

몬테카를로 시뮬레이션기법에 의한 대전력계통 신뢰도산정

◦ 김 창 수, 고 요, 권 영 한 / 추 진 부, 고 현 속, 이 상 중
한국전기연구소 / 한국전력공사

Reliability Evaluation for Bulk Transmission System
by Monte Carlo Simulation Method

C. S. Kim, Y. Ko, Y. H. Kwon / J. B. Choo, H. W. Ko, S. J. Lee
K E R I / K E P C O

ABSTRACT

In the planning stage of bulk power transmission system, reliability evaluation has been a major issue in the sense of suppling reliable power at the minimum cost. MEXICO program, based on Monte-Carlo simulation method, is known as a valuable tool for reliability evaluation. This paper presents the empirical study results when using MEXICO program for IEEE-RTS, IEEE-MRTS and KEPCO-233 system.

1. 서론

계통규모가 빠르게 확장됨에 따라 정전등에 의해 파급되는 경제적 손실 또한 증대되고 있다. 계통규모의 증가는 발전설비의 투자뿐만 아니라 송전설비의 투자계획에 대한 영향도 커진다. 따라서 중장기 송전계획의 계획수립을 위한 적절한 계통신뢰도 평가는 설비의 효율적 운용과 함께 투자의 경제성, 적정 공급신뢰도 유지를 위한 기준이 될 수 있다.

대전력계통의 신뢰도에는 적정성과 안정성을 고려할 수 있으며, 전력계통의 신뢰도산정을 위해 개발된 MEXICO모형에서는 적정성 평가와 함께 제한된 안정성에 대한 평가도 함께 이루어지고 있다. 신뢰도 평가시에는 기존계통에 대한 적정성과 새로 추가되는 설비에 대한 영향을 평가하기 위해 선도에 대한 신뢰도 측면의 한계이득도 계산되어야 한다.

현재 우리나라에서 적용하고 있는 공급신뢰도의 기준은 발전설비를 중심으로한 신뢰도산정을 사용하고 있으며, 계통을 포함한 신뢰도 산정까지는 하지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 발전설비 및 송전설비를 포함한 공급신뢰도 산정 및 이의 운용에 대한 방안을 MEXICO모형을 중심으로 제시하며, KEPCO-92년 모선 실제계통을 적용한 결과를 중심으로 하여 실용성을 확인하고자 한다.

2. 계통을 포함한 공급신뢰도산정

대전력계통에서 산출되는 신뢰도 지수에는 공급지장확률(LOLP), 공급지장전력량(LOEE), 공급지장전력(EUD)등이 있

며, 원인별로는 발전기사고 등으로 인한 발전력부족에 의한 공급지장, 송전선로 사고 및 선로 용량부족에 의한 공급지장, 그리고 두가지 요인이 복합적으로 일어나는 공급지장으로 구별된다.

$$\begin{aligned} \text{LOLP} &= \text{LOLP}_G + \text{LOLP}_T + \text{LOLP}_C \\ \text{LOEE} &= \text{LOEE}_G + \text{LOEE}_T + \text{LOEE}_C \\ \text{EUD} &= \text{EUD}_G + \text{EUD}_T + \text{EUD}_C \end{aligned} \quad (2.1)$$

LOLP : 공급지장확률(Loss of Load Probability)
LOEE : 공급지장전력량(Loss of Energy Expectation)
EUD : 공급지장전력(Expected Unserved Demand)
(Expected Power Not Supplied, EPNS)

G : 단일모선 시스템으로 가정한 발전력부족에 의한 공급지장(선로의 용량한계, 사고는 무시)
T : 발전시스템을 100% 신뢰할때 선로용량 한계, 사고 등에 의한 공급지장
C : 발전기/선로의 복합적인 공급지장

그러나, 프랑스 EDF에서 개발한 MEXICO모형에서는 공급지장 계산을 순수한 발전력부족(단일회로망으로 가정)에 의한 공급지장부분과 계통까지 포함할 경우에 발생하는 추가적인 공급지장부분(계통부족)으로 구분하여 계산하고 있다.

가. 직류전력조류해석

조류해석에 사용되는 방법은 정확도면에서는 떨어지나, 계산시간면에서 우수한 선형화한 직류조류해석모델을 사용하며, 다음의 식으로 나타낸다.

$$p - c = Y\theta \quad (2.2)$$

p : 모선 i에서 발생하는 유효전력 p_i 로 구성된 n 벡터
c : 모선 i에서 소비되는 유효전력 c_i 로 구성된 n 벡터
θ : 모선 i의 전압 위상각 θ_i로 구성된 n 벡터, (i ∈ N)
Y : 모선어드미턴스 행렬

$$\begin{aligned} Y_i &= (\forall i \in N, \forall j \in N) \\ &= -1/r_{ij} : \text{모선 } i, j \text{가 선로 } \lambda_{ij} (1 \leq i, j \leq N) \text{로 연결} \\ &= 0 : \text{모선 } i, j \text{사이에 연결된 선로가 없음} \\ Y_i &= \sum_{1 \leq i \leq N} (1/r_{ij}), (\forall i \in N) \end{aligned}$$

벡터 v 를 계통망 선로의 양 모선간 상차각이라 하면 v 는 다음식으로 표현된다.

$$v = S^t \theta \quad (2.2)$$

$S_i (\forall i \in N, \forall j \in M)$: 모선-선로 접속행렬
 = 1 : 모선 i 가 선로 λ_j 의 시작모선
 = -1 : 모선 i 가 선로 λ_j 의 끝모선
 = 0 : 모선 i 가 선로 λ_j 의 모선이 아님

따라서, $A = S^t Y^{-1}$ 라 하면 식(2.2)는 다음과 같이 표현된다.

$$v = A (p-c) \quad (2.3)$$

나. 교정조치

과부하선로의 해소에는 가능한 부하차단량을 최소로 하면서 발전기의 발전비용이 최소로 되도록 발전력을 재배분하는 방법을 사용한다. 이러한 문제의 해석에는 선형계획법, 비선형계획법 등이 있으나 수렴의 특성 및 계산시간 등의 관점에서 시뮬레이션 기법에서는 선형계획법이 널리 사용된다.

$$\text{목적함수} : \text{Min } \phi(p, h, c) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} p_{ij} + \mu \sum_{i=1}^n h_i'' + \delta \sum_{i=1}^n (c_i^0 - c_i) \quad (2.4)$$

계약조건 : $v = A (p + h - c)$

$$\sum_{i \in N} (p_i + h_i) = \sum_{i \in N} c_i$$

$$\begin{aligned} p^0 &\leq p \leq p^1 \\ 0 &\leq c \leq c^0 \\ -v^0 &\leq v \leq v^0 \\ h_i &= h_i' + h_i'' \\ 0 &\leq h_i' \leq h_i^0 \\ 0 &\leq h_i'' \leq h_i^M - h_i^0 \end{aligned}$$

여기에서 : p, c, v 는 미지수
 p^0, p^1, c^0, v^0 는 $p, c, |v|$ 의 제한치
 β_{ij} : 모선 i 에 연결된 j 발전기의 발전비용
 μ : 수력발전 중요성에 대한 비용
 δ : 공급지장전력비용

선형계획법에 대한 계산은 쌍대완화법(dual relaxational algorithm)으로 문제를 처리한다.

다. 부하예측의 불확실성 고려

년간부하지속곡선 k 시간대에서 송전용량 부족에 기인한 공급부족전력은 식 2.5와 같이 표현된다.

$$D_k = \int_0^{\infty} g(c) W_k(c) dc \quad (2.5)$$

D_k : k 시간대 부하에서 송전용량 부족에 의한 공급지장전력
 $W_k(c)$: k 시간대 부하의 확률밀도함수(평균: S_k , 표준편차: σ_k)

$$W_k(c) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(c - S_k)^2}{2 \sigma_k^2}\right) \quad (2.6)$$

$g(c)$: 부하수준 c 에서 송전용량 부족에 의한 공급지장전력 함수이며, 부하증가에 따른 부분선형함수.

따라서 송전선로 부족에 의한 연간 공급지장에너지는 식 2.7과 같이 표현된다.

$$D = \sum_{k=1}^s \Delta_k D_k \quad (2.7)$$

s : 연간부하지속곡선의 총 단계수

Δ_k : 연간부하지속곡선의 k 단계의 지속시간

발전기의 발전용량부족에 의한 k 시간대부하의 공급지장전력은 식 2.8과 같이 표현된다.

$$G_k = \int_p^{\infty} (c - p) W_k(c) dc \quad (2.8)$$

G_k : k 시간대 부하에서 발전용량 부족에 의한 공급지장전력 기대치

$$G = \sum_{k=1}^s \Delta_k G_k \quad (2.9)$$

따라서 전체 공급지장전력량은 발전기의 용량부족에 의한 공급지장과 선로의 송전용량한계에 의한 공급지장의 합이 된다.

라. 신뢰도 산정

Monte Carlo시뮬레이션 기법에 의한 신뢰도 산정은 그림 1과 같은 과정으로 산출된다.

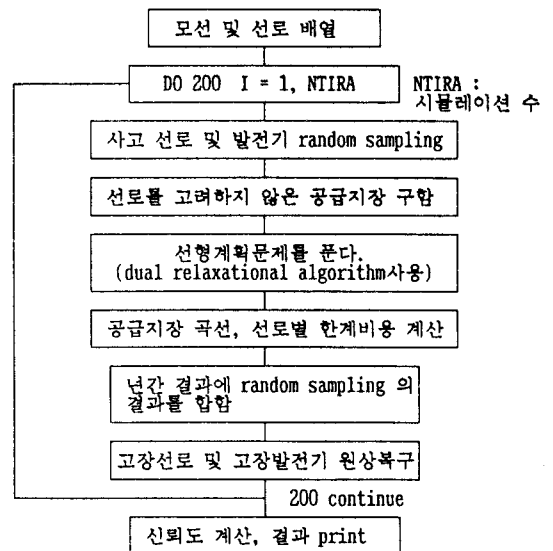


그림 1 시뮬레이션 기법에 의한 신뢰도 흐름도

3. 사례연구

가. IEEE 24모선에 의한 신뢰도 산정

계통신뢰도 산정을 위한 IEEE-RTS시스템과 IEEE-MRTS시스템을 이용한 신뢰도 산정결과는 아래와 같다. 신뢰도 산정에서 연간 공급지장전력량 계산은 주별로 발전기의 보수계획을 고려하고 부하예측의 불확실성을 5% 반영하여 계산하였다. 최대부하 시점에서의 신뢰도 계산은 발전기의 보수계획은 없고 사고율만 고려하여 계산하였다.

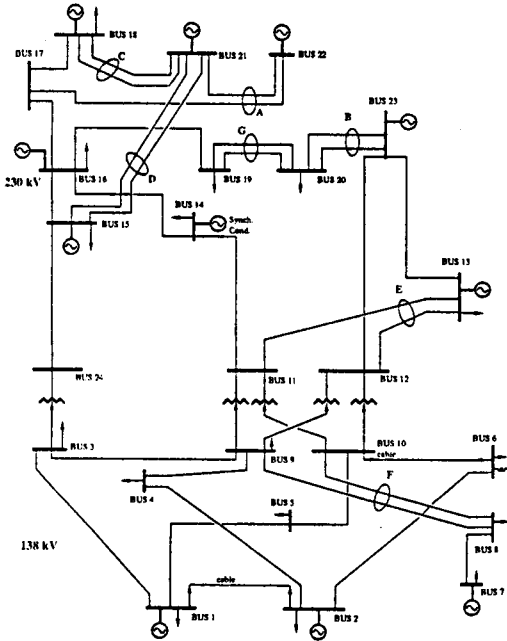


그림 2 IEEE-RTS 계통도

1). IEEE-RTS결과

MEXICO모형에서 7-8선로사고를 고려하지 않을때 주별 보수를 고려한 공급지장전력량은 연간전력량의 0.027%인 4116MW/년이며, 선로에 의한 공급지장전력량 기대치는 0.3MW/년으로 대부분 발전력부족에 의해 발생되었다.

최대부하시점에서의 공급지장은 표 1 과 같이 대부분 발전력부족에 의해 발생하며, 계산값은 CONFTRA 프로그램에서 계산된 값과 비슷한 결과를 나타내었다.

표 1. 최대부하 시점에서 공급신뢰도 지수

	MEXICO	CONFTRA ⁽⁷⁾
LOLP	0.0812 (-)	0.08533 (100 %)
LOLP _c	0.0812 (-)	0.08530 (99.96)
LOLP _T	0.0000 (-)	0.00000 (-)
LOLP _c	- (-)	0.00003 (0.04)
EUD	13.79 MW (100 %)	14.902 MW (100 %)
EUD _c	13.79 MW (100 %)	14.898 MW (99.97)
EUD _T	0.00 MW (-)	0.000 MW (-)
EUD _c	- (-)	0.004 MW (0.03)

* 최대부하 2850MW, 최대발전용량 3405MW, 수행회수 40,000번
* MEXICO모형에서 7-8선로, 수력발전은 사고에서 제외.

2). IEEE-MRTS결과

여기서는 선로용량한계가 나타나지 않는 RTS의 문제점을 해결하기 위하여 선로데이터는 그대로 하고 발전용량을 2배, 모선부하를 1.8배로 된 MRTS시스템을 적용하였다. 이 시스템으로 수행한 결과는 표 2와 같다. 신뢰도 수행결과 7-8선로의 용량부족으로 7-8선로에 의한 공급지장전력이 선로 공급지장전력의 약 84%를 차지하며, 공급지장확률도 68%를 차지함을 알 수 있다. 최대부하 시점에서 공급지장전력은 표 2와같이 발전력에 의하여 38%, 선로에 의하여 62%로, CONFTRA 프로그램에서 계산된 값과 비슷한 결과를 나타내었다.

표 2. 최대부하 시점에서 공급신뢰도 지수

	MEXICO(1)	MEXICO(2)	CONFTRA ⁽⁷⁾
LOLP	0.0338 (-)	0.0707 (-)	0.07180 (100 %)
LOLP _c	0.0131 (-)	0.0131 (-)	0.01513 (21.07)
LOLP _T	0.0214 (-)	0.0674 (-)	0.00710 (9.88)
LOLP _c	- (-)	- (-)	0.04957 (69.05)
EUD	4.78MW (100 %)	10.03MW (100 %)	10.665MW (100 %)
EUD _c	3.81MW (79.71)	3.81MW (38.00)	4.140MW (38.82)
EUD _T	0.97MW (20.29)	6.22MW (62.00)	0.257MW (2.36)
EUD _c	- (-)	- (-)	6.273MW (58.82)

* 최대부하 5130MW, 최대발전용량 6810MW, 수행회수 40,000번
* MEXICO모형에서 7-8선로, 수력발전은 사고에서 제외.
(1) 7-8선로용량 제한없음, (2) 7-8선로용량 175MW

나. KEPCO-233 계통에 의한 신뢰도 산정

사례연구에서 사용된 KEPCO-233계통은 우리나라 1992년 한전계통으로 트리선로 및 모선은 루프선로에 모선부하를 분담시킨후 제외한 233모선, 542선로(341경로) 계통으로 구성하였다. 계통분석에서 '92년의 발전설비(수력, 양수포함 23,721 MW, 도서발전제외, 가정치)와 하계의 최대부하수준(21,283MW, 가정치), 그리고 '92년의 계통에 '95년의 발전설비(수력포함 31,050MW, 도서발전제외, 가정치)와 하계의 최대부하수준(26,775MW, 가정치)을 적용하여 상호 비교하였다. 발전력에서 가장큰 발전기용량 정도인 1000MW를 순동예비력 확보를 위한 감발전력으로 고려하였다. '95년의 각 모선별 부하는 '92년 모선별 부하에서 증가율을 모두 같게 하여 산출하였다. 위의 조건과 수력발전기의 사고는 없는 것으로 하고 화력발전에 대한 유지보수계획을 고려하지 않을 경우에 대하여 '92년 계통수준에서 '95년 까지 계획된 발전설비가 건설될 경우에 우선 보장되어야 할 계통자료에 대한 기준치를 평가하였다.

평가결과와 하나인 최대부하시점에서의 공급지장전력을 보면 표 7 에서와 같으며, '92년에는 발전력부족에 의한 공급지장이 대부분(전체공급지장의 98%)을 차지하며, '95년에는 계통의 보장없이 발전력만 증가시킬경우 선로에 의한 공급지장이 반이상(전체공급지장의 74%)을 차지하므로 발전력증가와 함께 선로의 증설도 필수적임을 알 수 있다.

계산시간은(PC ARL486시스템, 속도:45배/4.771BM PCXT) 약 9시간('92년분석,5000회)정도 소요되며, 이 시간은 계통의 크기뿐만 아니라 선로의 제약조건 상태에 따라서도 달라진다.

표 3. 각 부하수준별 공급지장전력(1992년 부하수준)

부하수준 (MW)	시간 (Hr)	발전부족 (MW)	계통부족/지장확률 (MW / %)	계 (MW)	
21283.	0	725.04	8.16	12.305	733.20
20628.	48	397.20	9.42	12.707	406.61
19964.	138	187.33	9.60	11.532	196.93
19275.	190	72.76	8.95	9.702	81.71
18601.	287	24.38	7.98	8.254	32.35
17929.	390	6.88	6.99	7.411	13.87
17258.	661	1.63	6.06	6.981	7.69
16586.	848	0.32	5.18	6.716	5.49
15917.	941	0.05	4.34	6.407	4.39
15244.	767	0.00	3.56	5.872	3.56
14573.	837	0.00	2.86	5.234	2.86

* 각 부하에 대한 불확실성을 5% 반영

표 4. 각 부하수준별 공급지장전력(1995년 부하수준)

부하수준 (MW)	시간 (Hr)	발전부족 (MW)	계통부족/지장확률 (MW / %)	계 (MW)	
26775.	0	197.97	365.71	89.879	563.68
25951.	48	69.06	302.25	95.549	371.32
25116.	138	19.04	224.31	98.453	243.35
24248.	190	3.80	147.18	99.583	150.98
23401.	287	0.61	85.07	99.366	85.68
22555.	390	0.05	40.75	91.602	40.80
21711.	661	0.00	18.45	57.935	18.45
20867.	848		11.41	21.536	11.41
20024.	941		9.18	10.046	9.18
19178.	767		7.85	7.373	7.85
18334.	837		6.74	6.807	6.74

* 각 부하에 대한 불확실성을 5% 반영

표 5. 년간 공급지장전력량

구분	1992년 부하, 발전기	1995년 부하, 발전기
년간 전력량	132797.7 GWH	167065.7 GWH
발전부족	115838.7 MWH	15437.2 MWH
계통부족	33566.6 MWH	215741.3 MWH
계	149405.3 MWH	231178.5 MWH

표 6. 선로용량 1 MW 증가시 년간공급지장전력량 변화 및 최대부하 시점에서 공급지장전력 변화

선로	1992년 부하, 발전기	1995년 부하, 발전기
1012 - 1121	-13.823 / -0.0430	-137.037 / -0.4794
1230 - 6133	-63.331 / -0.0028	-1052.633 / -0.5664
1230 - 6134	-86.527 / -0.0026	-73.425 / -0.0064
1232 - 6133	-83.094 / -0.0051	-1129.503 / -1.1236
1232 - 6134	-76.612 / -0.0080	-65.239 / -0.0092
1512 - 1674	-28.678 / -0.0016	-1694.253 / -0.8385
1512 - 1684	-14.881 / -0.0006	-1519.027 / -1.1522
1633 - 1673	-1.978 / -0.0051	-118.119 / -0.3255
2012 - 2140	-10.492 / -0.0415	-39.924 / -0.1816
2193 - 2194	-0.252 / -0.0002	-61.172 / -0.2082
2628 - 3123	0.000 / 0.0000	-61.332 / -0.3219
3120 - 3122	-0.308 / -0.0005	-92.406 / -0.9108
4511 - 4620	-125.051 / -0.0160	-790.980 / -1.1338
4620 - 4621	-5.913 / -0.0051	-95.875 / -0.0221
4660 - 4661	-6.028 / -0.0248	-609.664 / -1.0188
5012 - 5130	-7.103 / -0.0309	-2285.337 / -1.3198

* 1233 - 6134, 1233 - 6134선로 가동중지

표 7. 최대부하 시점에서 공급신뢰도 지수

	1992년 부하, 발전기	1995년 부하, 발전기
LOLP	0.7188 (100%)	1.0000 (100%)
LOLP _c	0.5968 { - }	0.1782 { - }
LOLP _r	0.1582 { - }	0.9170 { - }
EUD	536.85 MW (100%)	522.34 MW (100%)
EUD _c	526.25 MW (98.03%)	138.04 MW (26.43%)
EUD _r	10.60 MW (1.97%)	384.31 MW (73.57%)

본 한전계통 사례연구는 각 모션별 부하성장이 전체부하성장과 같다는 가정하에 산출된 것이다. 발전기 사고율은 한전에서 정한 사고율^[3]을 사용하였으며, 선로 비가동율은 '84-'90년의 선로사고 및 작업자료를 감안하여 산출하였다.

4. 결론

지금까지 발전과 계통을 모두 고려한 대전력시스템에 대한 시뮬레이션 기법을 사용한 신뢰도 산정기법 및 결과를 IEEE-RTS, IEEE-MRTS 및 한전의 '92년계통의 사례를 중심으로 제시하였다. 사례연구에서 발전력 뿐만 아니라 송전계통을 포함하므로 실제와 가까운 신뢰도 산출이 가능하게 되었으며, 또한 발전기증설과 부하증가에 따라 합리적으로 계통계획을 수립하는데 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

본 결과는 다른방식의 신뢰도산정 프로그램을 개발하여 산정한 값과 비교하기 위한 자료로도 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 한국전력, "송전계통의 신뢰도 산정기법에 관한 기초이론 연구", 1987. 5.
- [2] _____, "최적 장기송전계통계획 모형 및 Program Package 확립에 관한 연구", 1989. 7.
- [3] _____, "장기전력 수급계획", 1990.12.
- [4] Roy Billinton, Ronald N. Allan, "Reliability Assessment of Large Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1988
- [5] Roy Billinton, Ronald N. Allan, Luigi Salvaderi, "Applied Reliability Assessment in Electric Power System", IEEE PC0251-9, 1991.
- [6] EPRI, "Composite System Reliability Evaluation Method", EPRI EL-5178, Jun.1987.
- [7] EPRI, "Reliability Evaluation for Large-Scale Bulk Transmission System", Vol1, Vol2, EPRI EL-5291, 5178, Jan.1988.
- [8] EPRI, "Bulk Transmission System Component Outage Data Base", Apr. 1981.
- [9] J C Dodu, Merlin, "Recent Improvements of the Mexico model for probabilistic planning studies", Electrical Power & Energy Systems, Apr. 1979.