

Monte Carlo Simulation기법을 이용한 송전계통의 신뢰도 평가

문승필* 김홍식* 최재석* 차준민**
 *경상대학교 전기공학과 **대진대학교 전기공학과

Reliability Evaluation of Transmission System using Monte Carlo Simulation Method

Seungpil Moon Hongsik Kim Jaeseok Choi Junmin Cha
 Department of Electrical Engineering of Gyeongsang National University* and DaeJin University

Abstract - This paper presents a method for evaluating nodal probabilistic congestion and reliability indices of transmission systems using Monte Carlo simulation methods. Quantitative evaluation of transmission system reliability is very important because successful operation of an electric power system in the deregulated electricity market depends on transmission system reliability management. Monte Carlo methods are often preferable, when complex operating conditions are involved and/or the number of sever events is relatively large. To evaluate the reliability of a real power system, Monte Carlo Methods will be more useful. The characteristics and effectiveness of this methodology are illustrated by the case study using a small test system.

1. 서 론

전 세계적인 전력산업의 흐름은 규제완화체제로 변화 중에 있으며 우리나라의 전력산업도 도매경쟁과 소매경쟁의 체제로 변화하고 있는 실정이다. 전력산업 구조개편이라는 도전 속에서 전력시장의 기존 틀은 필연적으로 불가피하게 변화될 것이다. 이러한 규제완화 된 전력시장 하에서의 발전계통 신뢰도 평가와 더불어 송전계통의 신뢰도평가는 더욱 중요한 부분을 차지하게 될 것이다. 계통 망사업자(ISO 또는 ITO)는 과거의 계통전체의 신뢰도기준의 설정과 더불어 이제 계통 망의 확충계획 및 운용을 위하여 송전계통 만의 신뢰도기준을 일마로 할 것인가에 초점을 모아야 할 것으로 판단된다. 그러나, 송전계통만의 신뢰도평가는 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가 지수 및 해석수법이 이미 1960년대 말에 개발되었음에도 불구하고 대부분이 발전계통을 대상으로 한 연구이고 송전선로 사고율과 같은 송전선로의 불확실성을 고려한 연구 및 그 응용범위는 많지 않은 실정이었다. 그 이유는 복합전력계통의 신뢰도는 각 설비의 구성요소 및 각 지점의 부하크기 등과 복잡하게 관련되어 있어 그 해석이 쉽지 않기 때문이며 복합전력계통에 대한 다각적인 각도에서의 확률론적 신뢰도 평가방법의 기존연구가 부족한데서 비롯된다. 본 연구자들은 이미 복합전력계통(HLII)의 신뢰도지수와 발전계통(HLI)의 신뢰도 지수의 차이는 송전계통만의 신뢰도수준이라는 점에 착안하여 해석적 방법을 이용한 송전계통만의 신뢰도를 평가할 수 있는 방법을 개발한 적이 있다.

확률론적 평가지수는 계통의 신뢰성 평가시 내재되어 있는 계통조건 불확실성을 반영할 수 있으며 계통의 신뢰성에 영향을 미치는 파라미터들과의 정성적인 관계를 반영하고 있다. 따라서 확률론적인 평가지수는 계통의 신뢰성에 영향을 미치는 파라미터들을 고려함으로써 계획안들의 적정성에 대한 상대적인 비교가 가능함과 동시에 임의 계통의 신뢰도에 대한 정량적인 평가가 가능하다. 확률론적 평가 방법에는 계통의 모든 상태와 이에 대한 사고확률을 고려하여 계산하는 상태열거법과 계통 요소의 사고 가능성을 random하게 고려하여 시뮬레이션

하는 Monte Carlo Simulation법이 있다.

본 연구에서는 장래에 실제통 적용을 위하여 거대하고 복잡한 운용조건을 갖고 부수적인 사건이 비교적 많은 계통의 해석에 있어 해석적 기법보다 상대적으로 유리하다고 알려져 있는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 이용하여 송전계통만의 신뢰도를 평가하여 보았다.

2. Bulk계통 및 각 부하지점별 신뢰도 평가

2.1 각 부하지점별 신뢰도 지수

복합전력계통의 각 부하지점별 신뢰도 지수인 전력부족확률(LOLP_k) 및 공급지장전력량의 기대치(EENS_k) 등은 식 (3)에서 보인 유효부하지속곡선 ${}_k\Phi(x)$ 를 이용하여 을 식 (1) 및 식 (2)처럼 구할 수 있다[10-12].

$$LOLP_k = {}_k\Phi(x)|_{x=AP_k} \text{ [pu]} \tag{1}$$

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k+L_{pk}} {}_k\Phi_i(x) dx \text{ [MWh]} \tag{2}$$

단, AP_k = k부하지점의 최대도달가능 공급전력[MW]

$${}_k\Phi_i(x_e) = {}_k\Phi_{i-1}(x_e) \otimes {}_kf_{oi}(x_{oi}) \tag{3}$$

$$= \int {}_k\Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) {}_kf_{oi}(x_{oi}) dx$$

\otimes : 상승적분을 의미하는 연산자

$${}_k\Phi_o(x_e - x_{oi}) = {}_k\Phi(x_L)$$

${}_kf_{oi}(x_{oi})$: i번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

$$L_{pk} : k부하지점의 최대부하[MW]$$

2.1 Bulk 계통의 신뢰도 지수

HLII까지의 Bulk 계통의 신뢰도 지수 중 공급지장전력량의 기대치(EENS_{HLII})는 식 (4)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 없으므로 식 (5)와 같이 구하도록 한다.

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \text{ [MWh]} \tag{4}$$

$$LOLP_{HLII} = \sum_{k \in R} P(B_k) P_{lk} \text{ [pu]} \tag{5}$$

단, NL : 부하지점의 수

R : 공급지장이 발생하는 상태들의 집합
 $P(B_k)$: 사고용량 B 가 발생할 확률
 P_{lk} : k 상태에서의 공급지장시간확률

2.4 Monte Carlo법을 이용한 복합전력계통의 상태확률

소규모계통이고 신뢰성이 높은 계통에서는 계통구성요소의 사고율이 아주 낮으므로 Monte Carlo법으로 신뢰도 평가를 하고자 한다면 시뮬레이션 시간이나 시뮬레이션 반복횟수를 상당히 늘려야 하지만 해석적 방법에서는 사고율이 낮을수록 여러 발전기나 송전선로가 동시에 탈락할 확률은 '0'에 더욱 가까워지므로 오히려 계산해야 하는 고장상태 차수를 줄여도 되기 때문에 고려해야 하는 상태수가 적어지므로 소규모계통이고 신뢰성이 높은 계통에서는 해석적 방법이 유리하다. 그러나 대규모 계통이나 신뢰성이 낮은 계통의 신뢰도평가를 하는 경우 해석적 방법에서는 여러 발전기나 송전선로가 동시에 탈락할 확률이 증가하여 고려해야 할 상태수가 기하급수적으로 증가하므로 Monte Carlo법이 더욱 유리하다.

본 연구에서 이용한 Monte Carlo법을 살펴보면 다음과 같다.

복합전력계통에서 어떤 상태가 임의의 부하지점에 대하여 공급지장을 일으킬 상태의 확률을 계산하기 위하여 각 구성요소들의 상태가 성공상태와 실패상태 만을 갖는다고 가정하면 식 (6)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} S_i &= 0 \text{ (운전상태)}, & x &\geq \text{FOR}_i \\ S_i &= 1 \text{ (고장상태)}, & 0 &\leq x < \text{FOR}_i \end{aligned} \quad (6)$$

단, FOR_i : i 번째 요소의 사고율

이때, 계통의 상태 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ 가 되고 S_i 는 i 번째 구성요소(발전기, 송전선로)의 상태이고 x 는 각 구성요소의 상태모의를 위하여 발생된 난수이다. 발생된 난수에 의해서 각각의 구성요소의 상태(운전상태 ($S_i=0$), 고장상태 ($S_i=1$))가 모의되고 이들로부터 계통의 상태 S 가 모의된다. 각 구성요소들이 n 회 샘플링(충분히 큰 반복) 되었다면 FOR_i 는 식 (7)과 같아진다.

$$\text{FOR}_i = \frac{\sum_{j=1}^n S_i}{n} \quad (7)$$

그리고 상태벡터 S 가 N 회 샘플링 되었다면 상태벡터 S 의 확률 $P(S)$ 은 식 (8)과 같다.

$$P(S) = \prod_{i=1}^M \text{FOR}_i \approx n(S)q(S) \quad (8)$$

단, $P(S)$: 계통의 상태확률 벡터

M : 구성요소의 수

$\text{FOR}_i = \begin{cases} \text{FOR}_i \\ 1 - \text{FOR}_i \end{cases}$

$n(S)$: 상태벡터 S 의 샘플링 수

$q(S) = \frac{1}{N}$: 상태벡터 S 의 출현확률

N : 반복횟수

3. 송전계통망의 신뢰도평가

앞서의 HLI 및 HLI수준의 신뢰도 지수들을 이용하여 송전계통망의 신뢰도 지수인 LOLP_{TS} 및 EENS_{TS} 를 구하면 다음과 같다.

$$\text{LOLP}_{TS} = \text{LOLP}_{HLII} - \text{LOLP}_{HLI} \quad [\text{pu}] \quad (9)$$

$$\text{EENS}_{TS} = \text{EENS}_{HLII} - \text{EENS}_{HLI} \quad [\text{MW/yr}] \quad (8)$$

또한, 연구대상기간 동안의 평균공급부족전력을 의미하는 AEDNS (Average Expected Demand Not Served)와 공급부족이 발생하는 시간동안의 공급부족전력을 의미하는 ELC (Expected Load Curtailments)를 구하면 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같다.

$$\text{AEDNS}_{TS} = \text{EENS}_{TS}/T \quad [\text{MW/ pu.yr}] \quad (9)$$

$$\text{ELC}_{TS} = \text{EENS}_{TS}/\text{LOLP}_{TS} \quad [\text{MW/ pu.cur.yr}] \quad (10)$$

단, T : 연구대상기간

4. 흐름도

그림 1은 본 연구의 흐름도를 보인 것으로 개략적인 설명을 추가하면 다음과 같다. Monte Carlo Methods를 이용하여 각각의 상태벡터를 발생시키고 생성된 상태에서의 조류계산을 시행한다. 그리고 계산된 조류에 따라서 부하지점별 확률론적 부하분포함수를 구하고 주어진 부하지속곡선과 상승적분 하여 식 (3)과 같이 유효부하 지속곡선을 구할 수 있다. 이렇게 하여 각 부하지점별 유효부하지속곡선이 만들어지면 식 (1), (2)와 같이 각 부하지점별 신뢰도지수인 전력부족확률(LOLP_k) 및 공급지장전력량의 기대치(EENS_k)를 구할 수 있다.

각 부하지점별 신뢰도 지수를 이용하여 Bulk 계통의 신뢰도 지수를 식 (4), (5)와 같이 구한 다음 식 (7), (8)에 의해 송전계통의 신뢰도지수인 LOLP_{TS} 및 EENS_{TS} 를 구할 수 있다.

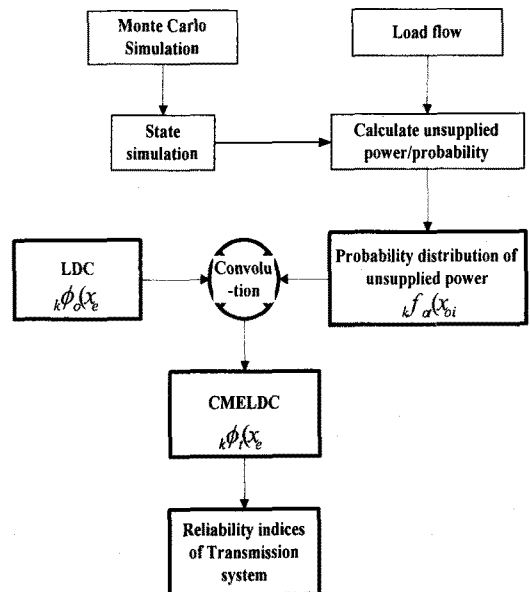


Fig. 1. Flow chart.

5. 사례 연구

본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 살펴보기 위해 그림 2와 같은 RBTS계통에 적용하여 보았다. 그림 2에서 팔호 속의 값들은 각 발전기 및 송전선로의 사고율을 보인 것이다. 그리고 부하지속곡선은 IEEE-RTS 24모선계통에서 하계의 주중 하루를 기준으로 하였다.

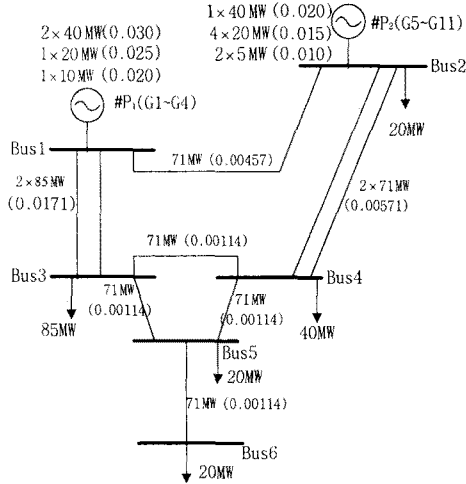


Fig. 2. Single line diagram of the RBTS for case study.

표 1은 Base Case 및 각 송전선로의 상정사고에 대한 각 부하지점별 LOLE값을 보인 것이고 표 2는 각 부하지점별 EENS값을 보인 것이다. 각 송전선로의 상정사고에 대하여 가장 민감하게 반응하는 선로는 모선 #5-#6을 연결하는 TL5-6으로 나타났고 가장 둔감하게 반응하는 선로는 모선 #3-#4를 연결하는 TL3-4로 나타났다.

Table 1. LOLE in each case study

LOLE	BUS 2	BUS 3	BUS 4	BUS 5	BUS 6	Bulk system
Base Case	0.073	0.074	0.075	0.073	0.101	0.084
TL12	0.073	0.090	0.146	0.090	0.102	0.099
TL13	0.074	0.213	0.271	0.213	0.225	0.208
TL24	0.072	0.116	0.173	0.116	0.128	0.122
TL34	0.072	0.073	0.130	0.073	0.085	0.084
TL35	0.072	0.128	0.075	0.090	0.102	0.098
TL45	0.072	0.102	0.159	0.090	0.102	0.110
TL56	0.018	0.018	0.022	0.018	24.000	16.697

Table 2. EENS in each case study

EENS	BUS 2	BUS 3	BUS 4	BUS 5	BUS 6	Bulk system
Base Case	0.089	0.378	0.178	0.089	0.566	1.300
TL12	0.098	0.564	0.288	0.133	0.332	1.414
TL13	0.099	1.015	0.501	0.239	0.438	2.291
TL24	0.097	0.607	0.308	0.143	0.342	1.498
TL34	0.097	0.417	0.219	0.098	0.297	1.300
TL35	0.097	0.464	0.197	0.377	0.576	1.710
TL45	0.097	2.447	1.174	0.377	0.576	4.671
TL56	0.017	0.071	0.035	0.017	398.000	398.139

표 3은 계산된 HLII, HLI 및 송전계통의 신뢰도 지수를 보인 것이다.

Table 3. 송전계통의 신뢰도 지수

	HLII	HLI	T/L
EDNS[MWh/day]	1.30E+00	8.11E-01	4.89E-01
LOLE[hr/day]	8.36E-02	7.26E-02	1.10E-02

6. 결론

본 연구에서는 앞서 저자들에 의해 개발·제안된 송전

계통만의 신뢰도를 평가할 수 있는 해석적 방법의 알고리즘을 거대하고 복잡한 운용조건을 갖고 부수적인 사건이 비교적 많은 계통의 해석에 있어 유리하다고 알려져 있는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 이용하여 송전계통만의 신뢰도를 평가하여 보았다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. Monte Carlo 기법을 도입함으로써 보다 거대하고 복잡한 계통에 적용할 수 있다.
2. 송전선로의 증설이 전 계통의 신뢰도에 미치는 영향의 정도를 정량적으로 분석할 수 있다.
3. 송전선로가 각 부하지점별 신뢰도 수준에 미치는 영향을 알 수 있으므로 각 송전선로의 신뢰도를 가지쳐로 평가할 수 있다.
4. 송전계통만의 신뢰도지수를 산출함으로써 계통망사업자(ISO 또는 ITO)측면에서 고려될 수 있는 계통망의 확충계획 및 운용을 위한 신뢰도 기준설정에 도움이 될 수 있다.

앞으로 본 연구를 토대로 실제계까지 확장하여 송전계통만의 신뢰도 지수들을 산정할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술단 목적기초연구 (과제번호 : 2000-1-30200-006-3) 지원으로 수행된 결과의 일부임.

[참고 문헌]

- [1] 건동훈, 안재욱, 장의태, 이 선, 김발호 및 Ross Baldick, "전력산업 구조변화 및 전력탁송에 관한 연구" 한국전력공사 전원계획처 보고서, 1998, 3.
- [2] 박종근, 김발호, 박종배 및 정도영, "전력산업구조개편 개론" 기초전력공학공동연구소보고서, 1999, 8.
- [3] 서울대학교 경제연구소 및 한국전력공사 전력산업구조조정실, "전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구" 한국전력공사 전력산업구조조정실 보고서, 1999, 8.
- [4] W.S Read, W.K. Newman, I.J. Perez-Arriaga, H.Rudnick, M.R. Gent & A.J. Roman, "Reliability in the New Market Structure (Part1)" IEEE Power Engineering Review, December, 1999, p.4~14.
- [5] M. Ilic, et al, "Power Systems Restructuring; Engineering and Economics" Kluwer Academic Pub., 1998.
- [6] 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.
- [7] Roy Billinton and Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", Plenum Press, 1994.
- [8] Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Assessment of Large Electric Power Systems", Kluwer Academic Pub., 1988.
- [9] 문 승필, 최 재석, 신 홍교, 이 순영, 송 길영; "Monte Carlo법에 의한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법 개발 및 신뢰도해석" 대한전기학회 논문지, 1999년 5월, Vol. 48A, No. 5, pp. 508-515.
- [10] 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.
- [11] 차 준민, 김 홍식, 최 재석, 오 광해; "규제완화된 전력시장 하에서의 송전계통 신뢰도 평가방법의 개발" 2000년, 7월, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp397-399.