

위험도 개선 지수를 이용한 송전계통 계획 수립에 관한 연구

Transmission Network Expansion Planning Using Risk Level Improvement Index

김 성 열*
(Sung-Yul Kim)

Abstract - This paper attempts to evaluate the impact of power plant penetration on constraints of a transmission network and proposes a methodology based on risk level, which can evaluate the condition of the network and facilities intuitively. Furthermore, based on this methodology, RLII(Risk Level Improvement Index) is proposed in order to establish comprehensive TNEP(Transmission Network Expansion Planning) from a viewpoint of ISO(Independent System Operator). In order to verify the proposed methods in this paper, real power systems in Incheon and Shiheung areas, south Korea are applied to the case study.

Key Words : Transmission network expansion planning, Risk level improvement index, Risk level assessment

1. 서 론

화석연료의 고갈, 지속적인 전력소비량의 증가, 탄소배출 저감을 위한 범국가적 정책 및 신재생에너지 관련 기술 향상 등으로 인해 기존의 전력계통은 점진적인 변화를 겪고 있다. 또한, 이러한 계통망의 변화는 기존 계통의 안정도나 신뢰도, 설비의 위험도 등에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 전력계통 계획을 수립할 때는 발전원을 포함한 신규 전력설비의 계통 연계 및 부하변동 등 계통망의 변화를 충분히 검토할 필요성이 있다. 또한, 이러한 검토를 통해 발전 사업자나 계통망 운영자는 안정적이고, 경제적인 계통계획안을 수립해야 한다[1-4].

전력계통은 일반적으로 발전원, 변압기, 선로, 조상설비, 보호설비 및 관리, 제어, 통신 등을 위한 설비가 유기적으로 통합된 복잡한 시스템으로서, 송배전 전력의 품질을 보장하기 위해 전력계통 계획을 수립할 때는 부하수준에 적합한 전력 공급, 정상상태 및 상정사고 시 계통의 운전 성능, 전력계통 보호를 위한 설계와 협조가 고려되어야 한다. 특히, 송전계통 계획은 전력계통 계획의 중요한 부분 중 하나로서, 경제적이면서도 안전한 전력전송을 위해 대상기간 동안의 부하변동 및 발전계획에 따라 최적의 계통계획 수립을 그 목적으로 한다[5]. 이에 따라, 일반적으로 송전계통계획은 정적 계통계획과 동적 계통계획으로 구분할 수 있으며, 문제해결을 위한 적용 기법에 따라 선형 계획법(LP: Linear Programming), 동적 계획법(DP: Dynamic Programming), 혼합 정수 계획법(MIP: Mixed Integer Programming) 및 휴리스틱 기법 등으로 나누어진다[6-11]. 기존의 송전계통 계획 기법은 신규 설비의 계통 연계에 따른 기존 전력 설비의 위험도를 임계지점에 대해서 평가하여 반영함으로써, 설비의 현 상태에 따른 위험도 자체의 변화가 미치는 영향에 대해

서 정확히 평가할 수 없다는 단점이 있다[12]. 또한, 발전 사업자는 최소의 비용으로 최대의 이익을 얻고자 한다. 이에 반해, 계통망 운영자는 신규 발전설비 도입에 따라 전력계통에 야기되는 영향을 최소화하고자 한다. 이러한 상반된 상관관계를 바탕으로 신규 발전설비의 계통 유입에 따른 영향을 평가하고, 합리적인 전력계통 확충 계획을 수립하여 전력망 운영자 입장에서 최적의 계통계획 방안을 모색할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 신규 발전설비의 계통 연계 시, 기존 보호계전 설비에 대한 보강 계획, 조상설비에 대한 보강 계획 및 송전선로에 대한 보강 계획 수립 필요성을 판단할 수 있는 기준이 되는 위험도 평가 기법을 제안한다. 또한, 적용 가능한 계통계획안을 시행했을 경우, 계통 및 설비의 위험도의 변화를 재평가함으로써, 최적의 송전계통 계획을 선정하는 기법을 제안한다.

2. 위험도 평가 기법

상정사고 시 선로에 흐르는 고장전류를 선로별 고장전류 허용치에 대하여 지수함수로 나타낸 지수 $\mathfrak{R}_{ij}^{n,I}(f)$ 와 정상상태 또는 상정사고 시 모선의 전압을 모선의 기준 전압에 따라 수립된 전압 유지 범위에 대하여 지수함수로 나타낸 지수 $\mathfrak{R}_i^{n,V}(f)$ 는 각각 다음과 같다[12].

$$\mathfrak{R}_{ij}^{n,I}(f) = \frac{1}{I_{ij}^{n,Rating}} \cdot (I_{ij}^{n,Rating})^{\frac{|V_j^n(f)|}{V_j^{n,Rating}}}$$
 (1)

$$\mathfrak{R}_i^{n,V}(f) = \frac{1}{V_i^{n,Range}(f)} \cdot (V_i^{n,Range}(f))^{\frac{|\Delta V_i^n(f)|}{V_i^{n,Range}(f)}}$$
 (2)

여기서,
 i, j : 모선 번호

* Dept. of Energy Engineering, Keimyung University, Korea
E-mail : energy@kmu.ac.kr

Received : February 17, 2014; Accepted : May 17, 2014

- n : 상정사고 개수
(n=0: 정상상태; n=자연수: 상정사고)
- f : 계통 고장원인
- $I_{ij}^n(f)$: 계통 상태 n일 때 f번째 고장원인에 의한 선로 ij의 전류
- $I_{ij}^{n,Rating}$: 보호설비가 동작할 수 있는 최대 허용 전류
- $V_i^{n,Range}(f)$: 각 모선별 전압유지범위에 따른 상/하한 전압 변동 허용 범위
- $\Delta V_i^n(f)$: 모선 i에 실제로 인가되는 전압과 기준 전압 값과의 차

계통 내에 상정한 모든 고장을 고려했을 때, 식 (1)과 (2)에 의해 평가된 모든 값 중에서 가장 큰 값을 다음과 같이 나타낸다.

$$\overline{\mathfrak{R}_{ij}^{n,I}}(f) = \text{Max} \{ \mathfrak{R}_{ij}^{n,I}(f) | \forall n, f \} \quad (3)$$

$$\overline{\mathfrak{R}_i^{n,V}}(f) = \text{Max} \{ \mathfrak{R}_i^{n,V}(f) | \forall n, f \} \quad (4)$$

고장전류 위험도($\mathfrak{R}_{ij}^{n,I}(f)$)는 상정된 모든 고장에 대해서 평가되며, 평가된 고장전류 위험도는 해당 상정사고 발생했을 시 고장전류로부터 계통을 보호하기 위한 차단기 등의 보호설비 보장 계획 수립 여부를 판단할 수 있는 기준으로 본 논문에서 활용된다. 또한, 전압 위험도($\mathfrak{R}_i^{n,V}(f)$)는 정상상태 또는 상정된 모든 고장에 대해서 평가되는데, 평가된 전압 위험도는 모선 전압이 그 모선의 기준 전압으로부터 벗어난 정도를 나타낸다. 전압 유지 범위를 벗어나는 즉, 위험도가 1을 넘는 경우, 해당 모선의 전압이 전압 유지 범위 내에 들어갈 수 있도록 무효전력을 공급 및 소비해주는 조상설비 등의 설비 보장 계획 수립의 필요성을 판단하는 기준으로 활용된다.

본 논문에서는 위에서 언급한 위험도 지수에 추가적으로, 정상상태 또는 상정고장 발생 시 선로 ij에 흐르는 조류량을 선로의 정격 용량에 대하여 지수 함수로 나타낸 지수($\mathfrak{R}_{ij}^{n,MVA}(f)$)를 제안한다.

$$\mathfrak{R}_{ij}^{n,MVA}(f) = \frac{1}{MVA_{ij}^{n,Rating}} \cdot (MVA_{ij}^{n,Rating})^{\frac{|MVA_{ij}^n(f)|}{MVA_{ij}^{n,Rating}}} \quad (5)$$

- 여기서,
- $MVA_{ij}^n(f)$: 계통 상태 n일 때 f번째 고장원인에 의한 선로 ij의 조류량
- $MVA_{ij}^{n,Rating}$: 선로의 최대 허용 조류량

이 때, 모든 고장에 대해서 조류 위험도가 가장 큰 값을 다음과 같이 정의하며,

$$\overline{\mathfrak{R}_{ij}^{n,MVA}}(f) = \text{Max} \{ \mathfrak{R}_{ij}^{n,MVA}(f) | \forall n, f \} \quad (6)$$

선로 ij의 조류량이 정격 용량을 초과하는 즉, 조류 위험도가 1을 초과하는 경우, 두 모선 사이에 선로 보강, 선로 신설 등의 선로 보강 계획 수립의 필요성을 판단하는 기준으로 본 논문에서 활용된다.

앞에서 살펴본 식 (1), (2)와 (5)의 위험도 지수 정의를 통해서 알 수 있듯이, 평가된 각 위험도 값이 기준치 1.0을 넘어서거나 이에 근접할수록 해당 설비를 위험한 상태에 있는 설비로 정의할 수 있다.

3. 위험도 분석을 통한 계통계획기법

신규 발전설비가 계통에 연계될 경우, 기존 계통에 접속하기 위한 비용 부담방식은 신규 설비의 접속비용 부담 범위에 따라 deep, shallow, super-shallow 방식으로 크게 분류된다. 국내의 경우, 발전사업자가 신규 발전설비 계통 연계에 따른 연계선로 비용만 부담하고 그에 따라 추가적으로 필요한 기존 계통 보강과 관련된 비용은 계통운영자가 부담하는 shallow 방식을 채택하고 있다. 따라서, 계통망 운영자는 신규 발전설비가 기존 계통에 미치는 영향을 보다 면밀히 분석하고, 그 결과를 토대로 경제적이면서도 계통 및 설비 위험도 저감에 탁월한 송전계통 계획안을 수립할 필요성이 있다[13,14].

위에서 언급한 위험도 지수들은 정상상태 또는 상정사고 시 각 요소별/설비별 위험도를 나타내며, 제안한 지수들이 1.0이하의 안정적인 상태에 있기 위해서는 필요에 따라 송전계통 계획이 필요하다. 또한, 제안한 위험도 평가 기법은 송전계통 계획 수립 시 가능한 계통계획안들 중 가장 효과적인 대안을 선정하는데 활용할 수 있다. 본 논문에서 효과적인 대안이란 투자비용 대비 각 위험도 지수의 개선 정도가 높은 계통계획안을 의미한다. 따라서, 본 논문에서 제안한 위험도 분석을 통한 최적의 송전계통 계획안은 다음과 같은 위험도 개선 지수(RLII: Risk Level Improvement Index)을 통해 평가할 수 있다.

$$RLII(s) = \Delta \mathfrak{R}(s) / C(s) \quad (7)$$

$$\Delta \mathfrak{R}(s) = \Delta \mathfrak{R}^I(s) + \Delta \mathfrak{R}^V(s) + \Delta \mathfrak{R}^{MVA}(s) \quad (8)$$

- 여기서,
- s : 가능한 계통계획안
- C(s) : 계통계획안 s적용 시 투자비용
- $\Delta \mathfrak{R}(s)$: 계통계획안 s적용에 따른 총 위험도 감소량
- $\Delta \mathfrak{R}^I(s)$: 계통계획안 s적용에 따른 전류 위험도 감소량
- $\Delta \mathfrak{R}^V(s)$: 계통계획안 s적용에 따른 전압 위험도 감소량
- $\Delta \mathfrak{R}^{MVA}(s)$: 계통계획안 s적용에 따른 조류 위험도 감소량

각 계통계획안별 투자비용(C(s))에 따른 위험도의 개선되는 정도(RLII(s))를 통해, 계통운영자는 송전계통 계획을 위한 최선의 대안을 선정할 수 있다. 본 논문에서 제안한 위험도 분석을 통한 송전계통 계획안을 선정하는 절차는 다음과 같다.

표 1 상정사고

Table 1 Contingency list

f	모선		f	모선	
	From	To		From	To
1	영흥TP#1	신시흥3	30	성곡	시화
2	영흥TP#1	신시흥#2	31	성곡	중시화
3	신인천3	신시흥3	32	성곡	목내
4	신인천3	가상1TP	33	신시흥3	가상부하
5	신인천1	인천	34	신시흥1	신시흥#2
6	신인천1	신현	35	신시흥1	오봉
7	신인천1	주안	36	신시흥1	남동
8	한중CC1	한중CC4	37	신시흥1	도립
9	한중CC1	송현	38	북시화	서시화
10	한중CC4	신현	39	북시화	신시흥#2
11	인천	남인천	40	서시화	남시화
12	신현	송현	41	서시화	시화
13	주안	관교	42	남시화	시화
14	주안	만수	43	신시흥#2	가상부하
15	송현	송월	44	신시흥#2	가상2TP
16	송현	남인천	45	신시흥#2	시화
17	송월	남인천	46	시화	중시화
18	신안산3	신시흥#2	47	오봉	남동
19	신안산3	가상2TP	48	오봉	동춘
20	신안산1	일동	49	오봉	도립
21	신안산1	남안산	50	남동	연수
22	신안산1	성포	51	남동	동춘
23	일동	원곡	52	남동	관교
24	남안산	목내	53	연수	옥련
25	반월	원곡	54	연수	학익
26	반월	안산	55	옥련	송도
27	반월	시화	56	학익	남인천
28	성포	안산	57	동춘	송도
29	안산	반월열발	58	관교	만수

표 2 위험도가 높은 구간

Table 2 Area in high risk level

위험 구간	Rating [MVA]	Base Case			태양광 발전 연계		
		Loading [MVA]	위험도	f	Loading [MVA]	위험도	f
한중CC4 신현	248	280.1315	2.0428	9			
		310.1440	3.9811	10			
주안 관교	158	171.2733	1.5300	13			
		158.2784	1.0090	14			
송월 남인천	200	217.6156	1.5947	17			
북시화 신시흥#2	465	562.6796	3.6336	39	519.5700	2.0560	39
인천 남인천	136				140.2900	1.1676	11
학익 남인천	273				306.7200	1.9993	56

선되었으나 여전히 불안정한 범위 내에 존재함을 확인할 수 있다. 이는 기존 영흥화력 및 외부계통을 통해서 전력이 공급되던 계통 구성 형태가 추가 발전기의 계통 연계로 인해 분산 공급되므로, 선로 이용률이 감소한 것에 기인한 결과이다. 반면, ‘인천-남인천’과 ‘학익-남인천’은 신규 발전기 연계로 인해 조류의 이동경로가 변화함으로 오히려 조류 위험도가 높아짐을 확인할 수 있다. 따라서, 신규 태양광 발전의 계통 연계에 따라 추가적인 송전선로 보강 계획이 필요하다. 본 논문에서는 송전계통 계획 전문가의 의견을 종합하여, 다음과 같은 계통계획안을 상정하였다.

표 3 가능한 계통계획안

Table 3 Scenarios for transmission network reinforcement

계통 계획안	선로 구간	Rating [MVA]	건설단가 [2회선/km·억원]	선로거리 [km]
#1	인천 - 남인천	136	3.43	3.13
	학익 - 남인천	273	4.65	4.11
	북시화 - 신시흥#2	465	5.75	2.165
#2	인천 - 학익	273	4.65	2.5
	북시화 - 신시흥#2	465	5.75	2.165

계통계획안 #1은 해당 선로 구간에 기존 선로와 동일한 1회선을 추가하는 방안을 나타내며, 계통계획안 #2는 ‘인천-학익’ 간 선로를 신설하고 ‘북시화-신시흥#2’ 사이에는 기존 선로와 동일한 1회선을 추가하는 방안을 나타낸다. 이에 따라 상정한 각 계통계획안을 사례계통에 적용한 후, 정상상태 및 상정사고 시 계통의 위험도를 재평가하며, 이를 그림 3에 나타내었다.

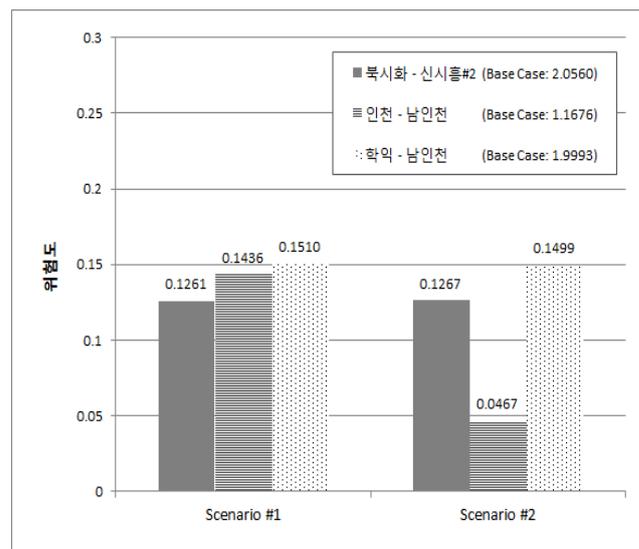


그림 3 각 시나리오 적용에 따른 고위험 구간의 위험도

Fig. 3 Risk level of high risk level area according to each scenario

신규 태양광 발전설비의 계통 연계로 인해 높은 위험도를 보인 구간에 대해 적용 가능한 계통계획안들을 시행했을 경우, 재평가된 위험도를 통해 각 계통계획안별 RLII를 분석하면 다음 표와 같다.

표 4 계통계획안별 RLII 분석 결과

Table 4 Analysis of RLII by scenarios

위험 구간	계통계획안 #1			계통계획안 #2		
	위험도 감소량	건설비용 [억원]	RLII	위험도 감소량	건설비용 [억원]	RLII
북시화 신시흥#2	1.9299	12.45	0.1135	1.9293	14.38	0.1884
인천 남인천	1.0240	10.74		1.1209	11.63	
학익 남인천	1.8483	19.12		1.8494		

계통계획안 #1을 적용했을 경우, 총 건설비용은 42.31억원이 소모되며, 이 때 위험도는 4.8022만큼 개선된다. 따라서 계통계획안 #1의 RLII는 0.1135이다. 또한, 계통계획안 #2를 적용했을 경우, 총 건설비용은 26.01억원이 소모되며, 이 때 위험도는 4.8996만큼 개선된다. 따라서 계통계획안 #2의 RLII는 0.1884가 된다. 따라서, 신규 태양광 발전의 계통 연계 후 위험도가 높은 3구간의 위험도를 저감시키기 위해서는 ‘인천-학익’ 간 선로를 신설하고 ‘북시화-신시흥#2’ 사이에는 기존 선로와 동일한 1회선을 추가하는 방안이 최적임을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 신규 발전설비의 계통 연계와 같은 계통 구조 변화에 따라 계통 및 설비의 위험도를 분석하여, 최적의 계통계획안을 선정하기 위한 기법 제안을 그 목적으로 한다. 먼저, 계통 및 설비의 위험도를 분석하기 위해 기존의 전류, 전압 위험도 평가 기법[12]에 추가적으로 조류 위험도 분석 기법을 제안하였다. 또한, 계통 및 설비 위험도를 개선하기 위해 경제적인 계통계획안 수립을 위한 위험도 개선 지수(RLII)를 제안하였다.

사례연구에서는 인천 및 시흥 일부 지역의 실제계를 대상으로 본 논문에서 제안한 위험도 평가 기법과 위험도 분석을 통한 계통계획기법을 적용하여 제안한 기법의 타당성을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 기법은 계통망 운영자 입장에서 계통 및 설비의 위험도를 평가하고, 위험도의 변화에 적합한 계통 계획안 수립을 위한 이론적 근거로 활용가능할 것으로 사료되며, 향후 신규 발전설비의 계통 접속에 따른 비용부담 방식이 기존의 shallow 방식에서 super-shallow 방식으로 점진적으로 전환될 경우 그 필요성이 더 커질 것으로 전망된다.

References

[1] Hyun-II Son, In-Su Bae, Jin-O Kim, "Congestion

and Loss Cost for the Market Participants", The Trans. of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.60, no.11, pp.2021-2027, 2011.11

[2] Jae-Haeng Heo, Jae-Kun Lyu, Woo-Ri Lee, Jong-Young Park, Jong-Keun Park, "Optimal Allocation of Shunt Capacitor-Reactor Bank in Distribution System with Dispersed Generators Considering Installation and Maintenance Cost", The Trans. of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.62, no.11, pp.1511-1519, 2013.11

[3] Bong-Woo Nam, Kyung-Bin Song, Kyu-Ho Kim, Jun-Min Cha, "The Spatial Electric Load Forecasting Algorithm using the Multiple Regression Analysis Method", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.22, no.2, pp.63-70, 2008.2

[4] Don Hur, Hae-Sung Jung, Heon-Su Ryu, Kang-Wook Cho, "Development of Transmission Expansion Planning Optimization Software Considering Integration of Generation and Transmission Facilities", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.24, no.2, pp.16-26, 2010.2

[5] Jun-Min Cha, "A Study on Reinforcement Planning of Transmission Lines for Composite Power System", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.15, no.3, pp.45-50, 2001.5

[6] de la Torre S., Conejo, A.J., Contreras, J., "Transmission Expansion Planning in Electricity Markets", IEEE Trans. Power Syst., vol.23, no.1, pp.238-248, 2008

[7] Chul-Soo Seo, Gi-gab Yoon, Sang-ho Park, Young-do Choy, Jae-gul Lee, Hyun-II Son, Jin-O Kim, "congestion and Loss cost for economic subject using Optimal Power Flow", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp.430-431, 2011.7

[8] Hyun-II Son, In-Su Bae, Dong-Hoon Jeon, Jin-O Kim, "Evaluation of Optimal Transfer Capability in Power System Interconnection", The Korean Institute of Electrical Engineers, The Trans. of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.59 no.4, pp.679-685, 2010.4

[9] Li W, "Probabilistic Transmission System Planning", Wiley/IEEE Press, 2011

[10] Sum-Im T., Taylor G.A., Irving M.R., Song Y.H, "Differential evolution algorithm for static and multistage transmission expansion planning", IET Gener. Transm. Distrib., vol.3, no.4, pp.365-384, 2008

- [11] Bulent O., Guven A.N., Shahidehpour M., "Congestion-Driven Transmission Planning Considering the Impact of Generator Expansion", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, No. 2, pp.781-789, 2009
- [12] Sung-Yul Kim, Sang-Kun Moon, Jin-O Kim, "A Study on Evaluation for Risk Level in Transmission Network Connected with Renewable Energy", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.25, no.2, pp.87-95, 2011.2
- [13] Hasan, K.N. ; Saha, T.K. ; Eghbal, M., "Renewable power penetration to remote grid - transmission configuration and net benefit analyses", Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT), 2011 IEEE PES, pp.1-8, 2011
- [14] Derk J. Swider, Luuk Beurskens, Sarah Davidson, John Twidell, Jurek Pyrko, Wolfgang Pruggler, Hans Auer, Katarina Vertin, Romualdas Skema, "Conditions and costs for renewables electricity grid connection: Examples in Europe Original Research Article", Renewable Energy, vol.33, Issue 8, pp.1832-1842, 2008.08

저 자 소 개



김 성 열 (金 成 烈)

2007년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2012년~2013년 미국 Georgia Institute of Technology, PSCAL 연구원. 현재 계명대학교 에너지공학과 조교수.