

동북아시아 연계계통의 신뢰도평가

최재석* 권증지* 트란트롱틴*
경상대학교 전기공학과*

윤재영** 박동욱**
한국전기연구원**

문승일***
서울대학교***

차준민****
대진대학교****

Reliability Evaluation for Interconnecting the Power Systems in North East Asia

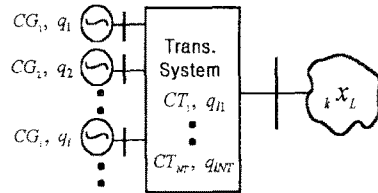
J.S. Choi J.J. Kwon T.T. Tran
Gyeongsang National University*

J.Y. Yoon D.W. Park
KERI**

S.I. Moon***
Seoul National University***

J.M. Cha****
Daejin University****

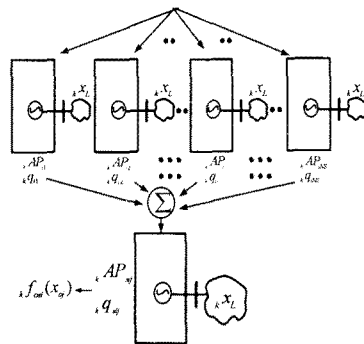
Abstract - This paper illustrates the case studies of reliability evaluation for interconnecting power systems in the north east Asia by using the tie line constrained equivalent assisting generator model(TEAG), which has been already developed in the second project year. A reliability evaluation program, it is named, NEAREL, based on the TEAG model was made. The reliability evaluation results for the seven interconnection scenarios of the actual power systems of six countries in the north east Asia are introduced and compared. The reasonable capacity of the tie line for three countries interconnection scenario is suggested from sensitivity analysis.



(a) 송전계통까지 감안한 실제계통

1. 서 론

본 연구는 동북아 계통 연계 시 각 계통의 신뢰도 평가를 계통 특성별 및 연계선 특성에 따른 영향을 정량적으로 분석할 수 있는 적합한 평가 모형 및 프로그램(NEAREL)을 개발하고 이를 이용하여 남한, 북한 및 극동러시아 등 연계 3개국 및 일본, 북동중국 및 몽고의 전력계통까지 감안한 동북아 6개국의 연계 시 각 계통의 신뢰도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 보았다 [1,2]. 본 모형은 각 연계선로의 불확실성(사고율)을 고려할 수 있으며 나아가 연계하고자 하는 계통의 송전계통의 불확실성도 고려할 수 있다[3]. 개발한 모형에 기초해서 작성한 프로그램을 이용하여 동북아 6개국의 2010년 및 2020년에 대한 7개의 시나리오를 설정하고 사례연구를 실시하여 보았으며 그 각각에 대하여 장단점을 비교하고 분석하였다[4,5]. 이중 상대적으로 가장 실현 가능성이 높다고 판단되는 동북아 3개국 계통(남한, 북한 및 극동러시아계통) 연계의 경우에 대하여는 3GW 가 신뢰도 측면에서 가장 적절한 연계선로 용량으로 얻어졌다. 본 연구에서 개발한 신뢰도 평가모형 및 프로그램은 비록 거시적인 관점에서의 평가용이지만 차후 동북아 연계 계통의 계획 및 운용이 이루어지도록 하는 토대를 구축함에 도움을 주리라 기대된다.



(b)와임의의아부하지점에서의 복합계통의 등가발전기(SFEG) 및 확률분포함수(f_{os})

그림 1. 계통B의 임의의 부하점 #BK에서의 등가발전기(SFEG#BK)

2. 등가보조발전기모형

2.1 모형구축절차

2.1.1 계통B의부하점 #BK의 등가보조발전기(SFEG#BK)

발전계통 및 송전계통을 함께 고려한 복합전력계통에서의 설비들의 용량 제약 및 사고율을 고려한 임의의 부하점에서의 등가발전기 모델은 그림 1과 같이 모델링 될 수 있다. 이와 같은 복합전력계통의 임의의 부하점 #K에서의 등가발전기(SFEG)의 상태확률분포함수(f_{os})는 상태확률 및 그때의 부하점#K에 최대도 도달할 수 있는 최대도달전력을 계산함으로써 구해질 수 있다. 그러므로 지원계통 B의 #BK에서의 등가발전기는 그림 2와 같이 모델링 된다.

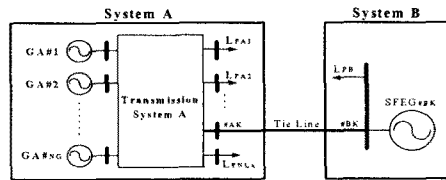


그림 2. 계통B의 부하점 #BK에서의 SFEG#KB

2.1.2 #BK지점에서의 부하를 고려한 수정된 등가보조발전기(EAG#BK)모델

여기서는 부하점 #BK에서의 부하를 삭감시킨 것이 지원하고자 하는 계통 A에 지원할 수 있는 계통 B의 설계 등가 발전기라 할 수 있다. 이와 같은 수정된 등가발전기(EAG)의 확률분포함수(PDF)의 용량은 식(1)과 같이 계산되며 그림 3은 이를 나타낸 것이다.

$$AP_j^{new1} = \text{maximum}((AP_j - L_{p\#BK}), 0.0) \quad (1)$$

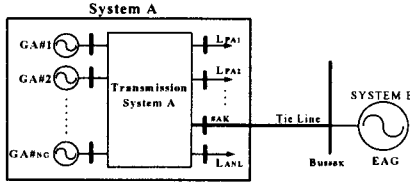


그림 3. 계통A가 계통B의 등가보조발전기 (EAG_{#BK})와 연계된 그림

2.1.3 계통A의 #AK지점에서 연계선로용량제약을 고려한 등가발전기(TEAG)모델

앞에서 수정된 EAG는 실제 연계선로의 용량제약에 의하여 지원할 수 있는 용량이 더욱 제한 될 수 있다. 이와 같이 연계선로 용량제약까지 감안한 것이 실제적인 최종 등가발전기라 할 수 있다. 이를 연계선로 용량제약 등가발전기(TEAG)라 하고, 이의 확률분포함수(PDF)는 식(2)와 같이 계산되며 그림 4는 이를 보인 것이다.

$$AP_j^{new2} = \text{Minimum}(AP_j^{new1}, TICP) \quad (2)$$

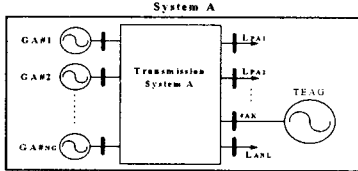


그림 4. 연계선로용량제약을 고려한 등가발전기 (TEAG)모델

2.2 작업 흐름도

전술한 TEAG를 작성하고 지원받는 계통의 신뢰도평가를 위한 작업 흐름도를 보이면 그림 5와 같다. 이를 이용하여 각 계절별로 설정한 계통특성자료를 토대로 하여 연계하는 계통들의 신뢰도를 평가할 수 있다.

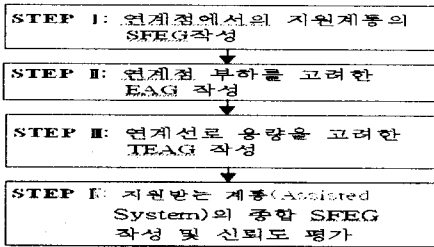


그림 5. 작업 흐름도 과정

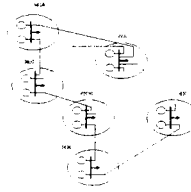
3. 사례연구

3.1 검토 시나리오

- 시나리오 I: 남한-북한-극동러시아 직렬연결형 (기본안)
- 시나리오 II: 남한-극동러시아 직접연결(북한은 경우지)
- 시나리오 III: 남한-극동러시아(동해이용 해저케이블)
- 시나리오 IV: 남한-북한-극동러시아 (북한 송전망을 이용한 연계)
- 시나리오 V: 남한, 북한, 극동러시아 및 일본 4개국 환상망 연결형
- 시나리오 VI: 남한, 북한, 극동러시아, 북동중국 및 몽고 5개국 환상망 연결형
- 시나리오 VII: 남한, 북한, 극동러시아, 일본, 북동중국 및 몽고 등 동북아 6개국 환상망 연결형.

본 연구에서 편이상 사용한 각 국의 약칭 및 전체적인

연계망을 그림으로 보이면 아래와 같다.



1. ROK: Republic of Korea
2. KPDR: Korean People's Democratic Republic
3. FER: Far East Russia
4. NJP: North Japan
5. NEC: North East China
6. MGA: Mongolia

3.2 검토 I: 2 및 3개국 연계형

우선, 3개국 연계시 연계선로용량별 신뢰도 지수의 변화를 분석해보았다. 남한의 경우를 보이면 그림 6과 같다. 여기서 연계용량이 3GW에서부터는 신뢰도지수가 포화되고 있음을 알 수 있다. 북한 및 러시아의 경우에 동일한 정성적 특성을 얻었다. 그러므로 본 시나리오에 대하여 적정연계용량은 3GW이라고 사료된다.

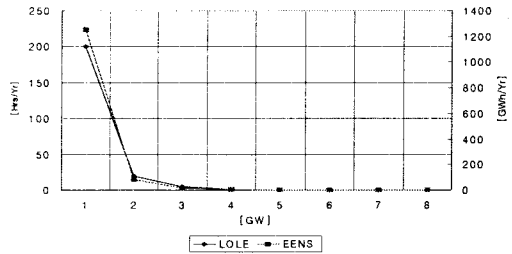


그림 6. 3개국 연계시 남한의 연계선로용량별 신뢰도 지수의 변화 (2010년도)

위의 분석을 토대로 연계용량을 3GW로 가정하고 얻은 남한, 북한 및 극동러시아를 연계할 경우에 2010년도의 남한의 신뢰도 지수를 보이면 표1과 같다.

표 1. 3개국 연계시 남한의 신뢰도: 2010년도, 3GW

ROK 2010						
SEASON		SPRING	SUMMER	FALL	WINTER	Total
LOLE [Hrs/Yr]	단독	0.035873	0.116515	0.484491	0.046054	0.682933
	연계시	0.48210	0.01798	1.64678	2.33056	4.47742
EENS [GWh/Yr]	단독	0.035305	0.205969	1.38940	0.042458	1.673132
	연계시	1.43217	0.036510	7.07294	9.62322	18.164840
EIR [PU]	단독	1.00000	0.99999	0.99999	1.00000	1.000000
	연계시	0.99998	1.00000	0.99994	0.99992	0.99996

표 2. 3개국 연계형의 시나리오별 신뢰도 지수 비교 (2010년도)

시나리오/국가	ROK	DPRK	FER	Average	비교 (연계형우선 순위도)	
시나리오 I	LOLE	4.47742	2.59321	2.36353	3.14472	2
	EENS	18.16484	2.29839	1.42320	7.295487	
시나리오 II	LOLE	0.301094	-	0.138382	0.219738	1
	EENS	0.860168	-	0.053989	0.464683	
시나리오 III	LOLE	0.301094	-	0.138382	0.219738	시나리오 II 와 동일
	EENS	0.860168	-	0.053989	0.464683	
시나리오 IV	LOLE	4.74965	-	2.48566	3.617655	3
	EENS	29.8837	-	2.43638	16.16004	

위의 3개국 연계형의 결과를 종합분석하면 다음과 같다.

1. 적정 연계용량은 여유력 등을 포함하여 신뢰도지수가 포화되는 3GW가 가장 적절하다고 사료된다.
2. 연계형은 북한을 단지 경우지 못한 남한과 극동러시아만을 연계하는 시나리오 II가 가장 좋다고 판단된다.
3. 북한의 송전망을 이용하여 연계하는 시나리오 IV는 신

- 회도 측면에서는 가능한 한 피하는 것이 좋다고 판단된다.
4. 단독계통 경우보다 연계계통의 전체적인 신뢰도는 모든 시나리오에 대하여 좋아지고 있다.
 5. 연계 후 남한은 신뢰도가 저하되며 북한 및 러시아는 높아짐. 그러나 남한의 경우에도 최대부하가 발생하여 설비투자비를 증가시키는 하계 시에는 신뢰도가 높아지며 타 계절인 춘계, 추계 및 동계 시에는 신뢰도의 저하가 그다지 문제가 되지 않는다고 판단된다. 그러므로 신뢰도 측면에서의 연계의 효과가 당초 예상한 대로 얻어진다고 판단된다.
 6. 2020년도도 2010년도와 매우 동일한 정성적인 신뢰도 변화 특성을 보였다.

3.2 검토 II: 4, 5 및 6개국 연계형

표 3, 표 4 및 표 5는 각각 동북아 4개국, 5개국 및 6개국의 연계시에 얻어진 신뢰도 지수를 나타낸 것이다.

표 3. 4개국 연계형의 신뢰도 분석 결과(2010년도)

	단독			연계시		
	LOLE [Hrs/Yr]	EENS [GWh/Yr]	EIR [PU]	LOLE [Hrs/Yr]	EENS [GWh/Yr]	EIR [PU]
ROK	0.682933	1.673132	1.00000	1.938732	11.41546	0.999975
DPRK	338.45784	658.97156	0.99221	1.353641	1.489023	0.99998
FER	4.907834	4.324243	0.99992	1.27986	0.924300	0.99998
JPN	0.24075	0.59448	0.999995	1.09397	17.85549	0.9999825
Ave.	86.0723	166.3909	0.9980	1.4166	7.9211	1.0000

표 4. 5개국 연계형의 신뢰도 분석 결과(2010년도)

	단독			연계시		
	LOLE [Hrs/Yr]	EENS [GWh/Yr]	EIR [PU]	LOLE [Hrs/Yr]	EENS [GWh/Yr]	EIR [PU]
ROK	0.682933	1.673132	1.00000	4.86533	15.46569	0.9999625
DPRK	338.45784	658.97156	0.99221	2.69839	1.893160	0.9999725
FER	4.907834	4.324243	0.99992	2.50457	1.176005	0.999975
NEC	20.04523	40.05638	0.99991	2.89269	10.35330	0.9999725
MNG	131.4000	83.9195	0.98500	1.09745	0.229408	0.9999575
Ave.	99.0988	157.7890	0.9954	2.8117	5.8235	1.0000

표 5. 6개국 연계형의 신뢰도 분석 결과(2010년도)

	단독			연계시		
	LOLE [Hrs/Yr]	EENS [GWh/Yr]	EIR [PU]	LOLE [Hrs/Yr]	EENS [GWh/Yr]	EIR [PU]
ROK	0.682933	1.673132	1.00000	3.56750	11.824026	0.99997
DPRK	338.45784	658.97156	0.99221	2.00361	6.031480	0.9999725
FER	4.907834	4.324243	0.99992	1.86526	0.9199846	0.999975
NEC	20.04523	40.05638	0.99991	2.14289	8.101669	0.999975
MNG	131.4000	83.9195	0.98500	0.81899	0.172636	0.999955
JPN	0.24075	0.59448	0.999995	1.81674	19.367426	0.9999775
Ave.	82.6224	131.5899	0.9962	2.0358	7.7362	1.0000

6개국 연계형의 결과를 종합분석하면 다음과 같다.

1. 6개국형 연계시 모든 시나리오에 대하여 전체계통의 신뢰도는 매우 좋아짐을 알 수 있었다.
2. 상대적으로 계통이 크면서 단독 신뢰도가 높은 남한과 일본은 계통연계시 다소 신뢰도가 떨어지며 대신 타 국가의 신뢰도가 높아짐을 보였다.
3. 그러나 남한과 일본도 미리 정한 신뢰도기준을 만족하는 범위내에서 연계용량을 정한다면 크게 문제될 것이 없다고 사료된다.
4. 6개국 연계형은 일종의 환상망 연계형이므로 연계하는 계통의 상대적 크기에 따라 매우 신뢰도의 증감폭이 크게 나타난다. 특히 작은 계통의 신뢰도 향상폭은 매우 크다.

4. 결 론

본 동북아 연계 연구에서는 자체 개발한 복합전력계통에서의 연계계통의 신뢰도 평가를 위한 등가보조발전기모형을 이용하여 직렬형 뿐만 아니라 환상형 연계계통에 대한 신뢰도를 평가할 수 있는 Tools를 완료하였으며 나아가 NEAREL이라고 불리는 신뢰도평가 프로그램을 작성하고 동북아시아 지역 실제계통에 적용한 사례연구를 성공적으로 수행하였다. 앞으로 본 연구에서 개발한

HLII에서의 등가발전기 모형을 이용한 연계계통의 신뢰도평가 프로그램인 NEAREL은 동북아 전력계통연계 연구과제의 일환으로서 많은 문제들에 대한 해결책을 제시하는 기본 바탕이 될 것으로 기대된다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 연계계통의 송전선로용량 및 불확실성을 고려할 수 있는 다개 환상망 연계 계통 신뢰도평가프로그램인 NEAREL을 개발하였다. 이의 특성은 다음과 같다.
 - 계통의 발전기 및 선로의 사고확률을 고려하는 확률론적 신뢰도 평가 프로그램이다.
 - 임의의 특정계통을 상세하게 송전계통을 고려한 HLII 수준으로 고려할 수 있다.
 - 각 계통의 발전기에 대하여 계절별 보수유지율을 고려할 수 있다.
 - 계절별 부하패턴을 고려할 수 있다.
2. 본 연구에서 개발한 다개환상망 연계계통 신뢰도평가 프로그램을 이용하여 우선 남한, 북한, 러시아 등 동북아 3개국을 직렬 연결형 연계계통의 신뢰도평가를 실시한 결과 2GW에서 가장 신뢰도 증가 효과가 크며 3GW가 본 3개국에 대하여 매우 적합한 연계송전용량임을 얻었다.
3. 3개국 연계에서 연계할 경우에 각 계통의 신뢰도 영향은 아래와 같았다.
 - 남한의 경우에 5GW 연계용량 이상일 경우에 남한의 전체적인 신뢰도가 상승하였다.
 - 그러나 남한의 경우에 최대부하가 나타나는 여름에는 신뢰도가 3GW부터 상승하였다.
 - 러시아 및 북한은 신뢰도가 모든 계절에 대하여 좋아졌다. 특히, 북한은 단계보다 상대적으로 그 크기가 가장 작으므로 신뢰도 상승효과가 가장 크게 나타났다.
4. 연계를 3개국의 전체적인 신뢰도는 좋아졌다.
 - 대륙 5개국(남한, 북한, 극동러시아, 북동중국 및 몽고) 연계 시 남한은 신뢰도가 저하된다. 그러나 여름에는 모든 계통의 신뢰도가 좋아졌다. 이는 남한보다 타 계통이 모두 겨울에 최대부하가 나타나는 계통이기 때문인 것으로 사료된다.
5. 4개국(남한, 북한, 극동러시아 및 일본)의 연계 시에는 동계 시 일본과 남한은 신뢰도가 저하되고 북한과 러시아는 신뢰도가 상승하였다. 그러나 하계 시에는 최대부하를 갖는 일본과 남한도 역시 신뢰도가 상승하였다. 이는 계통 연계 시 전체적으로 신뢰도가 좋아짐을 의미한다.
6. 연계 계통의 각 나라의 상대적 계통크기에 따라 연계송전의 적정용량도 다르게 나타나며 이에 대한 상세 연구는 차후과제로 남는다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부지원 전력산업 기술기반 조성사업에 의한 한국전기연구원 지원으로 기초전력공학공동연구원의 연구지원하에 연구된 결과임.

[참 고 문 헌]

- [1] Roy Billinton, Ronald N Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984
- [2] R.Billinton and W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods : Plenum Press, 1994.
- [3] Jaeseok Choi, TrungTinh Tran, Sungrok Kang, Dongwook Park, Jaeyoung Yoon, Seungil Moon, and Roy Billinton, "Tie Line Constrained Equivalent Assisting Generator Model (TEAG) Considering Forced Outage Rates of Transmission Systems" KIEE, International Journal on PE, June, 2004.
- [4] G.F. Kovalev, "Methods and Algorithms for Evaluating the EPS Reliability in Steady-State Conditions", 1985, 6th -USSR Energy Symposium Proceedings, Tokyo, pp.97-119, November 13, 1985,
- [5] Sergei Podkvalnikov, "Study for Russia, Democratic People Republic of Korea, Republic of Korea, and China Power Interconnection Analysis of Current Status", Report of Energy Systems Institute Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033, Russia.