

1 MW OTEC 플랜트의 키리바시 계통 연계 해석 Kiribati Distribution System Analysis for 1 MW OTEC Plant

김용래* · 임알렉산드르* · 송승호* · 최주엽*† · 문정현** · 서종범** · 김현주**
Yong-Rae Kim*, Alexandr Lim*, Seung-Ho Song*, Ju-Yeop Choi*†, Jung-Hyun Moon**, Jong-Beom Seo** and Hyeon-Ju Kim**

(Received 02 August 2022, Revision received 17 August 2022, Accepted 17 August 2022)

Abstract : Kiribati is an archipelagic state in the central Pacific Ocean. Its grid system operates independently like Korean grid system. Kiribati strives to provide renewable resources to reduce its dependence on fossil fuel imports. It uses solar energy as their principal renewable energy; however, a power generation method using ocean thermal gradient (OTEC) is considered more suitable for the country. In this article, the generator and PV systems were modeled, and then the entire system was simulated and analyzed before adding a new 1 MW OTEC plant to the Kiribati system. After that, the simulated effective power and frequency values were verified to compare the values before and after the installation of the new 1 MW OTEC power plant. In addition, the impact on the system was analyzed if the installed OTEC plant is not connected to the system due to a failure or repair. In conclusion, this study has proved that the load burden of the installed generator is reduced and the operation is stable in case Kiribati operates the OTEC plant.

Key Words : Kiribati, Grid integration, OTEC plant, Generator, PV system

*† 최주엽(<https://orcid.org/0000-0003-1773-0838>) : 교수, 광운대학교 전기공학과

E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5143

*김용래(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1942-1991>),
임알렉산드르(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7995-0935>) :
대학원생, 광운대학교 전기공학과

*송승호(<https://orcid.org/0000-0002-1516-8995>) : 교수, 광운대학교 전기공학과

**문정현(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5247-1029>), 서종범(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) :

선입기술원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터

**김현주(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4986-8914>) :

책임연구원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터

*† Ju-Yeop Choi(<https://orcid.org/0000-0003-1773-0838>) : Professor, Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University. E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5143

*Yong-Rae Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1942-1991>), Alexandr Lim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7995-0935>) : Graduate Student, Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.

*Seung-Ho Song(<https://orcid.org/0000-0002-1516-8995>) : Professor, Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.

**Jung-Hyun Moon(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5247-1029>), Jong-Beom Seo(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : Senior Engineer, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.

**Hyeon-Ju Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4986-8914>) : Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.

1. 서론

태평양에 위치한 키리바시는 수입 화석 연료에 대한 의존도를 줄이기 위해 신재생발전원을 키리바시 전력망에 공급하기 위한 노력을 하고 있다. 현재 키리바시에는 6개의 화력 발전기를 보유하고 있으며, 이 중 2개의 화력 발전기는 사고 때를 위한 비상용 발전기로 운용하고 있다. 신재생발전원은 대부분 태양광 발전이며, 3 MW 정도의 전력을 공급하고 있다. 태양광 발전의 경우 일사량에 의해 전력량이 결정되기 때문에 계통 운영 시 많은 어려움이 있다.^{1,2,5)}

신재생발전원 중 해수온도차발전(OTEC) 플랜트는 해양심층수와 해양표층수의 온도차에 의해 발전되는 시스템이다. 해수열원은 변동성이 적기 때문에 낮에만 운용할 수 있는 태양광발전원에 비해 안정적으로 전력을 공급할 수 있다. 이에 힘입어 키리바시에 해수온도차발전(OTEC)을 운용하는 것이 더 효율적일 수 있다.

논문에서는 현재 키리바시 계통에서 운용되는 발전기, 태양광발전원, 부하 등이 적용된 전체 계통도를 모델링하여 분석하였으며, 1 MW 해수온도차발전(OTEC)이 현재 키리바시 계통에 추가되어 운용되었을 때를 분석했다.

2. 전력계통 모델링

2.1 발전기

Table 1은 키리바시에서 운용 중인 발전기이다. 키리바시에 운용되고 있는 발전기는 동기 발전기

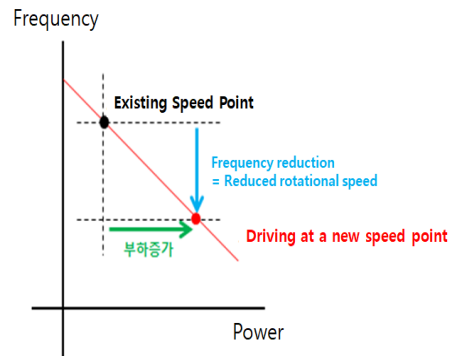
Table 1 Generator of Kiribati Grid

Generator	Rating (MW) 0.8 PF	Maximum Power (MW)	Mimumum Power (MW)
Generator 1	1.25	0.9	0.5
Generator 2	0.625	0.4	0.35
Generator 3	1.4	1.12	0.5
Generator 4	1.4	1.4	0.5
Generator 5	1.4	1.12	0.5
Generator 6	0.823	0.4	0.35

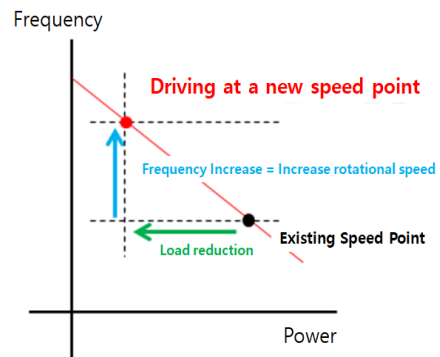
이며, 4개의 발전기는 상시 운용되고 2개의 발전기(Generator 2, 6)는 계통 사고가 발생했을 때 가동된다.²⁾

2.2 발전기 거버너

발전기 거버너는 터빈을 일정한 범위의 속도로 운전할 때 사용하는 제어기로서, 발전기의 유효전력을 제어한다. 거버너는 계통의 부하에 따라 발전기의 회전속도가 달라질 때 일정한 속도로 회전하게 된다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 계통의 부하가 증가하면 발전기 회전속도가 감소되고 새로운 주파수점에서 운전하도록 제어된다. 이와 반대로 부하가 감소할 경우 발전기 회전속도가 증가하고 새로운 주파수점에서 운전한다.



Load increase -> Reduced rotational speed



Load reduction -> Increase rotational speed

Fig. 1 Governor operation

2.3 발전기 여자기

발전기 여자기는 계자전류를 통해 발전기의 유기기전력 크기를 제어하여 계통의 전압을 안정적으로 유지시킨다. 발전기 여자기는 IEEE의 ST2A 여자기 모델을 사용하였다.²⁾

Fig. 2 블록도의 피드백 루프에 나온 식 (1)에 따라 발전기 여자기 출력이 안정될 수 있다.

$$\frac{sK_F}{1 + sT_F} \quad (1)$$

여기서, K_F 는 여자 제어 시스템의 안정기 이득값, T_F 는 여자 제어 시스템의 안정기 시정수이다.

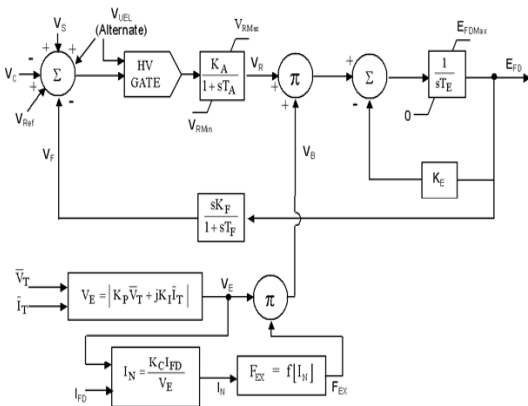


Fig. 2 Block diagram of Generator exciter model

2.4 PV System이 없는 계통 분석

2022년 최소 및 최대 부하를 적용했을 때 발전기의 부하 분담을 확인하기 위해 PV System을 제외했을 때를 확인했다. 발전기는 2개의 비상용 발전기를 제외한 4개의 발전기를 적용했다.

Fig. 3은 2022년의 최소 부하는 2.873 MW로 설정했을 때 발전기 1의 출력을 나타내며, 발전기 3, 4, 5의 출력은 발전기 1과 동일한 것을 확인했다. 각각의 발전기의 유효전력은 대략 0.7 MW로 출력되고 있으며 설정한 부하에 맞춰 정확히 유효전력이 출력됨을 확인했다. 또한 각 발전기

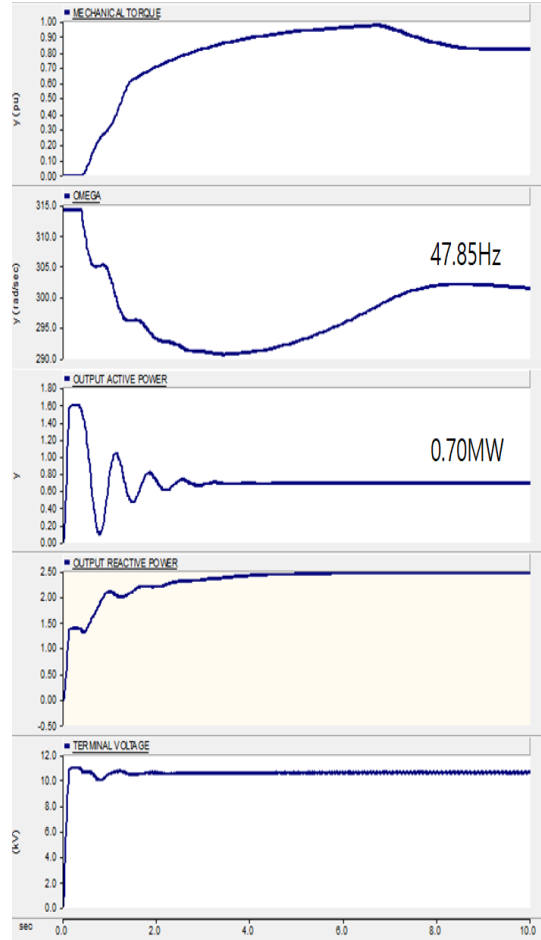


Fig. 3 Generator output at minimum load in 2022

의 거버너 동작으로 인해 주파수는 47.85 Hz로 유지되고, 출력 전압은 11 kV로 안정적으로 출력됨을 확인할 수 있다. 하지만 발전기 토크가 0.8 p.u.로 여유가 많이 남지 않았으며, 부하가 더 증가할 경우 발전기가 정지되는 상황이 발생할 수 있다.

반면, Fig. 4는 2022년 최대 부하 5.975 MW로 설정했을 때의 발전기 1의 출력을 확인했다. 4대의 발전기만으로는 2022년 최대 부하를 대처하지 못하고 발전기 4대 모두 계통에서 탈락함을 확인했다. 이처럼 PV System이 없는 키리바시 계통에서 부하가 많을 경우 키리바시 계통 전체에 블랙아웃이 발생할 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인했다.

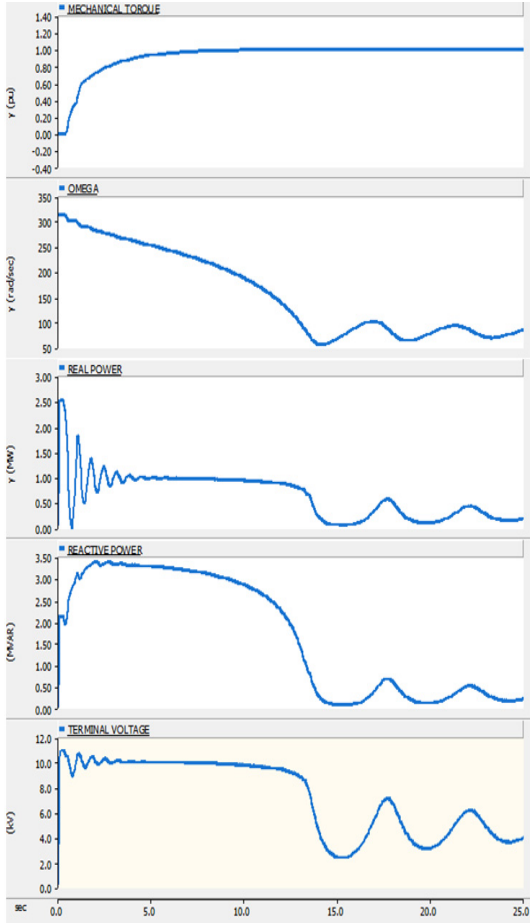


Fig. 4 Generator output at maximum load in 2022

2. PV System 모델링

2.1 PV System

Fig. 5는 PV System의 블록도이며, PV System은 PV Array, DC-DC Converter(Boost Converter), DC-AC Inverter로 나뉜다. DC-DC Converter는 PV Array의 특성에 의해 결정된 P-V 특성 곡선의 최대 전력점을 추종하는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어를 수행한다. DC-AC Inverter는 DC-DC Converter에 의한 DC 전압을 3상 AC 전압으로 변환하여 계통에 전력을 인가하는 역할을 한다. 이때 계통 전압의 위상 정보를 확인하여 동일한 위상의 3상 AC 전압을 출력해야만 계통에 전력을 인가할 수 있다. 계통 전압의 위상을 계산

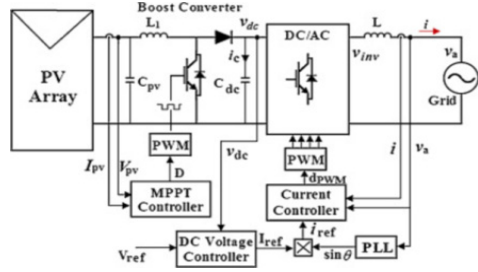


Fig. 5 PV System Block Diagram

Table 2 PV System capacity and output current

PV System	Power (kW)	Current (A)
K.I.T	158.14	329.5
Betio Stadium	137.2	285.8
Police	157.6	328.3
Nawerewere	216.4	450.8
Bonriki	2,200	4,580
Bonriki	500	1,040
Bikenibeu PS	400	833.3

하는 기법을 PLL(Phase Locked Loop)이라고 한다.

Fig. 5의 PV System 블록도에서 PV System의 손실이 없다고 가정하고, 계통 측에서 PV System을 테브난 등가회로로 변환하면 전류원으로 동작한다. 즉, PV System의 용량과 계통 전압을 통해 전류원의 크기를 식 (2)와 같이 계산할 수 있으며, 키리바시 계통에 설치된 PV System의 용량과 계산된 출력 전류를 Table 2에서 확인할 수 있다.

$$I_{PV} = \frac{P_{PV}}{V_{grid}} \quad (2)$$

여기서, I_{PV} 는 PV System의 출력 전류, P_{PV} 는 PV System의 출력 용량, V_{grid} 는 계통 전압이다.

2.2 Phase Locked Loop(PLL)

3상 전원과 연결되는 시스템에서 전원단 전압의 정확한 위상각은 필수적이다. 역률제어나 유효전력 및 무효전력 제어 등에서 전류나 전압의 지령치는 전원단 전압의 위상각과 동기되어야만 의미가 있기 때문이다. 이런 3상 전원 전압의 정확

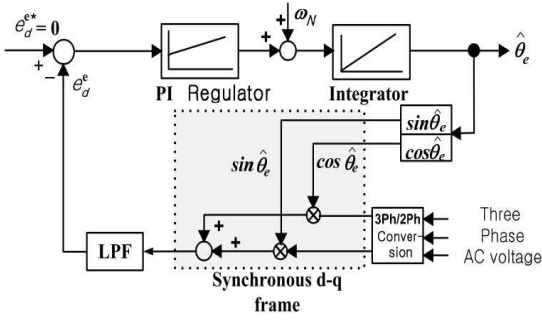


Fig. 6 Block diagram of PLL controller

한 위상각을 추적하여 계산하는 기법을 PLL(Phase Locked Loop)이라고 부른다.

Fig. 6은 PLL 제어기의 블록도이다. 동기 좌표계 d축 전압이 0이 되도록 제어하여 실제 위상각과 제어 위상각을 일치시킬 수 있다. Fig. 6에서 ω_N 은 정상 상태일 때의 계통 전압의 각주파수이고 LPF 블록은 저역 통과 필터로 제어각의 ripple을 방지하기 위해 사용한다. PLL 제어기의 전달 함수는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\hat{\theta}_e}{\theta_e} = \frac{K_p E s + K_i E}{s^2 + K_p E s + K_i E} \quad (3)$$

여기서, $\hat{\theta}$ 는 추정 계통 위상각, θ 는 실제 계통 위상각, K_p 는 PI 제어기의 비례 이득, K_i 는 PI 제어기의 적분 이득, E 는 계통 전압의 크기이다.

2.3 PV System이 적용된 키리바시 계통

PV System이 적용되었을 때 키리바시 계통을 확인했다. 2022년 최소 부하(2,873 MW)와 최대 부하(5,975 MW)로 설정했다.

Fig. 7은 최소 부하일 때 발전기 1의 주파수, 유효전력, 출력 전압의 파형이다. 발전기 3, 4, 5의 출력은 발전기 1과 동일함을 확인했다. Bonriki 지역의 BESS가 설치된 PV System은 낮 동안엔 BESS에 충전된다고 가정했다. PV System이 적용되지 않았을 때의 2022년 최소 부하 시 발전기 출력 파형인 Fig. 3과 비교했을 때 주파수는 0.35 Hz가 증가했고 각 발전기의 부하 분담

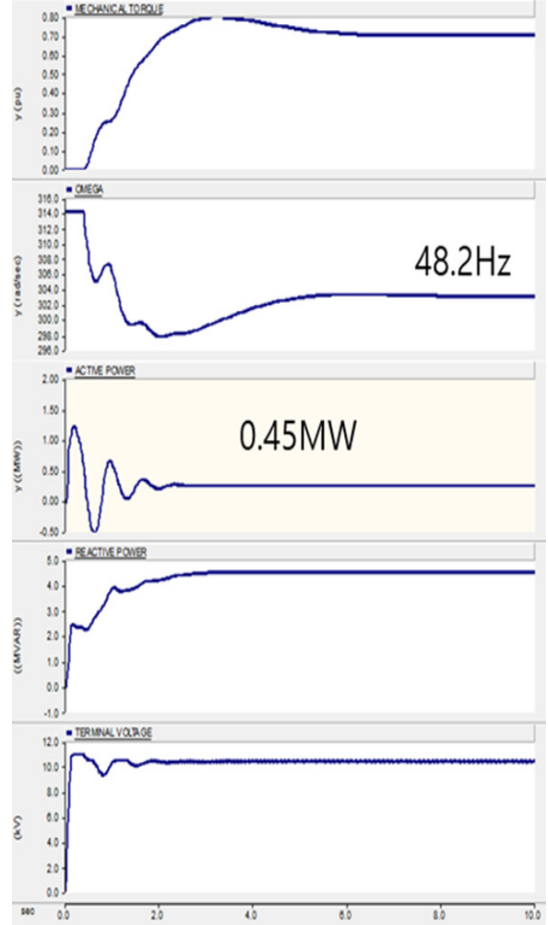


Fig. 7 Generator output at minimum load in 2022 with PV System

이 감소되었으며, 발전기의 정상 상태가 빠르게 도달된다.^{2,3)}

Fig. 8은 최대 부하일 때 발전기 1의 출력을 확인했다.

PV System이 적용된 최소 부하일 때보다 발전기는 0.3 Hz 주파수가 감소했고 0.78 MW 정도 부하가 증가했다. 하지만 PV System이 적용되지 않았을 때 2022년 최대 부하 시의 출력인 Fig. 4와 비교했을 때 PV System에 의해 발전기의 부하 부담이 감소했기 때문에 최대 부하일 때도 정상적으로 모든 발전기가 탈락하지 않고 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

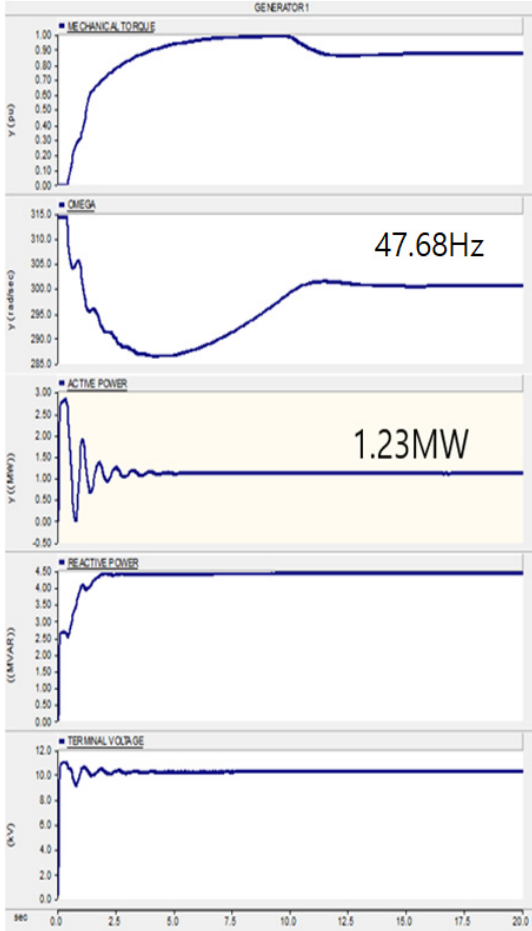


Fig. 8 Generator output at maximum load in 2022 with PV System

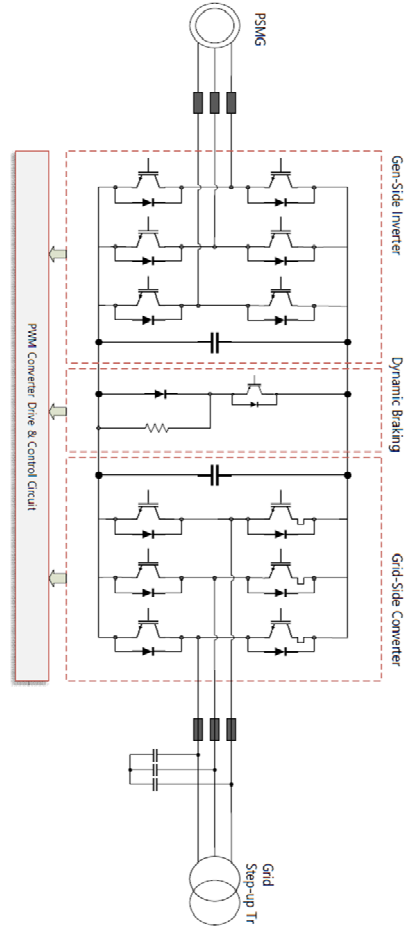


Fig. 9 Circuit of OTEC Plant

3. OTEC 플랜트 모델링

Fig. 9의 OTEC 플랜트는 Gen-Side Converter와 Grid-Side Converter로 나누어져 있다. Gen-Side Converter는 해수온도차발전을 위한 영구자석형 동기 발전기(PSMG)를 제어하며, Grid-Side Converter는 발전된 전력을 3상 계통에 인가하기 위한 제어를 하기 위한 전력변환기이다. OTEC 플랜트 역시 PV System과 같이 테브난 등가로 변환하여 전류원으로 동작시키고 또한 발전된 전력을 3상 계통에 인가하기 위해서는 계통 전압의 위상각이 필요하기 때문에 PLL 기법을 사용했다.

실제로 1 MW OTEC 플랜트를 운용할 때 자가 소비전력이 400 kW이기 때문에 순출력은 600 kW이다. 따라서 OTEC 플랜트가 적용된 시뮬레이션에서는 600 kW로 출력되도록 출력 전류를 계산했다.

4. OTEC 플랜트 연계 정적 및 동적 해석

4.1 OTEC 플랜트 연계 시 조류 해석

2022년 최소 및 최대 부하일 때 OTEC 플랜트가 적용된 키리바시 계통을 분석했다. 발전기 1, 3, 4, 5는 동일한 출력 및 주파수를 출력하므로 발전기 1에 대한 데이터만 확인했다. Fig. 10은 최소 부하일 때 발전기, PV System, OTEC이 운용될 때

발전기 1의 유효 전력, 주파수, 출력 전압 등을 확인한 데이터이다.

OTEC 플랜트 적용 시 키리바시의 모든 발전기는 300.6 kW의 유효 전력을 출력하고 48.7 Hz의 주파수로 동작한다. OTEC 플랜트 적용 전인 Fig. 7와 비교했을 때 각 발전기가 출력하는 유효 전력은 149.4 kW 정도 감소하였고, 이는 OTEC 플랜트가 운용되어 발전기의 부하 부담이 줄어들었기 때문이다. 또한 부하 부담이 줄어들어 발전기 거버너에 의해 주파수가 증가한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11과 같이 최대 부하의 OTEC 플랜트 적용 시 발전기 출력을 확인할 수 있다.

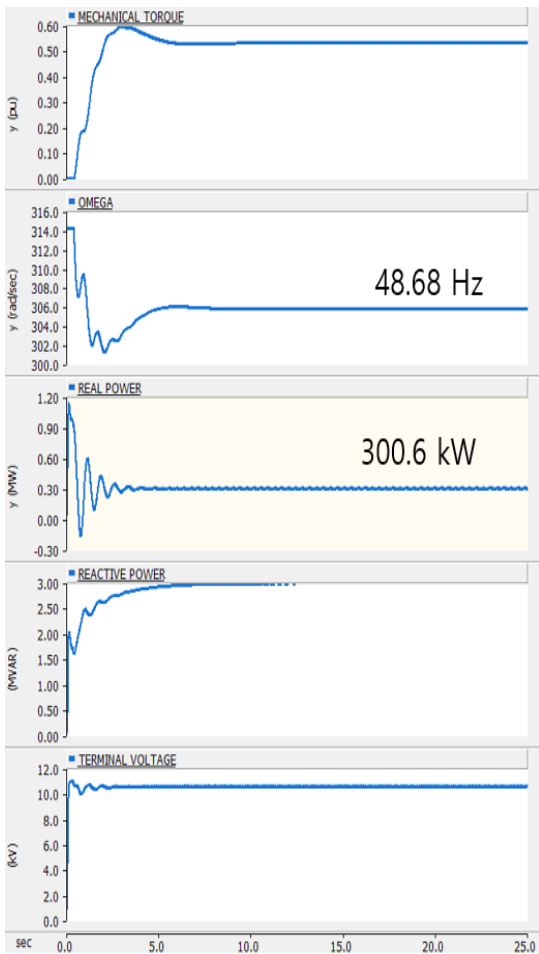


Fig. 10 Power of generator 1 at minimum load in 2022 with 1 MW OTEC

2022년 최소 및 최대 부하의 OTEC 플랜트 적용 전/후 시뮬레이션을 진행했을 때 OTEC에 의해 600 kW 유효 전력 공급으로 인해 발전기의 부하 부담이 감소하고, 주파수가 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 2022년 최대 부하 시 OTEC로 인해 키리바시 계통은 더욱 안정적으로 동작한다는 것에 큰 의미가 있다. 즉 몇몇 지역의 PV System이 문제가 생길 경우, 비상용 발전기 동작 전까지 OTEC의 운용으로 인해 기존 발전기의 탈락 없이 계통에 안정적으로 전력을 공급할 수 있다고 추론할 수 있다.

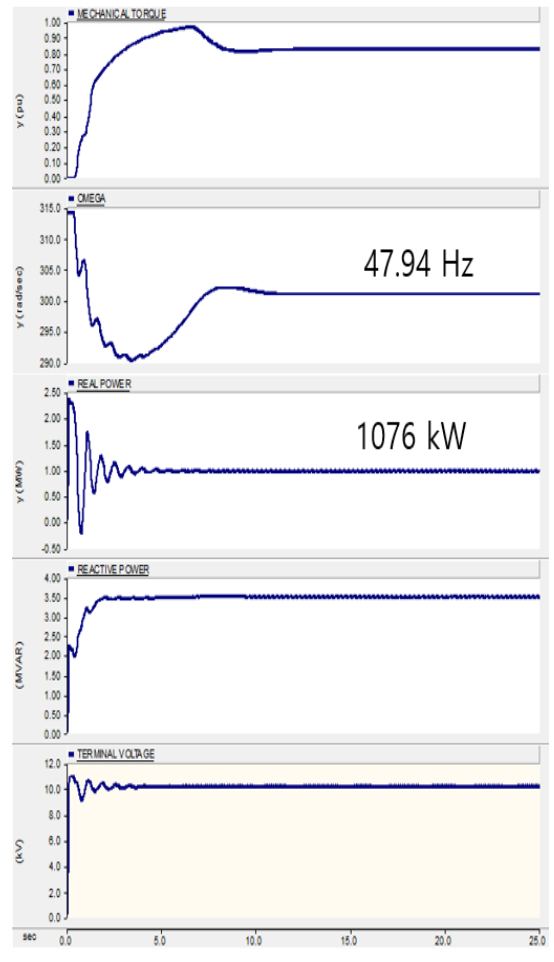


Fig. 11 Power of generator 1 at maximum load in 2022 with 1 MW OTEC

4.2 OTEC 플랜트 연계 시 고장 해석

OTEC이 정상적으로 동작하는 도중 키리바시 계통과 탈락했다고 가정했을 때 키리바시 계통을 확인했다.

7초에 OTEC 플랜트가 계통과 탈락했을 때는 Fig. 7과 Fig. 8과 같이 PV System과 발전기 4대만 동작했을 때의 유효 전력과 주파수를 출력하는 것을 알 수 있다.

만약 2022년의 최대 부하가 더 증가하여 발전기당 분담하는 부하가 증가한다면, 주파수가 감소할 수 있다. 주파수가 감소한다면 PV System이 계통에서 분리되는 문제가 발생할 수 있다.

우리나라의 경우, 계통 주파수가 60 Hz 기준으로 61.5 Hz 이상 시 즉시 탈락, 57.5 Hz 이하 시 299초 동안 운전유지, 57 Hz 이하 시 즉시 탈락된

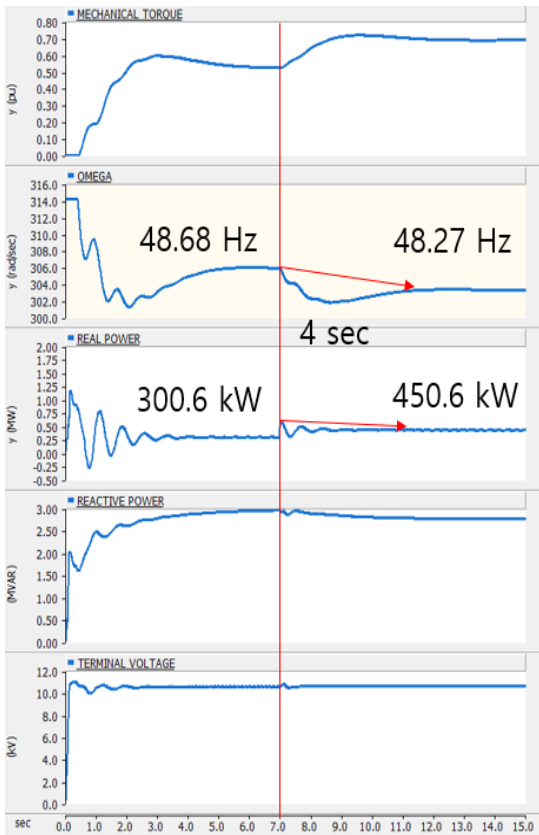


Fig. 12 Output of generator 1 at minimum load in 2022 if 1MW OTEC is eliminated

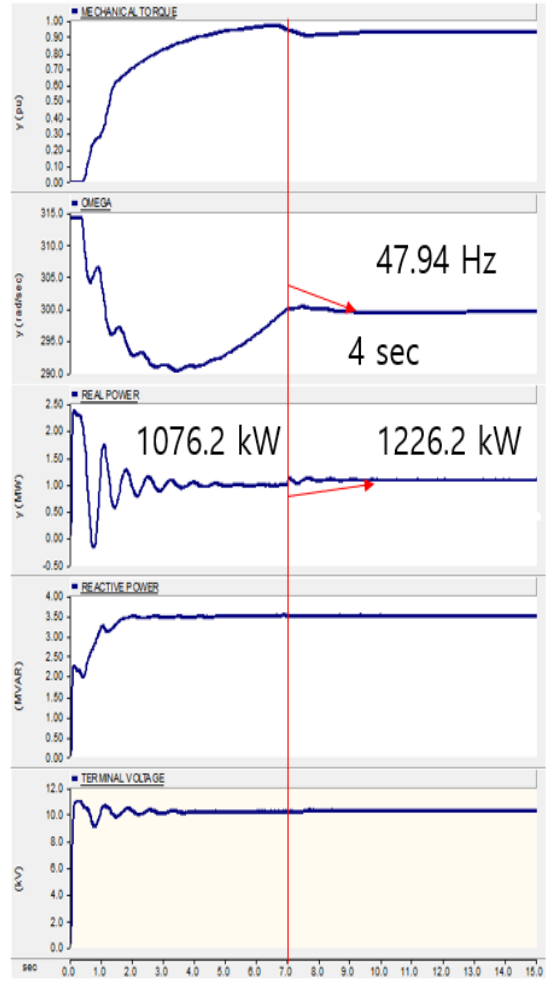


Fig. 13 Output of generator 1 at maximum load in 2022 if 1MW OTEC is eliminated

다. 이처럼 키리바시 계통에 연결된 PV System이 주파수 변화에 따라 탈락한다면 비상용 발전기의 동작 전까지 부하를 감당해야 하지만, Fig. 4와 같이 발전기 4대만으로는 모든 부하를 감당할 수 없다. 결국 OTEC 탈락 시 키리바시 계통은 큰 부하 부담이 발생할 수 있다.

4.3 OTEC 플랜트 고장 후 복귀 가능성에 대한 동적해석

OTEC 플랜트 고장 후 다시 키리바시 계통에 연결될 때를 확인했다. OTEC 플랜트와 같은

Power Converter는 기울기를 가지고 유효전력을 출력시키기 때문에 키리바시 계통에 RAMP로 600 kW를 150 kW씩 나눠서 계통에 전력을 인가했다.

Fig. 14는 2022년 최소 부하일 때 150 kW씩 인가했을 때 발전기는 450.6 → 413.1 → 375.6 → 300.6 kW로 출력이 감소되며, 주파수는 48.27 → 48.36 → 48.47 → 48.56 → 48.68 Hz로 증가한다.

Fig. 15는 2022년 최대 부하이며, RAMP로 인가했을 때 발전기 출력이다. 출력은 1226.2 → 1188.7 → 1151.2 → 1113.7 → 1076.2 kW로 감소, 주파수는 47.68 → 47.11 → 47.86 → 47.94 Hz로 증가한다.

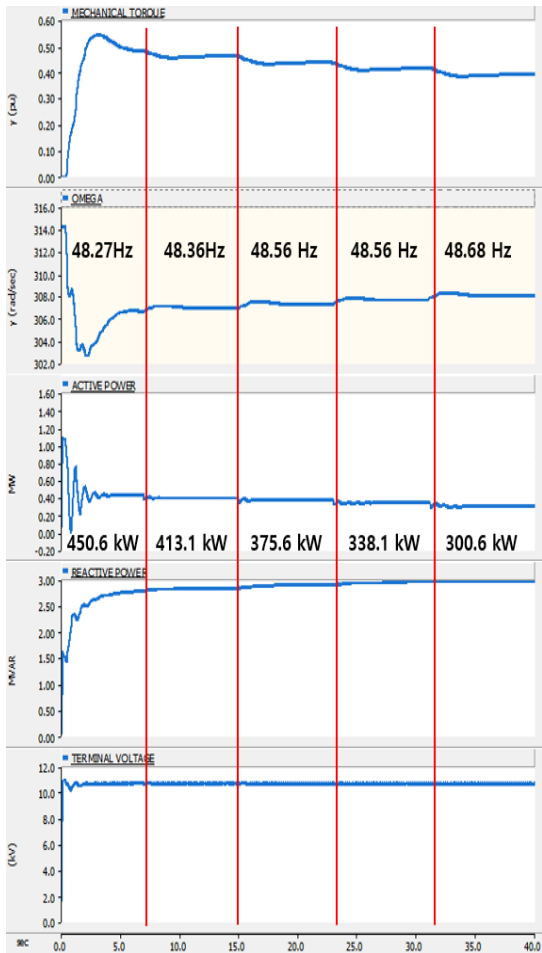


Fig. 14 Output of generator 1 at minimum load in 2022 when connected to RAMP

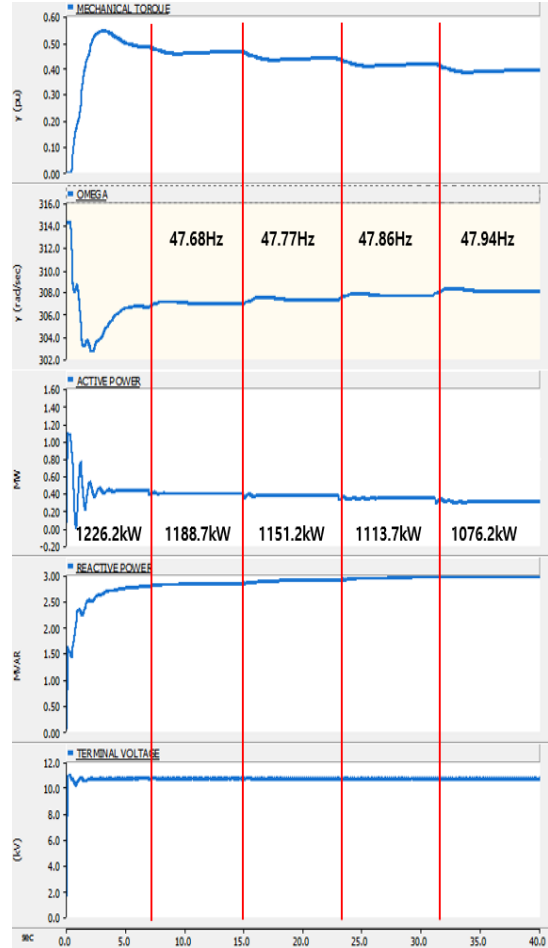


Fig. 15 Output of generator 1 at maximum load in 2022 when connected to RAMP

OTEC 플랜트가 계통에 복귀한 Fig. 14와 Fig. 15에서 큰 Transient 없이 발전기의 유효전력이 안정적이고, 주파수 또한 큰 Peak 없이 안정적으로 동작함을 확인했다.

5. 결 론

본 논문에서는 키리바시 발전기와 PV System, OTEC 플랜트를 모델링하였다. OTEC을 기존 키리바시 계통에 연결되었을 때 2022년 최소 및 최대 부하 시 발전기 부하 부담이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 또한 PV System의 발전량이 정격보

다 적어도 OTEC 동작으로 인해 발전기 부하 부담은 크게 증가하지 않는다. 또한 PV System의 발전량이 크게 줄어들거나 몇몇 지역의 PV System이 탈락해도 비상용 발전기 동작 전까지 OTEC이 정격 출력을 유지한다면 블랙아웃은 발생하지 않을 것으로 예상된다.

만약 OTEC이 키리바시 계통에 연결할 경우, RAMP를 가지고 유효전력을 출력하는 것이 계통과 OTEC의 Hardware를 보호할 수 있다고 판단된다. OTEC이 탈락한다면 부하량에 따라 계통에 문제가 발생할 수도 있다는 것을 확인했다. 최소 부하는 문제없이 계통이 유지될 수 있다. 하지만 최대 부하 시 OTEC이 탈락하면 발전기의 부하 부담이 크게 증가하며, 부하량이 증가할 경우나 PV System이 탈락한다면 키리바시에 블랙아웃이 발생할 수 있다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가 R&D 사업인 “1MW급 해수온도차발전 실증플랜트 개발 (6/6)”(PMS4730)에 의해 수행되었습니다.

Author contributions

Y. R. Kim; Conceptualization, Writing-original draft. A. Lim; Simulation. S. H. Song; Validation. J.

Y. Choi; Project administration, Writing – Review & Editing. J. H. Moon; Investigation. J. B. Seo; Data curation. H. J. Kim; Project administration.

References

1. S. R. Kumar, F. Gafano, A. Daka and A. Raturi, 2017, "Modelling and analysis of grid integration for high shares of solar PV in small isolated system-A case of kiribati", *Journal of Renewable Energy*. pp. 589-597. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.084>)
2. Kiribati PV and BESS Integration Studies Report, 2020.
3. South Tarawa water Supply Project Steady studies, 2019, "Independent Review of Proposed Power Supply Plan - Steady State Study Prepared for the Finnish Group and Asian Development Bank, Version 1.1, done for south Tarawa Water Supply Project".
4. Maximizing PV Integration at Kiribati Distribution System Report, 2020.
5. A. Lim, Y. R. Kim, J. Y. Choi, J. H. Moon, J. B. Seo and H. J. Kim, 2021, "Kiribati Distribution System Analysis for 1MW OTEC Plant", *Proceeding of the 2021 KSPSE Autumn Conference*, pp. 123-124.