Archive of SID

بررسی فنی و اقتصادی بازیافت حرارت توربین های گازی با استفاده از سیکل ارگانیک رنکین (ORC) در تاسیسات تقویت فشار گاز

مجید بقایی پور[1]
منطقه دو عملیات انتقال گاز
m_baghaipour@nigc-dist2.ir
m_baghaei_2111@yahoo.com

چکیده

با توجه به این‌که دمای گاز خروجی از توربین در ایستگاه‌های تقویت فشار به اندازه‌ی کافی زیاد است، پتانسیل استفاده از تولید مشترک برق و حرارت وجود دارد. سیکل ORC در بازیابی حرارت اتلافی توربین‌های گازی به عنوان یک تکنولوژی قابل اعتماد و اقتصادی در جهان در حال استفاده است. این سیکل برتری‌های تکنیکی، عملکردی و اقتصادی قابل توجهی نسبت به سیکل کلاسیک رنکین در اختیار قرار می‌دهد. شبیه‌سازی سیکل ORC با استفاده از نرم‌افزار Aspen Hysys بدین صورت بوده است که ساده‌ترین نوع چرخه‌ی ORC که با یک سیال خالص کار می‌کند و کمترین بازده را در میان چرخه-های پیشرفته‌تر و رایج دارد، به منظور شبیه‌سازی انتخاب و شرایط کاری ایستگاه نمونه در آن اعمال گشته است. از آنجایی که شرکت‌های اجراکننده‌ی سیکل ORC به دلیل کم بودن بازده‌ی سیکل ساده دیگر از آن استفاده نمی‌کنند، در اینجا نیز از سیکل ساده صرفاً جهت شروع کار برای شبیه‌سازی سیکل‌های پیچیده‌تر استفاده شده است. اگر سیکل ORC اجرا شده را با سیال پنتان در نظر بگیریم، می‌توان برای دبی‌های مختلف در دماهای متفاوت در طول سال، نمودار توان خالص خروجی، بازده و همچنین بازگشت سرمایه را به ازای دماهای مختلف محیط، دبی‌های متفاوت خروجی توربوکمپرسور و همچنین دماهای مختلف خروجی توربوکمپرسور به دست آورد. در صورتی‌که تعداد تاسیساتی که مجهز به سیستم بازیاب حرارت می‌شوند زیاد باشد، هزینه‌ی هر کیلووات برق تولیدی سیکل بطور قابل توجهی کاهش یافته و بازگشت سرمایه به دو سال و حتی پایین‌تر نیز کاهش می‌یابد. استفاده از سیکل ORC برای زمان بازگشت سرمایه‌ی زیر ۷ سال از نظر اقتصادی قابل توجیه است.

واژه های کلیدی: سیکل ORC، بازیافت حرارت، توربین گاز، ایستگاه تقویت فشار گاز

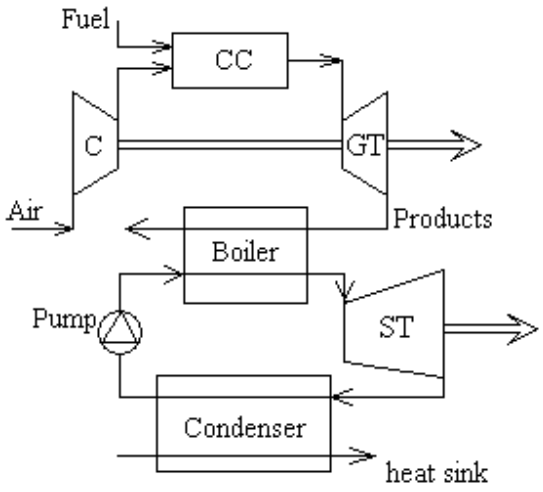
[1]-کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک(کارشناس ارشد انرژی)

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

با توجه به استفاده از توربین گاز در صنایع مختلف، راهکارهای متعددی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بازیافت انرژی تلف شده در این تجهیز پیشنهاد شده است. به طور خلاصه، روش‌های کاربردی برای صرفه‌جویی و بازیافت انرژی در بخش توربین گاز در تاسیسات تقویت فشار را می‌توان به چهار دسته ی استفاده از رکوپراتور[1]، خنک کردن هوای ورودی، بازیافت انرژی دودکش و تعویض توربین‌گاز تقسیم کرد. از میان راه‌کارهایی که می‌توان برای مدیریت مصرف انرژی انجام داد، افزایش بازده مصرف از طریق بازیافت انرژی اتلافی، به عنوان پربازده‌ترین، عملی‌ترین و پرسودترین روش شناخته شده است. خروجی توربین‌های گازی با سیکل باز، حرارتی را به اتمسفر تخلیه می‌کند که بیشتر از مقداری است که سیکل رنکین در کندانسور تحویل می‌دهد، بنابراین با ترکیب این دو سیکل به صورت سیکل‌های ترکیبی، خروجی سیستم تولید قدرت افزایش یافته و به این ترتیب بازده کل از مقدار ٪۳۵ تا تقریباً ٪۵۰ افزایش می‌یابد. شماتیک استفاده از سیکل ORC در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - شماتیک یک سیکل ترکیبی

۲- معرفی سیکل ارگانیک رنکین[2]

سیکل کلاسیک مورد استفاده در بخش بازیابی حرارت اتلافی، سیکل رنکین است. در ۲۰ سال گذشته استفاده از سیکل ارگانیک رنکین به جای سیکل رنکین در بازیابی حرارت اتلافی و بهره‌برداری از انرژی‌های نو، مورد توجه و استفاده‌ی گسترده‌ای قرار گرفته است. این سیکل تا به حال در چندین نقطه‌ی جهان برای تولید توان در شرایطی که روش‌های کلاسیک از نظر عملی یا اقتصادی کارایی کافی نداشته‌اند، نصب و بهره‌برداری شده و تا چند صد مگاوات انرژی را بازیافت و به انرژی الکتریسیته تبدیل نموده است. نیروگاه‌های مختلف تولید توان ORC که در حال بهره‌برداری در نقاط مختلف جهان با ظرفیت‌های مختلف از ۲۰۰ کیلووات تا ۱۳۰ مگاوات هستند، نشان‌دهنده‌ی بلوغ این تکنولوژی در تولید قدرت است. این سیکل به شکل کاملاً مناسبی برای استفاده از منابع حرارتی با دماهای پایین (۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) هماهنگ می‌باشد و نیروگاه‌های بسیاری با استفاده از این سیکل برای تولید برق از انرژی زمین‌گرمایی ساخته شده و در حال بهره‌برداری هستند. تکنولوژی ORC برای بازیافت حرارت اتلافی توربین‌های گازی و کارخانه‌های سیمان با ظرفیت متوسط نیز کارایی قابل توجهی دارد و برتری‌های چشم‌گیری نسبت به

[1] Recuperator
[2]. Organic Rankine Cycle (ORC)

www.SID.ir

Archive of SID

سیستم بازیابی حرارت کلاسیک با استفاده از سیکل رنکین معمولی در اختیار قرار می‌دهد. سیکل رنکین در توربین‌های گازی بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی در مورد توربین‌های گازی کوچکتر، هزینه‌ی نصب و راه‌اندازی و نگهداری توربین و بویلر بخار آب به ازای ظرفیت توان تولیدی ($/kw) بسیار بالا است و بهتر است از سیکل ارگانیک رنکین استفاده شود[۱]. سیکل ORC بر اساس سیکل بسته‌ی رنکین عمل می‌کند که البته برای کار با سیال کاری ارگانیک تغییراتی در آن لازم است. سیال کاری ارگانیک در سیکل ORC می‌تواند از دسته‌ی هیدروکربن‌ها انتخاب شده باشد ولی مواد غیر ارگانیک مانند سیال‌های سیلیکونی یا سیالاتی که در سیستم‌های تبرید استفاده می‌شوند نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیکل ORC ساده، سیال کاری در یک مدار بسته‌ی بدون نشت تحت پیش‌گرمایش قرار گرفته و سپس از طریق منبع حرارت اتلافی در اواپراتور بخار می‌شود. این بخار در توربینی که مستقیماً به ژنراتور کوپل شده‌است، کار انجام می‌دهد و در نهایت توسط آب یا هوای محیط در یک مبدل حرارتی کندانس می‌گردد. این مایع توسط پمپ به اواپراتور برگردانده می‌شود. در مواردی که دمای بالا در دسترس است، یک رکوپراتور در پایین دست توربین قرار داده می‌شود تا سیال قبل از ورود به کندانسور از حالت فوق داغ به بخار اشباع تبدیل شده و در کندانسور راحت‌تر میعان کند و در عین حال بازده سیکل افزایش یابد. در مسیرهای اصلی در سیکل ORC، سیال همواره تک‌فاز است. در مقایسه‌ی این سیکل با سایر تکنولوژی‌های بازیافت حرارت اتلافی با توان بین ۰/۵ تا ۵ مگاوات، ORC دارای برتری‌هایی تکنیکی و عملکردی است که از آن جمله می توان به بازده بالای توربین (تا ۸۵ درصد)، تنش پایین در پره‌های توربین به دلیل سرعت کم، دور پایین توربین، عدم وجود فرسایش خوردگی[1] در پره‌ها و پوسته‌ی توربین، عمر بالا (بیشتر از بیست سال)، فرایند سریع و ساده راه‌اندازی[2] و توقف[3]، عملکرد مناسب در بار کمتر از بار نامی، نگهداری و تعمیر آسان، قابلیت تطبیق عملکرد با تغییرات شرایط حرارت ورودی و شرایط محیطی و عدم تداخل با کار سیستم اصلی اشاره کرد[۲].

۲-۱- محدوده‌ی مناسب استفاده از ORC

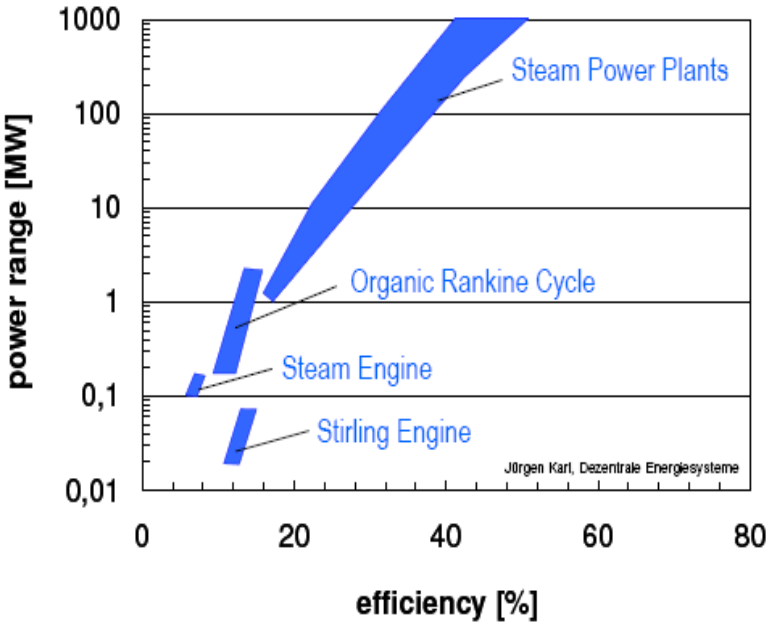
شکل ۲**شکل۲** نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی توان تولیدی و سیستم‌های تولید قدرت احتراق خارجی رایج در سال ۲۰۰۶ است. با توجه به این شکل، محدوده‌ی معمول و مناسب با بیشترین بازده برای سیکل ORC بین توان‌های ۱۰۰ کیلووات تا ۲/۵ مگاوات است که بازده تبدیل حرارت به الکتریسیه نیز بین ۷ تا ۱۸ درصد خواهد بود. البته در میان مواردی که به مرحله‌ی اجرا درآمده‌اند و هم‌اکنون در حال بهره‌برداری هستند، تا توان ۶/۵ مگاوات نیز از سیکل ORC استفاده شده‌است. به طور کلی می‌توان محدوده‌ی عملکرد سیکل ORC را روی منابعی از حرارت با دمای بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و توانی بین ۰/۵ تا ۵ مگاوات اعلام نمود. قسمت پایین این محدوده مربوط به بهره‌برداری از منابع انرژی‌های نو مانند انرژی زمین‌گرمایی یا انرژی خورشیدی است (دمای زیر ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) که بازده در این محدوده بین ۸ تا ۱۸ درصد در شرایط بار نامی اعلام شده و منبع حرارت به صورت جریان مایع داغ است. بخش بالایی محدوده‌ی عملکرد مربوط به بهره‌برداری از حرارت اتلافی کارخانجاتی مانند کارخانه‌ی سیمان، ذوب آهن و شیشه و همچنین توربین‌های گازی می‌باشد (دمای بالای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) که بازده در این محدوده بین ۱۵ تا ۲۰ درصد در شرایط بار نامی است و منبع حرارتی به صورت جریان گاز داغ می‌باشد[۱] و [۶]. به علاوه واحدهای متعدد نیز می‌توانند به صورت موازی با یکدیگر برای به دست آوردن توان خروجی مورد نظر و استفاده‌ی کامل از توان حرارتی در دسترس منبع در یک سیستم نصب شوند.

---

[1] Erosion
[2] start
[3] stop

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۲ - بازده سیکل‌های مختلف بازیافت حرارت در محدوده‌ها مختلف قدرت (۲۰۰۶)

۲-۲- ترمودینامیک سیکل ORC

انتخاب سیال کاری در یک سیکل ORC یکی از مهم‌ترین پارامترها است که بسته به کاربرد و سطح انرژی منبع حرارتی تغییر می‌کند. از آنجا که این نوع سیکل برای بهره‌برداری از منابع حرارت دما پایین مناسب است، در آن از سیالاتی استفاده می‌شود که دمای جوش و حرارت نهان تبخیر پایینی دارند و می‌توانند در اثر انرژی کم به راحتی بخار شده و در توربین کار تحویل دهند. در اینجا با توجه به این‌که دمای منابع حرارتی موجود در سقف محدوده‌ی مؤثر سیکل‌های ORC قرار گرفته است، می‌بایست سیال کاری به گونه‌ای انتخاب شود که دمای جوش آن بالا باشد تا بتواند آنتالپی بیشتری در حالت بخار به دست آورد. در جدول ۱ لیستی شامل مواد انتخابی به همراه خصوصیات ترموفیزیکی آنها آورده شده است. این مواد بر اساس کاهش دمای بحرانی مرتب شده‌اند. مشاهده می‌شود که در دمای بحرانی بالاتر دمای جوش نرمال نیز بیشتر است. در سیکل ORC اختلاف آنتالپی ماکزیمم نسبت به سیکل رنکین بخار آب بسیار کمتر است. در واقع آنچه باعث جبران این مقدار در کار سیکل می‌شود، دبی جرمی بالاتر سیال کاری است. سیکل ORC می‌تواند در شرایط بخار اشباع یا چند درجه فوق داغ[1] کار انجام دهد. علت این امر این است که به دلیل شکل خاص نمودار T-S سیال کاری که در شکل ۳ نشان داده شده است، در این سیکل، سیال بعد از انبساط نیز به حالت فوق داغ باقی می‌ماند و مایع به وجود نمی‌آید. درجه‌ی فوق داغ بودن را می‌توان برای افزایش بازده افزایش داد که باعث افزایش حجم و هزینه‌ی مبدل حرارتی مورد نیاز می‌شود. علاوه بر نکات ترمودینامیکی که در مورد انتخاب مواد باید مورد توجه قرار داد، نکات زیست محیطی نیز باید در نظر گرفته شود. ماده‌ی مورد استفاده در این سیکل نباید سمی باشد و یا تأثیر مخرب بر لایه‌ی ازون داشته باشد[۳]و[۴].

[1] Super Heat

www.SID.ir

Archive of SID

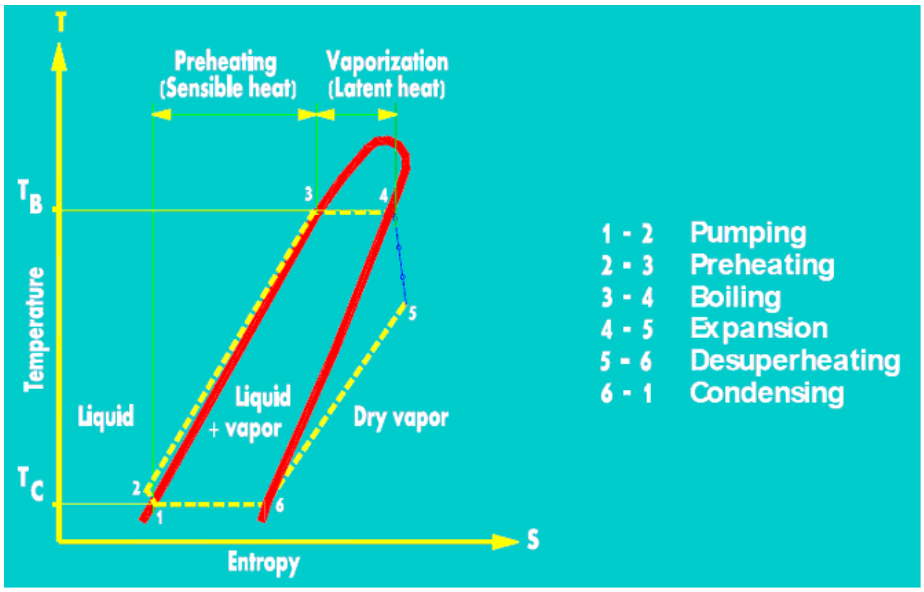
جدول ۱ - لیست موادی که پتانسیل مصرف در سیکل ORC را دارند[۵]

Fluid name	M (g/mol)	T_{cr} (°C)	P_{cr} (MPa)	T_{tp} (°C)	T_{nb} (°C)	h_{fg} @ 101325 Pa	Saturation dome shape
Water	18.02	373.95	22.06	0.01	99.97	2257.44	Wet
Decane	142.28	344.55	2.10	-73.15	174.15	276.84	Dry
Nonane	128.26	321.40	2.28	-73.15	150.75	288.65	Dry
Toluene	92.14	320.73	4.24	-94.15	110.55	361.94	dry
Octane	114.23	296.17	2.50	-56.78	125.62	302.52	dry
Benzene	78.11	288.90	4.89	5.55	80.08	394.97	dry
Cyclohexane	84.16	280.49	4.08	6.32	80.74	356.30	dry
Heptane	100.20	266.98	2.73	-90.60	98.38	317.21	dry
Methanol	32.04	240.23	8.22	-97.54	64.48	1101.72	wet
Hexane	86.18	234.67	3.02	-95.32	68.71	335.24	dry
R-113	187.38	214.06	3.39	-36.22	47.59	144.45	dry
R-141b	116.95	206.81	4.46	-103.30	32.05	223.08	dry
R-11	137.37	197.96	4.41	-110.47	23.71	181.49	isentropic
Pentane	72.15	196.55	3.37	-129.68	36.06	357.89	dry
Isopentane	72.15	187.20	3.40	-160.50	27.82	343.71	dry
R-123	152.93	183.68	3.66	-107.15	27.82	170.34	dry
R-245ca	134.05	174.42	3.93	-273.15	25.13	201.15	dry
Neopentane	72.15	160.60	3.20	-16.55	9.49	316.30	dry
R-245fa	134.05	154.05	3.64	-273.15	14.90	196.88	dry
Butane	58.12	151.98	3.80	-138.28	-0.55	385.32	dry
RE-134	118.03	147.10	4.23	-23.15	6.17	215.22	isentropic
R-114	170.93	145.68	3.26	-94.15	3.59	136.05	dry
R-236ea	152.04	139.29	3.50	-273.15	6.19	165.32	dry
R-142b	100.50	137.11	4.07	-130.43	-9.15	222.27	isentropic
Isobutane	58.12	134.67	3.64	-159.59	-11.67	366.24	dry
Ammonia	17.03	132.25	11.33	-77.66	-33.33	1370.26	wet
Cyclopropane	42.08	125.15	5.58	-127.45	-31.48		wet
R-236fa	152.04	124.92	3.20	-93.63	-1.44	160.48	dry
R-124	136.48	122.28	3.62	-199.15	-11.96	165.99	Isentropic
RC-318	200.04	115.23	2.78	-39.80	-5.98	116.87	Dry
R-152a	66.05	113.26	4.52	-118.59	-24.02	330.18	Wet
R-12	120.91	111.97	4.14	-157.05	-29.75	166.30	Wet
R-227ea	170.03	101.65	2.93	-126.80	-16.45	131.55	Dry
R-134a	102.03	101.06	4.06	-103.30	-26.07	217.16	Wet
Propane	44.10	96.68	4.25	-187.67	-42.09	426.14	Wet
R-22	86.47	96.15	4.99	-157.42	-40.81	233.93	Wet
Propylene	42.08	92.42	4.66	-185.20	-47.69	439.47	Wet
R-32	52.02	78.11	5.78	-136.81	-51.65	382.14	Wet
R-143a	84.04	72.71	3.76	-111.81	-47.24	226.82	Wet
R-218	188.02	71.95	2.67	-160.15	-36.83	105.31	dry
R-125	120.02	66.02	3.62	-100.63	-48.09	164.25	wet
R-41	34.03	44.13	5.90	-143.33	-78.12	489.16	wet
Ethane	30.07	32.18	4.87	-182.80	-88.60	489.79	wet
CO_2	44.01	30.98	7.38	-56.56	-78.40		wet
R-13	104.46	28.85	3.88	-181.15	-81.48	149.47	wet
R-23	70.01	26.14	4.83	-155.13	-82.02	239.55	wet
R-116	138.01	19.87	3.05	-97.15	-78.24	116.59	wet

مواد مختلفی از جمله مواد ارگانیک ساده، CFC ها و مواد سیلیکونی توسط شرکت‌های سازنده‌ی مختلف مورد استفاده قرار می گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳ – سیکل ORC روی نمودار T-S

۲-۳- سیکل ORC و فرآیند بازیافت

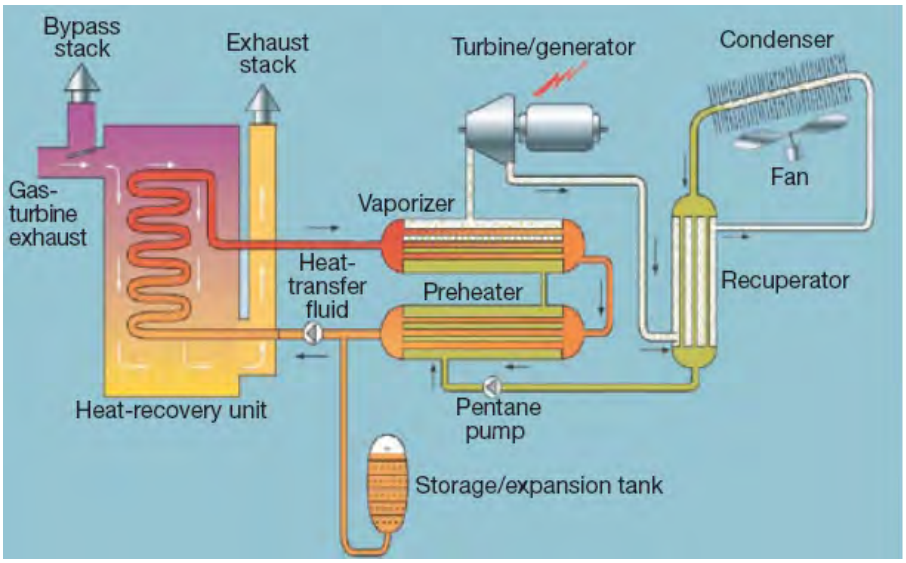
جریان‌های حرارت اتلافی معمولاً به صورت جریان داغ مایعات یا گازها می‌باشند. انتقال حرارت از این جریان‌ها به سیال کاری سیکل ORC یا به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم صورت می‌گیرد. در حالت مستقیم مبدل حرارتی برای انتقال حرارت از جریان حرارت به سیال کاری مستقیماً در جریان قرار می‌گیرد و حاوی سیال کاری است و در حالت غیر مستقیم یک سیکل بسته از سیال میانی وظیفه‌ی انتقال حرارت را به عهده می‌گیرد. استفاده از یکی از این دو روش بستگی به خصوصیات منبع حرارت اتلافی و سایر قیود خاص سیستم دارد. معمولاً جریان‌های مایع حرارت اتلافی به صورت مستقیم و جریان‌های گازی حرارت اتلافی به طور غیر مستقیم با سیکل ORC کوپل می‌شوند و علت نیز این است که منابع گازی معمولاً دارای انرژی بیشتر هستند و مقوله‌ی امنیت و کنترل‌پذیری در این سیستم‌ها اهمیت بیشتری دارد[۹]. وقتی از سیستم غیر مستقیم استفاده می‌شود، یک سیال واسطه مانند روغن‌های حرارتی، حرارت را از منبع دریافت کرده و به سیکل ORC تحویل می‌دهد. در انتخاب این سیال توجه می‌شود که فشار کاری آن در دمای مورد نظر پایین باشد و سیال کاملاً پایدار باقی بماند. به علاوه این ماده جز مواد قابل اشتعال نیز نیست. از طرفی کنترل سیستم به این صورت بسیار ساده‌تر خواهد بود زیرا می‌توان سیکل ORC را کاملاً از بخش منبع حرارتی به عنوان مثال دودکش گازهای توربین گاز و در واقع کل سیستم توربین گاز جدا نمود و جداگانه کنترل کرد. در سیستم میانی از یک منبع انبساط استفاده می‌شود تا هر گونه تغییر در حجم روغن حرارتی را حذف نموده و هدی ثابت را روی سیستم ایجاد کند. در یک توربین گاز، دودکش کنار گذر و کنترلر دبی روی پمپ در این سیستم تعادل را به گونه‌ای برقرار می‌کنند که دمای خروجی دودکش بیش از حد سرد نشود و دمای ماکزیمم روغن نیز از مقدار مجاز بیشتر نگردد. تغییرات دبی روغن، کنترل‌کننده‌ی میزان حرارتی است که از منبع حرارتی گرفته می‌شود و به سیال کاری تحویل داده می‌شود. پارامتر کنترل‌کننده‌ی این دبی نیز توان منبع حرارت است. با کاهش توان منبع به دلیل کاهش دمای منبع یا جریان آن، دبی روغن حرراتی کاهش می‌یابد تا دمای آن همچنان در محدوده‌ی طراحی قرار بگیرد و توانایی تبخیر سیال کاری را داشته باشد. به این ترتیب دبی سیال کاری نیز در سیکل کاهش

www.SID.ir

Archive of SID

می‌یابد زیرا حرارتی که برای تبخیر آن در دسترس است کمتر است. البته دمای سیستم در شرایط طراحی باقی می‌ماند و به این ترتیب سیکل بدون بروز مشکلی به کار خود ادامه می‌دهد. البته توان خروجی و بازده سیکل کاهش می‌یابد.

با توجه به این‌که همواره فرآیند صنعتی اصلی که تولید حرارت را انجام می‌دهد، اهمیت بسیار بیشتری نسبت به سیکل بازیافت حرارت دارد، در صورتی‌که سیستم بازیافت حرارت از کار بیافتد، سیستم اولیه تولید حرارت نباید تحت تأثیر قرار گیرد[۱۰]. دودکش کنار گذر در اینجا نیز برای قرار دادن مبدل حاوی روغن حرارتی در مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد و در صورت نیاز آن را از سیستم خارج می‌کند. یک نمونه از تجهیزات نصب شده در یک ایستگاه تقویت بصورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ – شماتیک سیکل ORC استفاده شده در ایستگاه تقویت فشار گاز

در شکل فوق تعدادی پیش‌گرم‌کن نیز قبل از بویلر و بعد از رکوپراتور وجود دارد که وظیفه‌ی آن‌ها این است که حرارت باقی‌مانده در روغن سیکل را که در اواپراتور بازیافت نشده، تا حد ممکن به سیال کاری انتقال دهند.

۲-۴- روابط ترمودینامیکی

در اینجا روابط ترمودینامیکی اساسی که در یک سیکل ORC ساده مطرح هستند، بیان می‌شود تا درک بهتری از تئوری سیکل به دست آید [۷] و [۸]. بازده سیکل ORC با توجه به رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$\eta_{ORC} = (W_{turbine} - W_{auxilaries}) / Q_{oil} \qquad (۱)$$

که در این رابطه $W_{auxilaries}$ مربوط به توان مورد نیاز برای پمپ‌ها، فن‌ها و سایر تجهیزات سیستم است. گرمایی که از طریق روغن وارد سیکل ORC می‌شود Q_{oil}، از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید.

$$Q_{oil} = \dot{m}_{oil}(C_{pin}T_{in} - C_{pout}T_{out}) \qquad (۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

ضریب گرمایی ویژه روغن حرارتی واسطه با تغییر دما به شکل قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. این حرارت صرف بخار کردن سیال کاری در اواپراتور می‌شود، در نتیجه رابطه ۳ را نتیجه می‌دهد.

$$Q_{oil} = (\dot{m}h_{fg})_{working\ fluid,high\ pressure} \quad (۳)$$

سیال در این مرحله وارد توربین می‌شود که بازده آن تقریباً ۸۵ درصد است.

$$\eta_{turbine} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out,s}} \quad (۴)$$

بعد از توربین گاز وارد رکوپراتور می‌شود که دارای بازده تقریباً ۸۰ درصد است.

$$Q_{pre-heat} = 0.8\dot{m}(h_{out,turbine} - h_{in,condensor}) \quad (۵)$$

سیال وارد کندانسور هوایی می‌شود و تبادل حرارت انجام می‌دهد تا به حالت مایع تبدیل گردد.

$$\dot{m}_{air}C_{pair}(T_{in} - T_{out}) = (\dot{m}h_{fg})_{working\ fluid,low\ pressure} \quad (۶)$$

بعد از خروج از کندانسور سیال وارد پمپ می‌شود که افت فشار آن را نسبت به اواپراتور جبران می‌کند.

$$W_{pump} = \frac{\dot{m}\Delta p}{\rho\eta_{pump}} \quad (۷)$$

بازده پمپ تقریباً ۸۰ درصد است. سیال در این مرحله بعد از دریافت حرارت در رکوپراتور وارد اواپراتور می‌شود و به این ترتیب سیکل بسته می‌شود.

$$Q_{pre-heat} = \dot{m}(h_{out} - h_{in})_{recuperator} \quad (۸)$$

۳- نمونه‌های کاربرد ORC در بهره‌برداری از حرارت اتلافی

۳-۱- توربین گازی

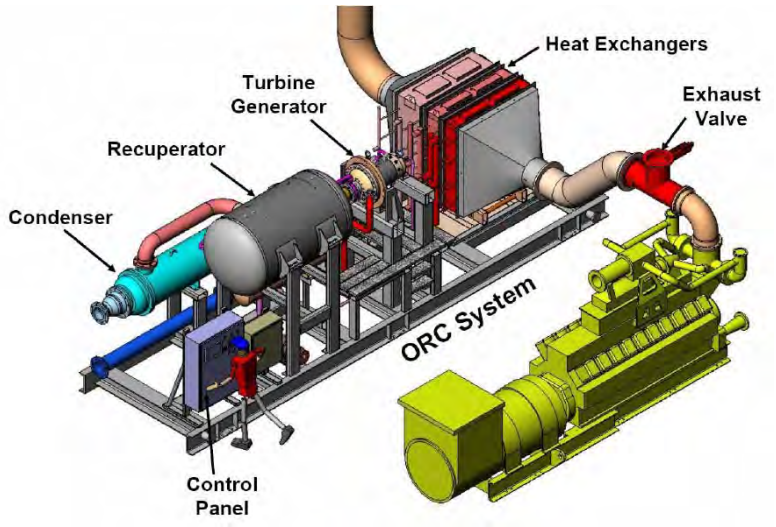
گازی که از دودکش توربین گازی تخلیه می‌شود و وارد اتمسفر می‌گردد، مقدار زیادی انرژی در دسترس دارد. در واقع به دلیل بازده ۳۵ درصدی سیکل توربین گاز، ۶۵ درصد انرژی ورودی در گاز داغ خروجی در حال اتلاف است. این جریان گاز منبع مناسبی برای بازیابی انرژی از طریق سیکل ORC است (شکل). با نصب این سیستم بازده کلی توربین گاز به ۴۵ الی ۴۷ درصد افزایش می‌یابد[۱]. چند نکته راجع به کاربرد سیکل ORC در تاسیسات تقویت فشار حائز اهمیت است که در ادامه به آنها اشاره شده است[۱۱]:

- نصب این سیستم تأثیری روی سیستم کمپرسور گاز نخواهد داشت. تنها نیاز به یک توقف کوتاه کاری می‌باشد تا یک کنارگذر روی دودکش نصب گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

- سیستم بازیاب حرارت در ساختمان کاملاً مجزا از ایستگاه تقویت فشار نصب می‌گردد و باید توسط حصار از محوطه‌ی ایستگاه نیز جدا شود تا مالکیت و کارکرد آن‌ها قابل تشخیص باشد. موارد دیگری نیز باید در نظر گرفته شود، مانند فضای لازم برای قرار گرفتن تجهیزات سیکل و رعایت حد تولید آلودگی صوتی.
- سیستم به صورت کنترل از راه دور عمل می‌کند و بازرسی حضوری توسط پرسنل مجزا انجام می‌گیرد.
- در حال حاضر در دنیا، سیستم‌های بازیاب حرارت در مالکیت یک شرکت به غیر از شرکت‌های خط لوله قرار می‌گیرد و توسط آن راه‌اندازی و بهره‌برداری می‌گردد. این شرکت می‌بایست بهای حرارت و اجاره‌ی زمین را به شرکت صاحب ایستگاه تقویت فشار پرداخت کند.
- دسترسی به شبکه‌ی برق نیز از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا در صورت عدم دسترسی هزینه‌ی راه‌اندازی خطوط الکتریسیته و ترانس‌ها نیز از کارایی کل سیستم می‌کاهد.
- نوسانات آب و هوایی و یا برنامه‌ی کارکرد متغیر ایستگاه چندان مطلوب نیست و برای انتخاب توان سیکل مناسب نیاز به بررسی‌های آماری خواهد بود، لذا شرایط کارکرد ثابت مناسب‌تر است.



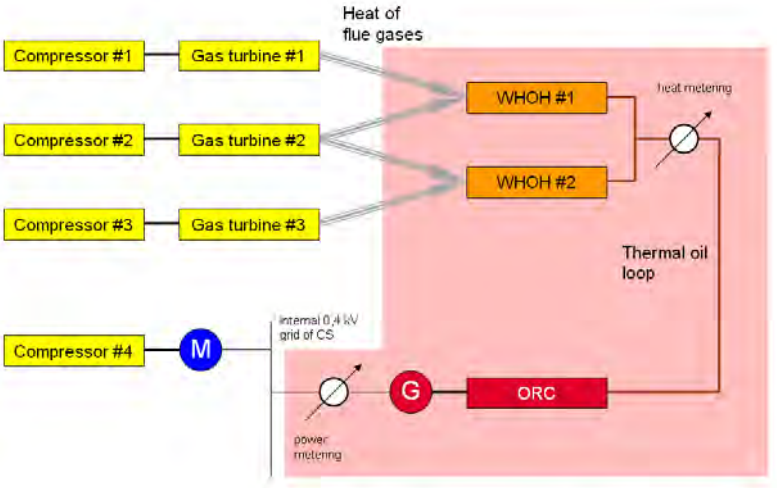
شکل ۵ - شماتیک بازیافت حرارت گاز خروجی توربین گاز توسط سیکل ORC

۳-۲- کاربرد برق تولیدی

برق تولیدی توسط سیکلORC از طریق بازیاب حرارت دودکش یک ایستگاه تقویت فشار گاز می‌تواند در داخل ایستگاه مورد استفاده‌ی داخلی قرار گرفته و یا به شبکه برق کشور تزریق گردد[۱۲]. یک سیستم ORC برقی آماده‌ی مصرف در اختیار قرار می‌دهد (هزینه‌ای که در ازای هر کیلووات توان تولیدی سیکل پرداخت شده شامل ملاحظات برق تولیدی نیز می‌شود). برق در ایستگاه می‌تواند صرف رانش الکتروموتور خنک‌کن‌های گاز گردد. البته در تابستان که توان تولیدی سیکل کاهش می‌یابد، توان مصرفی این خنک‌کن‌ها افزایش می‌یابد، لذا باید امکان استفاده از برق را در این حالت مورد بررسی دقیق قرار داد. روش دیگر استفاده از برق تولیدی راه‌اندازی یک الکتروموتور برای راه‌اندازی کمپرسور یک واحد است (شکل ۵).

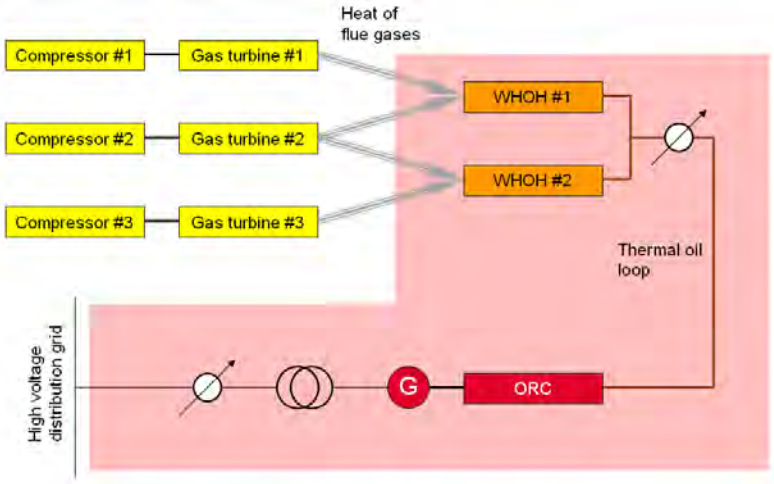
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶- بهره‌برداری از برق تولیدی سیکل بازیاب حرارت در ایستگاه[۱۱]

استفاده از این برق در داخل ایستگاه باعث می‌شود، شرکت‌های مسئول خط لوله نیز خود صاحب و بهره‌بردار سیکل بازیاب حرارت شوند و همچنین نیاز به فروش برق تولیدی وجود نداشته باشد که در هر صورت مسائل جانبی را کاهش می‌دهد. شکلهای ۶ و ۷ بهره‌برداری از برق تولیدی در ایستگاه و شماتیک تزریق برق به شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۷- بهره‌برداری از برق تولیدی سیکل بازیاب حرارت از طریق تزریق آن به شبکه‌ی اصلی[۱۱]

۴- بررسی اقتصادی

۴-۱- محاسبه‌ی تخمینی زمان بازگشت سرمایه

محاسبات برای اطلاعات دودکش ایستگاه نمونه با در نظر گرفتن فرضیاتی، انجام شده است تا بتوان به طور تخمینی زمان بازگشت سرمایه را به دست آورد. شبیه‌سازی این سیکل با پیاده‌سازی ساده‌ترین شکل سیکل ORC در نرم‌افزار Aspen Hysys

www.SID.ir

Archive of SID

انجام و سیال کاری سیکل، پنتان نرمال که در محصولات یکی از بزرگترین تولیدکنندگان تجهیزات ORC (ORMAT) به کار می-رود، انتخاب شده است و دمای هوای دودکش بین ۴۸۰ تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و دبی آن بین ۵۰ تا ۷۰ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. توان حرارتی کل این جریان با فرض این‌که جریان هوای خروجی بعد از مبدل روغن حرارتی ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باشد و جریان خروجی دودکش هوای خالص در نظر گرفته شود، در حالت ماکزیمم و مینیمم به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$W_{tot,\min} = 50\,kg/s \times (h_{air}\ at\ 1bar\ and\ 480°C - h_{air}\ at\ 1bar\ and\ 100°C) \quad (۹)$$
$$= 18.85\,MW$$
$$W_{tot,\max} = 70\,kg/s \times (h_{air}\ at\ 1bar\ and\ 500°C - h_{air}\ at\ 1bar\ and\ 100°C)$$
$$= 27.9MW$$

با توجه به رابطه‌ی ۹ مقدار کل توان در دسترس بین ۱۸/۸۵ و ۲۹/۹ مگاوات است که با احتساب بازده ۱۵درصد برای زمستان و ۸ درصد برای تابستان ، مقدار توان خروجی سیکل ORC در تابستان و زمستان به ترتیب برابر ۱/۵ و ۴/۳ مگاوات در نظر گرفته می-شود. سیکل ORC در دمای محیط کمتر بازده بالاتری دارد و با توجه به بار بیشتر توربین گاز در زمستان نیز انرژی خروجی بیشتر است. بازده ۱۵ درصد محافظه‌کارانه در نظر گرفته شده است. بازده ۸ درصد نیز با توجه به بازده مینیمم سیکل ORC برای بدترین حالت انتخاب شده است. برای محاسبه‌ی زمان بازگشت سرمایه، زمان کارکرد سیکل در سال و میزان انرژی برقی که به دست می-دهد اهمیت زیادی دارد. توان به دست آمده در ادامه آورده شده است.

- انرژی برق تولیدی در زمستان (بافرض ۴۰۰۰ ساعت کارکرد) ۱/۷*۱۰^۷ کیلووات‌ساعت
- انرژی برق تولیدی در تابستان (بافرض ۲۰۰۰ ساعت کارکرد) ۰/۳*۱۰^۷ کیلووات‌ساعت
- انرژی برق تولیدی در سال ۲*۱۰^۷ کیلووات‌ساعت

در صورتی‌که از سیال کاری مناسب‌تر برای شرایط آب و هوایی ایران استفاده شود که بازده سیکل در تابستان دچار افت نشود و در صورتی‌که سیکل در تابستان نیز به اندازه‌ی زمستان کارکند، مقادیر به دست آمده به صورت زیر خواهد شد.

- انرژی برق تولیدی در زمستان (بافرض ۴۰۰۰ ساعت کارکرد) ۱/۷*۱۰^۷ کیلووات‌ساعت
- انرژی برق تولیدی در تابستان (بافرض ۴۰۰۰ ساعت کارکرد) ۱/۲*۱۰^۷ کیلووات‌ساعت
- انرژی برق تولیدی در سال ۲/۹*۱۰^۷ کیلووات‌ساعت

در این حالت زمان بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد. این عدد یک مقدار تقریبی است و باید برای هر ایستگاه با توجه به تاریخچه‌ی فعالیت آن در سال و همچنین اطلاعات دقیق بازده سیکل انتخابی تکرار شود. در صورتی‌که حرارت اتلافی به عنوان یک منبع انرژی بازگشت‌پذیر در نظر گرفته شود و قابل مقایسه با CO2 Emission Trading گردد، قیمت برق تولیدی به شکل قابل توجهی (تا دو برابر) افزایش می‌یابد که باعث کاهش زمان بازگشت سرمایه می‌گردد. همچنین در صورتی‌که تعداد تاسیساتی که مجهز به سیستم بازیاب حرارت می‌شوند زیاد باشد، هزینه‌ی هر کیلووات برق تولیدی سیکل از ۲۰۰۰ یورو به ۱۰۰۰ یورو کاهش یافته که با احتساب این مورد بازگشت سرمایه به دو سال و حتی پایین‌تر نیز کاهش می‌یابد. استفاده از سیکل ORC برای زمان بازگشت سرمایه‌ی زیر ۷ سال از نظر اقتصادی قابل توجیه است.

۵- نتیجه گیری

سیکل ORC در بازیابی حرارت اتلافی توربین‌های گازی به عنوان یک تکنولوژی قابل اعتماد و اقتصادی در جهان در حال استفاده است. این سیکل برتری‌های تکنیکی، عمل‌کردی و اقتصادی قابل توجهی نسبت به سیکل کلاسیک رنکین در اختیار قرار

www.SID.ir

Archive of SID

می‌دهد. در این تحقیق سعی بر آن بود تا با بررسی و شبیه‌سازی عملکرد واقعی یک ایستگاه نمونه، تأثیر نصب سیستم بازیافت حرارت ORC در آن دیده شود؛ که تأثیر آن حدود ۷٪ افزایش بازده تولید واحد قدرت به همراه تولید خالص برق با ظرفیتی معادل ۴۸۰۰ KW می باشد؛ لیکن چنانچه شرایط کارکرد ایستگاه با افزایش تقاضا یا هر علت دیگری به شرایط نامی نزدیک شود و اگر از ابتدا برای استفاده‌ی صنعتی از این تکنولوژی برنامه‌ریزی شود، پس از مدتی مقادیر بیشتری (نزدیک ۵۲۰۰KW) می‌توان با استفاده از این تکنولوژی، برق تولید کرد.

منابع و مراجع

1. L. Y. Bronicki, “Organic Rankine Cycle Power Plant for Waste Heat Recovery”, ORMAT International Inc., 2008.
2. R. Vescovo, “ORC Recovering Industrial Heat, Power Generation from Waste Energy Streams”, Turboden Ltd., 2009.
3. M. Tampier, P. A. Beauchemin, D. Smith, E. Bibeau, “Identifying Environmentally Preferable Uses for Biomass Recourses” Envirochem Services Inc., 2006.
4. A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff, “Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications”, Applied Thermal Engineering, vol 29, p 1809-1817, 2009.
5. B. Aoun, “Micro Combined Heat and Power Operating on Renewable Energy for Residential Building”, PhD. Thesis, Director: D. Clodic, Ecole des Mines de Paris, 2008.
6. H. Spliethoff, A. Schuster, “The Organic Rankine Cycle– Power Production from Low Temperature Heat”, Institute for Energy Systems, Technische Universität München, 2006.
7. S. Quoilin, V. Lemort, “Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems”, 5th European conference Economics and management of Energy in Industry, 2009.
8. X. Shi, D. Che, “A combined power cycle utilizing low-temperature waste heat and LNG cold energy”, Energy Conversion and Management, vol 50, p 567-575, 2009.
9. Turboden Ltd. “ORC turbogenerators for medium/low temperatures– demonstration projects and commercial plants”, Geothermal Energy Exhibition, 1st edition, 2009.
10. Turboden Ltd, Doc. 08A00171_e, “Electricity production from Biomass Using Organic Rankine Cycle”, 2008.
11. Contribution Towards Task I-9: Identification of Standards Practiced in four International Companies, Revision 2, Standard Setting and Energy Saving Program in Gas Pipeline, Compressor Stations and Pressure Reduction Plants in Iran, Project Number 429.001, 2010.
۱۲. بازیافت گرمای هدر رفته از فرآیندهای صنعتی، دفتر بهینه‌سازی مصرف انرژی، معاونت انرژی وزارت نیرو.

www.SID.ir