

به کار گیری تکنولوژی ژنراتور های ترمو الکتریک (TEG) در تبدیل حرارت به برق و تزریق توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل در (DG)

کامران رضانی طلابری^۱ گئورک قره پتیان^۲

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیر کبیر-تهران-ایران

۲- پژوهشکده بهره برداری ایمن شبکه - دانشگاه صنعتی امیر کبیر - تهران-ایران

آدرس ایمیل: Ramezani_Kamran@aut.ac.ir ; grptian@aut.ac.ir

چکیده

در این مقاله تبدیل انرژی حرارتی به برق توسط ژنراتورهای حالت جامد (solid state) از نوع ترموالکتریک (TEG) معرفی، جزئیات و محاسبات آن بیان شده است. مدلسازی مولد ترمو الکتریک و شبیه سازی دینامیک از سیستم سه فاز، متصل به شبکه و بارهای مستقل، از طریق سیستم تبدیل توان (PCS) و اینورتر بحث شده است. در خصوص سیستم کنترل (MPPT) جهت انتقال بیشترین توان، به بار محلی و شبکه، همچنین تزریق توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل، مطالعه شده است. بررسی طرح با استفاده از شبیه سازی MATLAB/simulink با اعمال شرایط مختلف صورت پذیرفته است.

واژه های کلیدی : ژنراتور ترمو الکتریک (TEG: ThermoElectric Generator) ، سیستم تبدیل توان power : (PCS conditioning system) ، مبدل DC-DC ، اینورتر منبع ولتاژ (VSI: voltage source inverter) ، ردگیری نقطه حد اکثر قدرت (MPPT: Maximum power point tracking) ، تولید پراکنده (DG).

مقدمه

افزایش نیاز به انرژی و محدودیت منابع فسیلی و افزایش آلودگی محیطی زیستی ناشی از سوزاندن این منابع ، باعث حرکت به سوی استفاده از انرژی های تجدید پذیر شده است [1]. تولید پراکنده منبع توان الکتریکی در نزدیکی مصرف کننده است و مستقیماً به شبکه توزیع متصل می شود. همچنین میتواند به صورت ابتدایی، تمام یا قسمتی از قدرت الکتریکی مورد نیاز شبکه را تأمین نماید، با به عنوان منبع تولید آماده به کار استفاده شود [4-5]. برای ما ثابت شده است که انرژی های تجدیدپذیر همانند انرژی باد، خورشید، ژئو ترمال، زیست توده ، و آبی و غیره، دارای کمترین آلودگی محیط زیستی بوده و با پیشرفت تکنولوژی و کاهش هزینه های انرژی های تجدیدپذیر، جوامع به سمت استفاده از آنها حرکت میکنند [6]. در میان انرژی های تجدیدپذیر، تجهیزات حرارتی حالت جامد با نام ژنراتور ترمو الکتریک TEG و یا ترمو پیل، به عنوان یک پتانسیل جدید جایگزینی برای انرژی پاک در تولید پراکنده است [7]. پیشرفت در فن آوری موجب توسعه TEG در بازار های آزاد رقابتی و در نتیجه کاهش هزینه و افزایش کیفیت آن خواهد شد. از مزایای آن میتوان، قابلیت تولید برق به طور مداوم در صورت وجود حرارت، سادگی نصب و راه اندازی، تعمیرات و نگهداری گم، عمر طولانی و قابلیت اطمینان خوب را بر شمرد [8]. مولد

های ترمو الکتریک برق را به صورت DC و بدون به کار گیری قطعات متحرک با استفاده از تفاوت درجه حرارت در محل اتصال دو نیمه هادی غیر هم جنس فراهم میآورند. در نتیجه ژنراتور های ترمو الکتریک یک گزینه جدید برای زیر ساخت منابع انرژی های تجدید پذیر و تبدیل به یک منبع جدید جهت کاربرد های DG شده اند. در این مقاله در خصوص اصول عملکرد سیستم TEG بحث شده است. همچنین شبیه سازی PCS با کارایی بالا و اتصال TEG به شبکه سه فاز و بار مستقل انجام شده است. شبیه سازی سیستم کنترل جهت انتقال بیشترین توان به شبکه با منبع حرارتی متغیر انجام شده است. این کار شامل مدلسازی ترمو الکتریک و اتصال آن از طریق تجهیزات الکترونیک قدرت به شبکه الکتریکی و بار مستقل و تبادل توان اکتیو و راکتیو است.

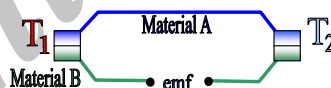
مقدمه ای بر TEG

مولد ترمو الکتریک

ترمو الکتریسیته علم تبدیل گرما به انرژی الکتریکی و یا بطور معکوس تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایش و سرمایش است [10]. در سال ۱۸۲۱ فیزیکدانی به نام یوهان سبک (Johann Seebeck) کشف نمود که دو فلز غیر هم جنس با دو اتصال (در دو سمت) در دمای متفاوت، موجب ایجاد جریان الکتریکی میشود [11]. این پدیده اثر سبک نام دارد. همچنین اگر دو فلز غیر هم جنس مطابق شکل ۱ اتصال یافته و در دو طرف اختلاف دمای $\Delta T = T_1 - T_2$ وجود داشته باشد، در دو انتها نیروی محرکه الکتریکی V یا (emf) بر طبق ضریب حرارتی α یا (S) ایجاد میشود، یا ضریب حرارتی emf از (۱) حاصل میشود. همچنین ولتاژ حاصل شده طبق (۲) است [12].

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$

$$V_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} (S_A - S_B) dT, \quad V = \alpha \Delta T \quad (2)$$



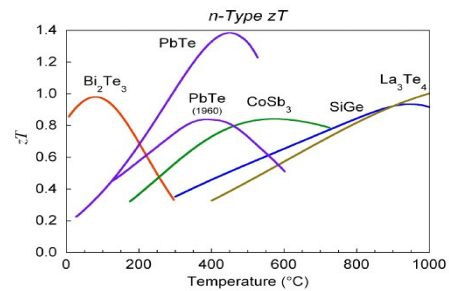
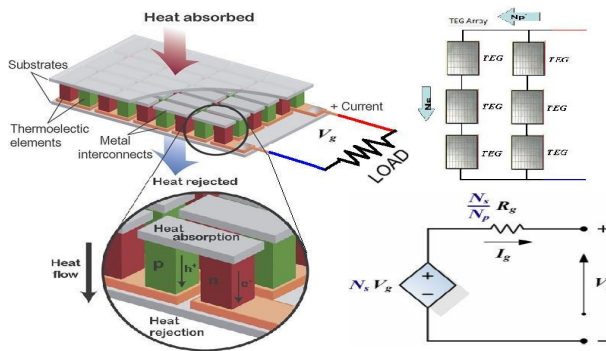
شکل ۱: دو فلز غیر هم جنس که در دو دمای متفاوت T_1 و T_2 اتصال یافته اند (اثر سبک)

مدل سیستم TEG

از سازندگان TEG میتوان به Hi-Z و Tellurex اشاره نمود [13]. همچنین شرکت های Marlow و Kryotherm و V-infinity نیز در زمینه TEG فعال هستند [14]. دیاگرام شماتیک از TEG در شکل ۲ نشان داده شده [16]. یک TEG شامل دو ماده نا همسان، از نوع نیمه هادی های P و N، دارای اتصال الکتریکی سری و اتصال حرارتی موازی است. منبع حرارت به یک سمت اعمال شده به نام اتصال گرم با درجه حرارت T_{Hg} و در سمت دیگر، تحت عنوان اتصال سرد، دارای کمترین درجه حرارت T_{Lg} است. روی سمت سرد حرارت گیر (heat sink) نصب میشود. با ایجاد اختلاف درجه حرارت بین دو سطح، در خروجی ولتاژ V_g ایجاد میشود. چنانچه این ولتاژ به باری اعمال شود جریان I_g جاری میشود. توان خروجی بستگی به اختلاف درجه حرارت ΔT ، خواص مواد نیمه هادی، و مقاومت بار در خروجی دارد.

به کار گیری تکنولوژی ژنراتور های ترمو الکتریک (TEG) در تبدیل حرارت به برق و تزریق توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل در (DG)

ضریب شایستگی (ZT) در ماده ترمو الکتریک به عنوان مولد برق یا سرمایه‌ش، با رابطه بدون واحد (۳) بیان میشود. در این رابطه ZT وابسته به α ، T دمای مطلق، ρ هدایت الکتریکی نیمه هادی، K هدایت حرارتی است [15]. در ترکیبات ساخته شده



شکل ۳: منحنی ضریب شایستگی برای مواد تجاری مورد استفاده و توسعه (توسط NASA)

شکل ۲: دیاگرام ماژول ترمو الکتریک به همراه مدار معادل الکتریکی و آرایه

TEG

عناصر ترمو الکتریک، ضریب ZT با توجه به موارد مختلف کاربردهای تولید انرژی الکتریکی یا خنک کنندگی، در دماهای مختلف، طبق شکل ۳ است [15].

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (3)$$

منبع انرژی TEG

در ژنراتورها غالباً "مهمترین عامل در سیستم منبع انرژی است. در سیستمهای دارای انرژی تجدیدپذیر و فنا پذیر که عمل تبدیل انرژی به برق صورت میپذیرد، نوع انرژی و چگونگی به کار بستن آن نقش به سزایی در آن دارد. در این مقاله سیستم ترمو الکتریک همانند سلولهای خورشیدی به تنهایی انرژی تجدیدپذیر نبوده، بلکه وسیله ای جهت تبدیل انرژی های تجدید پذیر به انرژی الکتریکی است. برتری سیستم TEG نسبت به سیستمهای دیگر، تبدیل حرارت به هر شکل ممکن به انرژی الکتریکی است. از تبدیل انرژی تجدیدپذیر به برق توسط TEG میتوان انرژی زمین گرمایی، انرژی حرارتی خورشیدی (به صورت مستقیم و غیر مستقیم)، زیست توده و هر نوع حرارتی دیگر را برشمرد. از تبدیل انرژی فنا پذیر TEG، میتوان سوختهای فسیلی و مرسوم و همچنین به عنوان یک برداشت کننده انرژی از خروجی های اتلافی همچون دودکش ها و سطوح گرم را مطرح نمود. علاوه بر این قابلیتها این تبدیل کننده انرژی بدون اجزای مکانیکی متحرک، بدون صدا و دارای عمر طولانی و تعمیر و نگهداری است.

مدل الکتریکی - حرارتی TEG

در این مدل مقدار انرژی حرارتی جذب شده در سطح سرد از (۴)، Q_H مقدار انرژی حرارتی داده شده به سطح گرم از (۵) حاصل می شود [18].

$$Q_{Hg} = \alpha_g I_g T_{Hg} - \frac{1}{2} I_g^2 R_g + k_g (T_{Hg} - T_{Lg}) \quad (4)$$

$$Q_{Lg} = \alpha_g I_g T_{Lg} - \frac{1}{2} I_g^2 R_g + k_g (T_{Hg} - T_{Lg}) \quad (5)$$

به کار گیری تکنولوژی ژنراتور های ترمو الکتریک (TEG) در تبدیل حرارت به برق و تزریق توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل در (DG)

در اینجا α ضریب سیبک ، I جریان عبوری از ماژول ، T_{Hg} ، T_{Lg} یا (T_H, T_C) به ترتیب دمای سطوح سرد و گرم و R مقاومت داخلی ماژول و k_g هدایت حرارتی است. شکل ۴ این مدل را نشان میدهد. همچنین ولتاژ تولید شده خروجی V_g ، توان خروجی P_g و راندمان حرارتی η از (۶) الی (۱۲) حاصل میشود، که در آن ولتاژ خروجی،

$$V_g = \alpha_g(T_{Hg} - T_{Lg}) - I_g R_g \quad (6)$$

توان خروجی ،

$$P_g = \alpha_g I_g (T_{Hg} - T_{Lg}) - I_g^2 R_g \quad (7)$$

راندمان حرارتی،

$$\eta = \frac{P_g}{Q_{Hg}} \quad (8)$$

و همچنین راندمان بیشینه در حالت ژنراتوری از روابط پیچیده (۱۰ الی ۱۲) قابل محاسبه است، در این روابط A سطح حرارتی، R مقاومت داخلی ماژول TEG است [15-19].

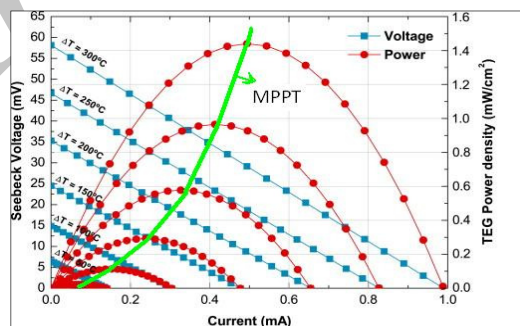
$$\eta = \frac{I^2 R_L}{\alpha I T_h + \kappa A (T_h - T_c) - \frac{1}{2} I^2 R} \quad (10)$$

$$\frac{d\eta}{d\left(\frac{R_L}{R}\right)} = 0 \quad \text{راندمان بیشینه} \quad (11)$$

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta T}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (12)$$

منحنی خروجی توان TEG

در سالهای اخیر جهت افزایش راندمان TEG تحقیقات گسترده ای در حیطه نانو انجام گرفته است. شکل ۴ منحنی ولتاژ-جریان ($V-I$) جهت بدست آوردن چگالی توان در دماهای متغیر را نشان میدهد. این منحنی توان، مربوط به سیلیکون نانو سیمی (9 si nw) با آرایه پل سری است. در این منحنی ولتاژ و توان خروجی تابع جریان کشیده شده و همچنین اختلاف دمای ΔT تا 300°C است [20]. با تغییر بار و درجه حرارت، ولتاژ و جریان خروجی تغییر نموده، در نتیجه نیاز به یک سیستم MPPT جهت تطبیق با خروجی TEG هستیم.



شکل ۴: منحنی های توان خروجی TEG و مسیر حرکت کنترل کننده MPPT.

معمولاً همانند آرایه های فوتو ولتاییک TEG به صورت آرایه مطابق شکل ۲ استفاده میشود تا ولتاژ و جریان آن افزایش یابد. جهت محاسبات از مدار معادل الکتریکی آرایه استفاده می شود [21]. بار و روابط (۱۳) و (۱۴) مقادیر معادل ولتاژ خروجی

V_{gen} و مقاومت کل R_{gen} ماژول بدست می آید. N_s تعداد ماژولهای سری و N_p تعداد ماژولهای موازی و E ولتاژ داخلی یک مولد TEG است. مقدار جریان کلی از تقسیم این روابط میسر است. انتقال بیشترین توان زمانی میسر است که مقاومت بار با مقاومت ماژول برابر باشد. از این رو وظیفه واحد MPPT تطبیق مداوم مقاومت بار و امپدانس خروجی ماژول آرایه TEG است.

$$R_{Gen} = \frac{N_s \times R_M}{N_p} \quad (13) \quad ; \quad V_{Gen} = N_s \times E \quad (14)$$

سیستم تبدیل توان

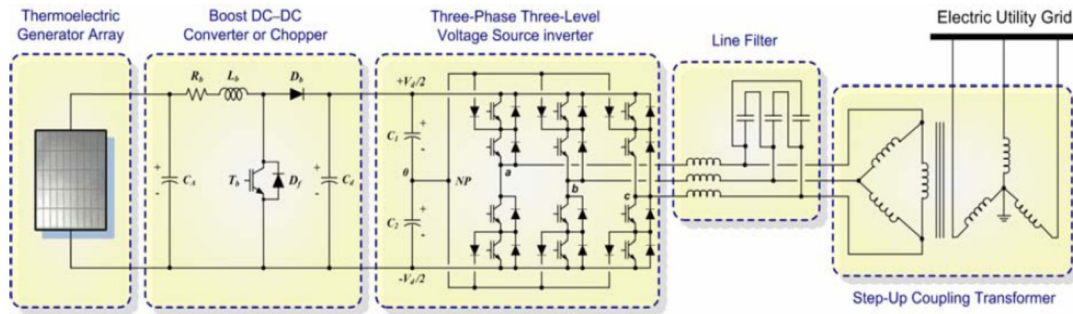
مدلسازی سیستم تبدیل توان

یک ساختار ساده مورد استفاده TEG در تولید پراکنده، شامل آرایه TEG و سیستم تبدیل توان (PCS) جهت اتصال به شبکه الکتریکی، مطابق شکل ۵ است. هدف اصلی از اتصال سیستم TEG به شبکه به کار گیری آن به عنوان تولید پراکنده، انتقال بیشترین توان از منبع حرارتی به شبکه مورد نظر با ضریب توان واحد است. این اتصال باید سه هدف را دنبال کند، اول: تبدیل توان الکتریکی از DC به AC، دوم: کنترل مؤثر عملکرد آرایه TEG در نزدیکی نقطه (MPP) در تمام زمانها بدون وابستگی به حرارت و شرایط محیطی، سوم: تولید توان راکتیو به صورت محلی بدون هیچگونه سیستم اضافی [18]. سیستم PCS الکترونیکی به ما اجازه رسیدن به این اهداف را به بهترین نحو میسر می نماید. با استفاده از توپولوژی کنترل مناسب، سیستم TEG قادر است به طور هم زمان و به طور مستقل کنترل جریان توان اکتیو و راکتیو شبکه مدرن را با توجه به نیاز انجام دهد. معمولاً در PCS از سیستم الکترونیک صنعتی دو طبقه استفاده میکنند [18]. پیکربندی پشت سر هم (دو مرحله ای) به ما درجه آزادی بیشتری را جهت اتصال TEG به شبکه نسبت به سیستم تک مرحله ای خواهد داد. معمولاً جهت اتصال به شبکه از اینورتر سه فاز DC/AC یا (VSI) که در آن از IGBT (Insulated gate Bipolar Transistors) بهره گرفته شده استفاده میشود. این سیستم سه فاز حالت جامد توسط ترانسفورماتور کوپلاژ که در اولیه دارای فیلتر موج سینوسی هارمونیک است به شبکه متصل می شود. ولتاژ خروجی کنترل شده VSI میتواند از تکنولوژی (PWM) بهره گرفته باشد. از آنجایی که VSI یک ولتاژ ثابت در لینک DC خود جهت کوپل توان اکتیو و راکتیو به شبکه الکتریکی لازم دارد، از یک مبدل DC/DC (یا چاپر) با توپولوژی بوست به طور معمول استفاده میشود. [18]. با این حال، سیستم دو مرحله ای دارای معایبی نسبت به سیستم تک مرحله ای است و آن کاهش توان و افزایش تلفات و افزایش حجم و وزن سیستم است. با طراحی مناسب در سیستم PWM در اینورتر، با عملکرد افزایشی (یا boosting) میتوان به طور مستقل و هم زمان عملکرد اینورتر را، بدون تاثیر پذیرفتن از ولتاژ شبکه در رنج وسیعی کنترل نمود.

مبدل بوست DC-DC

مولد افزایشی DC-DC با ذخیره انرژی در یک سلف در زمان معین و سپس انرژی ذخیره شده را به ولتاژ بالاتری در خروجی تبدیل می کند. عملکرد این مبدل به صورت سیستم PWM است. این مبدل جهت کنترل ولتاژ متوسط بین ورودی و خروجی خود، با هدف تطبیق مشخصه خروجی آرایه TEG با امپدانس معادل دیده شده از باس در اینورتر عمل می کند. از این طریق با تغییر عرض پالس چرخه کار (duty cycle) در مبدل DC-DC، این امکان فراهم میشود که عملکرد سیستم TEG در نزدیکی نقطه MPP به طور مستقل در هریک از شرایط تغییرات دمایی و بار امکان پذیر شود. این مبدل در (شکل ۶) و رابطه ولتاژ ورودی به خروجی طبق (۲۰) و (۲۱) ارائه شده است. در روابط (۲۰) و (۲۱)، d نسبت تبدیل چرخه کار DC-DC که $d \in [0, 1]$ و V_{in} ولتاژ ورودی و V_{out} ولتاژ باس DC در اینورتر، t_{on} و t_{off} زمان روشن و خاموش بودن IGBT است [23].

به کار گیری تکنولوژی ژنراتور های ترمو الکتریک (TEG) در تبدیل حرارت به برق و تزریق توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل در (DG)



شکل 5: مدل کامل اتصال سیستم مولد ترمو الکتریک به شبکه الکتریکی

شکل 6: مولد افزایشی DC-DC (boost)

$$V_{in}t_{on} + (V_{in} - V_{out})t_{off} = 0 \quad (20)$$

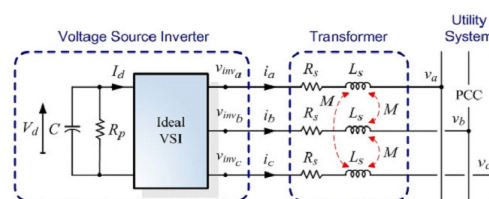
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = \frac{1}{1-d} \quad (21)$$

اینورتر منبع ولتاژ استاندارد

اینورتر منبع ولتاژ استاندارد جهت تبدیل ولتاژ DC به AC به کار میرود و در آن از IGBT با فرمان PWM سینوسی استفاده شده است. جهت حذف هارمونیک حاصل از PWM از فیلتر استفاده میشود. اینورتر VSI در حالت ایده آل توسط یک اندوکتانس L_s معادل ترانسفورماتور و مقاومت R_s مقاومت قطعات الکترونیکی به شبکه متصل میشود (شکل 7). معادلات دینامیکی خروجی VSI با استفاده از (22) حاصل میشود [24]. در این روابط، ولتاژ خروجی VSI و ولتاژ PCC و $i_{a,b,c}$ جریان خروجی اینورتر است.

$$\begin{bmatrix} v_{inva} \\ v_{invb} \\ v_{invc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = (R_s + sL_s) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, L_s = \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} : \text{ ماتریس } R \text{ و } L$$



شکل 7: مدار معادل اتصال VSI به شبکه

عملکرد سیستم DG با TEG به صورت جزیره ای

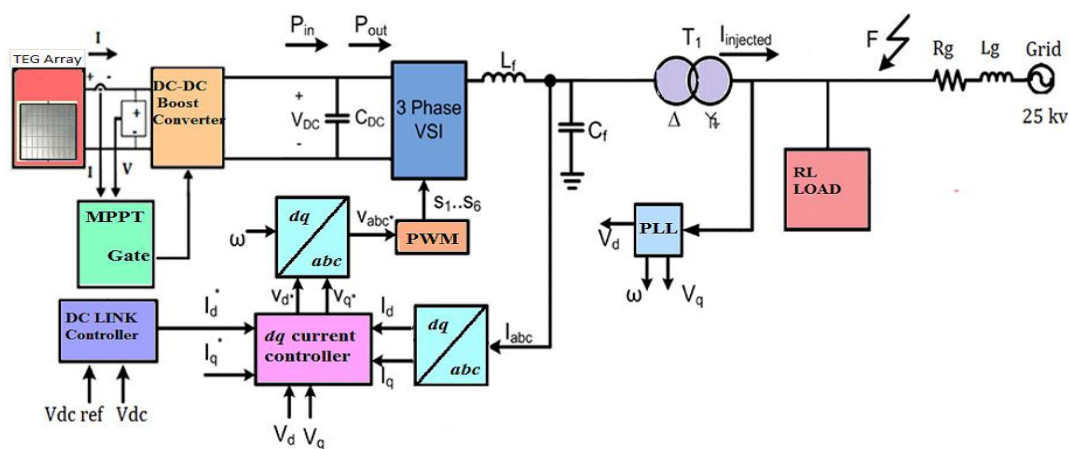
موضوع جزیره ای شدن مهمترین بحث در حضور DG در عملیات بازیابی است. حالت ISLANDING زمانی بوجود میآید که بخشی از سیستم فقط از منبع DG تغذیه شود که به موارد زیر تفکیک شده است .

- ۱- جزیره ای شدن ناخواسته : باید سریعاً " شناسایی و DG از سیستم قطع شود.
- ۲- جزیره عمدی : به ایجاد جزیره با طرح از پیش تعیین شده اطلاق میشود . این جزیره ها بایستی توسط منبع مطمئن تغذیه شوند که بتوانند ولتاژ و فرمانس و کیفیت تغذیه را تضمین کنند . در این صورت نقش مهمی در بازیابی شبکه دارند.
- ۳- ریز شبکه: به نوع خاصی از جزیره عمدی اطلاق میشود که اساساً به صورت مستقل کار میکنند [27]. با توجه به ماهیت سیستم TEG از نظر استقلال کنترل توان اکتیو و راکتیو نسبت به یکدیگر ، این نوع از منابع تجدیدپذیر میتواند راه کار مناسبی جهت پاسخ به حالات جزیره ای ، با وجود منبع ثابت حرارتی خود باشد. این موضوع به تنهایی جای بحث دارد.

سیستم کنترل

استراتژی کنترل

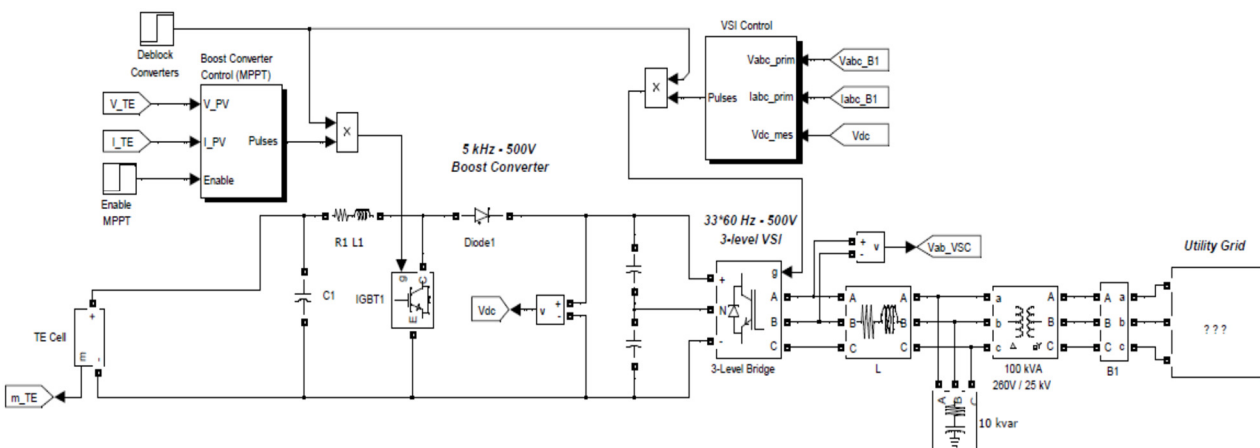
سیستم کنترل TEG متصل به شبکه (شکل ۸) دارای VSI با استراتژی کنترل جریان و سیستم حداکثر توان MPPT است. با این ایده باید کنترل کننده در PCS به صورت لحظه ای انرژی حاصل از TEG را تطبیق دهد [18]. واحد کنترل توان اکتیو جهت انتقال توان اکتیو به شبکه مورد نظر بدون در نظر گرفتن توان تولیدی در اینورتر است. از این طریق امکان کنترل توان اکتیو به صورت دینامیک و لحظه ای در اینورتر، با حد کثر توان تولید شده در TEG از طریق MPPT برای تمام شرایط عملیاتی امکان پذیر است. سیستم MPPT به طور مستقیم مقدار $duty\ ratio$ را در اینورتر با توجه به نتیجه مقایسه اندازه گیری قدرت خروجی TEG به طور مداوم تنظیم میکند. الگوریتم کنترل استفاده شده روش P&O (Perturbation & Observation) (ایجاد اغتشاش و مشاهده) که به طور گسترده در سیستمهای PV استفاده شده است. همچنین این سیستم دارای مزایای زیادی در سیستم کنترل MPPT در TEG است [18]. الگوریتم کنترلی روش P&O یک الگوریتم بالارونده و با رسیدن به نقطه مورد نظر عمل میکند. بیشتر الگوریتمهای P&O دارای پایه ولتاژ توان هستند. الگوریتم استفاده شده در این مقاله توان و $duty\ ratio$ میباشد. در این روش مقدار توان P_k با مقدار ولتاژ و جریان V_k و I_k و مقدار توان قبلی P_{k-1} مقایسه میشود. البته میتوان استراتژی های کنترلی دیگری همچون MP&O و EPP نیز استفاده نمود [26].



شکل ۸: سیستم کنترل و تبدیل توان به صورت کلی

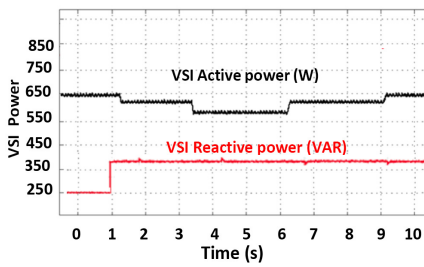
شبیه سازی

شبیه سازی سیستم کنترل و (PCS) با به کارگیری SimPowerSystem در نرم افزار MATLAB/Simulink [25] انجام شد (شکل ۹) و در آن بلوکهای اصلی درج شده است. در شبیه سازی در ابتدا با توجه به روابط حاکم بر ژنراتور ترمو الکتریک و مدار معادل الکتریکی-حرارتی مدلی از TEG دارای ورودی های حرارت و ضریب α مربوط به جنس ماده طراحی شد. در این شبیه سازی ضریب $\alpha=1,3$ در نظر گرفته شده است. سپس با تغییر مقادیر درجه حرارت به صورت پله ای تغییرات ولتاژ خروجی ماژول شبیه سازی شده TEG مطالعه شد. در این قسمت اختلاف دما بین سطوح سرد و گرم $\Delta T = T_H - T_C$ $200^\circ C$ و دمای نقطه گرم از $320^\circ C$ تا $350^\circ C$ تغییر داده شده است (مطابق شکل ۱۰). همچنین از این تغییرات دما مشاهده شد که توان خروجی TEG نیز متناسب با آن از $620W$ تا $700W$ تغییر نموده است. همچنین این تغییرات موجب میگردد سیستم کنترل MPPT فرمان لازم جهت واحد کنترل توان اکتیو (APCM) را فراهم آورده و بیشترین توان به خروجی فرستاده شود (شکل ۱۱). دلیل تغییر توان خروجی TEG با وجود ΔT ثابت در شکل ۵ بررسی شده است. در شکل ۱۲ مقدار توان خروجی VSI از $570W$ تا $650W$ تغییر نموده است و افت مشاهده شده در توان اکتیو خروجی به دلیل تلفات سیستم PCS است. همچنین در شکل ۱۲ مطالعه شده است که، ورود یک بار راکتیو $370var$ به خروجی VSI، اثری روی مقدار توان اکتیو نخواهد گذاشت و در نتیجه توان اکتیو و راکتیو مستقل هستند. در این شبیه سازی شبکه مورد نظر یک PCC شامل خطوط انتقال بارهای اکتیو و راکتیو و منابع سینوسی سه فاز شبیه شین بی نهایت است. مقاومت اهمی و سلفی خط انتقال متصل به شبکه به ترتیب $0.15\Omega/Km$ و $0.002H/Km$ و طول خط متصل به $4Km$ PCC در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۳ انتقال توان در حالت متصل به شبکه و حالت جزیره ای مطالعه شده است. مشاهده میگردد در حالت متصل به شبکه توان تولیدی $570W$ تا $650W$ متغیر است و در حالت جداد شده از شبکه (جزیره ای) با یک بار محلی مقدار توان از $370W$ تا $450W$ تغییر نموده است و چنانچه منبع حرارتی ثابت فراهم گردد ژنراتور TEG توانایی تامین بار به صورت جزیره ای را نیز خواهد داشت. جهت عملکرد فیلتر خروجی اینورتر، شکل موج قبل و بعد از فیلتر گرفته شده و مشاهده شد این شکل موج به سینوسی نزدیک است (شکل ۱۴ و ۱۵). این فیلتر (line filter) مطابق شکل ۵ VSI را به ترانسفورماتور کوپلاژ متصل مینماید و مقادیر آن $L=15mH$ و $C=0.8Kvar$ است و هارمونیک فرکانس بالای خروجی ناشی از PWM در VSI را هموار میکند.

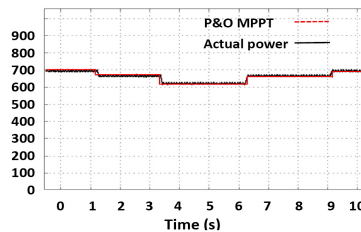


شکل ۹: سیستم کنترل شبیه سازی شده مقاله

به کار گیری تکنولوژی ژنراتور های ترمو الکتریک (TEG) در تبدیل حرارت به برق و تزریق توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل در (DG)

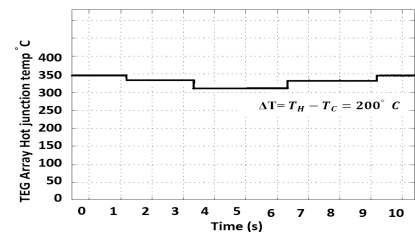


شکل ۱۲: تغییرات توان اکتیو و راکتیو و مستقل بودن آنها

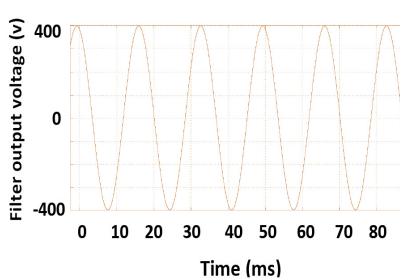


شکل ۱۱: تغییرات توان اکتیو خروجی TEG بر

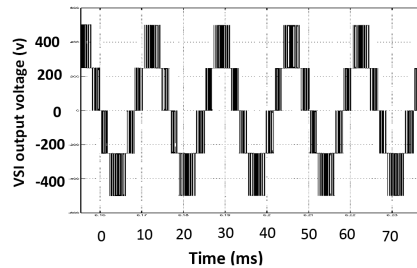
اثر درجه حرارت



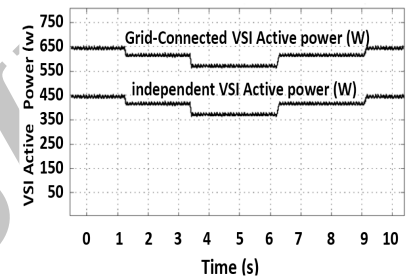
شکل ۱۰: تغییرات درجه حرارت TEG



شکل ۱۵: ولتاژ خروجی VSI پس از فیلتر



شکل ۱۴: ولتاژ خروجی VSI



شکل ۱۳: خروجی توان اکتیو در حالت مستقل و

متصل به شبکه

نتیجه گیری

در این مقاله، کاربردهای ژنراتورهای ترمو الکتریک به عنوان مبدل انرژی حرارتی به برق، به عنوان یک جایگزین نوین در منابع تولید پراکنده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سیستم ترمو الکتریک مدلسازی و شبیه سازی حرارتی-الکتریکی شد. مدلسازی دقیق نرم افزاری سیستم کنترل TEG و اینورتر مورد بررسی قرار گرفت و همچنین الگوریتمهای کنترل P&O و MPPT بررسی شد. عملکرد سیستم TEG به صورت مستقل از شبکه بررسی شد. همچنین جهت اعتبار مباحث مطرح شده عملکرد شبیه سازی شده سیستم TEG از نظر شارش توان اکتیو و راکتیو به شبکه و همچنین از نظر مستقل بودن آنها مورد بررسی قرار گرفت. در همه حالات عملکرد سیستم قابل قبول بوده نتیجه اینکه میتوان، سیستم ترمو الکتریک در بارهای محلی و DG را به عنوان منبع مناسبی (به صورت تجدیدپذیر و فنا پذیر) در مناطق مختلف طرح ریزی و اجرا نمود. همچنین وسیله مناسبی جهت جذب انرژی حرارتی اتلافی است.

منابع

- [1] Bartz, Sherry ., Kelly, David L ., Economic growth and the environment: Theory and facts, Science Direct, Resource and Energy Economics vol 30 , pp 115–149, (2008).
- [2] Willis, H. L. and Scott, W. G. Distributed Power Generation Planning and Evaluation. Marcel Dekker Pub. Co., New Yor ,2000.
- [3] Distributed Generation in Liberalized Electricity Markets. International Energy Agency, 2002 .
- [4] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D ., Belmans R., D'haeseleer W.; "Distributed generation: definition, benefits and issues," 33(6):787–98; Energy Policy 2005.
- [5] El-Khattam W., Salama M.M.A., "Distributed generation technologies, definitions and benefits", Electric Power System Res 71, pp2004,128-19.
- [6] Rahman S. Going green: the growth of renewable energy. IEEE Power & Energy Magazine, 2003.



- [7] Riffat S. B. and Ma X., Thermoelectrics: a review of present and potential applications, Applied Thermal Eng., 23, 8, 2003, 913-35.
- [8] Xi, H., Luob L. and Fraisse, G. Development and applications of solar-based thermoelectric technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 2007, 923-36
- [9] Nolas G. S., Sharp, J. and Goldsmit, H. J. Thermoelectrics: Basic Princ. and New Materials Development, Springer, Berlin, 2001.
- [10] "THErMoELECTrICITy For EnErGY HarVESTInG", observatorynano, Briefing no.17, June 2011
- [11] D. M. Rowe. CRC Handbook of Thermoelectrics. 1995.
- [12] Thermoelectric Effects in Metals: Thermocouples (S.O. Kasap 1997-2001) An e-Booklet
- [13] Juanicó L. E., Rinalde G. F., Tagliavore E., Gortari S. and Molina M. G., Desarrollo de Termogeneradores para Electrificación de Hogares Rurales, Proc. 2nd Iberian-American Congress "HYFUSEN 2009", San Juan. 8-12 june.
- [14] www.kryotherm.ru & www.marlow.com & www.cui.com co
- [15] G. JEFFREY SNYDER* AND ERIC S. TOBERER Materials Science, California Institute of Technology, 1200 East California Boulevard, Pasadena, California 91125, USA 2008 nature materials , VOL 7 , FEBRUARY 2008 ; www.nature.com/naturematerials
- [16] Mitrani D., Tome A., Salazar J. Methodology for extracting thermoelectric module parameters , IEEE Transactions on Inst. and meas, 2005. – Vol.54. – No. 4. – P. 1548–1552
- [17] Buist R. J. Methodology for testing thermoelectric materials and devices. – CRC Handbook of Thermoelectrics. – D. M. Rowe, CRC Pres. Inc., Florida, 1995. – 209 p.
- [18] Molina, M. G.; Juanicó, L. E.: "Recent Advances in Thermoelectric Power Generation: Stand-Alone and Grid Connected Applications". In book: Acosta, V. M. (Editor): "Advances in Energy Research. Vol. 8". Nova Science Publ. Inc., New York, USA, Chapt. 1, pp. 1-59, 2011.
- [19] D.J. Paul. School of Engineering. Thermoelectric Energy Harvesting. School of Engineering. University of Glasgow, U.K.. Douglas J. Paul, 2013.
- [20] Diana Dávila, Albert Tarancón, Carlos Calaza, Marc Salleras, Marta Fernández-Regúlez, Alvaro San Paulo, Luis Fonseca Monolithically integrated thermoelectric energy harvester based on silicon nanowire arrays for powering micro/nanodevices Nano Energy, Volume 1, Issue 6, November 2012, Pages 812–81
- [21] Ferrotec's Thermoelectric Technical Reference Guide is a comprehensive technical explanation of thermoelectrics and thermoelectric technology. <http://www.ferrotec.com>
- [22] Fang Zheng Peng, Senior Member, IEEE " Z-Source Inverter" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 39, NO. 2, MARCH/APRIL 2003
- [23] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins. Power electronics, Con-verters, Applications and Design. Second edition edition, 1995.
- [24] Marcelo Gustavo Molina and Pedro Enrique Mercado. Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines, 2011.
- [25] The MathWorks Inc. SimPowerSystems for use with Simulink: User's Guide, 2011.
- [26] C. Liu, B. Wu and R. Cheung Department of Electrical & Computer Engineering, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada M5B 2K3 ADVANCED ALGORITHM FOR MPPT CONTROL OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS Canadian Solar Buildings Conference Montreal, August 20-24, 2004
- [27] E. Carpaneto, G. Chicco, and A. Prunotto, "Reliability of reconfigurable distribution systems including distributed generation," in Proc. 9th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 6 pp., Stockholm, Sweden, 11-15 Jun. 2006.