

규제완화된 전력시장 하에서의 송전계통 신뢰도 평가방법의 개발

차준민* 김홍식** 최재석** 오광해***
 *대전대학교 전기공학과 **경상대학교 전기공학과 ***한국철도기술연구원

Development of a Method for Reliability Evaluation of Transmission System under the Deregulated Electricity Market

Junmin Cha* Hongsik Kim** Jaeseok Choi** Kwanghae Oh***
 *Daejin University **Gyeongsang National University ***Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper presents a method for assessing reliability indices of transmission system. Because successful operation of electric power under the deregulated electricity market depends on transmission system reliability management, quantity evaluation of transmission system reliability is very important. The key point idea is based on that the reliability level of transmission system is equal to reliability level difference of between composite power system(HLII) and generation system(HLI). It is sure that risk indices of reliability of composite power system are larger than those of generation system. It is the reason that composite power system includes uncertainties and capacity limit of transmission lines. The characteristics and effectiveness of this methodology are illustrated by the case study using MRBTS.

Keywords: Power system reliability, Composite power system, Generation system, Power system hierarchical level, Deregulated electricity market

전력시장의 완전한 경쟁시장체제를 구축하는데 매우 중요한 역할을 담당할 송전계통의 신뢰도 평가를 위한 새로운 방법을 제시한다. 이는 HLII에서 얻어진 값과 HLI으로 모델링하여 얻어진 값과의 차이가 송전계통의 신뢰도 수준이라 할 수 있는데서 출발한다. MRBTS에 대한 사례연구를 통하여 제시한 방법의 유용성을 살펴보았다.

2. 규제완화된 전력시장 하에서의 전력계통의 신뢰도 평가

2.1 전력계통의 계층구조

통상 전력계통을 그 구성요소, 그리고 운영 및 계획 특성상 그림 1과 같이 분류하여 각종 평가 및 해석을 실시하고 있다. 여기서 보는 것처럼 발전계통 및 송전계통을 포함한 복합전력계통(HLII)까지의 신뢰도 지수와 발전계통만의 신뢰도 지수의 차는 곧 송전계통만의 신뢰도 지수가 됨을 알 수 있다[8,9].

1. 서론

최근 현대 에너지 산업의 핵심적인 위치를 차지하고 있는 전력산업에서도 독점상태, 과도한 규제 및 과도한 공공 소유 등을 특징으로 하던 기존 개념이 규제완화와 경쟁도입의 과정을 통하여 새로운 개념으로 이해되고 있다. 이에 준하여 1990년 이후 영국의 잉글랜드 및 웨일즈 지역을 필두로, 유럽(EC), 미국, 일본 및 호주 등으로 급속히 확산되고 있는 등 전 세계적으로 국가주도형 독점체제로부터 자유경쟁체제로 전환하기 위하여 각종 관련 규제가 철폐되거나 완화되고 있으며 전력산업의 구조개편도 활발히 이루어지고 있다[1-3].

이러한 전력산업의 구조개편은 실제적으로 컴퓨터 및 정보통신분야의 최근 급격한 기술발달과 이를 바탕으로 한 전력거래방식의 개발 때문에 가능하게 되었다고 볼 수 있으며 궁극적으로는 자유 경쟁을 통하여 효율을 향상시킬 수 있는 새로운 전력산업 구조 모델의 완성을 목표로 하고 있다. 특히, WTO 체제와 시장개방이라는 새로운 세계 무역질서가 형성됨에 따라, 현재의 전력산업의 경쟁체제 도입을 위한 내부적 형태의 압력뿐만 아니라 전력부문에 대한 시장개방이라는 외부적 형태의 압력도 각국의 전력산업 개편을 서두르게 하는 요인이 되고 있다. 전세계적인 전력산업의 흐름은 규제완화체제로 변화 중에 있으며, 우리 나라의 전력산업도 6개 발전사업단의 분리를 시작으로 도매경쟁과 소매경쟁의 체제로 탈바꿈하고 있는 시점이다. 특히, 규제완화된 전력시장 하에서는 발전계통 신뢰도 평가와 더불어 더욱 중요시되는 것이 네트워크를 이용하여 소비자에게 전력을 직접적으로 공급해주는 송전계통의 신뢰도 평가라고 할 수 있다. 신뢰도 평가를 위한 다양한 방법이 연구되어 왔으나 현재까지 송전계통만을 위하여 확률론적인 신뢰도 지수를 제시하는 연구는 매우 미약한 상태이다[4-7]. 본 연구에서는 국내에서도 곧 이루어질

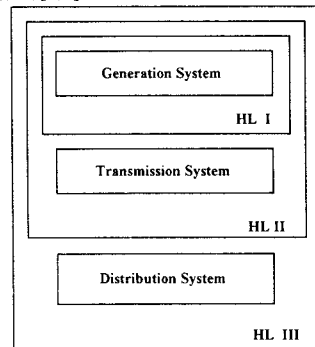


Fig. 1. Power system hierarchical level diagram.

2.2 HLI의 신뢰도 평가

HLI에서의 유효부하지속곡선 $HLI\Phi(x)$ 를 이용하여 발전계통만의 신뢰도 지수들인 전력부족확률($LOLP_{HL}$: Loss of load expected) 및 공급지장전력량의 기대치($EENS_{HL}$: Expected energy not supplied) 등을 식 (1) 및 식 (2)처럼 구할 수 있다.

$$LOLP_{HL} = HLI\Phi(x)|_{x=IC} \quad [pu] \quad (1)$$

$$EENS_{HL} = \int_{IC}^{IC+Lp} HLI\Phi(x) dx \quad [MWh] \quad (2)$$

단, IC = 총설비용량[MW]

$$HLI\Phi_i(x_e) = HLI\Phi_{i-1}(x_e) * HLI\Phi_{oi}(x_{oi}) = \int HLI\Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) HLI\Phi_{oi}(x_{oi}) dx \quad (3)$$

⊗ : 상승적분을 의미하는 연산자

$$HLI \Phi_{oi}(x_e - x_{oi}) = HLI \Phi(x_L)$$

$HLI f_{oi}(x_{oi})$: i 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

L_p : 계통 최대부하[MW]

2.3 HLII의 신뢰도 평가

(1) 각 부하지점별 신뢰도 지수

복합전력계통의 각 부하지점에서의 유효부하지속곡선 $k \Phi(x)$ 를 이용하여 전력부족확률(LOLP_k) 및 공급지장전력량의 기대치(EENS_k) 등을 식 (4) 및 식 (6)처럼 구할 수 있다[10-12].

$$LOLP_k = k \Phi(x)|_{x=AP_k} \quad [\text{pu}] \quad (4)$$

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_{pk}} k \Phi_i(x) dx \quad [\text{MWh}] \quad (5)$$

단, AP_k : k 부하지점의 최대도달가능 공급전력 [MW]

$$k \Phi_i(x_e) = k \Phi_{i-1}(x_e) \otimes k f_{oi}(x_{oi}) \\ = \int k \Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) k f_{oi}(x_{oi}) dx \quad (6)$$

⊗ : 상승적분을 의미하는 연산자

$$k \Phi_{oi}(x_e - x_{oi}) = k \Phi(x_L)$$

$k f_{oi}(x_{oi})$: i 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

L_{pk} : k 부하지점의 최대부하[MW]

(2) Bulk 계통의 신뢰도 지수

HLII까지의 Bulk 계통의 신뢰도 지수 중 공급지장전력량의 기대치(EENS_{HLII})는 식 (7)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 (8)과 같이 구하도록 한다.

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \quad [\text{MWh}] \quad (7)$$

$$LOLP_{HLII} = \sum_{k=R}^{NL} P(B_k) P_{lk} \quad [\text{pu}] \quad (8)$$

단, NL : 부하지점의 수

R : 공급지장이 발생하는 상태들의 집합

$P(B_k)$: 사고용량 B_k 가 발생할 확률

P_{lk} : k 상태에서의 공급지장시간확률

3. 송전계통의 신뢰도평가

앞서의 HLI 및 HLII수준의 신뢰도 지수들을 이용하여 송전계통만의 신뢰도 지수인 $LOLP_{TS}$ 및 $EENS_{TS}$ 를 구하면 다음과 같다.

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

$$EENS_{TS} = EENS_{HLII} - EENS_{HLI} \quad [\text{MWh/yr}] \quad (10)$$

또한, 연구대상기간 동안의 평균공급부족전력을 의미하는 $AEDNS$ (Average Expected Demand Not Served)와 공급부족

이 발생하는 시간동안의 공급부족전력을 의미하는 ELC (Expected Load Curtailments)를 구하면 각각 식 (11) 및 식 (12)와 같다.

$$AEDNS_{TS} = EENS_{TS}/T \quad [\text{MW/ pu.yr}] \quad (11)$$

$$ELC_{TS} = EENS_{TS}/LOLP_{TS} \quad [\text{MW/ pu.cur.yr}] \quad (12)$$

단, T : 연구대상기간

4. 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 나타낸 것과 같다.

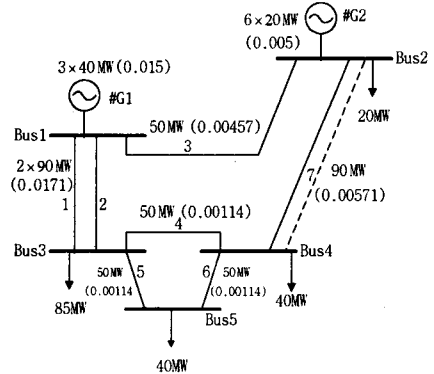


Fig. 2. MRBTS for case study.

표 1은 HLI 및 HLII에서 얻어진 각각의 신뢰도 지수들과 그 차를 보인 것이다. 여기서보는 바와 같이 이들 차는 송전계통의 신뢰도 수준이라 할 수 있다. 한편, 사례연구에서는 편의상 전력부족확률(LOLP)에 시간을 곱한 전력부족시간기대치(LOLE: Loss of load expectation)를 사용하였으며 연구기간은 하루에 대한 신뢰도 평가를 하는 것으로 하였다.

Table 1. Reliability Indices - Case 1

Level \ Index	HLII	HLI	송전계통
LOLE[hrs/day]	0.0544	0.0471	0.0073
EENS[MWh/day]	0.3292	0.1655	0.1637
AEDNS[MW/day]	0.0137	0.0069	0.0068
ELC[MW/cur.day]	6.0515	3.5138	22.736

한편, 표 2는 모선 2와 모선 4 사이의 송전선로 T7을 1회선에서 2회선으로 증강시켰을 경우인데 기준으로 택한 경우 1의 결과와 비교해 볼 때 당연히 발전계통(HLI)의 신뢰도 지수는 변화가 없지만 송전계통의 신뢰도 수준은 급격히 상승함을 알 수 있다.

또한 표 3은 모선1에 발전기를 1대 더 추가시킨 경우의 송전계통의 신뢰도 지수의 영향을 살펴본 것인데 발전계통의 신뢰도지수는 크게 증가하고 송전계통의 신뢰도 수준도 송전선로를 증강시킨 경우인 경우 2보다는 적지만 다소 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 이는 송전계통만의 신뢰도는 발전계통의 신뢰도에 영향을 미치지 않지만 발전계통의 신뢰도는 송전계통의 신뢰도에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Reliability Indices - Case 2

Index \ Level	HLII	HLI	송전계통
LOLE[hrs/day]	0.0473	0.0471	0.0002
EENS[MWh/day]	0.1701	0.1655	0.0046
AEDNS[MW/day]	0.0071	0.0069	0.0002
ELC[MW/cur.day]	3.5962	3.5138	46.000

Table 3. Reliability Indices - Case 3

Index \ Level	HLII	HLI	송전계통
LOLE[hrs/day]	0.0029	0.0013	0.0016
EENS[MWh/day]	0.0554	0.0037	0.0517
AEDNS[MW/day]	0.0023	0.0002	0.0021
ELC[MW/cur.day]	19.103	2.8462	30.412

나아가 그림 3은 각 송전선로의 상정사고에 대하여 송전계통의 신뢰도에 미치는 정도를 살펴본 결과이다.

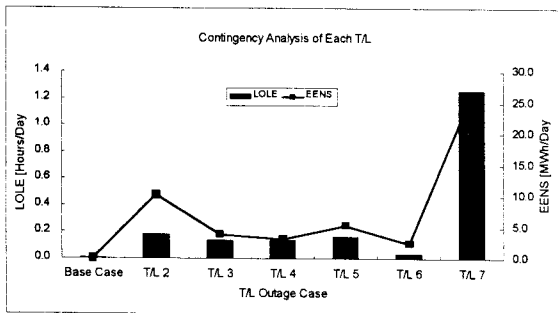


Fig. 3. Contingency Analysis of Each T/L.

그림 3으로부터 상정사고 중에서 송전계통만의 LOLE와 EENS값이 가장 커지는 경우는 6×20[MW]의 발전소와 부하단을 연결하는 7번 선로의 경우이다. 이 상정사고의 경우, 7번 선로가 탈락되면 모선 2번 발전소의 총 발전력 120[MW]를 용량 50[MW]인 3번선로만을 통하여 송전해야 하므로 공급부족이 크게 일어나 신뢰도가 가장 악화될 것으로 판단된다. 이는 송전선로의 혼잡(Congestion)을 의미하는 것으로서, 본 연구에서 제안하는 송전계통의 신뢰도 평가 방법이 차후 혼잡처리 방안에 관한 연구의 토대가 될 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 송전계통만의 신뢰도를 평가할 수 있는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 제시하는 알고리즘의 주된 개념은 복합전력계통(HLII)의 신뢰도 지수와 발전계통(HLI)만의 신뢰도 지수와의 차는 곧 송전계통만의 신뢰도 수준을 의미한다는 데 있다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 어느 송전선로의 증강이 송전계통의 전체 신뢰도를 얼마나 상승시키는지를 정량적으로 분석할 수 있으므로 송전계통의 계획 및 운용에 합리성을 기할 수 있는 자료를 제공할 수 있다.
- 전원의 증가나 발전기의 합리적인 운용도 역시 미약하지만 송전계통의 신뢰도를 상승시키고 있음을 알 수 있었다.
- 각 송전선로의 고장시 송전계통전체에 미치는 신뢰도 수준을 산출할 수 있으므로 각 송전선로의 신뢰도 측면에서의 감도분석이 가능하다.
- 나아가 각 송전선로가 각 부하지점별로 얼마나 신뢰도 수준에 영향을 미치는지를 상세하게 검토할 수 있으므로 차후 각 송전선로의 신뢰도를 가치로 평가할 수 있는 길을 마련하였다.

본 알고리즘을 이용하면 규제완화된 전력시장 하에서 신뢰성을 갖는 송전계통을 계획 및 운용하는데 크게 도움이 될 수 있으리라 기대된다. 여기서는 조류를 유량법으로 계산하였으나 AC조류를 이용하면 전압의 크기나 선로손실까지 감안한 송전계통 신뢰도평가가 이루어질 것으로 사료되며 차후 이에 대한 연구가 기대된다.

(참 고 문 헌)

- 전용훈, 안재욱, 장의태, 이 선, 김발호 및 Ross Baldick, "전력산업 구조변화 및 전력탁송에 관한 연구" 한국전력공사 전월계획처 보고서, 1998, 3.
- 박종근, 김발호, 박종배 및 정도영, "전력산업구조개편 개론" 기초전력공학공동연구소보고서, 1999, 8.
- 서울대학교 경제연구소 및 한국전력공사 전력산업구조조정실, "전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구" 한국전력공사 전력산업구조조정실 보고서, 1999, 8.
- 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.
- W.S Read, W.K. Newman, I.J. Perez-Arriaga, H.Rudnick, M.R. Gent & A.J. Roman, "Reliability in the New Market Structure (Part2)" IEEE Power Engineering Review, January, 1999, p.10~16.
- M. Ilic, et al, "Power Systems Restructuring; Engineering and Economics" Kluwer Academic Pub., 1998.
- S. Niioaka, 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.
- Roy Billinton and Wenyan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", Plenum Press, 1994.
- Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Assessment of Large Electric Power Systems", Kluwer Academic Pub., 1988.
- 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.
- 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.
- 최 재석, 김 홍식; "전력계통의 건강도 해석에 관한 기초 연구" 2000년, 5월, 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집 pp.45-48.