

다중 우주 최적화를 활용한 불균일 온도 조건 열전 발전 시스템의 전역 최대 발전전력 추종 기법

지상혁, 이채은, 장요한, 배성우[†]

한양대학교 전기공학과

Global Maximum Power Point Tracking Method for Thermoelectric Power Generation Systems under Non-Uniform Temperature Conditions using Multi-Verse Optimizer

Sanghyuk Ji, Chaeun Lee, Yohan Jang, Sungwoo Bae[†]

Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 열전 발전(Thermoelectric Generation, TEG) 시스템의 최대 발전전력 추종을 위한 Multi-Verse Optimizer (MVO) 기법을 Perturb and Observation(P&O) 및 Grey Wolf Optimization(GWO)기법과 비교 분석한다. MVO는 다중 우주를 모방한 메타 휴리스틱 최적화 알고리즘으로, 최대 발전전력 추종을 위한 탐색 정확도 및 속도를 조정할 수 있다. 이를 통해 GWO와 같은 기존 메타 휴리스틱 기반 MPPT 기법에 비해 빠른 추종 속도로 정확한 Global Maximum Power Point (GMPP)를 추종할 수 있어 TEG 시스템의 발전전력 손실을 감소시킬 수 있다. MVO 기법의 우수성은 MATLAB/Simulink 환경의 시뮬레이션을 통해 P&O 및 GWO 기법과 비교 검증된다. 시뮬레이션 결과 MVO 기법은 설계한 조건을 기준으로 GWO 기법에 비해 최대 26.09%의 추종 속도를 향상시켜 더 나은 MPPT 성능을 보여주었다.

1. 서 론

본 논문에서는 열전 발전(Thermoelectric Generation, TEG) 시스템의 최대 발전전력 추종을 위한 Multi-Verse Optimizer (MVO)기반 Maximum Power Point Tracking(MPPT) 기법을 비교 분석한다. 불균일 온도 조건에서 TEG 시스템은 하나의 Global Maximum Power Point(GMPP)와 여러 개의 Local Maximum Power Point(LMPP)를 가지게 된다^[1]. MPPT 기법을 활용하여 GMPP를 정확하게 추종할 경우 TEG 시스템의 발전 효율을 향상시킬 수 있다. 기존 MPPT 기법인 Perturb and Observe(P&O)와 Incremental conductance는 단순한 알고리즘으로 널리 사용되지만 불균일 온도 조건에서 LMPP에 수렴하기 쉽다^[2]. 이를 해결하기 위해 Grey Wolf Optimization (GWO), Particle Swarm Optimization(PSO), MVO와 같은 메타 휴리스틱 기반 최적화 기법들이 제안되었다. GWO, PSO 기법은 GMPP를 정확하게 추종할 수 있으나 추종 과정에서 무작위성을 가진다. MVO는 탐색 정확도 및 속도를 조정하여 추종 과정에서 무작위성을 줄임으로써 GWO, PSO 기법보다 빠르게 GMPP를 추종할 수 있다. 본 논문에서는 TEG 시스템의 MPPT를 위해 MVO 기법을 적용한다. 또한, MVO 기법의 우수성은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 결과를 통해 P&O 및 GWO 기법과 비교 검증된다.

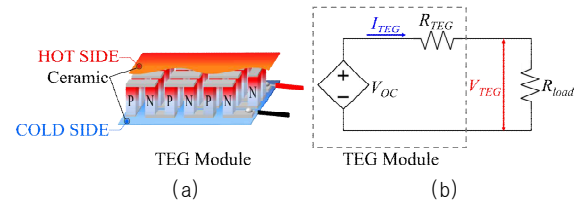


Fig. 1 TEG module. (a) Configuration, (b) Equivalent electrical circuit

2. 다중 우주 최적화 기반 최대 발전전력 추종 기법

2.1 열전 발전 시스템

TEG 모듈은 그림 1(a)와 같다. TEG 모듈의 기본 구조는 두 개의 세라믹 기판과 여러 개의 P형 반도체와 N형 반도체 쌍으로 구성되어있으며 반도체들은 구리와 같은 도체로 연결된다. TEG 모듈의 발전 원리는 Seebeck 효과를 기반으로 한다^[2]. 세라믹 기판 간에 온도 차이가 발생할 때 P형 반도체와 N형 반도체 쌍에 발생하는 전위차를 활용하여 열에너지를 전기에너지로 변환한다. TEG 모듈을 전기적 등가회로로 나타내면 그림 1(b)와 같이 개방 전압원(V_{OC})과 내부 저항(R_{TEG})으로 나타낼 수 있다. TEG 모듈이 부하와 연결된 상태에서 두 개의 세라믹 기판 사이에 온도 차이가 발생하면 부하 측으로 전류(I_{TEG})가 흐른다. 그리고 부하(R_{load})에는 TEG 모듈의 전압(V_{TEG})이 걸린다. V_{OC} 를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_{OC} = \alpha_{pn} (T_H - T_C) = \alpha_{pn} \cdot \Delta T \quad (1)$$

여기서, α_{pn} 는 Seebeck 계수, T_H 는 고온 접합부 온도, T_C 는 저온 접합부 온도, ΔT 는 T_H 와 T_C 온도 차이이다. TEG 모듈의 전력(P_{TEG})은 다음 수식과 같다.

$$P_{TEG} = I_{TEG}^2 \cdot R_{load} = V_{OC}^2 \cdot \frac{R_{load}}{(R_{load} + R_{TEG})^2} \quad (2)$$

TEG 시스템의 구성과 불균일 온도 조건에서 TEG 시스템의 Power-Voltage(P-V) 곡선은 그림 2와 같다. TEG 시스템은 여러 개의 TEG 모듈이 직렬 연결된 TEG 스트링을 병렬로 연결한 구조이다. 스트링 간에 온도가 균일하지 않다면 멀티 피크가 발생하며, 멀티 피크는 하나의 GMPP와 여러 개의 LMPP로 구성된다. 이때 TEG 시스템이 GMPP가 아닌 LMPP에서 동작할 경우 발전전력 손실이 발생하고, 발전 효율이 저

Table 1 Parameters of a TEG system

Parameters	Value
String number	4
Module number for each string	200
Basic part of Seebeck coefficient	210 μ V/K
Variation rate of Seebeck coefficient	120 μ V/K
Reference temperature	300K

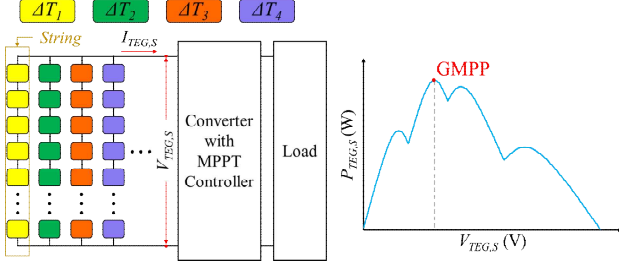


Fig. 2 Configuration of thermoelectric generator system and P-V characteristics of TEG system under non-uniform temperature.

하된다. 따라서 불균일 온도 조건에서 TEG 시스템의 발전 효율을 향상시키기 위해 정확하고 빠르게 GMPP를 추종하는 것이 중요하다.

2.2 다중 우주 최적화 기법

MVO는 다중 우주 이론을 모방한 최적화 기법으로, 블랙홀, 웜홀, 화이트홀이 서로 상호작용하여 최적의 해를 찾는다^[3]. MPPT 적용을 위한 MVO 기법의 순서도는 그림 3과 같다. 먼저, 초기 우주 모집단을 구성하고, 이때 우주는 듀티비를 의미한다. 각 우주에 의해 측정된 전압, 전류를 통해 전력을 구하여 적합성을 평가한다. 모든 우주의 적합성이 평가되면 각 우주의 객체를 다른 우주로 이동시킨다. 객체(X^j)는 웜홀을 통해 다른 우주로 이동하며 최대의 발전전력을 탐색하고, 이 과정을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$X_j^i = \begin{cases} X_j + TDR \cdot ((ub_j - lb_j) \cdot r_1 + lb_j), & r_2 < 0.5 \text{ and } r_3 < WEP \\ X_j - TDR \cdot ((ub_j - lb_j) \cdot r_1 + lb_j), & r_2 \geq 0.5 \text{ and } r_3 < WEP \\ X_j^j, & r_3 \geq WEP \end{cases} \quad (3)$$

여기서, X_j 는 j번째의 최적의 해이다. ub_j 는 최대 탐색 한계 값, lb_j 는 최소 탐색 한계 값, r_1, r_2, r_3 는 0과 1사이의 랜덤한 값을 가진다. WEP은 웜홀 존재 확률이며 수식은 다음과 같다.

$$WEP = WEP_{min} + i \cdot \left(\frac{WEP_{max} - WEP_{min}}{i_{max}} \right) \quad (4)$$

여기서, WEP_{min} 은 웜홀 최소 존재 확률, WEP_{max} 는 웜홀 최대 존재 확률, i 는 현재 반복 횟수, i_{max} 는 최대 반복횟수를 나타낸다. TDR은 이동 변동률을 나타내며 수식은 다음과 같다.

$$TDR = 1 - \frac{\frac{1}{i^p}}{\frac{1}{i_{max}^p}} \quad (5)$$

여기서, p 는 이동 변동률이며 반복에 대한 탐색 정확도와 속도를 나타낸다. p 값이 클수록 더 빠르고 정확하게 해를 구할 수 있지만 지역 해에 수렴할 수 있다. 적합성 평가와 탐색은 i_{max} 까지 반복되며 각 우주에 의해 탐색된 발전전력의 차이가 이전의 우주의 발전전력의 차이보다 작으면 탐색이 종료된다.

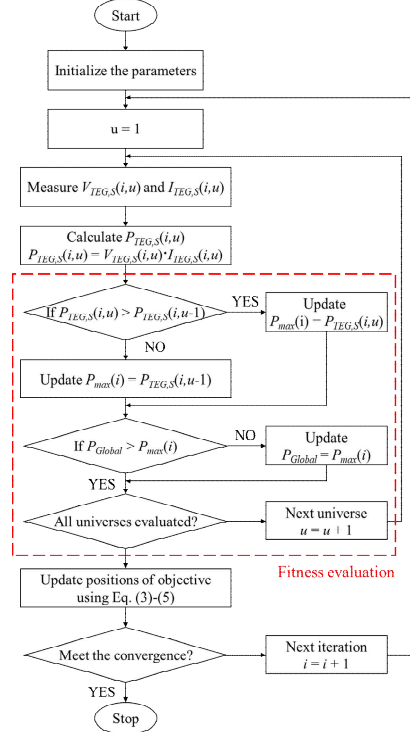


Fig. 3 Flowchart of MVO method.

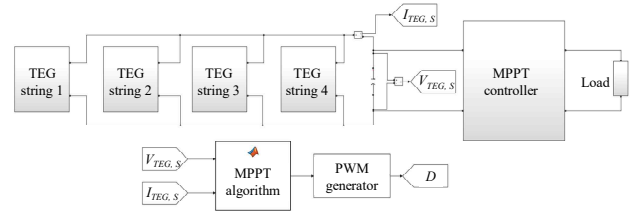


Fig. 4 Simulation configuration of the TEG system.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 설계

MVO 기법의 성능 비교를 위해 MATLAB/Simulink를 활용한 시뮬레이션을 진행한다. 설계한 TEG 시스템의 구성도는 그림 4와 같다. TEG 시스템은 4개의 직렬 연결된 TEG 스트링으로 구성되고, 각 스트링은 200개의 병렬 연결된 TEG 모듈로 설계하였다. TEG 시스템의 사양은 표 1과 같다. 표 2는 불균일 온도 조건을 위한 TEG 스트링의 온도, V_{OC} 및 내부 저항 조건을 나타낸다^[1]. 설계한 불균일 온도 조건에 따른 TEG 시스템의 P-V 곡선은 그림 5와 같다. MPPT 제어기는 TEG 시스템의 출력 전압과 부하 전압을 고려하여 부스트 컨버터 토폴로지를 적용하였다. MVO 기법 및 비교를 위한 GWO 기법, P&O 기법은 MATLAB 코드로 구현하였다. 각 기법은 TEG 시스템의 출력 전압($V_{TEG,S}$)과 출력 전류($I_{TEG,S}$)를 활용하여 MPPT 제어기를 통해 듀티비(D)를 출력한다. 총 시뮬레이션 시간은 1s이고, 시뮬레이션 샘플링 시간은 0.01s이다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 6(a)는 불균일 온도 조건 1, 그림 6(b)는 불균일 온도 조건 2에 대한 세 가지 기법의 GMPP 추종 결과이다. 불균일 온도 조건 1의 경우, P&O 기법은 0.726s의 가장 느린 추종 속

Table 2 Parameters of each string

Parameters	String 1	String 2	String 3	String 4
Con dition 1	$T_H(^{\circ}\text{C})$	247	123	76
	$T_C(^{\circ}\text{C})$	47	31	18
	$V_{OC}(\text{V})$	24.04	10.05	6.03
	$R_{TEG}(\Omega)$	0.50	0.16	0.10
Con dition 2	$T_H(^{\circ}\text{C})$	62	194	237
	$T_C(^{\circ}\text{C})$	32	114	37
	$V_{OC}(\text{V})$	3.20	9.00	24.04
	$R_{TEG}(\Omega)$	0.019	0.138	0.50

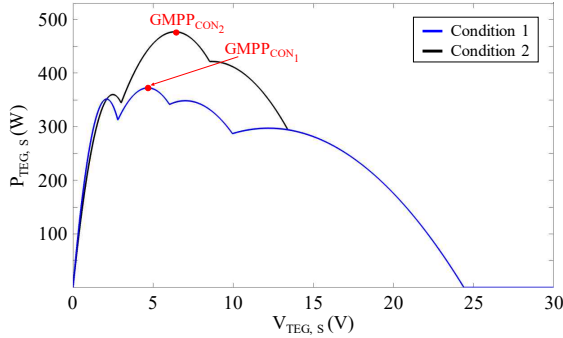


Fig. 5 Simulation configuration of the TEG system.

도로 348W의 LMPP에 수렴하였다. GWO 기법은 P&O 기법보다 빠른 0.530s의 추종 속도로 372W의 정확한 GMPP를 추종하였다. MVO 기법은 GWO 기법보다 23.58% 더 빠른 0.405s의 추종 속도로 GMPP를 정확하게 추종하였다. 불균일 온도 조건 2의 경우, P&O 기법은 0.828s의 가장 느린 추종 속도를 보이며 476W의 GMPP를 추종하였다. GWO 기법은 P&O 기법보다 빠른 0.479s의 추종 속도를 보였고, MVO 기법은 GWO 기법보다 26.09% 더 빠른 0.354s의 추종 속도로 정확한 GMPP를 추종하였다.

GMPP 추종 속도에 따른 TEG 시스템의 발전량 차이를 분석하기 위해 시뮬레이션 결과를 기반으로 발전전력 손실을 비교하였다. 발전전력 손실 비교를 위한 이상적인 총 발전량은 TEG 시스템이 GMPP에서 연속적으로 동작한 경우의 발전량이다. 불균일 온도 조건 1의 경우, P&O 기법은 LMPP에 수렴하여 10.06%의 가장 큰 발전 전력 손실이 발생하였다. GWO 기법은 2.55%의 발전 전력 손실이 발생하였으며, MVO 기법은 0.90%의 가장 낮은 발전전력 손실이 발생하였다. 불균일 온도 조건 2의 경우, P&O 기법은 가장 느린 GMPP 추종 속도로 인해 6.16%의 가장 큰 발전 전력 손실이 발생하였다. GWO 기법의 발전전력 손실은 1.99%이며, MVO 기법은 GWO 기법보다 빠른 속도로 GMPP를 추종하여 0.71%의 가장 낮은 발전 전력 손실이 발생하였다. 각 불균일 온도 조건에서 시뮬레이션 결과에 따른 세 가지 기법의 추종 결과는 표 3에 정리하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 불균일 온도 조건에서 TEG 시스템의 발전 효율 향상을 위해 MVO 기법의 우수성을 비교 분석하였다. MVO 기법은 다중 우주 이론을 모방한 최적화 기법으로써 정확한 GMPP 추종이 가능하다. 이동 변동률 수식에서 적절한 p 값을 조정함으로써 정확하고 빠른 GMPP 추종이 가능하다. MVO 기법의 우수성은 MATLAB/Simulink 환경의 시뮬레이

Table 3 Simulation results for each condition

Method	Condition 1			Condition 2		
	Tracked point	Tracking time(s)	Energy loss(%)	Tracked point	Tracking time(s)	Energy loss(%)
P&O	LMPP	0.726	10.06	GMPP	0.828	6.16
GWO	GMPP	0.530	2.55	GMPP	0.479	1.99
MVO	GMPP	0.405	0.90	GMPP	0.354	0.71

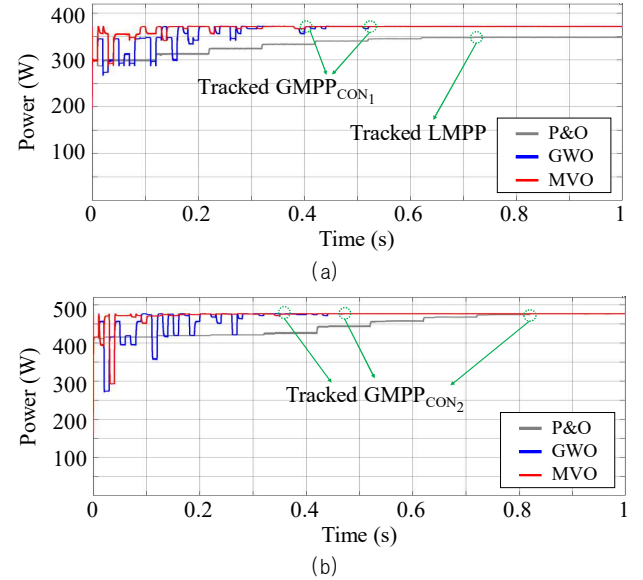


Fig. 6 Simulation results. (a) Condition 1, (b) Condition 2

션 결과를 통해 기존 P&O 기법과 GWO 기법과 비교 검증되었다. 시뮬레이션 결과 MVO 기법은 GWO 기법보다 최대 26.09% 더 빠르게 GMPP를 추종하였으며 발전 손실은 최소 0.71%로 가장 낮았다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00234563)

참 고 문 헌

- [1] X. Zhang, B. Yang, T. Yu and L. Jiang, "Dynamic Surrogate Model Based Optimization for MPPT of Centralized Thermoelectric Generation Systems Under Heterogeneous Temperature Difference," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 2, pp. 966-976, 2020, June
- [2] Y. Jang, C. Lee, S. Ji and S. Bae, "Hybrid Global Maximum Power Point Tracking Algorithm for a Thermoelectric Generation System," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems, Gyeongju, Korea, Republic of, pp. 267-271, 2021
- [3] Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Abdolreza Hatamlou. "Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization." Neural Computing and Applications 27, pp. 495-513, 2016