

Python 기반 WSCR 강건 지수를 이용한 미래계통 구축에 관한 연구

A Study on Future System Construction Using WSCR Strengthness Index based on Python

박성준* · 허진** · 김현진*** · 조윤성†
(Seong-Jun Park · Jin Hur · Hyun-Jin Kim · Yoon-Sung Cho)

Abstract - In this paper, to studied about future power system construction using PSS / E-Python API. Python-based future system automatical construction methods and modeling of renewable sources. it confirmed the stability of the powert system for each renewable area by calculating the weighted short circuit ratio (WSCR) index. it calculated the short circuit ratio (SCR) and selected the transmission line linkage scenario to improve the stability of vulnerable areas. it confirmed the WSCR index improvement through the selected transmission line linkage of scenario, and analyzed the stability of the renewable power system applying the scenario. It describes Facts and Shunt devices adjustment for the load flow convergence. It describes the stable method of the bus voltage through the transformer Ratio Tap adjustment. By performing PSS/E ASCC using the Python it was performed three-phase short circuit fault capacity analysis, it is confirmed whether excess of the fault current circuit breaker capacity. In order to contingency accident analysis, it have described the generation of one or two line list of each areas using the Python. The list is used to contingency analysis and describe the soluted of the transmission line overload through comparison before and after adding the scenario line.

Key Words : PSS/E-Python, Power system construction, Renewable energy, WSCR, SCR, Load flow analysis, Fault analysis, Contingency list, Contingency analysis

1. 서 론

2015년 파리기후협약으로 지구 온난화에 따른 지구 평균온도 상승폭을 낮추기 위해 대한민국에서는 재생에너지 3020 계획을 수립한다. 세계7위 온실가스 배출국가인 한국은 2030년까지 약 37%의 온실가스 감축을 목표로 한다[1]. 2030년까지 미세먼지 오염물질인 황산화물 질소산화물 및 먼지의 총량 약 62% 감축을 목표로 하는 계획을 가지고 있다. 이에 따라 재생에너지 3020계획에서 온실가스 및 미세먼지 감축을 위한 원자력, 석탄 발전설비의 감축과 태양광 및 풍력중심의 신재생설비의 확충이 계획되었다[2]. 이를 반영하여 8차 전력수급 기본계획에서 2030년까지 전체 발전량의 약 20%로 신재생 발전량을 확대할 계획이다[9].

발전량 20%는 2030년 목표 수요 최대전력인 100.5GW의 약 20GW의 발전량을 신재생 전원으로 대체할 계획이다.

목표 수요전력은 8차 수급 기본계획 계획기간인 17년~31년 사이 연평균 1.3%증가가 전망된다. 또한 4차 산업 혁명으로 인한 신규 디바이스의 단위 전력소비는 증가하나, 전력소비 최적화 및 전력 자급 생태계로의 전환에 따라 전반적인 소비는 감소할 것으로 전망된다. 즉, 상대적인 수요는 감소하나 절대적인 수요는 증가하여 서술된 바와 같이 2031년 100.5GW로 예상된다[9].

서술된 계획 및 연구들을 고려하여 미래 전력계통에 확충된 설비의 Data Base(DB) 구축이 필요하다. 또한 구축된 미래계통 DB의 정합성 검증을 위해 안정도를 해석하여야한다. 본 논문에서는 안정한 미래 계통 DB구축 및 안정도 해석을 위한 모델링 및 사례연구를 통한 검증을 수행한다. 사례연구 시 계통의 정합성은 전력계통 신뢰도 및 전기 품질 유지기준에 맞춰 확인하였다[7]. 또한 일반적인 계통해석 방법인, 조류해석, 고장해석, 상정고장해석뿐만 아니라 미국 전력회사 ERCOT사에서 신재생 계통 연계 시 계통의 강건 척도 기준으로 사용하는 WSCR 지수 및 SCR 지수 계산 및 계통제어를 통해 계통 강건 지수 해석 및 향상을 모의한다. WSCR 강건 척도는 ERCOT사에서 정의한 지역별 강건 지수를 기준으로 하고 강건도 기준에 맞춘 계통의 정합성을 검증하기 위해, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에 따라 계통을 해석하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Daegu Catholic University.

E-mail: philos@cu.ac.kr

* Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Daegu Catholic University, Korea

** Department of Electrical Engineering, Sangmyung University, Korea

***Power Grid Planning Department, KEPCO, Korea

Received : May 31, 2018; Accepted : July 3, 2018

2. 모델링

본 장에서는 미래계통 계획 시 신재생 에너지 연계를 위한 신재생에너지 연계 계통 구축 방안에 관하여 서술한다. 구축된 미래 계통의 WSCR 강건 지수 해석방안 및 강건화 방안에 대해 서술한다. 강건 지수가 안정화 된 미래계통의 안정도 해석에 대해 서술하였다.

2.1 신재생에너지 연계 미래계통 구축 모델링

본 절에서는 Python기반 신재생에너지 연계 미래 계통 PSS/E DB 구축 시뮬레이터 생성에 관하여 서술한다. 시뮬레이터는 Python과 PSS/E를 연동하는 Application Program Interface (API)를 통해 자동 수행되고, *.raw형식의 파일로 저장된다. 생성된 미래계통 구축 시뮬레이터는 다음 순서도와 같이 수행된다[6].

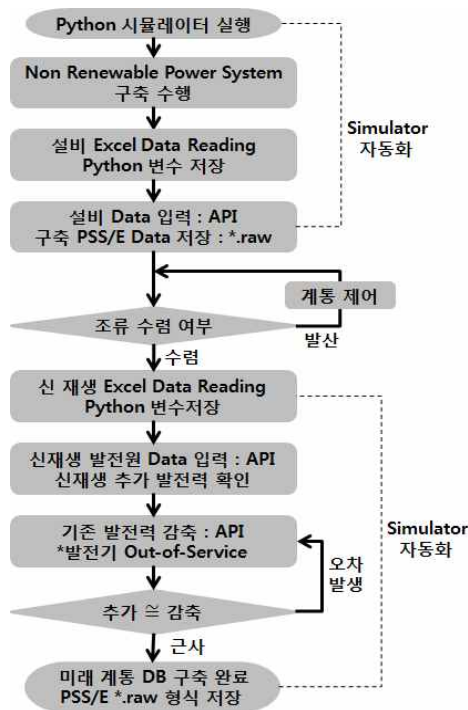


그림 1 미래계통 구축 순서도

Fig. 1 Future System Construction Flowchart

그림과 같은 순서로 Python 시뮬레이터를 통해 자동으로 미래 계통 DB를 구축한다. 우선 시뮬레이터를 실행하면 설비 데이터가 있는 Excel Data를 시뮬레이터로 받아 Python 내부 변수로 저장한다. 저장된 Data를 Psspy API 함수를 이용하여 데이터를 입력한다. 구축된 계통은 PSS/E Tool의 *.raw 형식의 파일로 저장한다. 이와 같은 형식으로 신재생 에너지가 포함되지 않은 계통을 우선 구축하여 저장한다.

신재생 에너지가 포함되지 않은 미래 계통을 우선 구축하는

이유는 계통의 조류 수렴성을 높이기 위함이다. 신재생 발전원을 포함한 계통을 한 번에 생성하게 되면 조류의 수렴성이 낮아진다. 서술된 바와 같이 신재생이 포함되지 않은 미래 계통을 생성한 이후, 조류계산을 수행하여 계통의 발산유무를 확인하고, 발산 시 계통 제어를 통해 조류 수렴을 모의한다. 조류를 수렴하기 위해 조상설비를 조정하고, FACTS 설비를 투입하는 등의 제어를 수행한다.

서술된 바와 같이 Non Renewable 미래계통의 조류를 수렴한 뒤, 신재생 발전기를 추가하여 미래계통 DB를 구축한다. 이후 신재생 발전기를 추가함에 따라 증가된 발전력을 확인하고, 기존발전력을 감축한다. 기존 발전력 감축량과 신재생에 의한 추가발전량이 비슷한 값이 되면 발전력 감축을 멈추고, 이전과 마찬가지로 구축된 신재생 미래계통 DB를 PSS/E 프로그램의 *.raw 형식의 파일로 저장한다.

미래계통 구축 시 추가될 신재생에너지는 풍력, 태양광, 이외 기타 3가지로 분류하여 발전기로 모델링 한다[10]. 발전기는 PSS/E 내 신재생 발전원인 Wind Control Mode 역률제어 발전기로 모델링한다. 또한 SCR 및 WSCR계수 산정 시 단락용량과, 상정고장 시 조류의 흐름에 영향을 미치는 발전기 내부 임피던스는 다음과 같이 모델링한다.

표 1 발전기 내부 임피던스 (p.u)[11]

Table 1 Sub-transient impedance of generator

발전원	발전기 내부 임피던스
PV	99999
WIND	1/1.05
ETC	0.189

표 1에서 서술된 바와 같이 풍력발전기는 Type 4 풍력 Turbine 발전기로 모델링하여 내부 임피던스 1/1.05를 입력한다. 태양광은 고장에 영향을 거의 미치지 않는 99999, 기타는 0.189로 모델링한다[5]. 모델링 된 바와 같이 발전원을 추가하고, 구축된 신재생 미래계통 DB를 위 서술된 바와 같이 조류를 안정화하여 계통 해석을 수행한다.

2.2 신재생에너지 연계 미래계통 강건도 해석 방법 모델링

본 절에서는 신재생 에너지 연계 미래계통 강건도 해석 방법에 관한 모델링을 수행한다. 조류수렴 및 모션전압이 안정화된 초기 신재생 연계 계통의 안정성을 확인한다. 신재생 연계 계통의 강건도는 WSCR을 통해 확인하고, SCR지수를 계산하여 선로 연계 방안을 모색한다. SCR 지수의 계산은 WSCR 계산을 통해 선정된 취약 지역의 1, 2회선 상정고장 발생 시 각 모션에서 계산된 SCR의 최소값을 의미한다. WSCR은 Weighted Short Circuit Ratio 가중 단락비로 신재생 에너지 계통연계 시 신재생 연계 지역의 강건도를 확인하는 척도가 된다. WSCR은 ERCOT사의 기준으로 지역 별 지수가 1.5이상으로 유지되어야 강건한 계통으로 정의한다. WSCR은 다음 식을 통해 계산된다[3].

$$WSCR = \frac{\sum_i^N (S_{scwa-i} * P_{renew-i})}{(\sum_i^N P_{renew-i})^2} \tag{1}$$

식 (1)에서 S_{scwa-i} 는 신재생 연계 전 버스 i의 단락용량, $P_{renew-i}$ 은 버스 i에 연계된 MW용량을 의미한다. 식 (1)에 따라 각 지역별로 WSCR을 계산하여 강건도 취약지역을 확인한다. 선정된 취약지역의 WSCR회복을 위한 SCR을 계산하여 각 모선별 강건도를 확인한다. 신재생 연계선로의 SCR은 Short Circuit Ratio 단락비로 계통에 선로 연계 시 계산하여 연결 모선의 강건도를 확인하는 척도가 된다. 일반적으로 연결 모선의 최소 SCR 지수가 3이상 이 되어야 강건한 모선으로 정의한다. SCR지수를 계산하는 식은 다음과 같다[4].

$$SCR = \frac{S_{sc-i}}{P_{renew-i}} \tag{2}$$

식 (1)과 같이 $P_{renew-i}$ 은 버스 i에 연계된 MW용량을 의미하고, S_{sc-i} 는 신재생이 연계된 모선 i의 단락용량을 의미한다. 식 (2)를 통하여 계산된 SCR 지수가 낮은 모선과 높은 모선을 확인한다. SCR지수가 기준이하인 모선에는 345kV 모선을 신설하고, 345kV 선로 연계를 고려한다. 이를 토대로 SCR지수가 낮은 모선과 높은 모선간의 선로 연계 시나리오를 선정한다. WSCR 및 SCR 계산을 통해 미래계통 강건 시나리오 선정 순서는 다음과 같다.

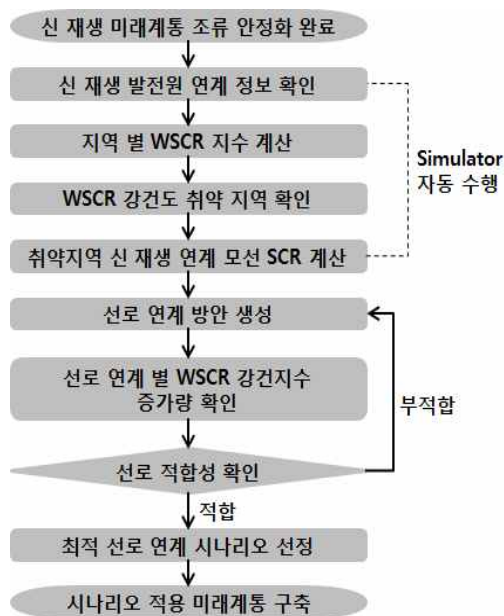


그림 2 계통 WSCR 강건 시나리오 선정 순서도
 Fig. 2 Flowchart of selection scenario for WSCR stabilize

그림 2에서 나타난 바와 같이 초기 신재생 미래계통을 구축하고 조류 및 모선전압을 안정화 한다. 미래계통의 조류 안정화 완료 이후 Python 시뮬레이터를 통해 신재생 발전원의 연계 정보를 받는다. 데이터를 이용하여 지역별 WSCR을 계산하고 WSCR 지수가 1.5 이하인 강건도 취약지역을 확인한다. WSCR 강건 지수가 낮은 취약지역의 신재생 연계모선 별 SCR 지수를 확인하고, SCR 지수가 낮은 모선과 높은 모선간의 선로연계 방안을 모색한다. 모색된 선로 연계에 따라 WSCR 강건지수의 증가를 확인한다. 또한 WSCR 강건 지수 증가량과 물리적 거리 등을 고려하여 연계 선로의 적합성을 확인한다. 이에 따라 최적의 154kV 및 345kV 선로연계 시나리오를 선정한다. 최적의 선로 연계 시나리오에 따라 취약지역의 WSCR 강건 지수를 재확인 한다. WSCR 강건 지수가 1.5 이상으로 안정된 최적의 선로연계 시나리오를 구축된 신재생 미래계통에 적용하여 WSCR 강건 계통 구축을 완료한다.

2.3 신재생에너지 연계 미래계통 안정도 해석 모델링

본 절에서는 신재생 에너지 연계 미래계통 강건 지수 안정화 후 안정도 해석 수행에 관하여 모델링 한다. 미래계통 안정도 해석에는 정상상태 해석, 과도상태 고장 용량해석, 상정고장 해석을 통한 계통 안정도 해석을 수행한다. 계통 안정도 해석 시 강건 지수 증가를 위한 선로연계에 따른 안정도 변화와, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에 따라 구축된 미래계통의 안정화 여부를 확인한다. 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준은 다음과 같다[7].

표 2 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준

Table 2 Power system reliability and electricity quality maintenance standard

종류	기준
정상상태 선로과부하	선로 과부하 100[%] 이하 유지
정상상태 모선 전압	최대 1.05 [P.U] 이하 최소 0.95 [P.U] 이상 유지
고장 전류 차단기 허용 용량	154kV: 50[kA] 345kV: 63[kA] 이하 유지
상정고장 선로 과부하	상정고장 발생 시 선로 과부하 120[%] 이하 유지

전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에 따라 계통 안정도 해석을 수행하기 위해 Python 기반 시뮬레이터를 생성하여 미래계통의 안정도를 해석한다[6]. 생성된 시뮬레이터의 미래계통 안정도 해석 순서는 다음 순서도를 통하여 기술하였다.

그림 3에서 나타난 바와 같이 WSCR 지역 강건 지수 안정화를 위해 선정된 시나리오와 같이 선로를 추가한 후계통 안정도 해석을 수행한다. 정상상태 모선전압 및 선로 과부하 여부를 확인하고, 시나리오 선로 연계 전과 후를 비교한다. 제어를 통해 정상상태를 안정화 한 뒤, 고장계산을 수행하고 위 서술된 바와 같이 고장전류 허용기준 수렴여부를 확인한다. 송전선로 설비를 증설함에 따라

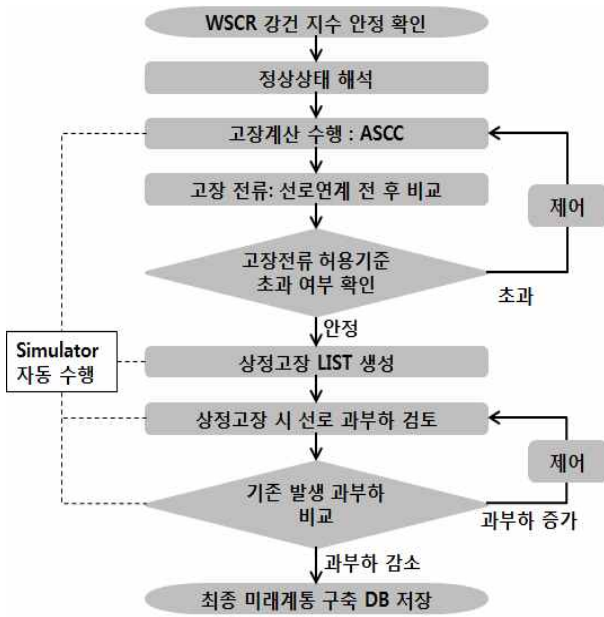


그림 3 계통 안정도 해석 순서도
 Fig. 3 System stability analysis flowchart

모선으로 유입되는 고장전류가 증가하여 허용기준을 초과하면 모선분리를 통해 고장전류를 감소시킨다. 고장전류의 안정이 확인되면, 상정고장 시 선로 과부하 및 전압초과 발생 여부를 확인한다. 상정고장 해석을 위해 Python 기반 시뮬레이터를 이용하여 상정고장 List를 자동으로 생성한다[6]. 상정고장 List 생성 Python 시뮬레이터의 동작은 각 지역별 1, 2회선 선로의 상정고장 발생에 대해 List를 자동으로 생성한다. 생성된 List에 따라 상정고장 시 선로 과부하 검토를 수행한다. 검토 결과를 토대로 시나리오 선로 연계 전 상정고장 시 발생하는 과부하와 비교하여 과부하 증가 및 감소여부를 확인한다. 생성된 List를 통해 모든 지역의 상정고장 해석을 수행한 후 안정도 해석을 종료한다. 안정도 해석 수행 종료 후, 최종적으로 제어를 통해 변경된 Data를 포함하여 구축된 최종 미래계통 DB를 저장한다.

3. 사례연구

본 장에서는 신재생 연계에 따른 미래계통 DB구축 및 안정화 방안에 대한 검증을 위한 사례연구를 수행한다.

3.1 신재생에너지 미래계통 구축

본 절에서는 모델링 된 바와 같이 신재생 에너지 미래 계통을 구축하였다. 시뮬레이터를 통해 구축된 신재생에너지가 포함되지 않은 PSS/E *.raw 형식의 미래계통 파일을 생성하였다. 생성된 미래계통 DB 파일의 발전, 부하, 조상설비용량은 다음과 같다.

표 3 미래계통 발전/부하/조상설비 정보

Table 3 Future System Generation/Load/Shunt Information

계통 정보	상세 정보
발전	99712.3 MW / 22885.5 MVAR
부하	98321.3 MW / 34432.2 MVAR
조상설비	26470.8 MVAR

표 4 신재생 발전원 추가 정보

Table 4 information about the added renewable sources

신재생 설비	신재생 연계 모선 개수	용량(MW)
태양광	114	4,871
풍력	65	3,849
기타	39	4,864

생성된 신재생 에너지가 포함되지 않은 미래계통 조류해석을 수행하였다. 모델링 된 바와 같이 계통 Shunt 초기값을 조정하여 조류를 수립시켰다. 수립 이후 신재생 발전원을 추가하였고 약 12GW의 신재생 발전원을 추가하였다. 신재생 발전원의 계통연계에 관한 정보는 다음과 같다.

표 4에 서술된 바와 같이 추가된 발전량만큼 기존 발전원을 Out-of-Service 하여 부하와 발전량을 맞추었다. 신재생 발전원의 미래계통 연계 이후 계통 제어를 통해 조류를 안정화하였고, 변압기 Tap Ratio 조정을 통해 모선전압을 안정화하였다. 이에 따라 구축된 미래계통을 저장하여 계통 강건 지수 및 안정도 해석을 수행한다.

3.2 미래계통 강건 지수 안정화

본 장에서는 모델링을 통해 생성된 Python 기반 시뮬레이터를 이용하여 강건 지수 안정화 사례연구를 수행하였다. WSCR 계산 및 SCR 계산을 통해 강건 지수 기반 선로연계 방안을 모색하고 시나리오를 선정하여 강건 지수 안정 계통 DB를 구축하였다.

3.2.1 WSCR 강건 지수 계산

Python 시뮬레이터를 통해 지역별 WSCR 강건 지수를 계산하여 표 5와 같은 결과를 확인하였다. 표 5에서 보는 바와 같이 전남지역을 제외한 지역은 강건 지수가 기준치 1.5 이상을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 또한 대체적으로 신재생 연계 용량 및 연계 비율이 높은 지역의 WSCR 지수가 적은 지역의 WSCR지수 보다 낮게 계산되는 것을 확인할 수 있다. 이를 토대로 WSCR지수가 약 0.9477으로 계산된 전남지역을 취약지역으로 선정하였다. 이에 따라 2장에서 모델링 된 바와 같이 전남지역의 WSCR 지수를 높이기 위해, SCR 지수를 기반으로 선로연계를 고려하였다.

표 5 지역별 WSCR 계산 결과

Table 5 Regional WSCR calculation results

지역	신재생 용량 [MW]	연계 모선 수	연계 비율 [%]	WSCR	강건 유무
서울	2.3	3	4.92	4272.65	0
남 서울	91.1	5	6.58	105.92	0
인천	1190.6	21	19.53	8.9009	0
경기	270.0	20	26.32	21.052	0
경기 북부	1057.3	28	19.58	6.8741	
강원	1859.4	50	73.53	2.9772	0
충북	237.8	21	39.62	26.899	0
충남	3129.8	41	124.24	3.1372	0
전북	1130.2	24	47.06	7.5099	0
전남	4928.8	64	65.31	0.9477	X
대구 경북	2103.1	67	45.58	3.9207	0
부산	1259.7	32	24.81	9.1848	0
경남	587.8	29	35.37	9.1662	0

3.2.2 SCR 강건 지수 계산

WSCR 강건 지수 해석과 마찬가지로 모델링된 시뮬레이터를 통해 취약지역의 신재생 연계 모선 SCR 지수를 계산한다. 선정된 취약 지역 전남의 신재생 연계모선 SCR 지수를 계산하였을 때 다음과 같은 결과를 확인하였다.

표 6 취약지역 신재생 연계 모선 SCR 계산 결과 : 취약모선 154kV

Table 6 SCR calculation results about linkage renewable buses of vulnerable areas: Vulnerable bus 154kV

모선명	SCR	강건유무
신안	1.4017	X
영암	2.8189	X
완도	5.2100	0
해남	5.9815	0
고흥	9.7966	0

표 7 취약지역 신재생 연계 모선 SCR 계산 결과 : 강건모선 154kV

Table 7 SCR calculation results about linkage renewable buses of vulnerable areas: Robust bus 154kV

모선명	SCR	백운	SCR
강진	608.4577	순천	5058.862
백운	3475.051	소라	7043.166
장성	1480.507	일곡	16129.04
송정	249145.7	엄다	7037.56

위 표 6과 7에서 보는 바와 같이 표 6는 전남지역에서 상정고장 시 최소 SCR지수가 낮은 모선 4개의 결과를 나타내고 표 7은 SCR 지수가 높은 모선 6개의 결과를 나타내었다. 표 6에서 나타낸 바와 같이 신안 영암 모선의 최소 SCR 지수가 기준치인 3이하로 계산되는 것을 확인하였다. 2장 모델링에 서술된 바와 같이 계산식에 따라 SCR 지수가 높은 모선은 용통 전력이 많아 단락용량이 높고, 신재생 연계 용량이 적다. 이와같이 SCR 지수가 낮은 지역은 용통전력이 적고 신재생 연계 용량이 높다. 따라서 SCR 지수가 높은 모선과 낮은 모선의 연계를 통해 SCR지수가 낮은 신재생 모선에 단락 용량을 증가시킬 수 있다. 이에 따라 SCR 및 WSCR 강건 지수를 높이기 위한 선로연계 시나리오를 선정한다. 또한 선로 연계를 통해 발전 전력을 부하측으로 송전하여 선로 과부하를 해소하기 위한방안으로 사용할 수 있다.

154kV 모선간의 연계만으로 WSCR 지수를 증가시키기 위해서는 추가되는 선로의 개수가 많아 경제적인 측면에서 좋지 않다. 또한 SCR 지수가 높은 154kV 모선의 특징은 345kV 모선과 연계 되어 있거나 인접해 있는 것으로 확인된다. 따라서 345kV 모선 연계 및 지역간 선로연계를 위해 SCR 지수가 낮은 신안 및 영암 모선에 345kV 모선을 신설하여 345kV 모선간의 선로 연계를 고려한다. 따라서 전남지역 및 전북, 경남지역의 인접 345kV 모선의 SCR 계산 결과는 다음과 같다.

표 8 345kV모선 SCR 계산 결과

Table 8 Calculation result of SCR of 345kV bus

모선명	SCR	지역
강진	7.2252	전남
광주	9.5578	
광양	20.3574	
화순	7.1478	
전남	7.9413	
여수	13.5653	전북
남원	8.7727	
정읍	3.8711	경남
고성	1.2534	

표 8에서 보는 바와 같이 전남 지역과 인접한 지역의 345kV 모선의 SCR 지수를 계산하였을 때, 경남지역의 고성 모선의 최소 SCR 지수는 낮으므로 연계를 고려하지 않고, 전북지역과의 선로 연계 및 전남지역 내의 선로 연계를 고려한다.

3.2.3 선로 연계 시나리오 선정

3.2.2에서 서술한 바와 같이 SCR지수에 따라 그리고 모선 승압을 통한 선로 용통전력 증가를 모의하였을 때, 표 9와 같은 연계선로 WSCR 강건 지수 증가를 확인하였다.

표 9 연계 선로별 WSCR 계산 결과

Table 9 Calculation Result of WSCR for linked line

	연계 선로	모선 전압	길이	WSCR	증가량	시나리오 선정
BASE	-	-		0.9477	-	
1	신안 - 송정	154kV	110km	1.0625	0.1148	X
2	영암 - 화치		75km	0.9925	0.0448	X
3	완도 - 일곡		110km	1.0045	0.0568	X
4	해남 - 엄다		53.5km	0.9924	0.0447	X
5	고흥 - 순천		43km	0.9871	0.0395	X
6	영암 - 장성		32km	0.9855	0.0378	X
7	신안 - 소라		45km	1.0226	0.0750	X
8	신안 - 백운		75km	1.0301	0.0824	O
9	영암 - 백운		24km	1.0419	0.0942	O
10	신안 - 영암		19km	1.0595	0.1115	O
11	삼천포 - 광양	345kV	38km	0.9823	0.0346	X
12	정읍 - 광주		44km	0.9659	0.0182	X
13	영암 - 강진		10.31km	1.0138	0.0661	O
14	신안 - 광주		55.2km	1.0962	0.1485	O
15	신안 - 정읍		101km	1.0696	0.1219	O
16	영암 - 광양		42.56km	0.9936	0.0459	X

표 9는 각 선로를 개별로 추가하였을 때 계산되는 WSCR 및 증가량을 나타낸다. 표에서 서술된 바와 같이 추가된 연계 선로 데이터 정보는 각 지역 간 물리적 거리를 계산하여 기존 계통에 근사한 길이와 동일한 전압을 갖는 모선의 선로 데이터를 기반으로 입력하였다. 신안 및 영암의 경우 SCR 강건 지수가 기준 이하로 계산되었으므로, 345kV 모선을 신설하여 선로의 단락용량을 큰 폭으로 증가시키기 위한 선로연계를 모의하였다. 계산된 WSCR 증가량을 기반으로 하여 최소한의 선로연계를 통해 WSCR 지수를 회복하기 위한 시나리오를 선정하였다.

추가된 연계 선로의 WSCR 강건 지수 증가량이 높더라도 154kV 선로의 길이가 길어 인접지역 신안 - 광주 345kV선로로 대체할 수 있는 1번 추가선로 신안 - 송정 선로는 시나리오 선정에서 제외하였다. 또한 결과를 토대로 154kV 선로연계보다 345kV선로 연계를 통한 WSCR 강건 지수 회복량이 큰 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 신안 및 영암지역에 신규 345kV 모선을 생성한 경우와 생성하지 않을 경우를 비교하였을 때, 345kV 모선을 신규로 생성하여 선로 연계를 고려하면 추가 선로 개수가 감소하는 것을 확인하였다. 추가된 연계 선로개수가 줄어들게 되면 경제적인 측면에서도 유리하므로 표에서 나타난 바와 같이 시나리오를 선정하였다. 이에 따라 선정된 6개의 선로를 신재생 연계계통에 추가하였을 때 WSCR지수 약 1.5689로 서술된 기준치 이상으로 회복된 것을 확인하였다. 선로 연계 모의를 통해 강건 지수가 안정된 계통 생성 후 안정도 해석을 수행한다.

3.3 선정 시나리오 계통 안정도 해석

본 절에서는 WSCR 강건 지수가 안정된 시나리오 계통을 이용해 계통의 정합성을 검증하기 위한 계통 안정도 해석을 수행한다. 계통 안정도 해석은 정상상태해석, 과도상태 고장전류 해석, 상정고장 해석을 수행하였다. 안정도 해석 수행은 2장에서 모델링 된 바와 같이 Python 시뮬레이터를 통해 수행하였다.

3.3.1 정상상태 해석

신재생 연계 및 WSCR 강건 시나리오와 같이 선로를 추가한 뒤 정상상태 해석을 수행하여 선로과부하 비율의 100% 초과여부를 확인한다[7]. 정상상태 해석을 수행하여 기존 미래계통과 비교하였을 때 선로과부하에 대해 다음과 같은 결과를 확인할 수 있다.

표 10 정상상태 선로 과부하 해석 결과

Table 10 Result of line overload analysis of steady state

과부하: 선로 연계 전		과부하: 선로 연계 후		
선로	회선수	과부하 량 [%]	해소 여부	과부하 량 [%]
운남 - 신안	2회선	143.7 %	해소	-
안좌 - 신안	2회선	118.1 %	해소	-
안좌 - 화원	2회선	272.0 %	해소	-
영암 - 나주	2회선	111.7 %	해소	-

표 10에서 보는 바와 같이 신재생 연계로 인한 정상상태 과부하 여부를 확인하였을 때, 4개의 선로의 과부하 발생을 확인할 수 있었고, WSCR 강건 시나리오에 따라 선로를 추가한 후 정상상태 선로 과부하가 해소되는 것을 확인하였다. 정상상태 과부하 해소가 되지 않을 경우, 과부하 발생 선로 모선의 선로 연계를 고려하거나 신재생 발전량 조절을 통해 선로 과부하 해소를 도모할 수 있다.

3.3.2 고장전류 해석

2장 모델링에서 서술된 바와 같이 고장계산(ASCC)을 수행하여 선정된 시나리오와 같이 선로를 추가한 모선 및 주변 모선의 3상 단락전류 계산결과는 표 11과 같다.

고장계산은 모델링된 Python 기반 시뮬레이터를 통해 자동으로 PSS/E ASCC 3상단락 해석을 수행하였고, 기존 계통과 비교를 위해 선로 추가 전, 후 계통을 모두 수행하여 고장전류 변화량을 확인하였다. 표 11에서 보는 바와 같이 선로연계로 인한 단락전류의 증가로 고장전류량이 증가한 것을 확인할 수 있다. 특히, 신재생 발전용량의 추가가 많고, 추가 선로 연계가 많은 신안 및 영암지역의 고장전류 증가량이 큰 것을 확인하였다. 선로연계를 통해 고장전류가 증가하였으나 고장전류 차단기 용량 허용기준을 초과하지 않는 것을 확인하였다. 고장전류 허용기준 초과

표 11 고장전류 계산 결과 [kA]

Table 11 Fault current calculation result [kA]

모선	고장전류: 기존	고장전류: 선로추가 후	고장전류 증가량	모선 전압	허용 기준
강진	22.0427	25.1842	3.1415	154kV	50kA
광양1	41.12	46.1398	5.0198		
나주	24.6653	31.7791	7.1138		
백운	30.2601	38.5519	8.2918		
송정	28.3513	30.6423	2.291		
영암	13.8412	40.3319	26.4907		
신안	10.2985	37.3106	27.0121	345kV	63kA
영암3	-	18.8792	-		
신강진	17.3005	20.804	3.5035		
신안3	-	20.8455	-		
신정읍	21.1587	25.332	4.1733		
신광주	23.7834	27.7864	4.003		

시 2장에 서술된 바와 같이 모선분리 등을 통해 고장전류를 감소시켜준다. 서술된 바와 같이 계통 고장전류 안정도를 확인하였고, 시뮬레이터를 통해 상정고장 해석을 수행한다.

3.3.3 상정고장 해석

신재생 연계 후 WSCR 강건 시나리오에 따라 선로 추가 시 상정고장 해석을 수행하기 위해 상정고장 List를 생성하여야 한다. Python 기반 자동화 시뮬레이터를 통해 WSCR 강건 시나리오에 따라 선로가 추가된 전남지역의 상정고장 List를 생성하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행 결과 전남지역의 상정고장은 1회선 237개 2회선 98개 총 335개의 상정고장 List가 생성되었다. List에 따라 상정고장 해석을 수행하여, 선로 추가 전 후로 나누어 상정고장 시 발생하는 과부하 선로를 확인하였다. 시뮬레이터는 List에 따라 계통 강건 지수 안정화 시나리오에 따른 선로추가 전 후 각각 사고를 발생시켜 자동으로 비교하여 Python 수행 창에 표기한다. 상정고장 시 120% 이상 발생하는 선로 과부하를 확인하여 새로 발생하는 선로과부하 및 선로 추가로 인해 해소되는 선로과부하를 확인한다. 이에 따라 다음과 같은 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

표 12 상정고장 해석 수행 결과

Table 12 Result of Contingency analysis

계통 구분	과부하 발생 선로 수	전남지역 과부하 정보
시나리오 선로 연계 전	17	운남 - 신안 #1,2
		안좌 - 신안 #1,2
		안좌 - 화원 #1,2
		영암 - 나주 #1,2
시나리오 선로 연계 후	9	-

시뮬레이션 결과에 따라, 상정고장 시 신규 생성되는 과부하는 추가로 발생하지 않았고, 기존 미래계통 전남지역의 과부하선로의 해소를 확인하였다. 정상상태에서 확인된 바와 같이 선로 추

가에 따른 송전용량의 분배로 선로가 추가된 상정고장 지역 주변의 선로 과부하는 발생하지 않았다. 이에 따라 2장에서 모델링된 바와 같이 상정고장 해석을 종료하고, 구축된 미래계통 DB를 저장하며 계통 안정도 해석 사례연구를 종료하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 Python 기반 자동화 시뮬레이터를 생성하여 계통 WSCR 강건도 해석 및 안정도해석을 수행하였다. 사례연구를 통해 WSCR 강건도 시나리오를 생성하여 선로를 추가하였고 계통 조류를 안정시켰다. 계통 안정도해석을 통해 시나리오의 적합성을 확인하였고, 제어를 통해 계통을 안정화하였다.

계통 안정도는 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준[7]에 맞춰 안정성 유지여부를 확인하였다. 선로연계에 따라 고장전류가 증가하였지만 서술된 전기 품질 기준 내로 유지되는 것을 확인하였다. 정상상태 및 상정고장 발생 시 선로 과부하 여부를 확인하였을 때, WSCR 강건 지수를 고려한 선로연계 지역의 과부하 해소를 확인하였다. 이는 선로연계에 따라 송전 전력의 분배로 과부하가 해소되는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 신재생 발전원의 증가에 따른 강건 지수를 고려한 전력 계통 구축 및 계획, 안정도 해석방법에 관하여 연구하였고, 신재생 미래계통 구축에 고려 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 한국전력공사 지원에 의한 것임.

본 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2017R1D1A3B03035505).

References

- [1] The Paris Agreement, UN Framework Convention on Climate Change Conference of The Parties-21 Paris, 11.30-12. 2015.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, Renewable Energy 3020 Implementation Plan, 12, 2017
- [3] Study of the Integration of the Lubbock Power & Light System into the ERCOT System, ERCOT, June 9, 2016.
- [4] Seongjong Kim, Minhan Yoon, Seongchul Hwang, Gilsoo Jang, Korea University (2014), "Study of voltage characteristics with SCR in wind farm connected to power system", *KIEE Smart Grid Research Conference Spring Conference Papers*, 151-152.
- [5] World Energy Perspectives 2016, "Variable Renewables

Integration in Electricity Systems: How to Get it Right”, World Energy Council, 2016.

- [6] PSS/E 32 Manual “Documentation API”, Siemens PTI.
- [7] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2015-112, Power system reliability and electricity quality maintenance standard, June, 2015.
- [8] Wood, Allen J, Wollenberg, Bruce F, Sheble, Gerald B, “Power Generation, Operation, and Control”, John Wiley & Sons.
- [9] Ministry of Trade, Industry and Energy, Eighth Plan for Electricity Supply and Demand, 12. 2017.
- [10] V. Gevorgian and E. Muljadi, “Wind Power Plant Short Circuit Current Contribution for Different Fault and Wind Turbine Topologies”, *NREL*, pp. 18-19, oct. 2010.
- [11] Prepared by the Joint Working Group, “Fault Current Contributions from Wind Plants,” *IEEE Power and Energy Society*.



김 현 진 (Hyun-Jin Kim)

He was graduated from Jeju University and majored in Electrical Engineering in 2000. He is a Senior manager in KEPCO and is in charge of Power system planning of Korea power network.



조 윤 성 (Yoon-Sung Cho)

He received B.S degree in electrical engineering from Korea University at 2008. He is presently an assistant professor in the Department of Electronic and Electrical Engineering, Deagu Catholic University. His research interests are power system analysis and renewable energy.

저 자 소 개



박 성 준 (Seong-Jun Park)

He received B.H degree in electrical engineering from Daegu Catholic University at 2017. He is presently a master course in the Department of Electronic and Electrical Engineering, Deagu Catholic University. His research interests are power system analysis and automatic control



허 진 (Jin Hur)

Jin Hur received his B.S., M.S. degrees in Electrical Engineering from Korea University, Seoul, Korea, in 1997 and 1999, respectively, and a Ph.D. degree in Electrical and Computer Engineering from the University of Texas at Austin in 2012.