

بررسی موضوعی ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی

محمد امیان^۱، عرفان کریمی^۲

۱ دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاه هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران m.ommian@gmail.com

۲ کارشناس ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۴

چکیده

بهره‌برداری همه‌روزه از انرژی‌های تجدیدپذیر از یکسو سبب کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و از سوی دیگر موجب کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود. از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به پیل‌های سوختی اشاره کرد که با به‌کارگیری فرایندهای الکتروشیمیایی توان تولید می‌کند. در میان پیل‌های سوختی، قابلیت پیل‌های سوختی اکسید جامد در ترکیب با نیروگاه‌های گازی سبب شده است که سامانه هیبریدی حاصل به‌عنوان یک سامانه تولید توان نوین معرفی شود. پیل سوختی اکسید جامد به سه روش مستقیم، غیرمستقیم و نیمه‌مستقیم با توربین گازی ترکیب می‌شود. هدف این مقاله مقایسه عملکردی و اقتصادی ترکیب سه روش اتصال پیل سوختی اکسید جامد با یک نیروگاه گازی ۱۰ مگاواتی با راندمان ۳۰ درصد است. نتایج نشان می‌دهد خروجی نیروگاه با اتصال سامانه پیل سوختی اکسید جامد به‌صورت مستقیم به ۳۷ مگاوات با راندمان ۶۶/۲ درصد، با اتصال نیمه‌مستقیم به ۲۱/۶ مگاوات با راندمان ۴۹/۲ درصد و با اتصال غیرمستقیم به ۲۰/۶ مگاوات با راندمان ۴۸/۵ درصد خواهد رسید. این نتایج نویدبخش افزایش چشمگیری در بهبود عملکرد نیروگاه گازی است. تحلیل ترموآکونومیک این نوع پیکربندی‌ها در نیروگاه مورد اشاره از دیگر موارد مورد بررسی می‌باشد.

واژگان کلیدی: توربین گاز، پیل سوختی اکسید جامد، سامانه هیبریدی، ترموآکونومیک

۱. مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر ۳/۸ درصد در تولید الکتریسیته جهان سهم داشته‌اند، اما در حال حاضر انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از ۱۴ درصد از انرژی اولیه را تأمین می‌نمایند. متأسفانه این مهم در ایران سهم چندانی ندارد و همین مسئله خطری در مصرف سوخت‌های فسیلی محسوب می‌گردد. صنایع انرژی تجدیدپذیر هم‌اکنون در نقطه گذار قرار گرفته است؛ از نظر فنی، توانایی

در راستای نیازمندی بیشتر جوامع امروز به انرژی بیشتر، میزان به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر نیز در کشورها رو به افزایش است؛ به‌طوری‌که امروزه یکی از شاخص‌های توسعه‌یافتگی مصرف انرژی محسوب می‌شود. برابر برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده این نوع انرژی روزبه‌روز سهم بیشتری در سیستم تأمین انرژی خواهد داشت. تا انتهای سال ۲۰۱۰ م، ظرفیت‌های موجود در

ارائه آنها وجود دارد و از جنبه اقتصادی در بسیاری از مناطق کشور قابل رقابت است. بنابراین پس از اتمام منابع فسیلی و با توجه به معضل جهانی گرمایش زمین، به پیشبرد منافع ملی کشورهای توسعه یافته کمک شایانی خواهند نمود. از جمله عوامل مهم در گرایش به استفاده از انرژی تجدیدپذیر، نگرانی درخصوص تغییر شرایط جوی است. انرژی تجدیدپذیر می تواند نیاز به انرژی را تأمین نموده و در ضمن انتشار گازهای گلخانه ای را کاهش دهد. در حال حاضر گازهای گلخانه ای به طور مرتب در لایه نازک جو زمین تراکم پیدا می کنند و این تراکم گازها روزبه روز درجه حرارت زمین را افزایش می دهد. متأسفانه افزایش درجه حرارت نتایج منفی و فاجعه آمیزی را به بار خواهد آورد، بنابراین باید اقداماتی برای جلوگیری از آن به عمل آید؛ در این رهگذر استفاده از انرژی های تجدیدپذیر بدون کربن از جمله این راه کارهاست [۱-۲].

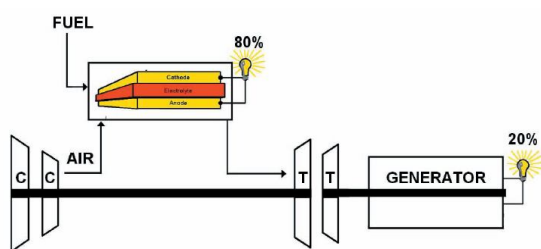
از میان منابع انرژی های تجدیدپذیر، استفاده از پیل های سوختی می تواند نقش بسزایی در رفع موانع یادشده داشته باشد. پیل سوختی وسیله ای است که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. پیل سوختی برخلاف باتری که انرژی را ذخیره می کند، حالتی از انرژی را به حالت دیگر تبدیل می کند، به طوری که در این تبدیل مواد داخل پیل مصرف نمی شوند. در این میان هیدروژن به دلیل تمایل واکنش دهنده گی بالا، فراوانی و عدم آلاینده گی محیط زیست، به عنوان سوخت ایده آل در پیل سوختی استفاده می شود. پیل های سوختی به دلالت زیر جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی متداول محسوب می شوند [۲]:

۱. راندمان بالاتری نسبت به سوخت های فسیلی متداول نظیر نفت و بنزین دارند
۲. پیل سوختی دمابالا برای هیبرید شدن با چرخه های تولید توان گزینه مناسبی هستند
۳. چون در پیل های سوختی اجزای متحرک وجود ندارد، این وسیله بسیار بی صدا و آرام است و آلودگی صوتی ندارد
۴. پیل سوختی آلودگی ناشی از احتراق سوخت های فسیلی را حذف می کند و تنها محصول جانبی آن آب است
۵. چنانچه هیدروژن مصرفی حاصل از الکترولیز آب باشد، نشر گازهای گلخانه ای به صفر می رسد

۶. امکان استفاده از سوخت های تجدیدپذیر مثل هیدروژن و سوخت های فسیلی مثل متان با خروجی پاک در آنها وجود دارد
۷. پیل های سوختی وابسته به نوع آن (صفحه ای و لوله ای) مدولار می باشند؛ یعنی با افزایش مساحت پیل، توان تولیدی آنها قابل افزایش است
۸. سوخت گیری مجدد پیل های سوختی به راحتی ممکن و زمان عملکرد آنها از باتری های متداول بسیار طولانی تر است

۲. نیروگاه هیبریدی

نیروگاه های گازی متداول دارای معایبی چون استفاده از سوخت های فسیلی، راندمان حرارتی پایین، نسبت سوخت مصرفی به توان تولیدی بسیار کم و اتلاف دمای بالای گازهای خروجی از توربین می باشند. با توجه به معایب ذکر شده و بیان مخاطرات استفاده از سوخت های فسیلی، لازم است اصلاحات جدی در نیروگاه های گازی انجام شود. یکی از بهینه ترین روش های افزایش کارایی نیروگاه های گازی، هیبرید کردن آن با پیل سوختی اکسید جامد^۱ است. ایده اولیه استفاده از سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی در اواسط سال ۱۹۷۰ م مطرح شد و تاکنون بیش از ده ها ایده در این زمینه ثبت شده است. در این سیستم پیشنهادی، یک پیل سوختی دمابالا جایگزین محفظه احتراق در سیکل توربین گازی گردید (در صورت نیاز از یک محفظه احتراق پس از پیل استفاده م شد). در واقع گرمای حاصل از واکنش های الکتروشیمیایی یک پیل سوختی اکسید جامد دمابالا را می توان به عنوان جایگزین محفظه احتراق (به عنوان منبع دمابالا) جهت افزایش عملکرد کلی آن به کار برد. سیستم های هیبریدی اشاره شده شامل پیل سوختی به عنوان جزء بالایی^۲ یا تأمین کننده حرارت ورودی و توربین گاز به عنوان سیکل زیرین^۳ می باشند (شکل ۱).



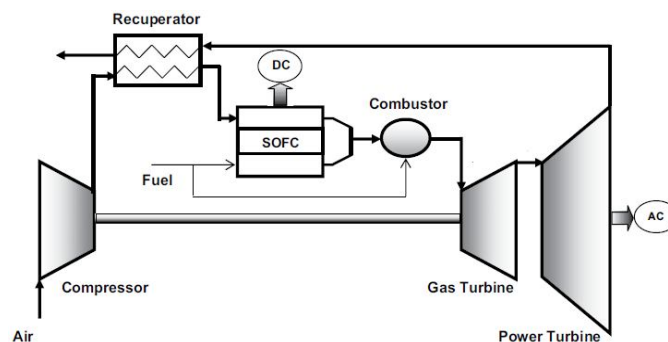
شکل ۱. نمایش شماتیک از یک سیستم هیبریدی پیل سوختی

می‌کند [۱]. در شکل ۳ یک سیستم هیبریدی، شامل ترکیب یک پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار با سیکل توربین گاز ساده نمایش داده شده است. در این سیستم هوای خروجی کمپرسور وارد یک بازتاب می‌گردد که جریان گرم آن از خروجی توربین تأمین می‌شود. این هوا پس از گرم شدن وارد بخش کاتد پیل سوختی اکسید جامد می‌گردد. از طرف دیگر سوخت نیز با فشار بالا وارد بخش آنود پیل شده و در نتیجه پس از به‌سازی طی یک واکنش الکتروشیمیایی بین هیدروژن و اکسیژن توان تولید می‌گردد. چون واکنش الکتروشیمیایی انجام گرفته در پیل سوختی اکسید جامد گرمازا می‌باشد، دمای هوا و سوخت در داخل پیل سوختی زیاد می‌شود. در ادامه گازهای داغ خروجی از پیل سوختی وارد پس‌سوز شده یا به‌طور مستقیم وارد توربین می‌گردند. در این سیستم هیبریدی سوخت‌های متنوعی اعم از گازی و مایع به‌کار می‌رود، اما آنچه پس از به‌سازی (داخلی یا خارجی) وارد پیل می‌شود هیدروژن است [۳].

با توجه به دمای کارکرد بالای سیکل توربین گاز، لزوم استفاده از پیل‌های سوختی دمابالا در ترکیب با این سیکل تولید توان وجود دارد. پیل سوختی اکسید جامد به‌دلیل راندمان مناسب و دمای کارکرد بالاتر، قابلیت بیشتری برای استفاده در سیستم‌های تولید توان یا تولید همزمان توان و گرما^۴ دارد. شکل ۲ نمایی از یک سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد ساخت شرکت زیمنس وستینگهاوس را نمایش می‌دهد [۱]. شرکت وستینگهاوس یک توربین ۲۲۰ کیلوواتی را با استفاده از فناوری پیل سوختی اکسید جامد با چیدمانی تحت فشار (فشار بیش از اتمسفر) ایجاد کرد. پیل سوختی به‌کار رفته از نوع لوله‌ای بوده و طراحی، اجرا و آزمایش سیستم هیبریدی مورد نظر در مرکز ملی تحقیقات پیل سوختی دانشگاه کالیفرنیا با هدف ایجاد سیستم هیبریدی جهت کارکرد توربین گازی به میزان حداقل ۳۰۰۰ ساعت انجام گردید. سیستم هیبریدی موردنظر ۲۲۰ کیلووات قدرت با راندمان حرارتی ۵۳ درصد تولید



شکل ۲. سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی شرکت وستینگهاوس [۱]



شکل ۳. دیاگرام سیستم هیبریدی [۲]

درصد با سه پیکربندی متفاوت و بررسی مزایا و معایب هر یک می‌باشد.

هدف مقاله حاضر، بررسی و مقایسه هیبرید کردن پیل سوختی اکسید جامد با یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی با راندمان ۳۰

۳. بررسی انواع پیکربندی

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان سیستم‌های هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد را براساس نوع اتصال به توربین گاز به سه دسته اتصال مستقیم^۵، اتصال غیرمستقیم^۶ و اتصال نیمه‌مستقیم^۷ تقسیم‌بندی کرد. در اتصال مستقیم سیال عامل عبوری از پیل سوختی و توربین گاز یکسان بوده، اما در اتصال غیرمستقیم پیل سوختی و توربین گاز با سیال‌های مختلفی کار می‌کنند [۲-۳]. اما برای بیان مفهوم اتصال نیمه‌مستقیم لازم است نخست به یک نکته مهم اشاره شود. در راستای استفاده بهینه از انرژی، از گرمای گازهای خروجی توربین گاز برای پیش‌گرم کردن واکنش‌دهنده‌های پیل سوختی به‌وسیله بازیاب استفاده می‌گردد. تفاوت اتصال غیرمستقیم و نیمه‌مستقیم در این است که در اتصال غیرمستقیم سیال عامل در پیل سوختی و سیال عامل توربین گاز در هیچ نقطه‌ای با یکدیگر ترکیب نمی‌شوند، اما در اتصال نیمه‌مستقیم خروجی پیل سوختی پس از سوختن تکمیلی در پس‌سوز هدر نمی‌رود، بلکه با خروجی توربین گاز ترکیب شده و این ترکیب جدید جهت پیش‌گرم کردن ورودی‌های پیل سوختی وارد بازیاب می‌شود. از اینرو به آن اتصال نیمه‌مستقیم گفته می‌شود. نیروگاه مورد بررسی مبتنی بر چرخه برایتون^۸ استاندارد بوده و از گاز طبیعی برای ایجاد حرارت ورودی پیل سوختی و پس‌سوز استفاده می‌کند. گاز طبیعی عمدتاً به‌صورت متان در نظر گرفته شده است و اجزای دیگر آن دارای سهم ناچیزی هستند. نسبت تراکم برابر با ۱۰ بوده و برای ایجاد حرارت کافی جهت دستیابی به دمای ورودی توربین برابر ۱۴۰۰ کلوین، احتراق گاز طبیعی (متان) انجام می‌شود. سپس محصولات احتراق در توربین تا فشار اتمسفر منبسط می‌گردند. بازده‌های آیزنتروپیک کمپرسور ۸۲/۳ درصد و توربین ۸۶ درصد می‌باشد. همچنین بازده احتراق ۹۸/۹ درصد از داده‌های تجربی محاسبه شده‌اند. در زمان انجام اندازه‌گیری‌ها، نیروگاه در وضعیت بار کامل قرار داشته و ۱۰ مگاوات توان خالص در بازده حرارتی ۳۰ درصد تولید می‌کرد. بازده ترمودینامیکی (راندمان قانون دوم) نیز برابر با ۱۳/۷ درصد می‌باشد [۴]. معمولاً در نیروگاه‌هایی که تحت چرخه برایتون مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و حرارت ورودی از احتراق سوخت‌های هیدروکربنی ایجاد می‌شود، عملکردهای ترمودینامیکی قانون اول و دوم پایینی دارند. در ادامه، نیروگاه ۱۰ مگاواتی مورد اشاره با سه نوع

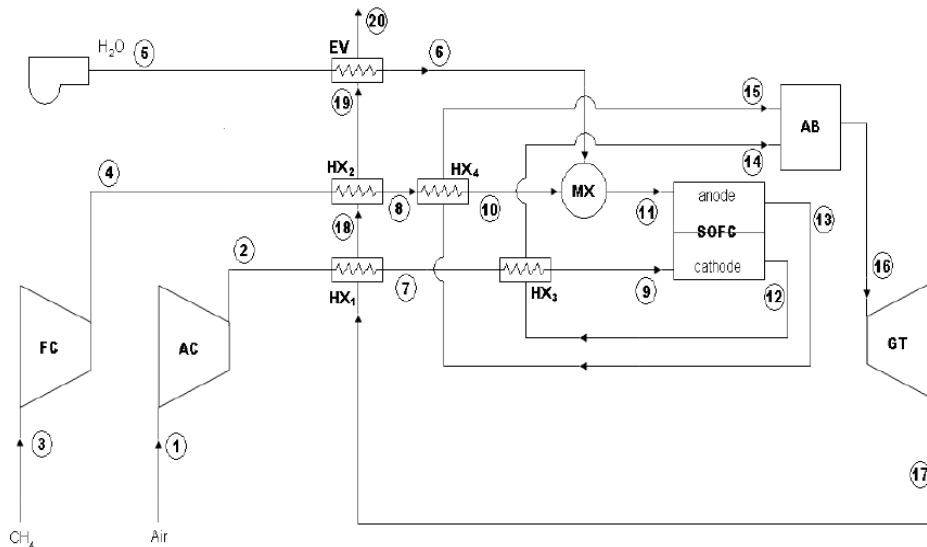
اتصال به یک نیروگاه هیبریدی تبدیل شده و مزایا و معایب هر یک بررسی می‌گردد.

۳-۱. اتصال مستقیم

اتصال اول از نوع مستقیم است. شکل ۴، پیکربندی ترکیبی پیشنهادی که با هدف بهبود عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی نیروگاه ایجاد شده است را نشان می‌دهد [۳]. مطابق شکل، سیال عامل پیل سوختی و توربین گاز یکسان است و از اینرو، اتصال را مستقیم می‌نامند. برای اتصال، پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای وستینگ‌هاوس در نظر گرفته شده است. با اینحال، چون این پیل سوختی با بهره‌گیری ۱۰۰ درصد از سوخت کار نمی‌کند، یک واحد پس‌سوز^۹ برای احتراق سوخت اضافی پیش از انبساط در توربین گازی مورد نیاز می‌باشد. همچنین این واحد موجب افزایش دمای ورودی توربین به ۱۴۰۰ کلوین می‌شود تا ضمن پیروی از قیدهای حرارتی مواد، بیشینه توان خروجی از توربین حاصل گردد. موتورهای احتراقی به دمایی که در آن کار می‌کنند حساسیت کمی نشان می‌دهند، اما برخلاف آنها پیل‌های سوختی به دمای بهره‌برداری بسیار حساس‌اند، بنابراین در نیروگاه ترکیبی، پیش‌گرم کردن جریان‌های گاز ورودی قبل از ورود به پیل سوختی ضروری است. این مهم از طریق بازیابی حرارت با استفاده از خروجی توربین انجام می‌شود. پیکربندی‌های مبدل حرارتی متعددی موجود می‌باشند و بازیاب‌های حرارتی جداگانه به‌منظور پیش‌گرم‌دهی هوای ورودی، سوخت و تبخیر آب برای بهسازی^{۱۰} مورد استفاده قرار گرفته‌اند. خروجی توربین گازی به‌عنوان سیال داغ در بازیاب‌های حرارتی استفاده می‌شود. همچنین بازیاب‌های حرارتی درون واحد پیل سوختی واقع شده‌اند، که به موجب آن، گازهای خروجی از پیل برای پیش‌گرم کردن گازهای ورودی به‌منظور افزایش دمای عملیاتی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرض می‌شود که احتراق به‌صورت کامل انجام می‌شود. در این تحقیق از بهسازی داخلی استفاده شده، اما قابلیت استفاده از بهسازی خارجی نیز وجود دارد و تنها عاملی که تحت تأثیر قرار می‌گیرد، هزینه سرمایه‌ای است. یک مدل ترموآکونومیکی ایجاد و به‌منظور بهینه‌سازی یک نیروگاه ترکیبی SOFC-GT برای فراهم‌سازی توان الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. هدف پژوهش حاضر نه طراحی نیروگاه‌های جدید، که به‌روزرسانی

نیروگاه‌های موجود مد نظر بوده است. نتایج نشان می‌دهند که با هیبرید کردن واحد پیل سوختی به صورت اتصال مستقیم به این نیروگاه بازده حرارتی کل از ۳۰/۰ درصد به ۶۶/۲ درصد و بازده قانون دوم از ۱۳/۷ درصد به ۴۷/۰ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به هزینه هیبرید کردن نیروگاه و براساس هزینه‌های

تولید انبوه پیل سوختی پیش‌بینی می‌شود برگشت‌پذیری سرمایه در این پروژه کمتر از ۴ سال باشد. واضح است که نیروگاه ترکیبی ۳۷ مگاوات، تقریباً چهار برابر بیشتر از نیروگاه اولیه توان ایجاد می‌کند که نیاز به ساختن نیروگاه‌های جدید را رفع می‌نماید [۴].



شکل ۴. پیکربندی نیروگاه هیبریدی با اتصال مستقیم [۴]

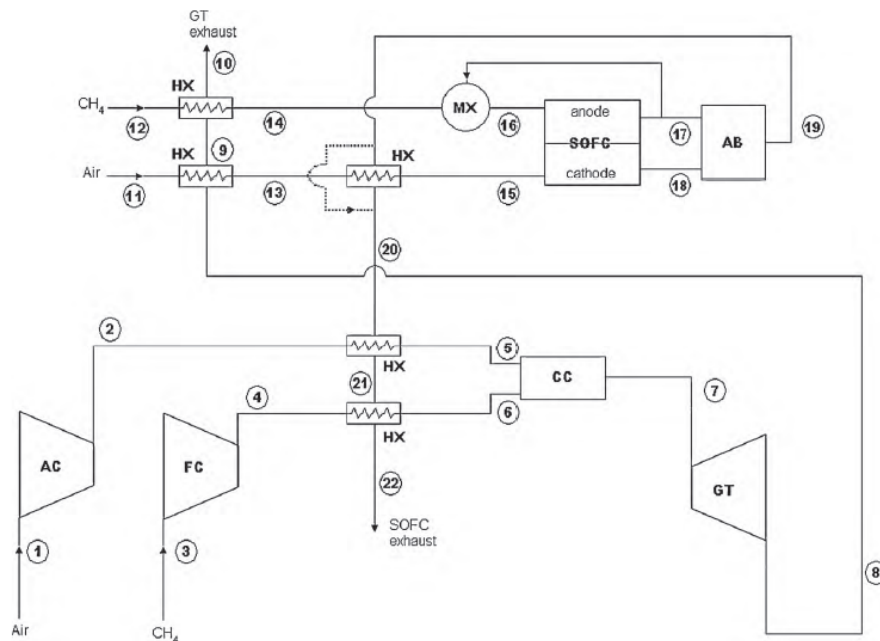
۳-۲. اتصال غیرمستقیم

اتصال دوم از نوع غیرمستقیم است. در شکل ۵ پیکربندی هیبریدی پیشنهادی به منظور بهبود عملکرد نیروگاه موجود نمایش داده شده است. پیل سوختی و توربین گازی با سیال‌های مختلفی کار می‌کنند و لذا این پیکربندی در دسته ترکیب غیرمستقیم قرار می‌گیرد. خروجی توربین برای پیش‌گرم کردن واکنش‌دهنده‌های پیل سوختی و خروجی پیل سوختی برای پیش‌گرم کردن گازهای متراکم که به توربین وارد می‌شوند (قبل از محفظه احتراق) مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیش‌گرم کردن گازهای ورودی پیل سوختی به افزایش دمای کاری پیل سوختی و عملکرد بهتر آن می‌انجامد. پیش‌گرم کردن گازهای ورودی توربین، مقدار احتراق مورد نیاز در نیروگاه توربین گاز را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب چرخه توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد عملکرد یکدیگر را بهبود می‌بخشند. به علاوه هیچ منبع آب خارجی برای پیل سوختی فراهم نشده و بخشی از خروجی آند جهت تأمین بخار برای به‌سازی متان بازگردانده می‌شود. چون پیل سوختی با بهره سوخت ۱۰۰ درصد عمل نمی‌کند، یک واحد

پس‌سوز برای احتراق سوخت اضافی مورد نیاز است. سپس خروجی واحد پس‌سوز برای پیش‌گرم کردن هوای ورودی به پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مبدل حرارتی به یک مکانیزم کنترلی مجهز شده است که نرخ جریان را به گونه‌ای تنظیم می‌نماید که دمای خروجی پیل سوختی در ۱۳۷۳ درجه کلوین نگه داشته شود [۵]. یک مدل ترموآکونومیک به منظور بهینه‌سازی یک نیروگاه توان ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد با اتصال غیرمستقیم، با استفاده از مدل ضرایب لاگرانژ توسعه داده شد. اتصال غیرمستقیم به این علت مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان بدون تخریب نیروگاه‌های موجود، قابلیت کاردهی آنها را افزایش داد. نتایج نشان می‌دهند که در نتیجه این اتصال، بازده حرارتی کل از ۳۰ به ۴۸/۵ درصد افزایش یافته ضمن اینکه هزینه توان تولیدی از ۵/۴۶ یورو بر کسلوات ساعت به ۴/۵۴ یورو بر کیلووات ساعت کاهش می‌یابد. بهینه‌ترین عملکرد نیز هنگامی مشاهده شد که یک پیل سوختی ۹/۳ مگاواتی برای خروجی توان کل ۱۸/۹ مگاوات مورد

مولی اکسیژن / متان SOFC به میزان ۳/۴۱ (۷۰ درصد هوای اضافی) حاصل گردید [۵-۶].

استفاده قرار گرفت. در مورد کولپینگ غیرمستقیم، عملکرد بهینه با مصرف سوخت ۶۰ درصد، بازیابی آند ۶۵/۳ درصد و نسبت



شکل ۵. پیکربندی نیروگاه هیبریدی با اتصال غیرمستقیم [۵]

دمای بالای پیل سوختی کمک می‌کند. در مورد استک‌های پیل سوختی کوچک (کمتر از ۷ مگاوات) معمولاً افزایش بیش از حد دما رخ می‌دهد. این مشکل را می‌توان با افزایش نرخ شارش هوا برطرف نمود، اما با این کار به علت افزایش نسبت هوا به سوخت عملکرد کاهش می‌یابد. روش دیگر برای حل این مشکل، حذف مبدل‌های حرارتی در ورودی پیل سوختی است. با این وجود، این روش به میزان زیادی هدف اتصال دو سیستم توان را با شکست مواجه می‌سازد. بنابراین یک پیل سوختی با مقیاس کوچک، وقتس در این پیکربندی با یک توربین گازی کوپل گردد، به عملکرد ترکیبی بهینه دست نخواهد یافت. در اینجا یک پیل سوختی ۱۱ مگاواتی به عنوان واحد بهینه در نظر گرفته می‌شود. در این مورد، نیروگاه ترکیبی ۲۰/۶ مگاوات توان تولید می‌کند [۶].

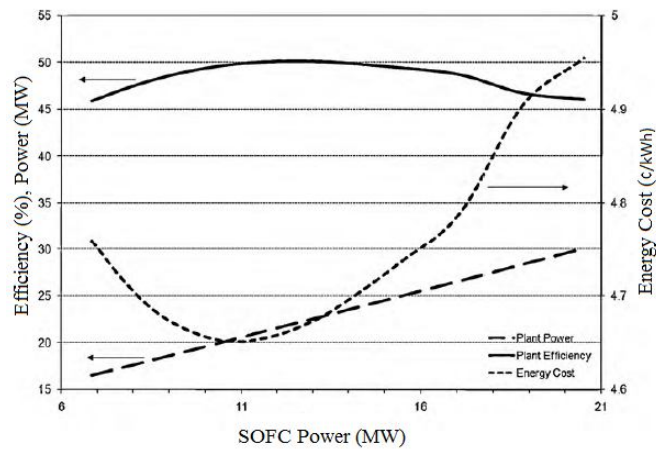
۳-۳. اتصال نیمه مستقیم

اتصال سوم از نوع نیمه مستقیم است. شکل ۷ پیکربندی ترکیبی پیشنهادی که با هدف بهبود عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی نیروگاه ایجاد شده است را نشان می‌دهد [۷]. این پیکربندی نیز

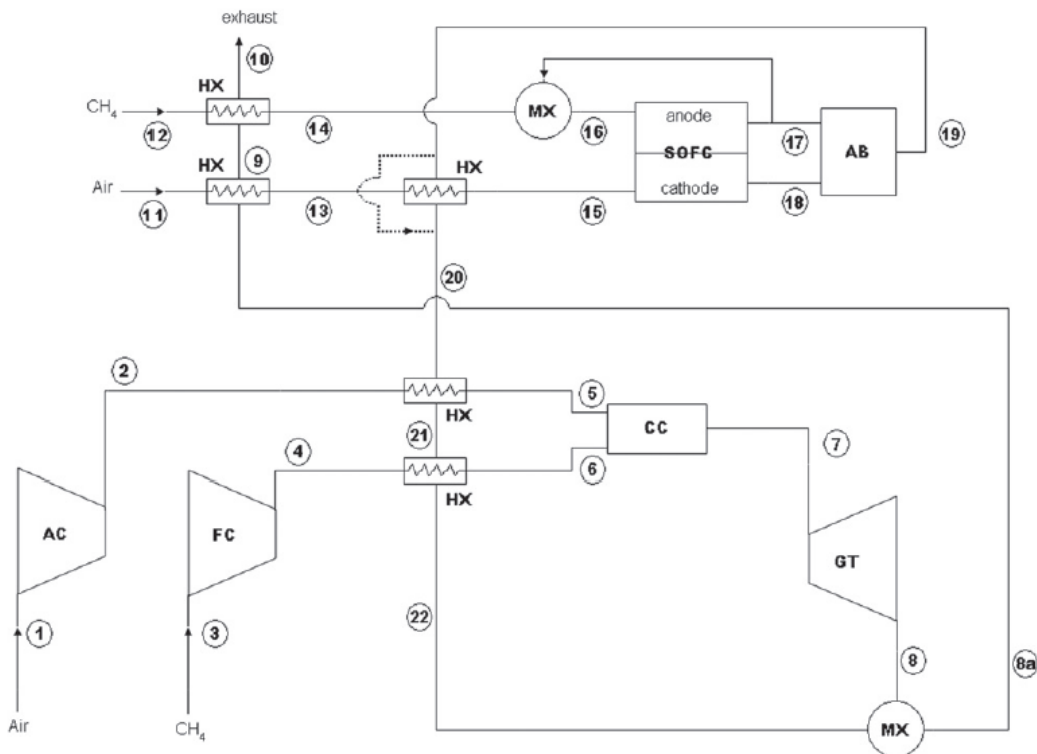
در شکل ۶ بازده، هزینه انرژی و خروجی توان کل در مقایسه با توان پیل سوختی رسم شده‌اند. توان نیروگاه به صورت خطی با افزایش مقیاس پیل سوختی افزایش می‌یابد؛ زیرا توربین گاز خروجی توان تقریباً ثابتی را حفظ می‌کند. وقتی توان پیل سوختی برابر با ۱۱ مگاوات است، کمینه هزینه انرژی ۴/۶۵ یورو بر کیلووات ساعت مشاهده می‌گردد. در کولپینگ غیرمستقیم، اندازه‌ای که پیل سوختی می‌تواند با توربین گاز ترکیب شود محدود می‌باشد؛ زیرا جریان خروجی توربین دارای ظرفیت حرارتی محدودی است. اگر پیل سوختی بیش از حد بزرگ باشد، خروجی توربین گاز قادر نخواهد بود به خوبی گازهای ورودی پیل سوختی را گرم نماید. در هر صورت، با افزایش توان پیل سوختی به بیش از ۱۱ مگاوات، امکان عملی نمودن نیروگاه از نظر اقتصادی کاهش می‌یابد. در توان ۱۳ مگاوات برای پیل سوختی، بازده در ۵۰/۲ درصد به مقدار بیشینه می‌رسد، در حالی که برای توان ۱۱ مگاوات، بازده تنها به میزان جزئی در ۴۹/۹ درصد کمتر است. همچنین حد پایین دیگری برای اندازه پیل سوختی در این پیکربندی وجود دارد. چون خروجی آند (در ۱۳۷۳ کلون) بازیافت می‌شود، وارد شدن این جریان داغ به ورودی، به حفظ

این ترکیب (مرحله ۸a) برای پیش گرم کردن واکنش دهنده های پیل سوختی مورد استفاده قرار می گیرد.

کاملاً مشابه اتصال غیرمستقیم است. با این حال، خروجی پیل سوختی (مرحله ۲۲) با خروجی توربین (مرحله ۸) ترکیب شده، و



شکل ۶. نمودار مقایسه بازده حرارتی، توان و هزینه توان تولیدی در برابر توان پیل سوختی اکسید جامد در اتصال غیرمستقیم [۵]



شکل ۷. پیکربندی نیروگاه هیبریدی با اتصال نیمه مستقیم [۷]

کاربردی برای ادغام پیل سوختی با یک توربین گاز را فراهم می سازد استفاده شده است. نتایج نشان می دهند که بازده حرارتی کل را می توان از ۳۰٪ درصد به ۴۹٪ درصد افزایش داد، ضمن اینکه هزینه تولید توان در نتیجه این اتصال، می تواند از ۵/۴۶ به ۴/۷۰ (یورو بر کیلووات ساعت) کاهش یابد.

چون ترکیب سیال های کاری تنها در نزدیکی خروجی رخ می دهد، از آن به عنوان اتصال نیمه مستقیم یاد می شود. یک مدل ترموآکونومیک ایجاد گردیده و به منظور بهینه سازی یک نیروگاه ترکیبی SOFC-GT با اتصال نیمه مستقیم مورد استفاده قرار گرفته است. اتصال نیمه مستقیم بدین علت که یک طرح

بهینه‌ترین عملکرد وقتی مشاهده شد که یک پیل سوختی ۱۲ مگاواتی برای خروجی توان کل ۲۱/۶ مگاوات مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مشخص شد که توان پیل سوختی را می‌توان برای کارکرد نیروگاه با توان کمتر کاهش داد، ضمن اینکه خروجی توان توربین گاز ثابت نگه داشته شود [۶].

نمودارهای هزینه انرژی و بازده در مقایسه با توان SOFC در شکل ۸ ترسیم شده‌اند. کمینه هزینه انرژی ۴/۷۰ یورو بر کیلووات ساعت در توان ۱۲ مگاوات برای پیل سوختی مشاهده می‌شود. با افزایش توان پیل سوختی به بیش از ۱۲ مگاوات، امکان عملی نمودن این نیروگاه از نظر اقتصادی کاهش می‌یابد. در توان ۱۳/۷ مگاوات، بازده در ۴۹/۵ درصد به مقدار بیشینه می‌رسد، در حالی که برای توان ۱۲ مگاوات، بازده به ۴۹/۲ درصد می‌رسد. برای پیل‌های کوچکتر، بازده کمتر می‌شود (به سمت بازده نیروگاه استاندارد میل می‌کند) و اجرای عملیات به هزینه بیشتری نیاز دارد. در مورد پیل‌های کوچکتر از ۴ مگاوات، معمولاً به علت آنتالپی نسبتاً بالای گازهای خروجی توربین، SOFC بیش از حد داغ می‌شود. این امر نشان می‌دهد که یک SOFC با مقیاس کوچک در ترکیب با یک توربین گازی در این پیکربندی، به عملکرد ترکیبی بهینه دست نخواهد یافت؛ زیرا توان اضافی تولیدشده توسط پیل سوختی نمی‌تواند هزینه استفاده از این فناوری را جبران نماید [۸-۹]. در واقع پیل سوختی ۱۲ مگاواتی به عنوان واحد بهینه در نظر گرفته می‌شود که توان کل نیروگاه با آن برابر با ۲۱/۶ مگاوات می‌باشد [۷].

۴. نتیجه‌گیری

به منظور بهینه‌سازی چرخه تولید توان، پیل سوختی اکسید جامد با یک نیروگاه گازی هیبرید گردید. این ترکیب با سه نوع اتصال مستقیم، غیرمستقیم و نیمه‌مستقیم صورت گرفته، نتایج و پیشنهادات زیر حاصل و ارائه می‌گردد:

۱. سیستم‌های هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد در ترکیب با چرخه توان گازی (SOFC-GT) با اتصال مستقیم بهترین گزینه به شمار می‌آید؛ زیرا هردو آنها با سیال عامل یکسان، در دما و بازه فشار مشابهی کار می‌کنند. این نوع پیکربندی بالاترین راندمان را بین سه نوع اتصال نتیجه می‌دهد.

۲. برای به‌روزرسانی نیروگاه‌های توربین گاز با استفاده از فناوری پیل سوختی، باید توجه کرد که افزودن این سامانه در کارکرد

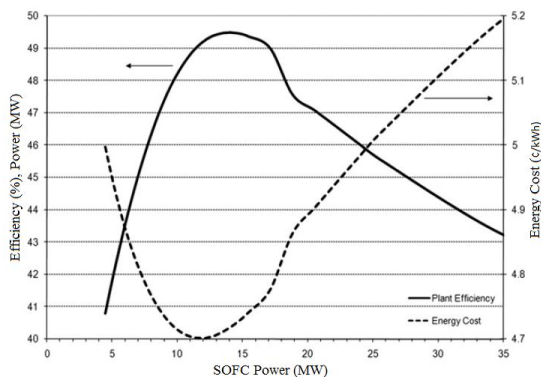
نیروگاه تداخل ایجاد نکند، به همین منظور استفاده از اتصال غیرمستقیم یا نیمه‌مستقیم از این دیدگاه کاربردی‌تر است. یکی از مزایای اتصال غیرمستقیم این است که این نوع اتصال بهترین قابلیت جفت‌شدگی پیل سوختی اکسید جامد با نیروگاه‌های توربین گاز را می‌دهد.

۳. جدول مقایسه‌ای سه نوع اتصال نشان می‌دهد که بازده حرارتی کل در اتصال مستقیم بیشترین مقدار و در حالت غیرمستقیم کمترین افزایش را نسبت به حالت غیر هیبریدی دارد، در نتیجه از این دیدگاه به ترتیب بهترین عملکرد را اتصال مستقیم، نیمه‌مستقیم و غیرمستقیم دارد.

۴. جدول مقایسه‌ای سه نوع اتصال نشان می‌دهد که با هیبریدکردن نیروگاه، توان تولیدی در حالت مستقیم تقریباً ۳/۷ برابر می‌شود، بنابراین از این دیدگاه به ترتیب بهترین عملکرد را اتصال مستقیم، نیمه‌مستقیم و غیرمستقیم دارد.

۵. مقایسه هزینه توان تولیدی نشان می‌دهد که با هیبرید کردن نیروگاه هزینه توان تولیدی در حالت غیرمستقیم نسبت به حالت نیمه‌مستقیم مقدار بیشتری کاهش پیدا می‌کند و از این دیدگاه اتصال غیرمستقیم نسبت به اتصال نیمه‌مستقیم مناسب‌تر است. ترکیب‌بندی مستقیم نیز به صرفه‌ترین ترکیب تولید توان می‌باشد.

۶. با توجه به اینکه سیستم‌های هیبریدی مزایای بسیار زیادی چون افزایش راندمان حرارتی، افزایش توان تولیدی و کاهش هزینه توان تولیدی دارند، پیشنهاد می‌شود برای پیشرفت سریع‌تر این فناوری در آینده دولت‌ها تسهیلات مالی لازم را برای محققان و صنعتگران جهت تحقیقات بیشتر و تجهیز نیروگاه‌های جدیدتر به سامانه هیبریدی را فراهم نمایند.



شکل ۸. نمودار مقایسه بازده حرارتی، توان نیروگاه و هزینه توان تولیدی در برابر توان پیل سوختی اکسید جامد در اتصال نیمه‌مستقیم [۷]

جدول ۱. مقایسه عملکردی سه نوع اتصال

نوع اتصال	غیرهیبریدی	مستقیم	غیرمستقیم	نیمه مستقیم
توان تولیدی (مگاوات)	۱۰	۳۷	۲۰/۶	۲۱/۶
راندمان کل (درصد)	۳۰	۶۶/۲	۴۸/۵	۴۹/۲
هزینه تولید توان (یورو بر کیلووات ساعت)	۵.۴۶	۳/۳	۴/۶۵	۴/۷

۵. مآخذ

- [1] N. F. Bessette, J. F. Pierre, Status of Siemens Westinghouse tubular solid oxide fuel cell technology and development program, Proceedings of the 2000 Fuel Cell Seminar, Courtesy Associates, November 2000.
- [2] X. Zhang, S. H. Chan, G. Li, H. K. Hob, J. Li, Z. Fenga, A review of integration strategies for solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, 2010, pp. 685-702.
- [3] A. Buonomano, F. Calise, M. Dentice d'Accadia, A. Palombo, M. Vicidomini, Hybrid solid oxide fuel cells-gas turbine systems for combined heat and power: A review, *Journal of Applied Energy*, Vol. 156, 2015, pp. 32–85.
- [4] Denver F. Cheddie, Integration of A Solid Oxide Fuel Cell into A 10 MW Gas Turbine Power Plant, *Energies*, Vol. 3, 2010, pp. 754-769.
- [5] Denver F. Cheddie, R. Murray, Thermo-economic modeling of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, 2010, pp. 8134–8140.
- [6] Denver F. Cheddie, Thermo-economic optimization of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant, *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 1702-1709
- [7] Denver F. Cheddie, Renique Murray, Thermo-economic modeling of a solid oxide fuel cell/gas turbine power plant with semi-direct coupling and anode recycling, *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 11208-11215.
- [8] S. H. Chan, H. K. Ho, Y. Tian, Modeling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant, *Journal of Power Sources*, Vol. 109, 2002, pp. 111-120.
- [9] A. Arsalis, Thermo-economic modeling and parametric study of hybrid solid oxide fuel cell –gas turbine–steam turbine power plants ranging from 1.5 MW to 10 MW, M.Sc. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.

پی نوشت

1. solid oxide fuel cell
2. topping component
3. bottoming cycle
4. CHP
5. direct coupling

6. indirect coupling
7. semi-direct coupling
8. bryton cycle
9. afterburner
10. reformation