

각 지역별 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구

김홍식** 문승필* 최재석* 차준민**
 *경상대학교 **대진대학교

A Study on Nodal Probabilistic Reliability Evaluation at Load Points

Hongsik Kim* Seungpil Moon* Jaeseok Choi* Junmin Cha**
 *Gyeongsang National University **Daejin University

Abstract - This paper illustrates a new method for reliability evaluation at load points in a composite power system. The algorithm includes uncertainties of generators and transmission lines as well as main transformers at substations. The CMECDC based on the new effective load model at HLII has been developed also. The CMECDC can be obtain from convolution integral processing of the outage capacity probabilistic distribution function of the fictitious generator and the original load duration curve given at the load point. The CMECDC based on the new model at HLII will extend the application areas of nodal probabilistic production cost simulation, outage cost assessment and reliability evaluation etc. at load points. The characteristics and effectiveness of this new model are illustrated by a case study of a small test system.

1. 서 론

최근 현대 에너지 산업의 핵심적인 위치를 차지하고 있는 전력산업은 전 세계적으로 국가주도형 독점체제로부터 자유경쟁체제로 전환하기 위하여 각종 관련규제가 철폐되거나 완화되고 있으며 전력산업체의 구조개편도 활발히 이루어지고 있다. 또한, 전력계통의 신뢰도 연구는 수직통합형 전력산업 구조에 적용하는 것을 배경으로 개발된 경우가 대부분 이었으며, 급격한 구조개편으로 미국의 캘리포니아 대 정전사태와 같은 전력계통 전반적인 신뢰도 관련의 문제점이 드러난 적도 있었다. 특히, 국내적으로도 발전부분을 6개의 발전회사로 분리하는 등 우리나라 또한, 전력산업구조개편이 활발히 진행되고 있다. 이에, 규제완화 조건에서의 합리적인 계통계획을 수립하는 것은 시급한 과제이며, 하루빨리 우리나라 실정에 맞는 가장 적합한 신뢰도 기준을 마련해야 할 것이다. 그러므로 본 논문에서는 이미 본 연구자들이 제안한 바 있는 복합전력계통의 유효부하저속곡선(CMELDC)을 이용하여, 아직까지 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 그 연구가 미흡한 발전기, 송전계통 및 주요 변압기의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통의 각 지역별 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구를 실시하여 보았다. 본 연구자들이 제안한 방법은 최근 활발히 진행되고 있는 규제완화된 전력시장화에서의 각 부하점별(nodal)로 신뢰도까지 산정할 수 있어 앞으로 매우 유용하게 사용될 것으로 사료되어 진다. 본 연구의 유용성 및 실용성을 살펴보기 위하여 MRBTS계통에 적용하여 보았다.

2. 본 론

2.1 HLII에서의 유효부하

HLI에서의 유효부하개념을 확장하여 발전계통 및 송전선로의 사고율과 같은 불확실성까지 고려한 그림 1에서의 (a)와 같은 일반적인 복합전력계통(HLII)을 생각해보기로 하자. 그림(a)에서 CG와 CT는 발전기 및 송전선로의 용량을 나타내며 q 와 q_i 은 각각 발전기와 송전선로의 사고율을 나타낸다. 따라서, 그림(a)는 그림(b)와 같이 각 발전기의 존재를 완전히 무시하는 대신 임의의 부하점에 용량이 $AP_{ij}[\text{MW}]$ 이며 사고상태 발생률이 q 인 가상발전기가 존재하는 것으로 등가화 할 수 있다. 그림(b)의 kf_{oi} 는 k 부하점에서의 #1 발전기부터 # i 운전된 경우의 종합적인 가상발전기(Synthesized fictitious generator)의 사고용량확률분포함수를 나타낸다. 그러므로 발전계통(HLI)에서의 유효부하개념을 도입하여 그림 3의 (b)를 (c)그림처럼 크기가 $CG[\text{MW}]$ 이고 사고율이 0인 발전기가 발전모션에 존재하고 q' 인 출현확률을 갖고 크기가 $AP_{ij}[\text{MW}]$ 인 가상부하와 그 부하점에서의 확률적 계통부하가 동시에 존재하는 것으로 등가화 할 수 있다. 이때 확률적 계통부하와 사고상태를 갖는 최대공급전력에 기인한 확률적 사고부하를 합하여 복합전력계통의 유효부하라고 정의할 수 있다. 이의 확률변수를 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$kx_e = kx_L + \sum_{j=1}^{NS} kx_{oj} \quad (1)$$

단, kx_e : k 부하점에서 복합전력계통의 유효부하 확률변수
 kx_L : k 부하점에서 확률적 계통부하의 확률변수
 kx_{oj} : k 부하점에서 j 번째 사고상태에서의 최대공급전력에 의한 확률적 사고부하의 확률변수
 NS : 계통상태의 총수

그러므로 발전기 #1부터 # i 번째 발전기까지 투입된 후의 k 부하점에서의 유효부하저속곡선의 확률분포함수 $k\Phi_i(x_e)$ 는 식 (2)와 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} k\Phi_i(x_e) &= k\Phi_o(x_e) \otimes kf_{oi}(x_{oj}) \\ &= \int k\Phi_o(x_e - x_{oj}) kf_{oi}(x_{oj}) dx \end{aligned} \quad (2)$$

단, \otimes : 상승적분을 의미하는 연산자
 $k\Phi_o$: k 부하점에서의 LDC

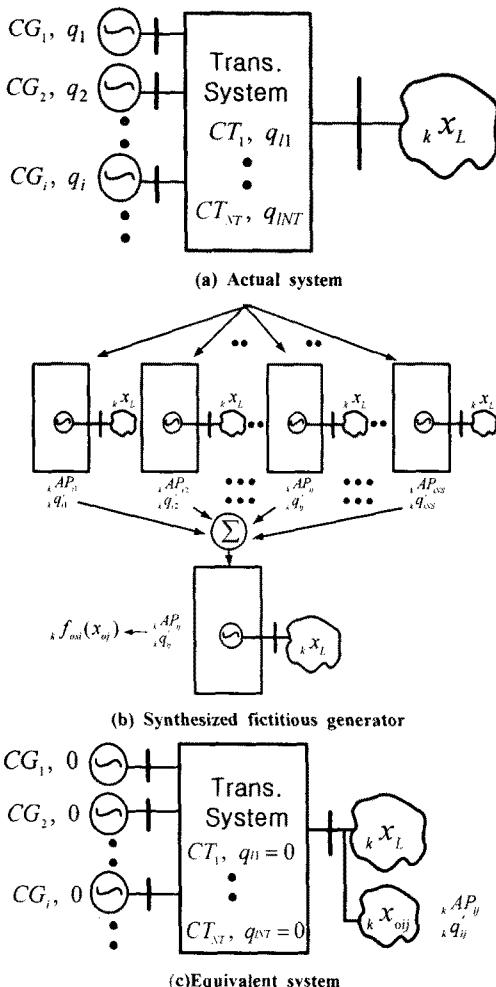


Fig. 1. Actual and equivalent systems and effective load nodal of HLII proposed in this study.

2.1.2 복합전력계통의 유효부하지속곡선에서의 신뢰도 지수산정

본 연구에서 개발한 발전기 #1부터 # i 까지 투입되고 난 후의 k 부하지점의 복합전력계통의 유효부하지속곡선 $\Phi_i(x_e)$ 를 이용하여 관측기간동안의 평균전력부족시간으로 정해지는 신뢰도 지수인 전력부족시간기대치 (Loss of load expected : LOLE)는 식(3)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$LOLE_{ik} = \Phi_i(x)|_{x=AP_k} \quad (3)$$

또한, 공급지장전력량의 기대치(Expected energy not supplied: EENS)는 단위시간에 걸쳐 공급되지 못한 총 전력량의 기대치로 신뢰도 기준을 정한다. 이러한 공급지장전력량의 기대치는 고장 등으로 인한 전원설비의 부족과 전력공급부족에 의해 발생한다. 복합전력계통에서 각 부하지점의 공급지장전력량의 기대치는 식(4)처럼 구할 수 있다. 따라서, 그림 2는 발전기 #1부터 # i 까지 투입되고 난 후의 k 부하지점의 CMELDC($\Phi_i(x_e)$)와 신뢰도 지수인 전력부족시간 기대치(LOLE)와 공급지장전력량의 기대치(EENS)를 나타내고 있으며 그림에서 L_{pk} 와

AP_{ik} 는 각각 발전기 #1부터 # i 까지 투입되고 난 후의 k 부하지점의 최대부하와 최고도달전력을 나타내고 있다.

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_{pk}} \Phi_i(x) dx \quad (4)$$

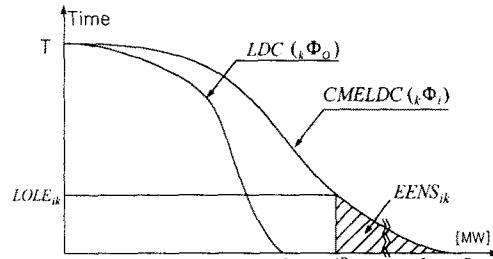


Fig. 2 Reliability indices and ELDC at load point #k

2.1.3 Bulk계통의 신뢰도 지수산정

HLII까지의 Bulk 계통의 신뢰도 지수 중 공급지장전력량의 기대치(EENS_{HLII})는 식 (5)처럼 앞서의 각 부하지점별 신뢰도 지수중 각 부하지점별 공급지장전력량의 기대치(EENS_k)를 합하면 구할 수 있다. 그러나 Bulk 계통의 전력부족시간기대치(LOLE_{HLII})는 그렇게 구할 수 없다. 그러므로 식 (6)을 이용하여 식(7)과 같이 구하도록 한다.

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \quad [\text{MWh/day}] \quad (5)$$

$$ELC_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} ELC_k \quad [\text{MW/cur · day}] \quad (6)$$

$$LOLE_{HLII} = EENS_{HLII} / ELC_{HLII} \quad [\text{hrs/day}] \quad (7)$$

단, NL : 부하지점의 수

$$ELC_k = EENS_k / LOLE_k \quad [\text{MW/cur · day}]$$

2.1.4 상태확률 및 최대공급전력산정

(1) 상태확률

실제계통에서는 발전기와 송전선로가 100개 정도일 때 상태수는 2^{100} 이 된다. 이는 현재의 계산기로도 천문학적인 계산시간이 소요된다. 그러나 다행이 여러개의 발전기나 송전선로가 동시에 탈락될 확률값은 0에 가까우므로 이들을 모두 고려하여 계산할 필요는 없다. 그러므로 근사값이긴 하지만 계산시간 면에서 현실적인 식 (8)을 이용하는 것이 유리하다.

$$q_{ij} = P(e)Q(\bar{e}_j) \quad \exists \forall n(\bar{e}_j) \leq 4 \text{ or } 5 \quad (8)$$

단, \bar{e}_j : 상태 # j 에서의 사고요소의 집합

$$n(\bar{e}_j) : \bar{e}_j \text{ 집합의 사고요소의 수}$$

$$P(e_j) : \text{사고용량 } e_j \text{의 확률}$$

$$P(\bar{e}_j) : \text{상태 } \bar{e}_j \text{에서의 공급지장확률}$$

(2) 최대공급전력 산정

어떤 임의의 부하지점에서 각 상태별 최대공급전력을 계산할 경우 가능해가 여러 개 있게된다. 그러므로 복합

전력계통의 신뢰도 평가시에는 각 상태별로 어떤 목적하는 바에 따라 목적함수를 설정하여 조류계산을 실시하고 이의 결과에 준하여 각 부하지점별로 최대공급전력을 산정하여야 한다. 여기서는 다음과 같이 부하와 송전선로에 흐르는 전력을 미지변수로 하여 목적함수 및 제약조건을 설정한다.

1) 목적함수

여기서는 문제의 편의상 여러 개의 가능해들 중에서 최소한의 공급지장전력이 발생하는 해를 구하는 것을 목표로 삼았다. 그러므로 송전선로의 손실을 무시하고 유전력만을 대상으로 하여 최대공급지장전력을 일으키는 부하지점의 공급지장전력을 최소화하는 것을 목적함수로 설정할 수 있다. 이를 정식화 하면 식 (9)와 같다. 여기서 L_{pk} 와 x_k 는 각각 k 부하지점의 최대부하[MW] 및 최대공급전력[MW]을 의미한다.

$$\text{Minimize } \{ \text{Max}(L_{pk} - x_k) / L_{pk} \} \quad k \in B_L \quad (9)$$

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

2) 제약조건

(가) 접속회로로 제약조건

각 모선에서의 전력의 유출입의 합은 그 모선에 연결된 발전기의 용량내에 있어야 한다. 이를 정식화하면 식 (10)과 같다.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \quad (10)$$

단, a_{ij} : 절점 - 지로접속행렬

B_B : 모든 모선번호의 집합

n : 지로의 수(부하지점 및 송전선로의 수)

CG_i : 모선 i 에서의 총 용량

(나) 선로용량 제약조건

각 송전선로에 흐르는 전력은 주어진 송전선로의 용량 범위내에 있어야 한다. 이를 정식화하면 식 (11)과 같다.

$$-CT_{lmax} \leq x_l \leq CT_{lmax} \quad l \in B_T \quad (10)$$

단, CT_{lmax} : l 번째 선로의 총용량 [MW]

B_T : 송전선로 번호의 집합

x_l : l 번째 선로의 전력조류[MW]

위의 제약조건들 및 목적함수를 매개변수 λ 를 도입하여 선형계획법으로 정식화하면 식 (12)와 같다.

$$\text{Minimize} \quad \lambda$$

Subjective to

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i \quad i \in B_B \\ & -CT_{lmax} \leq x_l \leq CT_{lmax} \quad l \in B_T \\ & (L_{pk} - x_k) / L_{pk} \leq \lambda \quad k \in B_L \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3. 흐름도

본 연구에서 각 부하지점별 확률론적 신뢰도평가를 하기 위한 흐름도는 그림 3과 같다.

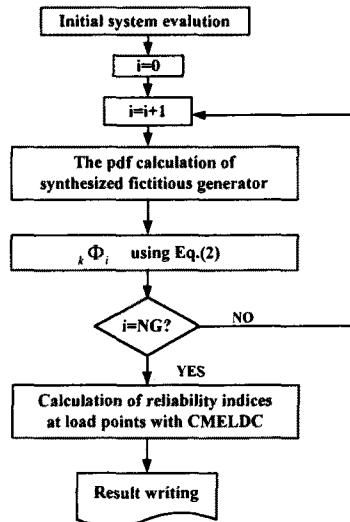


Fig. 3. The flow chart for reliability evaluation at load points.

4. 사례연구

본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 살펴보기 위해 그림 4와 같은 MRBTS계통에 적용하여 보았다. 발전기와 송전선로의 용량 및 사고율의 입력자료는 그림 4에 나타난 것과 같다. 또한, 각 변압기의 실패율(Failure rate)은 0.02[failures/yr]이며, 고장지속시간(Outage duration)은 768[hr]로 두었다.

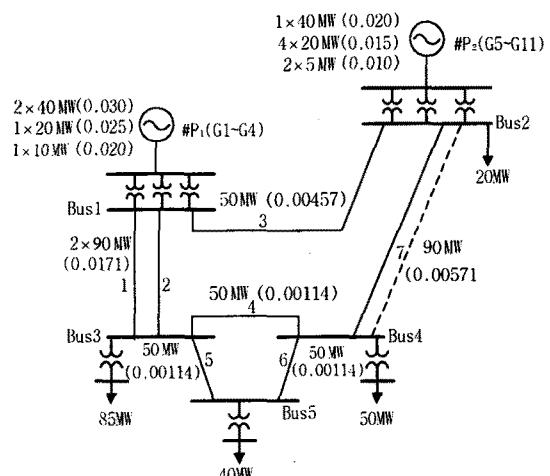


Fig. 4. A small test for case study.

표 1은 변압기를 고려하지 않았을 때의 MRBTS에서의 Bulk 계통 및 각 부하지점별 확률론적 중요신뢰도 지수인 LOLE, EENS 그리고 ELC를 나타낸 것이다. 또한, 표 2는 주요 변압기를 고려했을 때의 MRBTS에서의 각 부하지점별 확률론적 신뢰도지수 및 Bulk 계통의 신뢰도 지수를 나타낸 것이다. 표 3 및 4는 Bus1번과 Bus2번에서 각각 1 bank 고장시의 신뢰도지수를 나타낸 것이다. 결과에서 변압기를 고려했을 때의 LOLE와 EENS값은 고려하지 않았을 때보다 올라갔음을 알 수가 있고, 기준으로 한 변압기를 모두 고려했을 때의 경우 Bus1번과 Bus2번에서 각각 1 bank 고장시의 신

뢰도지수도 지수를 비교해 본 결과 예상했던 바와 같이 1 bank 고장시에 신뢰도가 나빠졌음을 알 수가 있다. 참고로, 그림 5와 6은 표1~4까지의 각 부하지점별 LOLE와 EENS를 그래프로 비교하여 보았다.

Table 1. Nodal and bulk system probabilistic reliability indices (MRBTS)

Bus No.	LOLE [hrs/day]	EENS [MWh]	ELC [MW/cur · day]
Bus2	0.0106	0.0538	5.0751
Bus3	0.0349	0.2574	7.3804
Bus4	0.0175	0.0985	5.6213
Bus5	0.0219	0.1196	5.4593
Bulk	0.0225	0.5294	23.5361

Table 2. Nodal and bulk system probabilistic reliability indices (변압기추가)

Bus No.	LOLE [hrs/day]	EENS [MWh]	ELC [MW/cur · day]
Bus2	0.1601	1.9815	12.3759
Bus3	0.1853	11.3239	61.1225
Bus4	0.1673	5.5931	31.0240
Bus5	0.1719	5.2796	30.7196
Bulk	0.1756	24.2782	138.2421

Table 3. Nodal and bulk system probabilistic reliability indices (Bus1-1bank 고장)

Bus No.	LOLE [hrs/day]	EENS [MWh]	ELC [MW/cur · day]
Bus2	0.2532	2.4478	9.6684
Bus3	0.4764	13.5218	28.3827
Bus4	0.3222	6.5924	20.4590
Bus5	0.3611	6.2558	17.3221
Bulk	0.3800	28.8179	75.8321

Table 3. Nodal and bulk system probabilistic reliability indices (Bus2-1bank 고장)

Bus No.	LOLE [hrs/day]	EENS [MWh]	ELC [MW/cur · day]
Bus2	0.1727	2.0452	11.8409
Bus3	0.2158	11.6428	53.9596
Bus4	0.1882	5.8264	30.9569
Bus5	0.1976	5.4166	27.4095
Bulk	0.2008	24.9310	124.1670

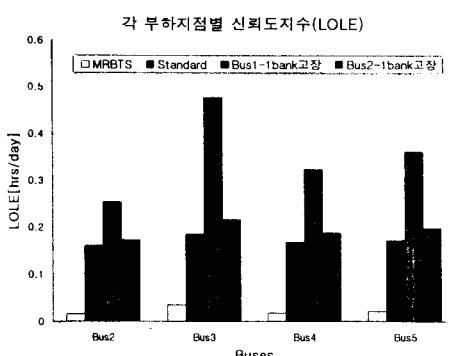


Fig. 5. LOLE at load points

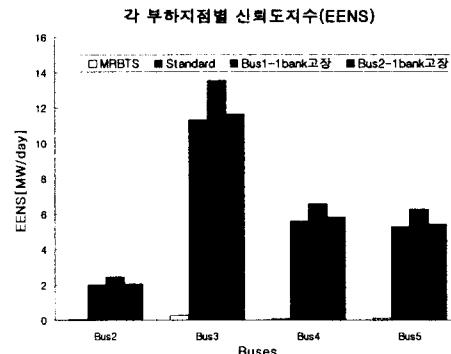


Fig. 6. EENS at load points

3. 결 론

본 논문에서는 이미 본 연구자들이 제안한 바 있는 유효부하지속곡선(CMELDC)을 이용하여, 아직까지 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 그 연구가 미흡한 발전기, 송전계통 및 변전소의 주 변압기의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통의 각 지역별 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구를 실시하여 보았다.

본 연구자들이 제안한 방법의 유용성 및 실용성을 정리하면 다음과 같다.

1. 발전기, 송전계통 및 주요변압기의 사고율과 같은 불확실성을 고려한 복합전력계통의 확률론적 신뢰도 평가를 더욱 상세하고도 용이하게 평가할 수 있게 되었다.
2. 최근 활발히 진행되고 있는 규제완화된 전력시장에서의 각 부하지점별(nodal) 최적신뢰도 기준을 설정 할 수 있게 되었다.
3. 복합전력계통의 신뢰도 평가 및 그 응용범위가 넓어졌을 뿐만 아니라, 본 연구를 토대로 부하지점별 확률론적 발전비용산정이나 해석적인 방법에 의한 공급지 장비추정도 가능해졌다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목표기초연구 (과제번호: 2000-1-30200-006-3) 지원으로 수행된 결과의 일부임

(참 고 문 헌)

- [1] 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 & Part 2)" IEEE Power Engineering Review, December, 1999, p.4~14(Part1), p10~16(Part2).
- [2] CEA, *Industry Restructuring - News & Info*: CEA connections online news, March 2000.
- [3] Jaesook 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.
- [4] Jaesook Choi, Seougpil Moon, Hongsik Kim, Byongjun Lee and Roy Billinton, "Development of ELDC and Reliability Evaluation of Composite Power System Using Monte Carlo Method", IEEE, PES, SM2000, Seattle, USA.
- [5] 김홍식, 문승필, 최재석; "각 부하지점별 유효부하지속곡선 작성법에 관한 연구" 대한전기학회 논문지, 2000년 4월, Vol. 49A, No. 4, pp. 195-198.