

규제완화된 전력시장 하에서의 전력계통 신뢰도를 고려한 경제부하배분

김홍식* 임채현* 최재석* 차준민** 노대석***
 *경상대학교 전기공학과 **대전대학교 전기공학과 ***한국기술교육대학교 전기공학과

Economic Load Dispatch Considering Power System Reliability
 under the Deregulated Electricity Market

Hongsik Kim* Chaehyeun Lim* Jaeseok Choi* Junmin Cha** Daeseok Rho***
 *Gyeongsang National University **Daejin University ***Korea University of Technology & Education

Abstract - This paper presents a new algorithm for the economic load dispatch considering the reliability level constraints of composite power system under deregulated electricity market. It is the traditional ELD problem that generation powers have been dispatched in order to minimize total fuel cost subjected to constraints which sum of powers generated must equal the received load and no violating lower and upper limit constraints on generation. Under deregulated electricity market, however, generation powers of a pool have to be reallocated newly in order to satisfy the reliability differentiated level required at a load point because of a reliability differentiated electricity service which is a part of the priority service. In this study, new economic load dispatch algorithm for reallocating the generation powers of a pool in order to satisfy the reliability differentiated level under deregulated competitive electricity market is proposed. The uncertainties of not only generators but also transmission lines are considered for the reliability evaluation. 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, Economic load dispatch

1. 서 론

최근 전 세계는 사회주의체제의 붕괴와 더불어 자본주의의 세계적인 팽창 및 정보통신산업의 급격한 발전에 힘입어 그 누구도 거부할 수 없는 자본주의 패러다임인 자유경쟁체제로 탈려가고 있으며 경제, 사회 및 문화 체계도 이에 맞춰 급격한 변화를 겪고 있다. 특히, 시장경제면에서 자유경쟁을 밑받침으로 한 개방시장으로의 구축이 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 현대 에너지 산업의 핵심적인 위치를 차지하고 있는 전력산업에서도 독점상태, 과도한 규제 및 과도한 공공소유 등을 특징으로 하던 기존 개념이 규제완화와 경쟁도입의 과정을 통하여 새로운 개념으로 이해되고 있다. 이에 준하여 전 세계적으로 국가주도형 독점체제로부터 자유경쟁체제로 전환하기 위하여 각종 관련 규제가 철폐되거나 완화되고 있으며 전력산업의 구조개편도 활발히 이루어지고 있다[1].

국내적으로도 우리 나라 정부에서는 발전부분을 5-6개의 발전회사로 분리하는 등 우리 나라 전력산업구조개편을 위한 기본 계획을 발표한 바 있다. 이에 따라 전력시장의 기존 틀은 필연적으로 불가피하게 변화될 것으로 보인다. 그러나 공급지장(Black out)과 전압 및 주파수변동(Brown out)으로 대표되는 전력에너지의 신뢰도 및 품질은 자유경쟁 시장에만 맡길 수 없는 것으로서 이를 관리하고 유지하는 기구나 법적인 규제를 새롭게 제정하는 것이 필연적이라 할 수 있다. 또한 전력에너지의 신뢰도 및 품질에 관한 규제를 마련한다하더라도 이를 성공적으로 이루어 나가기 위해서는 규제완화조건에서의 전력계통의 신뢰도 평가기술의 개발이 선행되어야 가능하다[1-3].

본 연구는 규제완화된 전력시장조건 하에서의 발전기 및 송전계통의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 경제부하배분에 관한 한 방법을 제시한다. 본 연구에서 제안하는 방법을 이용하여 전력계통의 각 요소의 불확실성이 경제부하배분에 미치는 정도를 파악할 수 있으며 나아가 신뢰도를 고려하지 않은 기존의 경제부하배분과의 차이점을 비교 분석함으로써 신뢰도를 현금 가치화할 수 있다.

이를 토대로 궁극적으로는 차후 규제완화된 자유경쟁체제 하에서 보다 투명성을 갖는 전력시장운 운영에 도움이 되게 한다. MRBTS에 대한 사례연구를 통하여 본 연구에서 개발한 방법의 유용성을 살펴보았다.

2. 계통 신뢰도를 고려한 각 pool의 발전출력 할당량 산정 및 신뢰도 지수 산정

2.1 상태확률계산

발전계통 및 송전계통 모두를 포함한 복합전력계통의 신뢰도를 평가하기 위해서는 먼저 계통상태에 따른 상태 확률분포표를 작성하여야한다. 그러나 실제계통에서는 발전기와 송전선로가 100개 정도만이라도 상태 수는 2^{100} 이 된다. 이는 현재의 계산기로도 천문학적인 계산시간이 소요된다. 그러나 다행히 여러 개의 발전기나 송전선로가 동시에 탈락될 확률 값은 0에 가까우므로 이들을 모두 고려하여 계산할 필요는 없다. 그러므로 통상 동시에 발생 할 수 있는 사고갯수를 최고 4~5개 정도까지 가정하고 j계통 상태에 대한 상태확률 S_j 를 다음과 같은 근사값으로 산정하여 이용한다[4].

$$S_j = P(B_j) = \prod_{i \in B_{GT}} P(B_{ij}) \quad (1)$$

단, $P(B_{ij})$: i 구성요소가 j 계통상태에서 사고 또는 운전상태에 있을 확률
 B_{GT} : 복합전력계통의 발전기 및 송전선로의집합

2.2 각 상태의 pool의 발전출력 할당량의 산정

각 부하지점이 요구하는 서로 다른 신뢰도 수준을 만족하면서 경제부하배분을 실시하기 위해서는 우선 각 부하지점별 신뢰도수준을 만족하는 각 pool의 발전할당량을 산정 하여야한다. 여기서는 다음과 같이 부하와 송전선로에 흐르는 전력을 미지변수로 하여 목적함수 및 제약조건을 설정하였다[4-6].

(I) 목적함수

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

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

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 i 행 j 렬의 요소이며 CG_i 는 i 번째 절점(모선)에 연결된 발전기의 총 용량이다.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq G_{max,i} \quad i \in B_B \quad (3)$$

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.

$$-CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T \quad (4)$$

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

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

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

식 (5)를 해석하면 최대공급지장 전력율을 갖는 부하지점의 공급지장 전력율을 최소화하는 임의의 발전모선 또는 pool이 발전해야할 출력 할당량을 구할 수 있다.

2.3 각 부하지점별 신뢰도 지수평가

복합전력계통의 각 부하지점에서의 유효부하지속곡선 $k \phi(x)$ 를 이용하여 전력부족확률($LOLP_k$) 및 공급지장전력량의 기대치($EENS_k$) 등을 식 (6) 및 식 (7)처럼 구할 수 있다.

$$LOLP_k = k \phi(x)|_{x=AP_k} \quad [pu] \quad (6)$$

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + Lp_k} k \phi(x) dx \quad [MWh] \quad (7)$$

단, AP_k = k 부하지점의 최대도달가능 공급전력[MW]

$$\begin{aligned} k \phi_i(x_e) &= k \phi_{i-1}(x_e) \otimes f_{oi}(x_{oi}) \\ &= \int k \phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) f_{oi}(x_{oi}) dx \end{aligned} \quad (8)$$

\otimes : 상승적분을 의미하는 연산자
 $k \phi_o(x_e - x_{oi}) = k \phi(x_L)$
 $f_{oi}(x_{oi})$: i 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수
 Lp_k : k 부하지점의 최대부하[MW]

2.4 Bulk 계통의 신뢰도 지수평가

HLII까지의 Bulk 계통의 신뢰도 지수 중 공급지장전력

량의 기대치($EENS_{HLII}$)는 식 (9)처럼 앞서의 각 부하지점별 신뢰도 지수중 각 부하지점별 공급지장전력량의 기대치($EENS_k$)를 합하면 구할 수 있다. 그러나 Bulk 계통의 전력부족확률($LOLP_{HLII}$)은 그렇게 구할 수 없다. 그러므로 식 (10)과 같이 구하도록 한다.

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \quad (9)$$

$$LOLP_{HLII} = \sum_{k \in R} P(B_k) P_{lk} \quad (10)$$

단, NL : 부하지점의 수
 R : 공급지장이 발생하는 상태들의 집합
 $P(B_k)$: 사고용량 B_k 가 발생할 확률
 P_{lk} : k 상태에서의 공급지장시간확률

2.5 공급지장전력 산정

그러므로, 각 부하지점별 및 Bulk 계통의 $LOLP$ 및 $EENS$ 가 구해지면 역시 각 부하지점별 및 Bulk 계통에 대하여 각각 연구대상기간 동안의 평균공급부족전력율을 의미하는 $AEDNS$ (Average Epected Demand Not Supplied)와 공급부족이 발생하는 시간동안의 공급부족전력율을 의미하는 ELC (Expected Load Curtailments) 등의 신뢰도지수를 식 (11) 및 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$AEDNS_{k,HLII} = EENS_{k,HLII} / T \quad [MW / pu.yr] \quad (11)$$

$$ELC_{k,HLII} = EENS_{k,HLII} / LOLP_{k,HLII} \quad [MW / pu.curyr] \quad (12)$$

단, T : 연구대상기간

3. 계통 신뢰도를 고려한 경제부하배분

3.1 각 pool의 경제부하배분

앞서 식 (5)를 해석하여 신뢰도를 고려한 임의의 발전기 모선 또는 각 pool이 발전해야할 출력 할당량이 구해지면 그 pool의 경제부하배분을 아래 식과 같이 실시한다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Minimize} \quad z_i = \sum_{k=1}^{NG_i} C_{ik}(G_{ik}) \\ \text{Subject to} \quad \sum_{k=1}^{NG_i} G_{ik} = GP_i \\ G_{min,ik} \leq G_{ik} \leq G_{max,ik} \end{array} \right\} \quad (13)$$

단, NG_i : i 번째 pool의 발전기수
 GP_i : i 번째 pool의 할당된 발전출력 [MW]
 G_{ik} : i 번째 pool의 k 발전기의 출력 [MW]
 $C_{ik}(G_{ik}) = a_{ik}G_{ik}^2 + b_{ik}G_{ik} + c_{ik} \quad (a > 0)$ [Won/h]

3.2 신뢰도를 고려한 각 발전기의 출력 및 비용산정

그러므로 계통 신뢰도를 고려한 각 발전기의 확률론적 출력 기대치 EG_{ik} 및 확률론적 연료비용 기대치 EC_{ik} 는 식 (14) 및 식 (15)처럼 구할 수 있으며 나아가 신뢰도를 고려한 각 pool의 총 발전출력 및 연료비용은 식 (16) 및 식 (17)처럼 구해진다.

$$EG_{ik} = \sum_j G_{ik} * P(B_j) \quad (14)$$

$$EC_{ik} = \sum_j C_{ik}(G_{ik}) * P(B_j) \quad (15)$$

$$TG_i = \sum_{k=1}^{NG_i} EG_{ik} \quad [MW] \quad (16)$$

$$TC_i = \sum_{k=1}^{NG_i} EC_{ik} \quad [Won] \quad (17)$$

4. 흐름도

그림 1은 본 연구에서 제안하는 규제완화된 전력시장조건 하에서의 발전기 및 송전계통의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 경제부하배분 알고리즘을 위한 흐름도이다.

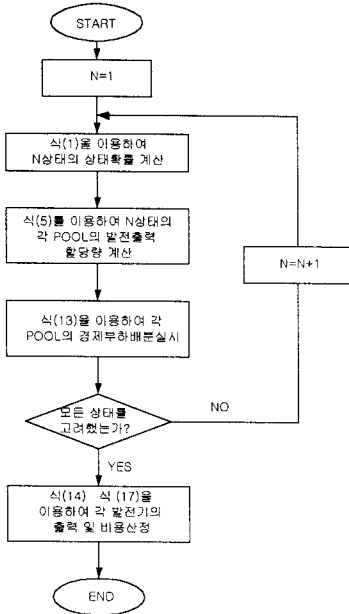


Fig. 1. Flow chart for economic load dispatch considering power system reliability under the deregulated electricity market.

5. 사례 연구

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 나타난 것과 같으며 각 발전기의 연료비 특성함수는 표 1과 같이 가정하였다[6].

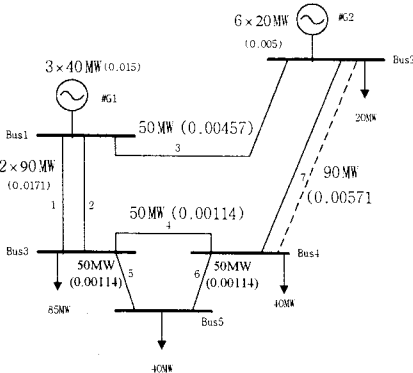


Fig. 2. MRBTS for case study (Total load=185[MW])

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 계통의 신뢰도를 고려하지 않은 기존의 경제부하배분을 실시하여 얻어진 결과와 본 연구에서 제시하는 계통의 신뢰도를 고려하여 각 pool의 할당된 출력으로 경제부하배분을 실시한 경우의 결과를 비교하여 본 것이다.

Table 2. Comparison of ELD results of conventional and proposed method - Case 1

Method Bus or pool	Conventional ELD	ELD by proposed method with considering reliability	Difference between conventional and proposed method
Generators at bus #1[MW]	25.4×3 =76.2	39.3×3 =117.9	13.9×3 =41.7
Generators at bus #2[MW]	18.13×6 =108.8	11.15×6 =66.9	- 6.98×6 = - 41.9
Total power	185	184.8	- 0.2
Total fuel cost [10 ³ Won/h]	43363.2	50092.9	6729.7

5. 결론

본 연구에서는 규제완화된 전력시장조건하에서의 발전기 및 송전계통의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 경제부하배분에 관한 방법을 제시하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 전력계통의 각 요소의 불확실성이 경제부하배분에 미치는 정도를 파악할 수 있었다.
2. 신뢰도를 고려하지 않은 기존의 경제부하배분과의 차이점을 비교 분석함으로써 신뢰도를 현금가치화 할 수 있었다.
3. 규제완화된 자유 경쟁 체제 하에서 보다 투명성을 갖는 전력시장에 도움이 될 것이라 사료된다.

본 연구에서는 공급신뢰도를 고려하여 각 Pool로 경제부하배분을 실시하였으나 경제부하배분이란 어디까지나 운용측면이므로 차후 발전기동정지 실패확률과 같은 운용측면에서의 신뢰도 평가모델에 의거하여 경제부하배분을 실시하는 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다. 더불어, 자유경쟁체제 하에서의 전력시장에서 각 부하지점별로 요구하는 신뢰도 수준 즉, 전력품질에 대한 요구사항이 다를 것이므로 각 수용가의 종류별 및 지역별 신뢰도 수준요구사항에 맞는 경제부하배분 알고리즘의 개발도 차후 연구과제라 생각된다.

[참고 문헌]

1. 박종근, 김발호, 박종배 및 정도영, "전력산업구조개편 개론" 기초전력공학공동연구소보고서, 1999, 8.
2. M. Ilic, et al, "Power Systems Restructuring; Engineering and Economics" Kluwer Academic Pub., 1998.
3. 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.
4. Roy Billinton & Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power System" Plenum Press, 1984.
5. 문 승필, 최 제석, 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.
6. Jaeseok Choi, Daeho Do, Seungpil Moon, Roy Billinton; "Development of a Method for ELDC Construction in a Composite Power System" Large Engineering Systems Conference on Power System, June 20-22, 1999, Halifax, Canada.