مطالعات فنی احداث واحد هیبرید تولید پراکنده در مؤسسه علمی کاربردی صنعت آب و برق

نویسندگان: داوود توکلی – da_tavakoli@yahoo.com

عباس اکبرزاده – abbasakbarzadeh@yahoo.com

مهدیه عرب‌زاده – m.arabzadeh.s@gmail.com

مرتضی یوسفیان – iviorteza1991@gmail.com

چکیده: افزایش هزینه‌های تولید و انتقال توان الکتریکی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و مشکلات زیست‌محیطی استفاده از نیروگاه‌های حرارتی باعث گردیده است تا نگاه ویژه‌ای به منابع تولید پراکنده صورت گیرد. در سال‌های اخیر با حمایت‌های صورت گرفته در ایران از توسعه و احداث مولدهای تولید پراکنده، استفاده از این مولدها برای تأمین توان الکتریکی مجموعه‌هایی همچون هتل‌ها، رستوران‌ها، مجمع‌های مسکونی و اداری گسترش یافته و با استقبال زیادی مواجه شده است.

در این مقاله با اشاره به مراحل موردنیاز جهت نصب واحدهای تولید پراکنده، مطالعات فنی لازم برای احداث یک واحد تولید پراکنده هیبرید شامل یه مولد تولید همزمان برق، حرارت و برودت و همچنین یک مجموعه پنل خورشیدی، در محل مؤسسه آموزش عالی علمی-کاربردی صنعت آب و برق در نرم‌افزار قدرتمند DIgSILENT انجام شده و خروجی‌های حاصل از آن ارائه گردیده است.

کلیدواژه: تولید پراکنده، مولد تولید همزمان برق، حرارت و برودت، پنل خورشیدی، مطالعات فنی، مؤسسه آموزش عالی علمی-کاربردی صنعت آب و برق.

۱- مقدمه

۱-۱- تولید پراکنده

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های فناوری، تغییرات اقتصادی و مقررات زیست‌محیطی، سیاست‌های تولید توان الکتریکی در نزدیکی محل مصرف و همچنین تغییرات به وجود آمده در ساختار سیستم‌های قدرت (تجدید ساختار صنعت برق) سبب شده است که نسبت به مفهوم تولید پراکنده علاقه‌مندی‌های فراوانی به وجود آید. آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۰۲ اعلام کرد که این ۵ عامل اساسی توسعه فناوری‌های تولید پراکنده، محدودیت در ساخت خطوط انتقال، افزایش تقاضای انرژی پایدار از سوی مشترکان، خصوصی‌سازی بازار برق و نگرانی‌های تغییرات آب‌وهوا در فراگیر شدن مفهوم تولید پراکنده نقش بسزایی داشته است [۱].

گستره وسیعی از تعاریف تولید پراکنده موجود می‌باشد که هریک طرح‌های تولیدی خاصی را شرح می‌دهند. برخی از تعاریف واحدهای تولید همزمان در مقیاس‌های بزرگ و همچنین مزارع بادی پهناور متصل به شبکه انتقال را نیز به‌عنوان تولید پراکنده در نظر گرفته و برخی دیگر، تنها واحدهای تولیدی کوچک متصل به شبکه توزیع را لحاظ نموده‌اند [۲-۷]. مزایای تولید پراکنده را می‌توان از دو جنبه برشمرد. این مزایا از دیدگاه مصرف‌کنندگان عبارت است از [۸]:

- کاهش مدت‌زمان خاموشی‌های برق؛
- کاهش هزینه‌های انرژی با تولید همزمان برق و گرما در محل مصرف؛
- کاهش میزان تأثیرپذیری و نوسانات قیمت برق، به‌ویژه با استقرار بازار برق در کشور؛ و
- کسب درآمد از طریق فروش انرژی مازاد بر نیاز.

همچنین، مزایای تولید پراکنده ازنظر شبکه قدرت را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد:

- بهبود کیفیت توان؛
- افزایش قابلیت اطمینان در تأمین انرژی؛

www.kahrobaonline.ir

- کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری جهت توسعه سیستم انتقال [۹]؛
- افزایش طول عمر تجهیزات شبکه؛
- کاهش تلفات شبکه انتقال؛
- افزایش پیک سایی و بارهای قابل قطع؛
- کاهش تراکم خطوط انتقال؛ و
- عدم نیاز به احداث نیروگاه‌های با ظرفیت بالا.

مواردی دیگر همچون موارد زیر نیز از دیگر مزایای تولید پراکنده می‌باشد.

- کاهش آلایندگی زیست‌محیطی [۱۰]؛
- امکان راه‌اندازی سریع؛ و
- تنوع در منابع انرژی اولیه موردنیاز [۱۱].

فناوری‌های تولید پراکنده را نیز می‌توان از منظر انرژی مصرفی برای تولید توان، به دو دسته تقسیم‌بندی نمود. فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی و فناوری‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر. فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی عبارت‌اند از:

- موتورهای رفت‌وبرگشتی (موتورهای احتراق داخلی، موتورهای استرلینگ و دیزل)؛
- توربین‌های گاز؛
- پیل‌های سوختی؛ و
- میکرو توربین‌ها.

فناوری‌های تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر نیز عبارت‌اند از [۱۲]:

- توربین باد؛
- صفحات فتوولتاییک؛
- کوره‌های خورشیدی؛
- انرژی زمین‌گرمایی؛
- انرژی امواج و جزر و مد؛ و
- بیومس (زیست‌توده).

۱-۲- واحدهای تولید همزمان برق، حرارت و برودت

تولید همزمان عبارت است از استفاده ترکیبی از انرژی سوخت، به‌منظور تولید بیش از یک محصول نهایی، مانند توان الکتریکی، بخار، سرمایش، گرمایش و غیره. به‌عنوان‌مثال، درصورتی‌که بخار خروجی یک بویلر بین یک توربین بخار و یک وسیله گرمایشی تقسیم گردد، به این عمل تولید همزمان اطلاق نمی‌گردد. چیزی که باعث تمایز تولید همزمان می‌باشد، «استفاده ترتیبی» از انرژی و تولید توأمان انرژی (برای مثال برق و حرارت) می‌باشد [۱۳].

در میان انواع واحدهای تولید همزمان، تولید همزمان برق، حرارت و برودت، با توجه به امکان تولید و استفاده این سه انرژی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. طبق تعریف FERC، تولید همزمان برق، حرارت و برودت عبارت است از تولید همزمان توان الکتریکی، توان حرارتی و توان برودتی مفید، با استفاده ترتیبی از سوخت واحد. مزایای این واحدهای تولید توان، علاوه بر دیگر مزایای واحدهای تولید پراکنده عبارت‌اند از [۱۴]:

۱- افزایش بازده سوخت دریافتی به برق تحویلی (با در نظر گرفتن تلفات انتقال و توزیع) از کمتر از ۳۰ درصد به ۸۰ تا ۹۵ درصد؛

۲- صرفه‌جویی در مصرف انرژی؛

۳- انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به تغییرات بار؛

۴- کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در اثر دوره کوتاه ساخت و به‌تبع آن پایین آمدن استهلاک سرمایه در طول این دوره؛

۵- امکان حضور طیف گسترده بخش خصوصی در سرمایه‌گذاری تولید به دلیل سهولت تأمین مالی و درنتیجه حرکت به‌سوی خصوصی‌سازی و تولید غیرمتمرکز برق؛

۶- توسعه پدافند غیرعامل و افزایش امنیت صنعت برق در مقابل‌حملات نظامی و تروریستی؛

۷- کاهش پرباری شبکه و کاهش نیاز به احداث ظرفیت‌های جدید تولید، انتقال و توزیع؛

۸- تملک کمتر زمین برای توسعه شبکه و کاهش تبعات مالی، اجتماعی و زیست‌محیطی؛

۹- افزایش پایداری و امنیت فنی سیستم قدرت؛

۱۰-حذف تلفات افزایش بار (در روش متمرکز، افزایش ۳۰ درصدی بار پیک نسبت به متوسط بار شبکه، تلفات انتقال و توزیع را ۶۹ درصد افزایش می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر از ۴۰ هزار مگاوات تولیدی در زمان پیک، ۲۸ هزار مگاوات توان به بار می‌رسد. درحالی‌که در روش تولید همزمان در محل مصرف، این تلفات نزدیک به صفر است)؛

۱۱-امنیت شبکه تولید متمرکز با ۲۵٪ ذخیره چرخان تأمین می‌شود (برای تأمین ۲۸ هزار مگاوات بار، نیاز به ۵۰ هزار مگاوات ظرفیت در تولید است)، درحالی‌که با استفاده از واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، نیاز به ذخیره چرخان وجود ندارد؛

www.kahrobaonline.ir

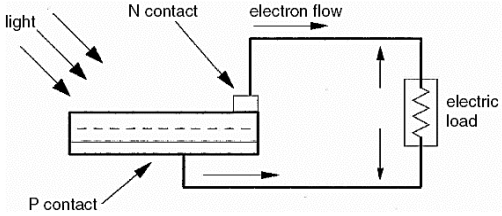
۱۲- کاهش یا از بین بردن تلفات انتقال و توزیع.

گفتنی است که محرک اصلی این مواحدها می‌تواند از نوع توربین‌های گاز، توربین‌های بخار، موتورهای رفت و برگشتی، میکروتوربین و پیل سوختی باشد. جدول (۱) مزایا و معایب هریک از این محرک‌ها را بیان نموده است. همچنین وابسته به کاربرد درنظر گرفته شده برای واحد تولید همزمان برق، حرارت و برودت نیز استراتژی‌های مختلفی جهت بهره‌برداری از آن تعریف شده است. تأمین تقاضای الکتریکی پایه، تأمین تقاضای حرارتی (برودتی) پایه، تأمین تقاضای الکتریکی، تأمین تقاضای حرارتی (برودتی)، تأمین تقاضای الکتریکی – حرارتی (برودتی) و حداقل هزینه از جمله آن‌ها می‌باشد.

۱-۳- پنل‌های خورشیدی

به‌موجب اثر فتوولتایک زمانی که فتون‌ها به نقطه مشترک دو ماده غیر هم‌جنس تابیده می‌شود، ایجاد ولتاژ می‌کنند. سلول فتوولتاییک نور را با استفاده از اثر فتوولتائیک مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند. فیزیکدان فرانسوی بکورل، اثر فتوولتایک را در سال ۱۸۳۹ کشف کرد ولی این مسأله تا سال ۱۹۵۴ تنها به‌صورت آزمایشگاهی محدود بود، اما در آن سال در آزمایشگاه‌های بل برای اولین بار سلول سیلیکونی ساخته شد و به علت داشتن قابلیت تولید توان بالا نسبت به واحد وزن، به‌سرعت در برنامه‌های فضایی ایالات‌متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. از آن تاریخ به بعد در تمام ماهواره‌های فرستاده‌شده به‌عنوان منبع تولید توان و با افزایش نیاز به الکتریسیته و بالا بودن قابلیت‌های سلول‌های خورشیدی این تجهیزات برای تولید توان به‌صورت متصل به شبکه قدرت و یا به‌صورت مستقل از شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵].

ساختار فیزیکی سلول خورشیدی مشابه یک دیود کلاسیک با پیوند p-n می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است. با تابش نور به پیوند p-n انرژی فتون‌ها به سیستم الکترون-پروتون ماده منتقل می‌شود و باعث تولید حامل‌های انرژی (بار) و پخش آن‌ها در پیوند می‌شود. حامل‌های بار می‌توانند مانند الکترولیت‌های مایع جفت الکترون-یون باشند و یا مانند مواد نیمه‌رسانا جفت حفره-الکترون باشند. حامل‌های بار در ناحیه پیوند یک گرادیان پتانسیل ایجاد می‌کنند و با قرار گرفتن در میدان الکتریکی شتاب گرفته و در مدار خارجی به‌صورت جریان، به حرکت درمی‌آیند. حاصل‌ضرب مربع این جریان در مقاومت مدار، توان تبدیل‌شده به الکتریسیته خواهد بود و بقیه توان فتون‌ها باعث افزایش درجه حرارت سلول می‌شود.



شکل ۱- اثر فتوولتاییک و تولید جریان در یک سلول خورشیدی

با توجه به آنکه ولتاژ و جریان تولیدشده توسط هر سلول خورشیدی بسیار محدود می‌باشد (معمولاً اندازه این سلول‌ها چند اینچ است و توان تولیدی آن‌ها تقریباً ۱ وات است)، اغلب تعداد زیادی از سلول‌های خورشیدی در کنار هم قرار گرفته و به‌صورت سری و موازی به هم متصل می‌گردند تا برق تولیدشده بتواند برای منظورهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد، به این آرایش پنل خورشیدی گفته می‌شود. پنل‌های خورشیدی بسته به میزان برق تولیدی خود در اندازه‌های مختلفی ساخته می‌شوند. آرایشی از چند پنل خورشیدی که در کنار هم قرار گرفته و به یکدیگر متصل می‌شوند، یک سیستم فتوولتائیک را ایجاد می‌نمایند.

سیستم‌های فتوولتائیک که در حال حاضر به‌صورت صنعتی تولید می‌شوند، ازنظر فناوری به دو دسته کلی سیلیکون کریستالی به‌عنوان فناوری نسل اول و فیلم- نازک به‌عنوان فناوری نسل دوم دسته‌بندی می‌گردد. سلول‌های سیلیکون کریستالی به انواع مونو کریستالی، پلی کریستالی و کریستال نواری تقسیم می‌گردد.

فناوری‌های کلیدی و مهم فیلم- نازک را نیز می‌توان شامل a-Si، CIS، GaAs و CdTe دانست. هزینه مواد اولیه در تکنولوژی نسل دوم پایین‌تر بوده و اندازه سلول تا ۱۰۰ برابر بزرگ‌تر از اندازه سلول ساخته شده با تکنولوژی نسل اول است که مزیتی برای تولید انبوه آن محسوب می‌شود. نسل سوم سلول‌های فتوولتاییک نیز که بیشتر در سطح آزمایشگاهی تولید می‌شوند و مراکز پژوهشی درحال‌توسعه آن‌ها می‌باشند، به سلول‌هایی اطلاق می شود که توانایی عبور از حد شاکلی-کوئیزر را دارند. این بدان معناست که دارای بازده نامی بالاتر از ۳۲ درصد می‌باشند. از انواع این سلول‌ها می‌توان به نانو سازه‌های سیلیکونی، مبدل‌های Up/Down، سلول‌های Hot Carrier و سلول‌های ترموالکتریک یا Hot Lattice اشاره کرد.

www.kahrobaonline.ir

جدول ۱- مقایسه فناوری‌های سیستم تولید هم‌زمان

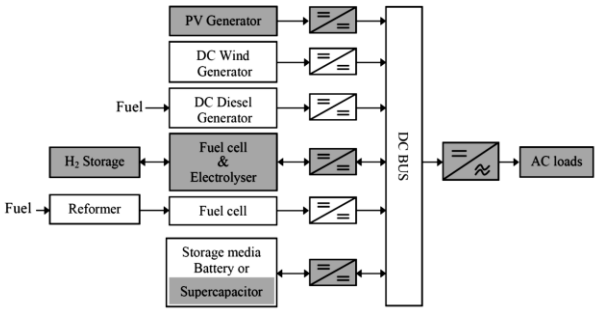
نوع سیستم	مزایا	معایب	ظرفیت‌های موجود (kW)
توربین گاز	اطمینان بالا، آلایندگی کم، حرارت با کیفیت بالا، بدون نیاز به سردکننده	نیاز به گاز بالا و یا کمپرسور گاز، بازده پایین هنگام تولید با ظرفیت پایین، کاهش تولید با افزایش دمای محیط، کاهش بازدهی در صورت افزایش دما	۵۰۰ الی ۲۵۰۰۰۰
میکرو توربین	قطعات متحرک کم و کوچک، سایز فشرده وزن کم، آلایندگی هوا و صوتی کم، بدون نیاز به سردکننده، فواصل طولانی تعمیرات	هزینه سرمایه‌گذاری بالا، بازدهی مکانیکی نسبتاً کم، محدود به کاربرد در دماهای پایین‌تر، پیچیده‌تر بودن اتصال	۳۰ الی ۲۵۰
موتورهای پیستونی	بازدهی توان بالا، انعطاف‌پذیری در هنگام عملکرد بخشی از ظرفیت، راه‌اندازی سریع، هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً کم، قابلیت استفاده به‌صورت مستقل از شبکه، قابلیت تنظیم میزان بار تولیدی کل، قابل تنظیم در محل با اپراتور عادی	هزینه نگهداری بالا، محدود به کاربرد در دماهای پایین‌تر، آلایندگی هوای نسبتاً بالا، باید دائماً سرد شود، حتی اگر حرارت خروجی مورد استفاده نباشد، ایجاد آلودگی صوتی (نویز زیاد)	احتراق جرقه‌ای (سرعت‌بالا) تا ۵۰۰۰ احتراق تراکمی (سرعت‌پایین) تا ۷۵۰۰۰
توربین گاز	بازده بالا، تنوع سوخت مصرفی، قابلیت حرارت دهی به بیش از یک پایانه، قابلیت اطمینان و طول عمر زیاد، امکان تغییر در نسبت نیرو به حرارت	راه‌اندازی طولانی، نسبت تولید برق به گرمای پایین	۵۰ تا ۲۵۰۰۰۰
پیل سوختی	آلودگی صوتی و آلایندگی کم، بازدهی بالا برای بارهای تولیدی مختلف، طراحی تفکیکی	قیمت بالا، چگالی پایین، نیاز به فرآیند روی سوخت (غیر از هیدروژن خالص)	۵ تا ۲۰۰۰

۱-۴- اتصال سیستم‌های هیبرید تولید توان به بار

ازنقطه‌نظر ساختاری، سیستم‌های هیبرید که از منابع متداول و سیستم‌های تبدیل توان منابع انرژی تجدیدپذیر تشکیل شده‌اند، به دو دستهٔ اتصال DC و اتصال AC تقسیم می‌شوند. در اتصال DC تمام منابع توان مستقیماً و یا از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به یک بأس DC متصل شده سپس توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه AC و یا بار DC یا AC متصل می‌شود و در اتصال AC منابع مستقیماً و یا از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه AC و یا بار AC متصل می‌شوند.

همانند آنچه در شکل (۲) نشان داده شده است، در توپولوژی اتصال DC، تمام واحدهای تولیدی و ذخیره کننده‌های انرژی به یک بأس DC وصل شده‌اند. در صورت وجود منبع تولید توان AC، توان تولیدشده با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به‌صورت DC تبدیل شده و سپس به بأس DC وصل می‌شود و درنهایت توان کل از طریق اینورتر DC/AC به‌صورت AC درآمده و بار را تغذیه می‌کند. همچنین اینورتر می‌بایست سطح ولتاژ و نیز فرکانس ولتاژ خروجی را در مقدار موردنظر تثبیت کند.

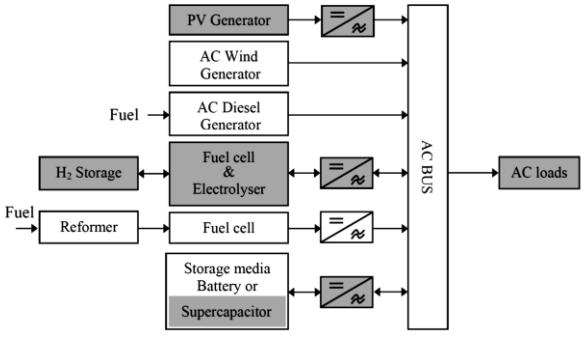
www.kahrobaonline.ir



شکل ۲- سیستم هیبرید توان با اتصال DC

تمام تجهیزات موجود در این توپولوژی، همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، از طریق بأس AC به مصرف‌کننده AC متصل می‌شوند. اتصال AC در مقایسه با اتصال DC دارای ویژگی خاص است و آن این است که هر اینورتر می‌تواند با مولدی که به آن متصل است سنکرون شود، لذا می‌تواند بار را به‌تنهایی و یا به‌طور هم‌زمان و هماهنگ با سایر اینورترها تغذیه کند. این مسئله باعث انعطاف‌پذیری بیشتر سیستم برای استفاده از منابع مختلف انرژی برای تأمین بار می‌شود. اگر تقاضای بار کم باشد، تنها یکی از اینورترها، به‌عنوان‌مثال اینورتر سلول خورشیدی بار را تأمین می کند و بقیه اینورترها به حالت آماده بکار درمی‌آیند و با افزایش بار و یا برای تأمین پیک‌بار اینورترهای دیگر نیز به مدار می‌آیند.

عملکرد و کنترل این توپولوژی به علت نیاز به سنکرون کردن واحدها پیچیده است. لذا بایستی سیستم کنترل پیشرفته‌ای برای هماهنگ کردن واحدهای تولیدی و ذخیره‌سازهای انرژی، جهت عملکرد صحیح سیستم بکار گرفته شود. علاوه بر این، به‌دلیل پیشرفت پیوسته واحدهای PCU، چنین سیستم کنترلی مطمئن‌تر شده و گسترش و اصلاح عملکرد سیستم هیبرید برای تأمین رشد مصرف بار و یا تغییر الگوی آن، قابل تحقق خواهد بود [۱۶].



شکل ۳- سیستم هیبرید توان با اتصال AC

۲- مراحل احداث مولد تولید پراکنده

مراحل احداث مولد تولید پراکنده باتوجه به دستورالعمل توسعه مولدهای مقیاس کوچک شامل ۱۰ مرحله می‌باشد که این مراحل عبارت‌اند از [۱۷]:

۱- دریافت فرم درخواست توسط سرمایه‌گذار و تکمیل و تحویل آن به شرکت برق؛

۲- بررسی اولیه فرم‌های دریافتی توسط شرکت برق؛

۳- ارائه نتایج مطالعات فنی انجام‌شده توسط مشاور سرمایه گذار به شرکت برق؛

۴- بررسی نتایج مطالعات فنی انجام‌شده توسط مشاور سرمایه گذار، توسط مشاور شرکت برق؛

۵- طرح نهایی نحوه اتصال؛

۶- اعلام نتیجه بررسی طرح نهایی؛

۷- ساخت و احداث؛

۸- آزمایش و راه‌اندازی؛

۹- دوره اتصال آزمایشی؛

۱۰- پذیرش نهایی یا لغو مجوز؛

مراحل دهگانه مورد اشاره اخیر را می‌توان به نحوی مراحل موردنیاز جهت راه‌اندازی مولد مقیاس کوچک موردنظر دانست. این در حالی است که پیش از شروع اجرایی‌سازی احداث مولد مقیاس کوچک، نیاز است تا دو مرحله اساس زیر طی شود:

- تعیین ظرفیت تولید مولد تولید پراکنده؛
- مطالعات اقتصادی و توجیه پروژه.

باتوجه به آنکه نصب مولدهای تولید پراکنده در ایران، اغلب با میزان تولید توان بالا (بالای ۵ مگاوات) دارای توجیه اقتصادی می‌باشد و از طرفی این میزان مصرف توان تنها از طرف صنایع قابل مصرف است، اغلب سرمایه‌گذاران در این حوزه، هدف از سرمایه‌گذاری خود را تأمین بخشی از مصرف انرژی مجموعه تحت اختیار خود (هتل، بانک، بیمارستان و غیره) ندانسته و تنها به جنبه سودآوری آن توجه می‌شود. بر این اساس، ظرفیت تولید توان مولد تولید پراکنده موردنظر جهت احداث، اغلب باتوجه به پارامترهای اقتصادی (قدرت مالی، میزان سودآوری و دوره بازگشت سرمایه) تعیین می‌شود و بررسی میزان مصرف بار در محل نصب مولد چندان مولد توجه قرار نمی‌گیرد.

معمولاً چند طرح اقتصادی مختلف متناسب با میزان سرمایه سرمایه‌گذار تعیین و مطالعات اقتصادی بر اساس آن صورت می‌پذیرد. این مطالعات با ورود پارامترهای مختلف اقتصادی به نرم‌افزار انجام می‌شود. از جمله قدرتمندترین نرم‌افزارهای موجود

www.kahrobaonline.ir

جهت اجرای مطالعات اقتصادی، نرم‌افزار کامفار می‌باشد. اطلاعات موردنیاز جهت ورود به این نرم‌افزار عبارت است از:

- تعریف پروژه و بازه زمانی احداث و بهره‌برداری؛
- محصولات اجرای پروژه؛
- تعریف واحدهای پولی و نرخ تبدیل آن‌ها به یکدیگر؛
- ورود نرخ تنزیل؛
- هزینه‌های ثابت بهره‌برداری شامل خرید زمین، محوطه سازی، ایجاد ساختمان، خرید تجهیزات و ماشین‌آلات، تجهیزات جانبی، حفاظت‌های محیط‌زیست، هزینه‌های سربار و غیره؛
- هزینه‌های تولید؛
- برنامه فروش محصولات؛
- سرمایه در گردش شامل دوره تولید محصول، دوره وصول مطالبات، مقدار تنخواه و پرداختی‌ها؛
- نحوه تأمین سرمایه (آورده سرمایه‌گذار و وام بانکی به همراه نحوه دریافت وام)؛ و
- مالیات، عوارض و دیگر پرداختی‌های وابسته به تولید.

۳- مطالعات فنی لازم به‌منظور احداث مولد تولید پراکنده

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، یکی از مراحل دهگانه راه‌اندازی مولد مقیاس کوچک، اجرای مطالعات فنی لازم جهت اتصال این منابع تولید توان به شبکه می‌باشد. مطالعات فنی اتصال مولدهای تولید پراکنده به شبکه شامل شش دسته مطالعه فنی زیر می‌باشد:

- مطالعات پخش‌بار در حالت عادی و اضطراری؛
- مطالعات اتصال کوتاه؛
- مطالعات پایداری گذرا؛
- مطالعات کیفیت توان؛
- مطالعات هماهنگی حفاظتی؛ و
- مطالعات سیستم زمین.

جدول (۲) مطالعات فنی موردنیاز جهت اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه را با توجه به طرح‌های اتصال و همچنین کلاس قدرت نامی آن‌ها ارائه نموده است. ازآنجایی‌که مسائل فنی مربوط به اتصال مولدهای مقیاس کوچک به شبکهٔ برق (مانند حداقل تجهیزات جانبی موردنیاز جهت اتصال صحیح این مولدها به شبکه، مکان اتصال آن‌ها و غیره) می‌تواند به‌طور چشمگیری با قدرت نامی مولدها تغییر کند، بنابراین مطابق جدول (۳)، این مولدها از لحاظ قدرت نامی در ۵ کلاس طبقه‌بندی می‌شوند. همان‌طور که مشخص است، تنها مولدهای با قدرت نامی کمتر از ۲۵ مگاوات به‌عنوان مولد مقیاس کوچک شناخته می‌شوند.

همچنین مولدها با توجه به کلاس قدرتی که در آن قرار می‌گیرند، از طریق یک یا دو طرح خاص می‌توانند به شبکه متصل شوند. طرح‌هایی که برای اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین شکل (۴) نیز محل اتصال مولدهای مقیاس کوچک به شبکه را با توجه به طرح متناسب با هریک نشان می‌دهد.

جدول ۲- مطالعات فنی موردنیاز با توجه به طرح اتصال و کلاس قدرت منابع تولید پراکنده

کلاس	طرح	مطالعات پخش‌بار	مطالعات اتصال کوتاه	مطالعات پایداری گذرا	مطالعات کیفیت توان	مطالعات هماهنگی حفاظتی	مطالعات سیستم زمین
۱	۱ و ۲	–	–	–	–	–	–
۲	۲ و ۳	×	×	× (تنها طرح ۳)	-	-	×
۳	۳	×	×	×	-	-	×
۴	۳ و ۴	×	×	×	×	×	×
۵	۴ و ۵	×	×	×	×	×	×

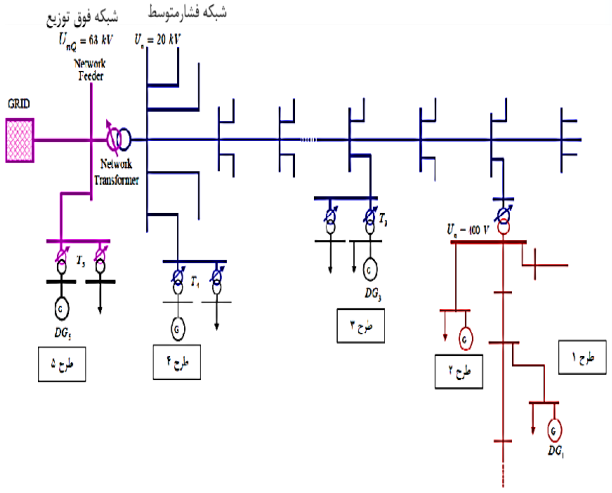
www.kahrobaonline.ir

جدول ۳- طبقه‌بندی مولدهای مقیاس کوچک با توجه به مقادیر نامی

کلاس	مقادیر نامی
کلاس ۱	کمتر از ۲۰ کیلووات
کلاس ۲	مساوی یا بیشتر از ۲۰ کیلووات و کمتر از ۲۰۰ کیلووات
کلاس ۳	مساوی یا بیشتر از ۲۰۰ کیلووات و کمتر از ۱۰۰۰ کیلووات
کلاس ۴	مساوی یا بیشتر از ۱ مگاوات و کمتر از ۷ مگاوات
کلاس ۵	مساوی یا بیشتر از ۷ مگاوات و کمتر از ۲۵ مگاوات

جدول ۴- طرح‌های مجاز برای اتصال مولد مقیاس کوچک به شبکه با توجه به قدرت نامی

کلاس طرح	۱	۲	۳	۴	۵
۱	*				
۲	*	*			
۳		*	*	*	
۴				*	*
۵					*



شکل ۴- طرح‌های اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه برق

۴- مطالعات فنی صورت گرفته برای نصب واحد هیبرید طراحی شده برای مؤسسه علمی کاربردی صنعت آب و برق

۴-۱- مقدمه

هدف از اجرای این مطالعات در مؤسسه آموزش عالی علمی-کاربردی صنعت آب و برق، نصب و راه‌اندازی یک مولد هیبرید تولید توان متشکل از یک واحد تولید همزمان برق، حرارت و برودت و یک مجموعه پنل خورشیدی می‌باشد. باتوجه به آنکه هدف از این طرح بیش از جنبه مالی، جنبه تأمین انرژی مؤسسه از طریق این مولد می‌باشد، لازم است مطالعاتی نیز به منظور تعیین ظرفیت بهینه نصب این واحد نیز صورت پذیرد. باتوجه به مطالعات صورت گرفته و اجرای ممیزی انرژی و همچنین ورود اطلاعات به نرم‌افزارهای مربوطه (نرم‌افزار تعیین ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتائیک مؤسسه انرژی و حمل‌ونقل اروپا و نرم‌افزار ارزیابی واحد تولید همزمان برق و حرارت ارائه شده توسط وزارت انرژی و صنعت بریتانیا) نتایج بدست آمده استفاده حداکثری از نیروگاه فتوولتائیک و همچنین نصب مولد تولید همزمان برق، حرارت و برودت با ظرفیت تولید ۷۵ کیلووات را پیشنهاد داده است. با توجه به ظرفیت تولید مولدهای مورد تأیید وزارت نیرو برای احداث نیروگاه تولید همزمان، ظرفیت ۸۰ کیلووات (استفاده از دو مولد ۴۰ کیلوواتی، از نوع موتور رفت و برگشتی EF7 شرکت مهندسی توسعه انرژی شهر پایدار) برا نصب مولد تولید همزمان و باتوجه به فضای در اختیار مؤسسه و همچنین قیمت خرید انرژی (قیمت خرید انرژی از مولدهای تجدیدپذیر با ظرفیت تولید کمتر از ۲۰ کیلووات بالاتر از ظرفیت‌های دیگر می‌باشد) ظرفیت تولید ۲۰ کیلووات برای نیروگاه فتوولتائیک درنظر گرفته شده است. این دو مجموعه با استفاده از ادوات لازم تشکیل واحد هیبرید تولید را داده و به شبکه متصل می‌شوند.

باتوجه به مطالب اشاره شده در بخش قبل و حجم تولید توان واحد هیبرید طراحی شده، مشخص است که کلاس کاری آن ۲ خواهد بود. همچنین مطالعات پخش بار نسان‌دهنده آن است که امکان اتصال این مولد از طریق طرح اتصال ۲ به شبکه وجود دارد. براین اساس، تنها مطالعات لازم برای اتصال مولد طراحی‌شده به شبکه، مطالعات پخش‌بار، مطالعات اتصال کوتاه و مطالعات سیستم زمین می‌باشد. گفتنی است باتوجه به آنکه مطالعات سیستم زمین در برگه اطلاعات تجهیزات موجود بوده و توسط مجری نصب مولد انجام می‌شود، اجرای این مطالعات در این مرحله نیاز نمی‌باشد.

www.kahrobaonline.ir

۴-۲- مدل‌سازی شبکه

به‌منظور انجام مطالعات پخش‌بار و اتصال کوتاه، ابتدا لازم است با توجه به اطلاعات واقعی شبکه (دریافتی از شرکت توزیع و شرکت برق منطقه‌ای) مدلی از شبکه در محدوده موردمطالعه ایجاد گردد. با توجه به اهمیت مطالعات در شرایط پیک‌بار شبکه، تمامی مطالعات در شرایط بیشترین بارگذاری صورت خواهد گرفت (اطلاعات بارگذاری در نظر گرفته شده با توجه به پیش‌بینی بار مربوط به سال ۹۷ می‌باشد).

بار پست شربیانی در پیک‌بار سال ۹۷ برابر با ۴۶/۶ مگاوات و ۱۸/۴ مگاوار پیش‌بینی شده است (بر اساس پیش‌بینی صورت گرفته توسط شرکت برق منطقه‌ای تهران). شکل (۵) شبکه شبیه‌سازی‌شده برای این مطالعات در محیط دیگسایلنت، همراه با نام‌گذاری خطوط، ترانسفورماتورها و شین‌ها را نشان می‌دهد.

۴-۳- مطالعات پخش‌بار

هدف از اجرای مطالعات پخش‌بار بررسی ولتاژ شین‌ها و بارگذاری خطوط و ترانسفورماتورها می‌باشد. به‌منظور بررسی تأثیر ورود منابع تولید پراکنده طراحی شده به‌منظور نصب در مؤسسه آموزش عالی علمی-کاربردی صنعت آب و برق لازم است دو مرتبه و با شرایط زیر مطالعات پخش بار انجام شود:

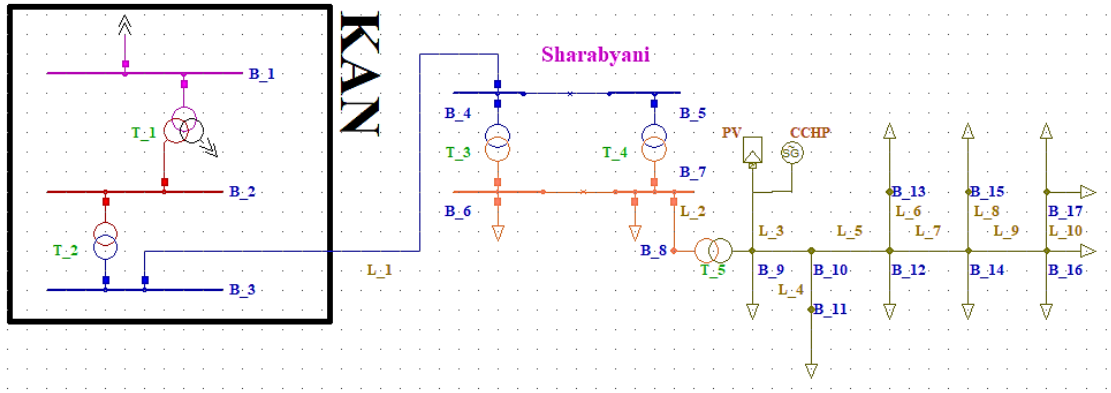
- عدم در مدار بودن مولد تولید پراکنده؛ و
- در مدار بودن مولد تولید پراکنده.

به این منظور ابتدا منابع تولید پراکنده غیرفعال شده و پخش‌بار در شبکه اجرا می‌گردد. در مرحله بعد با فعال‌سازی منابع تولید پراکنده نشان‌داده شده در شکل (۵)، مطالعات پخش‌بار مجدداً اجرا شده و اطلاعات موردنظر بررسی و ثبت خواهد شد. جداول (۵) الی (۷) به‌ترتیب مقدار بارگذاری ترانسفورماتورها، مقدار بارگذاری خطوط و ولتاژ شین‌های مربوط به بخش موردمطالعه از شبکه برق تهران (خطوط، ترانسفورماتورها و شین‌های پست شربیانی تا کن) را نشان می‌دهند.

جدول ۶: بارگذاری ترانسفورماتورهای موردبررسی پیش و پس از ورود منابع تولید پراکنده

نام ترانسفورما تور	بارگذاری ترانسفورما تور پیش از ورود مولد (٪)	بارگذاری ترانسفورما تور پس از ورود مولد (٪)	تغییرات بارگذاری ترانسفورما تور (٪)
ترانسفورما تور ۱	۴۸/۲۹۰۴۳	۴۸/۲۸۶۸۵	- ۰/۰۰۳۵۸
ترانسفورما تور ۲	۵۷/۹۶۸۱۶	۵۷/۹۴۸۲۹	- ۰/۰۱۹۸۷
ترانسفورما تور ۳	۶۳/۹۵۵۰۸	۶۳/۸۱۶۵۴	- ۰/۱۳۸۵۴
ترانسفورما تور ۴	۶۳/۹۵۵۰۸	۶۳/۸۱۶۵۴	- ۰/۱۳۸۵۴
ترانسفورما تور ۵	۶۲/۵۸۸۳۵	۵۲/۲۵۸۲۸	۱۰/۳۳۰۰۷ -

همان‌طور که از اطلاعات ارائه شده در جداول (۵) الی (۷) مشخص است، ورود مولد تولید پراکنده به دلیل کوچک بودن ظرفیت تولید توان آن، تأثیر بسزایی بر روی شبکه نداشته است و ازاین‌رو، در نظر گرفتن طرح اتصال شماره ۲ برای اتصال آن به شبکه سراسری صحیح می‌باشد.



شکل ۵- شبکه شبیه سازی در محیط دیگسایلنت برای اجرای مطالعات پخش بار و اتصال کوتاه

www.kahrobaonline.ir

جدول ۷: بارگذاری خطوط موردبررسی پیش و پس از ورود منابع تولید پراکنده

نام خط	بارگذاری خطوط پیش از ورود مولد (٪)	بارگذاری خطوط پس از ورود مولد (٪)	تغییرات بارگذاری خطوط (٪)
خط ۱	۵۲/۰۹۸۰۳	۵۱/۹۸۵۱۹	- ۰/۱۱۲۸۴
خط ۲	۵۳/۹۰۳۳۸۵۱	۵۳/۷۵۴۲۸۳۳	۰/۱۴۹۱۰۲ -
خط ۳	۴۳/۴۹۷۶۶	۴۳/۴۴۵۷۶	- ۰/۰۵۱۹
خط ۴	۲۴/۹۵۱۳۴	۲۴/۹۲۱۵۷	- ۰/۰۲۹۷۷
خط ۵	۶۲/۰۸۰۴۸	۶۲/۰۰۶۳۹	- ۰/۰۷۴۰۹
خط ۶	۲۵/۵۹۲۲۶۵	۲۵/۵۸۹۱۷۲	۰/۰۰۳۰۹۳ -
خط ۷	۴۶/۴۴۵۴۱	۴۶/۳۸۹۹۷	- ۰/۰۵۵۴۴
خط ۸	۱۰/۴۸۳۵۱	۱۰/۴۷۱	- ۰/۰۱۲۵۱
خط ۹	۲۵/۶۲۸۲۱	۲۵/۵۹۷۶۲	- ۰/۰۳۰۵۹
خط ۱۰	۱۳/۹۶۸۲۹	۱۳/۹۵۱۶۲	- ۰/۰۱۶۶۷

جدول ۵: ولتاژ شین‌های موردبررسی پیش و پس از ورود منابع تولید پراکنده

نام شین	ولتاژ پیش از ورود مولد (pu)	ولتاژ پس از ورود مولد (pu)	تغییرات ولتاژ (pu)
شین ۱	۰/۹۵۳۴۳۷۵	۰/۹۵۳۴۷۷۸	۰/۰۰۰۰۴۰۳ +
شین ۲	۰/۹۳۳۸۱۶	۰/۹۳۳۸۶۵	۰/۰۰۰۰۴۹۰ +
شین ۳	۱/۰۲۵۱۴	۱/۰۲۵۲۱۲	۰/۰۰۰۰۴۰۳ +
شین ۴	۱/۰۲۱۱۶۰	۱/۰۲۱۲۴۱	۰/۰۰۰۰۸۱۰ +
شین ۵	۱/۰۲۱۱۶	۱/۰۲۱۲۴۱	۰/۰۰۰۰۸۱۰ +
شین ۶	۰/۹۹۱۴۲۹۹	۰/۹۹۱۵۷۷۲	۰/۰۰۰۱۴۷۳ +
شین ۷	۰/۹۹۱۴۲۹۹	۰/۹۹۱۵۷۷۲	۰/۰۰۰۱۴۷۳ +
شین ۸	۰/۹۹۱۴۲۵۳	۰/۹۹۱۵۷۳۴	۰/۰۰۰۱۴۸۱ +
شین ۹	۰/۹۸۵۴۹۷۷	۰/۹۸۶۶۷۴۳	۰/۰۰۱۱۷۶۶ +
شین ۱۰	۰/۹۸۵۳۳۶۸	۰/۹۸۶۵۱۳۶	۰/۰۰۱۱۷۶۸ +
شین ۱۱	۰/۹۸۵۳۱۳۴	۰/۹۸۶۴۹۰۲	۰/۰۰۱۱۷۶۸ +
شین ۱۲	۰/۹۸۵۲۲۲۶	۰/۹۸۶۳۹۹۶	۰/۰۰۱۱۷۷۰ +
شین ۱۳	۰/۹۸۵۲۲۱۴	۰/۹۸۶۳۹۸۳	۰/۰۰۱۱۷۶۹ +
شین ۱۴	۰/۹۸۵۰۹۷۲	۰/۹۸۶۲۷۴۳	۰/۰۰۱۱۷۷۱ +
شین ۱۵	۰/۹۸۵۰۸۷۰	۰/۹۸۶۲۶۴۱	۰/۰۰۱۱۷۷۱ +
شین ۱۶	۰/۹۸۵۰۷۲۴	۰/۹۸۶۲۴۹۵	۰/۰۰۱۱۷۷۱ +
شین ۱۷	۰/۹۸۵۰۶۵۷	۰/۹۸۶۲۴۲۸	۰/۰۰۱۱۷۷۱ +

www.kahrobaonline.ir

همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده آن است که ورود این مولد تمامی پارامترهای مربوط به مطالعات پخش را در شبکه موردبررسی بهبود بخشیده است (نزدیک به یک پریونیت کردن ولتاژ شین‌ها و کاهش بارگذاری ترانسفورماتور و خطوط). بنابراین اتصال مولد تولید پراکنده طراحی شده ازنظر مطالعات پخش‌بار بلامانع است.

۴-۴- مطالعات اتصال کوتاه

با اضافه نمودن برخی اطلاعات در رابطه با مؤلفه‌های منفی و صفر مربوط به تجهیزات موردبررسی به شبکه طراحی شده، این امکان وجود خواهد داشت تا مطالعات اتصال کوتاه نیز با استفاده از نرم‌افزار دیگسایلنت اجرا شود. لازم به توضیح است که هدف از اجرای مطالعات اتصال کوتاه، تعیین بیشینه جریان اتصال کوتاه عبوری از هریک از شین‌های شبکه، در راستای تعیین قدرت قطع ادوات حفاظتی می‌باشد. معمولاً برای تعیین بیشینه جریان اتصال کوتاه، مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه در لحظه شروع خطا (I''_k) در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به آنکه ادوات حفاظتی بر اساس بیشترین مقدار جریان اتصال کوتاه طراحی می‌شوند و همواره جریان اتصال کوتاه در اتصال کوتاه ۳ فاز متقارن دارای بیشترین مقدار است، در این مطالعات نیز مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه در لحظه شروع خطا برای این نوع اتصال کوتاه تعیین می‌گردد. جدول (۸) نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مطالعات اتصال کوتاه را در شبکه موردبررسی نشان می‌دهد. گفتنی است به‌منظور بررسی تأثیر ورود مولد تولید پراکنده طراحی شده بر روی مقدار جریان اتصال کوتاه شین‌ها، همانند مطالعات پخش‌بار، مطالعات اتصال کوتاه نیز در دو حالت حضور و یا عدم حضور مولد تولید پراکنده اجرا شده و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

نتایج بدست آمده حاکی از آن است که جریان اتصال کوتاه پست مورد بررسی با ورود ادوات تولید پراکنده افزایش می‌یابد اما این افزایش با دور شدن از این مولدها دارای تأثیر بسیار ناچیزی است (تغییر جریان اتصال کوتاه در شین‌های ۴۰۰، ۲۳۰ و ۶۳ کیلوولت بسیار ناچیز و در حد صفر می‌باشد). تغییر جریان اتصال کوتاه در شین‌های ۲۰ کیلوولت و ۴۰۰ ولت نزدیک به مولد تولید پراکنده نیز دارای تغییرات چشمگیری نبوده (کمتر از ۲۰۰ درصد تغییرات مجاز بوده است) و ازاین‌جهت ممانعتی برای نصب مولد وجود نخواهد داشت.

جدول ۸- جریان اتصال کوتاه شین‌های موردبررسی پیش و پس از ورود منابع تولید پراکنده

نام شین	جریان اتصال کوتاه پیش از ورود مولد (kA)	جریان اتصال کوتاه پس از ورود مولد (kA)	تغییرات جریان اتصال کوتاه (kA)
شین ۱	۱۴,۴۰۹۹۳	۱۴,۴۱۰۵۹	+ ۰/۰۰۰۶۶
شین ۲	۴۴,۹۴۰۷۱	۴۴,۹۴۷۱۲	+ ۰/۰۰۶۴۱
شین ۳	۳۹,۵۲۷۰۲	۳۹,۵۶۳۱۳	+ ۰/۰۳۶۱۱
شین ۴	۲۶,۲۶۷۶۴	۲۶,۳۰۳۷۹	+ ۰/۰۳۶۱۵
شین ۵	۲۶,۲۶۷۶۴	۲۶,۳۰۳۷۹	+ ۰/۰۳۶۱۵
شین ۶	۱۸,۳۵۷	۱۸,۴۷۱۰۸	+ ۰/۱۱۴۰۸
شین ۷	۱۸,۳۵۷	۱۸,۴۷۱۰۸	+ ۰/۱۱۴۰۸
شین ۸	۱۸,۳۵۲۴۵	۱۸,۴۶۶۵۸	+ ۰/۱۱۴۱۳
شین ۹	۱,۶۹۴۷۳	۲,۱۰۲۵	+ ۰/۴۰۷۷۷
شین ۱۰	۱,۶۹۱۳۲	۲,۱۵۴۸۱	+ ۰/۴۶۳۴۹
شین ۱۱	۱,۶۸۸۱۳	۲,۱۴۶۸	+ ۰/۴۵۸۶۷
شین ۱۲	۱,۶۸۳۹۵	۲,۱۳۷۶۴	+ ۰/۴۵۳۶۹
شین ۱۳	۱,۶۸۱۴۸	۲,۱۳۲۶۳	+ ۰/۴۵۱۱۵
شین ۱۴	۱,۶۶۵۴۴	۲,۱۰۳۳	+ ۰/۴۳۷۸۶
شین ۱۵	۱,۶۵۷۲۹	۲,۰۸۹۵۷	+ ۰/۴۳۲۲۸

www.kahrobaonline.ir

شین ۱۶	۱,۶۵۷۲۹	۲,۰۸۹۵۷	+ ۰/۴۳۲۲۸
شین ۱۷	۱,۶۵۲۸۵	۲,۰۸۲۲۸	+ ۰/۴۲۹۴۳

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مراحل موردنیاز جهت نصب مولدهای تولید پراکنده و اتصال آن به شبکه برق ایران پرداخته شده است. پس از تشریح مراحل نصب این مولدها و همچنین مطالعات لازم به این منظور، نتایج بدست آمده از اجرای مطالعات فنی نصب مولد تولید پراکنده هیبرید طراحی شده برای مؤسسه آموزش عالی علمی کاربردی صنعت آب و برق ارائه شده است. باتوجه به ظرفیت تولید توان مولد هیبرید طراحی شده و همچنین شیوه اتصال آب به شبکه، تنها مطالعات لازم برای نصب آن، مطالعات پخش‌بار و مطالعات اتصال کوتاه می‌باشد. نتایج بدست آمده از این مطالعات نشان‌دهنده امکان اتصال این مولد به شبکه برق منطقه‌ای تهران می‌باشد.

مراجع

[1] International Energy Agency (IEA). Energy Technology Systems Analysis Programme. Available: http://www.iea.org/ techinitiatives/cross-cuttingagreements/ energytechnologysystemsanalysis/

[2] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," Energy Policy, vol. 33, pp. 787-798, 4// 2005.

[3] IEEE Standards Coordinating Committee, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System," ed, july 2003.

[4] vivek viswanathan menon, "a new islanding detection techniques for distributed generation," montana state university, jaunuary 2006.

[5] wilson xu and konrod mauch on martel, "an assessment of dg isalanding detection methods an issue for canada," report canment energy technology center varennes, july 2004.

[6] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, and M. Suter, "Network integration of distributed power generation," Journal of Power Sources, vol. 106, pp. 1-9, 4/1/ 2002.

[7] Ann Chambers, Barry Schnoor, and Stephanie Hamilton, Distributed Generation: A Nontechnical Guide: Pennwell Pub, February 2001.

[8] El-Khattam, W. Salama, and M. M. A., "Distributed generation technologies, definitions and benefits," Electric Power Systems Research, vol. 71, pp. 119-128, 10// 2004.

[9] Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," IEEE Transactions on power system, vol. 25, pp. 360 - 370, Jun. 2010.

[10] Hammons and T. J., "Integrating renewable energy sources into European grids," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 30, pp. 462-475, 10// 2008.

[۱۱] محمدی حیدرآباد، رضا. (۱۳۹۱). «بهره‌برداری بهینه سیستم‌های CHP گازسوز خود تأمین بابارهای الکتریکی و حرارتی در محیط بازار برق»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق.

[12] L. F. Ochoa and G. P. Harrison, "Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 198-205, 2011.

[۱۳] رضایی بنام، مسعود. (۱۳۹۱). «تعیین تعداد و ظرفیت بهینه واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت با در نظر گرفتن قیمت پلکانی برق به کمک برنامه‌ریزی تصادفی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

[۱۴] نیرو، دفتر بهبود بهره‌وری و اقتصاد برق و انرژی- وزارت. راهنمای جامع تولید هم‌زمان برق و حرارت. تهران، وزارت نیرو، ۱۳۸۸.

[15] Mukund R. Patel, "Design, Analysis, and Operation Wind and Solar Power Systems Second Edition", Published by CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.

[16] A.A Aal. "Modeling and simulation of photovoltaic fuel cell hybrid system "Doctor of Philosophy thesis in Engineering, Kassel, 2005.

[۱۷] دستورالعمل اتصال مولدهای مقیاس کوچک به شبکه برق.