급지장전력율을 최소화하는 것을 목적함수로 설정하였다. 이를 정식화하면 식 (2)와 같다. 여기서 $L_k$ 와 $x_k$는 각각 $k$부하지점의 부하 [MW] 및 최대공급전력[MW]를 의미한다.

$$Minimize\ \{Max(L_k - x_k)/L_k\} \quad k \in B_L \tag{2}$$

단, $B_L$ : 부하지점을 갖는 모선번호의 집합
Max : Maximum의 약어임

**(2) 제약조건**

(가) 접속회로 제약조건

각 모선에서의 전력의 유출입의 합은 그 모선에 연결된 발전기의 용량내에 있어야한다. 이를 정식화하면 식 (3)과 같다. 여기서 $a_{ij}$는 각 부하지점도 지로로 취급하여 요소에 포함한 절점-지로 접속행렬의 i행 j렬의 요소이며 $CG_i$는 i번째 절점(모선)에 연결된 발전기의 총 용량이다.

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le G_{\max i} \qquad i \in B_B \tag{3}$$

단, $B_B$ : 모든 모선번호의 집합
n : 지로의 수(부하지점 및 송전선로의 수)

(나) 선로용량 제약조건

각 송전선로에 흐르는 전력은 주어진 송전선로의 용량범위내에 있어야한다. 이를 정식화하면 식 (4)와 같다.

$$-CT_{jmax} \le x_j \le CT_{jmax} \qquad j \in B_T \tag{4}$$

단, $CT_{jmax}$ : j 번째 선로의 총용량 [MW]
$B_T$ : 송전선로 번호의 집합
$x_j$ : j번째 선로의 전력조류[MW]

위의 제약조건들 및 목적함수를 매개변수 λ를 도입하여 선형계획법으로 정식화하면 식 (5)와 같다.

$$\left.\begin{array}{ll} Minimize & \lambda \\ Subject\ to & \\ \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le G_{\max i} & i \in B_B \\ -CT_{jmax} \le x_j \le CT_{jmax} & j \in B_T \\ (L_k - x_k)/L_k \le \lambda & k \in B_L \end{array}\right\} \tag{5}$$

식 (5)를 해석하면 주어진 임의의 계통상태에 대하여 최대공급지장전력율을 갖는 부하지점의 공급지장전력율을 최소화하는 각 부하지점별 공급전력 $P_k$를 구할 수 있으며 여기에 식 (6)처럼 그때의 상태확률 $S_n$을 곱하여 각 부하지점별 공급전력기대치 $EP_k$를 얻을 수 있다.

$$EP_k = \sum_{n=1}^{NS} EP_{kn} * S_n \tag{6}$$

그러므로 k부하지점의 공급지장전력기대치인 $EDNS_k$를 식 (7)과 같이 계산할 수 있으며 따라서 Bulk 계통의 임의의 시각에서의 공급지장전력기대치인 $EDNS_{sys}$는 식 (8)처럼 얻어진다.

$$EDNS_k = D_k - EP_k \tag{7}$$

$$EDNS_{sys} = \sum_{k=1}^{ND} D_k - \sum_{k=1}^{ND} EP_k \tag{8}$$

그러므로 임의의 시각에서 각 발전기의 출력 상한과 송전선로의 용량등에 의해 제한되는 신뢰도 관리를 위한 목표값을 $EDNS_{ref}$ 라 하면 규제완화된 전력시장 하에서 임의의 시각에서 경제부하배분이 실시된 전력공급의 계통 신뢰도 $EDNS_{sys}$는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$EDNS_{sys} \le EDNS_{ref} \tag{9}$$

## 3. 신뢰도 할당

한편, 각 발전기로부터 임의의 수용가까지 공급되는 전력의 분배 분포를 다음의 식에 따라 계산할 수 있다[7].

$$G_i = \sum_{j}^{NC} X_{ij} \tag{10}$$

$$D_j = \sum_{j}^{NC} X_{ij} \tag{11}$$

$$X_{ij} \ge 0 \tag{12}$$

여기서 $X_{ij}$는 $i$발전기로부터 $j$수용가로 분배되는 공급전력이다. 각 수요자의 공급지장전력 $EDNS_{Dj}$의 할당도 $X_{ij}$의 할당과 비슷하게 식 (13)처럼 각 발전기로부터 공급전력을 분배함으로서 실시할 수 있다.

$$EDNS_{Dj} = D_j - \sum_{i}^{NG} X_{ij}(P_k) \tag{13}$$

단, $X_{ij}$ : $i$ 발전기에서 $j$ 수용가로 공급되는전력 [MW]

$EDNS_{Dj}$ : $j$ 수용가의 공급지장전력

그러므로 수요자가 요구하는 임의의 공급지장전력의 신뢰도 수준을 만족할 수 있도록 분배되는 공급전력 $X_{ij}$를 결정할 수 있다. 이때 다음과 같이 2가지 기준에 따라 할당할 수 있다[7].

**(1) 균등분배법칙 *(Equal distribution rate rule)***

이는 각 수요자에게 $EDNS_{sys}$를 그 수요의 크기에 따라 비례로 분배하는 법칙으로 아래의 식 (14)처럼 구한다. 이 분배원리는 각 수용가에서 발생하는 공급지장전력의 기대치는 각 수용가가 구매하는 전력소비량에 비례한다고 가정한 것에 기초하고 있다.

$$EDNS_{Dj} = EDNS_{sys} * \frac{D_i}{\sum_{k}^{NC} D_k} \tag{14}$$

**(2) 차등분배법칙 *(Differential distribution rate rule)***

신뢰도 수준의 요구는 수용가의 종류에 따라 차이가 있을 수 있다. 예를 들어 산업용은 주거용보다 높은 공급신뢰도를 요구한다. 이러한 각 수용가가 요구하는 상호 다른 신뢰도의 수준을 고려할 수 있도록 한 것이 아래 식 (15)처럼 생각할 수 있는 차등분배이다. 여기서 $\alpha_j$는 j종류의 수요가 요구하는 신뢰도 수준의 가중치이다.

$$EDNS_{Dj} = EDNS_{sys} * \frac{\alpha_j}{\sum_{k}^{ND} \alpha_k} \tag{15}$$

단, $\sum_{k}^{ND} \alpha_k = 1$ (16)

## 4. 흐름도

그림 1은 본 연구에서 제안하는 규제완화된 전력시장조건 하에서의 발전기 및 송전계통의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 신뢰도 할당 계산을 위한 흐름도이다.

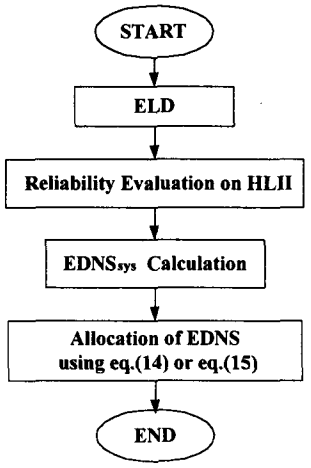


Fig. 1. Flow chart for allocation of power system reliability level under the deregulated electricity market.

## 5. 사 례 연 구

본 수법의 유용성을 살펴보기 위하여 4개 부하지점, 5모선 그리고 발전기 9대로 된 그림 2와 같은 MRBTS에 적용하여 보았다. 발전기의 용량, 각 송전선로의 용량 및 사고율은 그림 2에 나타낸 것과 같으며 각 발전기의 연료비 특성함수는 표 1과 같이 가정하였다.

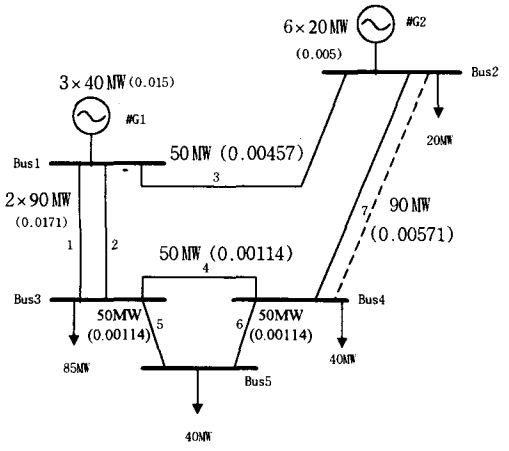


Fig. 2. MRBTS for case study.
(Total load=185[MW])

Table 1. Coefficients of fuel cost functions of generators

| coefficients / bus # | a [$10^3$Won/MW$^2$h] | b [$10^3$Won/MWh] | c [$10^3$Won/h] |
|---|---|---|---|
| 1 | 6.5 | 32.0 | 500.0 |
| 2 | 8.5 | 54.0 | 700.0 |

표 2는 본 MRBTS의 ELD 및 EDNSsys계산 결과이다.

Table 2. Results of ELD and EDNSsys

| | Result data |
|---|---|
| EDNSsys[MW] | 6.0515 |
| Generators at bus #1[MW] | 25.4×3=76.2 |
| Generators at bus #2[MW] | 18.13×6=108.8 |
| Total fuel cost [$10^3$Won/h] | 43363.2 |

표 3은 각 수용가 별 신뢰도 수준을 할당한 결과를 보인 것이다. 여기서, EDNS1은 균등분배법칙에 따른 것이며, EDNS2는 차등분배법칙에 따른 것이다.

Table 3. Allocation results of EDNS

| Load point | $\alpha$ | EDNS1[MW] | EDNS2[MW] |
|---|---|---|---|
| Bus2 | 0.1 | 0.6542 | 0.60515 |
| Bus3 | 0.4 | 2.7804 | 2.4206 |
| Bus4 | 0.3 | 1.3084 | 1.81545 |
| Bus5 | 0.2 | 1.3084 | 1.2103 |

## 5. 결 론

본 연구에서는 규제완화 된 전력시장 하에서의 발전기 및 송전선로의 사고율을 고려한 복합전력계통의 각 수용가별 신뢰도 수준의 할당에 관한 방법을 제시하였다.

그러므로 발전기의 사고율뿐만 아니라 송전선로의 사고율이 각 수용가가 요구하는 신뢰도 수준에 어느정도 영향을 미치는 지를 분석할 수 있다. 이는 규제완화된 전력시장 하에서 각 수용가가 원하는 신뢰도 수준에 맞는 전력공급을 받을 수 있음을 의미한다. 본 연구에서 제시하는 방법을 이용하여 전력에너지의 다양한 신뢰도 수준별 전력요금체계를 전력시장에 제시할 수 있으리라 기대된다. 한편, 본 연구는 전력시장을 통한 자유경쟁체재 하에서의 다양한 신뢰도 수준별 전력에너지 체계를 전력시장에 제시할 수 있는 한 방법을 보인 첫걸음으로서 차후 이를 이용한 재 경제부하배분문제 및 전력조류 추적문제등을 해결해야할 것으로 생각된다.

## [참 고 문 헌]


1. 서울대학교 경제연구소 및 한국전력공사 전력산업구조조정실, "전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구" 한국전력공사 전력산업구조조정실 보고서, 1999, 8.
2. M. Ilic, et al, "Power Systems Restructuring; Engineering and Economics" Kluwer Academic Pub., 1998.
3. Roy Billinton & Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power System" Plenum Press, 1984.
4. Roy Billinton and Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", Plenum Press, 1994.
5. Jaeseok Choi, Daeho Do, Seungpil Moon, Roy Billinton; "Development of a Method for ELDC Conctruction in a Composite Power System" Large Engineering Systems Conference on Power System, June 20-22, 1999, Halifax, Canada.
6. 문 승필, 최 재석, 신 홍교, 이 순영, 송 길영; "Monte Carlo 법에 의한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법 개발 및 신뢰도해석" 대한전기학회 논문지, 1999년 5월, Vol. 48A, No. 5, pp. 508-515.
7. S. Niioka, R. Yokoyama K. Okada & H. Asano, "Impact Evaluation of Reliability Management and Operation under the Deregulated Electric Power Market", IEEE PES WM2000, Singapore, Jan., 2000.