



دانشگاه سگیلان

دانشکده فنی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تعیین مدل دینامیکی و کنترل عملکرد یک توربین گازی

از

ابراهیم تراییان

استاد راهنما

دکتر کاظم آتشکاری

خرداد ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشکده فنی

گروه مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

تعیین مدل دینامیکی و کنترل عملکرد یک توربین گازی

از

ابراهیم ترابیان

استاد راهنما

دکتر کاظم آتشکاری

استاد مشاور

مهندس امیر حاجیلو

خرداد ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

با سپاس فراوان از زحمات و راهنمایی‌های جناب آقای دکتر آتشکاری و همچنین
همکاری جناب آقای مهندس حاجیلو و کلیه عزیزانی که در به پایان رساندن این رساله
اینجانب را یاری فرمودند.

فهرست مطالب

چ	فهرست جدول‌ها.....
ح	فهرست شکل‌ها.....
د	فهرست علائم اختصاری.....
ر	چکیده.....
ز	Abstract.....

فصل ۱ مقدمه‌ای بر توربین‌های گازی..... ۱

۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ تاریخچه.....
۴	۳-۱ طبقه‌بندی توربین‌های گازی.....
۵	۴-۱ سیکل ایده‌آل موتور توربین گازی.....
۷	۵-۱ سیکل واقعی برای تون.....
۷	۶-۱ انواع سیکل‌های توربین گازی.....
۸	۷-۱ توربین‌های گازی با دو محور.....
۹	۸-۱ مزایا، معایب و کاربردهای موتورهای توربین گازی.....
۹	۱-۸-۱ کاربردهای اصلی توربین گازی.....
۱۱	۲-۸-۱ امتیازات موتور توربین گازی.....
۱۱	۳-۸-۱ نقاط ضعف موتور توربین گازی.....
۱۳	۹-۱ مدل‌سازی دینامیکی توربین گازی.....
۱۳	۱۰-۱ دلایل استفاده از مدل دینامیکی.....

فصل ۲ سیستم‌های دینامیکی..... ۱۵

۱۶	۱-۲ مقدمه.....
۱۶	۲-۲ معادلات حالت به شکل معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE).....
۱۶	۱-۲-۲ سیستم ثابت زمانی خطی.....
۱۷	۲-۲-۲ سیستم‌های غیرخطی ورودی-مستوی.....
۱۷	۳-۲-۲ کنترل سیستم‌های به فرم معادلات دیفرانسیل معمولی.....
۲۱	۴-۲-۲ خطی‌سازی ورودی-خروجی سیستم‌های ورودی مستوی.....
۲۲	۳-۲ معادلات حالت در فرم معادلات دیفرانسیلی جبری.....

فصل ۳ مدل‌سازی توربین گازی..... ۲۵

۲۶	۱-۳ مقدمه.....
----	----------------

۲۷	..... مدل‌سازی غیرخطی در فضای حالت.....	۲-۳
۳۰	..... معادلات کمکی.....	۳-۳
۳۰	..... مدل‌سازی توربین و کمپرسور.....	۴-۳
۳۱	..... تقریب مرتبه اول.....	۱-۴-۳
۳۲	..... تقریب مرتبه دوم.....	۲-۴-۳
۳۸	..... شبیه‌سازی مدل توربین گاز.....	۵-۳
۴۴	.....
	فصل ۴ طراحی سیستم کنترلی.....	
۴۵	..... انتخاب ساختار کنترلی.....	۱-۴
۴۵	..... طراحی کنترلر مرتبه دوم سروو بر اساس خطی‌سازی ورودی-خروجی.....	۲-۴
۴۶	..... هدف کنترلی.....	۱-۲-۴
۴۶	..... خطی‌سازی ورودی-خروجی.....	۲-۲-۴
۴۷	..... کنترلر مرتبه دوم سروو.....	۳-۲-۴
۵۰	..... شبیه‌سازی سیستم کنترلی.....	۳-۴
۵۱	..... تحلیل قدرت کنترل.....	۴-۴
۵۴	.....
	فصل ۵ بهینه‌سازی سیستم کنترلی.....	
۵۵	..... مقدمه.....	۱-۵
۵۵	..... الگوریتم ژنتیک.....	۲-۵
۵۶	..... اصطلاحات مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک.....	۱-۲-۵
۵۸	..... نحوه عملکرد GA.....	۲-۲-۵
۵۹	..... شرایط توقف الگوریتم.....	۳-۲-۵
۶۰	..... توابع هدف.....	۳-۵
۶۰	..... میزان اتلاف انرژی.....	۱-۳-۵
۶۵	..... میزان مصرف سوخت.....	۲-۳-۵
۶۵	..... دمای ورودی به توربین.....	۳-۳-۵
۶۶	..... میزان خطای کنترل.....	۴-۳-۵
۶۷	.....
	فصل ۶ نتایج بهینه‌سازی سیستم کنترلی.....	
۶۸	..... مقدمه.....	۱-۶
۶۹	..... ماتریس کنترلی K.....	۲-۶
۶۹	..... بهینه‌سازی با تابع هدف.....	۳-۶
۶۹	..... انتخاب پارامترهای بهینه‌سازی.....	۱-۳-۶
۷۰	..... اتلاف انرژی.....	۲-۳-۶
۷۱	..... مصرف سوخت.....	۳-۳-۶
۷۲	..... دمای ورودی به توربین.....	۴-۳-۶
۷۳	..... خطای کنترلی.....	۵-۳-۶

۷۳	.....نتایج بهینه سازی یک تابع هدفی.....۶-۳-۶
۷۴	.....بهبودسازی با دو تابع هدف.....۶-۴-۶
۷۴	.....انتخاب پارامترهای بهبودسازی.....۶-۴-۱
۷۶	.....خطای کنترلی و اتلاف انرژی.....۶-۴-۲
۷۸	.....خطای کنترلی و میزان مصرف سوخت.....۶-۴-۳
۸۰	.....خطای کنترلی و دمای ورودی به توربین.....۶-۴-۴
۸۱	.....بهبودسازی با چهار تابع هدف.....۶-۵-۶

فصل ۷ نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار.....۸۴

۸۵	.....نتیجه‌گیری.....۷-۱-۸۵
۸۶	.....پیشنهاد ادامه کار.....۷-۲-۸۶

ضمائم.....۸۷

۸۸	.....فهرست ضمایم.....۸۸
۸۹	.....ضمیمه ۱- فهرست منابع و مأخذ.....۸۹
۹۱	.....ضمیمه ۲- پارامترهای طراحی.....۹۱
۹۳	.....ضمیمه ۳- بررسی Robustness.....۹۳

فهرست جدول‌ها

۳۸	جدول ۱-۳) ضرایب مربوط به تقریب سازی مرتبه اول.....
۳۸	جدول ۲-۳) ضرایب مربوط به تقریب سازی مرتبه دوم.....
۳۹	جدول ۳-۳) شرایط اولیه برای معادلات.....
۵۱	جدول ۱-۴) پارامترهای متغیر پس از طراحی کنترلر.....
۵۶	جدول ۱-۵) برخی از تفاوت‌های GA با سایر روش‌های بهینه سازی.....
۷۰	جدول ۱-۶) پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم ژنتیک یک تابع هدف.....
۷۳	جدول ۲-۶) مقادیر بهینه بردار کنترلی K
۷۴	جدول ۳-۶) مقادیر کمینه توابع هدف.....
۷۴	جدول ۴-۶) پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم ژنتیک دو تابع هدف.....
۷۷	جدول ۵-۶) نتایج عددی حاصل از بهینه سازی دو تابع هدفی خطای کنترلی و اتلاف انرژی.....
۷۹	جدول ۶-۶) نتایج عددی حاصل از بهینه سازی دو تابع هدفی خطای کنترلی و میزان مصرف سوخت.....
۸۱	جدول ۷-۶) نتایج عددی حاصل از بهینه سازی دو تابع هدفی خطای کنترلی و دمای ورودی به توربین.....
۸۳	جدول ۸-۶) نتایج عددی حاصل از بهینه سازی با چهار تابع هدف.....

فهرست شکل‌ها

۵	..... شکل (۱-۱) سیکل ساده‌ی توربین گاز.....
۶	..... شکل (۲-۱) نمودارهای P-V و T-S سیکل ایده‌آل توربین گاز.....
۷	..... شکل (۳-۱) نمودارهای T-S سیکل واقعی توربین گاز.....
۹	..... شکل (۴-۱) توربین گاز دو محوره و نمودار T-S.....
۱۸	..... شکل (۱-۲) نمایش دیاگرام بلوکی فیدبک حالت.....
۲۶	..... شکل (۱-۳) اجزای اصلی توربین گاز.....
۳۴	..... شکل (۲-۳) منحنی مشخصه کمپرسور بر اساس نتایج تجربی.....
۳۴	..... شکل (۳-۳) منحنی مشخصه کمپرسور با تقریب مرتبه اول.....
۳۴	..... شکل (۴-۳) منحنی مشخصه کمپرسور با تقریب مرتبه دوم.....
۳۵	..... شکل (۵-۳) راندمان آیزنتروپیک کمپرسور بر اساس نتایج تجربی.....
۳۵	..... شکل (۶-۳) راندمان آیزنتروپیک کمپرسور بر اساس تقریب مرتبه اول.....
۳۵	..... شکل (۷-۳) راندمان آیزنتروپیک کمپرسور بر اساس تقریب مرتبه دوم.....
۳۶	..... شکل (۸-۳) منحنی مشخصه توربین بر اساس نتایج تجربی.....
۳۶	..... شکل (۹-۳) منحنی مشخصه توربین بر اساس تقریب مرتبه اول.....
۳۶	..... شکل (۱۰-۳) منحنی مشخصه توربین بر اساس تقریب مرتبه دوم.....
۳۷	..... شکل (۱۱-۳) راندمان آیزنتروپیک توربین بر اساس نتایج تجربی.....
۳۷	..... شکل (۱۲-۳) راندمان آیزنتروپیک توربین بر اساس تقریب مرتبه اول.....
۳۷	..... شکل (۱۳-۳) راندمان آیزنتروپیک توربین بر اساس تقریب مرتبه دوم.....
۳۹	..... شکل (۱۴-۳) نمودار تغییرات فشار بر حسب زمان در سیکل توربین گاز.....
۴۰	..... شکل (۱۵-۳) نمودار تغییرات دما بر حسب زمان در سیکل توربین گاز.....
۴۰	..... شکل (۱۶-۳) نمودار تغییرات سرعت دورانی بر حسب زمان در سیکل توربین گاز.....
۴۱	..... شکل (۱۷-۳) نمودار تغییرات سرعت دورانی بر حسب زمان در سیکل توربین گاز با تغییر گشتاور خروجی (حساسیت سیستم حلقه باز).....
۴۱	..... شکل (۱۸-۳) نمودار تغییرات سرعت دورانی بر حسب زمان در سیکل توربین گاز با تغییر سرعت اولیه (ناپایداری سیستم حلقه باز).....
۴۲	..... شکل (۱۹-۳) نمودار تغییرات نسبت فشار، راندمان آیزنتروپیک و دبی عبوری از کمپرسور و توربین نسبت به زمان.....
۴۷	..... شکل (۱-۴) خطی‌سازی ورودی- خروجی به صورت دیاگرام بلوکی.....
۴۹	..... شکل (۲-۴) سیستم کنترل برای سیکل توربین گاز به شکل دیاگرام بلوکی.....
۵۰	..... شکل (۳-۴) نتایج حاصل از کنترل توربین گاز.....
۵۲	..... شکل (۴-۴) تغییر گشتاور خروجی در اثر تغییرات بار ژنراتور و بررسی قدرت کنترلر پس از این تغییر.....
۶۴	..... شکل (۱-۵) نرخ اتلاف انرژی در اجزای مختلف توربین گاز.....
۶۴	..... شکل (۲-۵) نرخ اتلاف انرژی بر حسب زمان.....
۶۵	..... شکل (۳-۵) نرخ جریان سوخت ورودی به محفظه احتراق بر حسب زمان.....
۶۶	..... شکل (۴-۵) نمودار v_{ref} و سرعت دورانی شفت توربین گاز.....
۶۸	..... شکل (۱-۶) نمودار کنترلی سرعت دورانی در حالت زیر میرا و میرای بحرانی.....
۷۰	..... شکل (۲-۶) نمودار تغییرات تابع شیبستگی نسبت به تغییر نسل‌ها در بهینه‌سازی اتلاف انرژی.....
۷۱	..... شکل (۳-۶) نتایج حاصل از بهینه‌سازی میزان اتلاف انرژی.....
۷۲	..... شکل (۴-۶) نتایج حاصل از بهینه‌سازی مصرف سوخت.....

۷۲	..... شکل ۶-۵) نتایج حاصل از بهینه سازی دمای ورودی به توربین.....
۷۳	..... شکل ۶-۶) نتایج حاصل از بهینه سازی خطای کنترلی.....
۷۶	..... شکل ۶-۷) نمودار پرتو در بهینه سازی دو تابع هدفی خطای کنترلی و اتلاف انرژی.....
۷۷	..... شکل ۶-۸) نتایج حاصل از بهینه سازی برای خطای کنترلی و اتلاف انرژی.....
۷۸	..... شکل ۶-۹) نمودار پرتو در بهینه سازی دو تابع هدفی خطای کنترلی و میزان مصرف سوخت.....
۷۹	..... شکل ۶-۱۰) نتایج حاصل از بهینه سازی برای خطای کنترلی و میزان مصرف سوخت.....
۸۰	..... شکل ۶-۱۱) نمودار پرتو در بهینه سازی دو تابع هدفی خطای کنترلی و دمای ورودی به توربین.....
۸۱	..... شکل ۶-۱۲) نتایج حاصل از بهینه سازی برای خطای کنترلی و دمای ورودی به توربین.....
۸۲	..... شکل ۶-۱۳) نمودارهای پرتو مربوط به بهینه سازی با چهار تابع هدف.....
۸۳	..... شکل ۶-۱۴) نتایج حاصل از بهینه سازی برای خطای کنترلی و دمای ورودی به توربین.....

فهرست علائم اختصاری

A	سطح $[m^2]$
E	انرژی مکانیکی $[J]$
M	گشتاور و وزن مولکولی $[-, Nm]$
P	توان $[W]$
Q	انرژی حرارتی $[J]$
R	ثابت ویژه گازها $[J/(kg K)]$
T	دما $[K]$
U	انرژی داخلی $[J]$
V	حجم $[m^3]$
W	کار $[J]$
C	گرمای ویژه $[J/(kg K)]$
I	انرژی $[J]$
X	تعداد مول $[-]$
a	دسترس پذیری ویژه $[J/kg]$
h	انتالپی ویژه $[J/kg]$
m	جرم $[kg]$
n	سرعت دورانی $[rps]$
p	فشار $[Pa]$
s	آنتروپی ویژه $[J/kgK]$
t	زمان $[s]$

حروف یونانی

α	ضریب موجود در مدل کمپرسور $[-]$
β	پارامتر ویژه‌ی هوا و گاز $[(K)^{0.5} s/m]$
γ	ضریب موجود در مدل توربین $[-]$
η	راندمان $[-]$
θ	ممان اینرسی $[kg m^2]$
κ	توان آدیاباتیک $[-]$
λ	ضریب موجود در مدل کمپرسور $[-]$
φ	ضریب موجود در مدل توربین $[-]$
ν	دبی جرمی $[kg/s]$
σ	ضریب افت فشار $[-]$
τ	ضریب سرعت توربین $[(K)^{0.5} s]$

زیرنویس‌ها

ورودی مجرای ورودی	<i>0</i>
خروجی مجرای ورودی و ورودی کمپرسور	<i>1</i>
خروجی کمپرسور و ورودی محفظه احتراق	<i>2</i>
خروجی محفظه احتراق و ورودی توربین	<i>3</i>
خروجی توربین و ورودی مجرای خروجی	<i>4</i>
مقدار مرجع	<i>ref</i>
کمپرسور	<i>C</i>
حجم کنترل	<i>cv</i>
محفظة احتراق	<i>comb</i>
سوخت	<i>fuel / f</i>
مجرای ورودی	<i>I</i>
ورودی	<i>in</i>
بار	<i>load</i>
مکانیکی	<i>mech</i>
مجرای خروجی	<i>N</i>
خروجی	<i>out</i>
فشار ثابت	<i>p</i>
شفت	<i>shaft</i>
توربین	<i>Turb / T</i>
حجم ثابت	<i>v</i>

امروزه استفاده از توربین گاز به دلیل کاربرد گسترده از جمله تولید توان، حمل و نقل، صنایع هوایی و سایر کاربردهای صنعتی افزایش یافته است. به همین دلیل جهت طراحی و همچنین تعیین سیستم کنترلی مناسب استفاده از یک مدل دینامیکی که همزمان کلیه خواص ترمودینامیکی را نیز در بر گیرد مورد نیاز است. در این پایان نامه بر اساس مدل غیرخطی توربین گاز که با کمک قوانین بقای جرم و انرژی به دست می آید سیستم کنترلی طراحی می گردد. این سیستم کنترلی که بر پایه ی خطی سازی ورودی-خروجی و اعمال کنترلر مرتبه دوم سروو بر سیستم خطی شده استوار است با کمک یک سیگنال مرجع ورودی سیستم را به سمت ورودی مشخصی حرکت می دهد به طوری که با تغییر در مقدار سوخت ورودی به محفظه احتراق به عنوان سیگنال ورودی، سرعت دورانی شفت متصل به توربین را کنترل می کند. دلیل انتخاب کنترل سرعت دورانی به عنوان هدف کنترلی در این مقاله لزوم توانایی توربین گاز جهت کارکرد در سرعت های دورانی متفاوت برای به حرکت درآوردن ژنراتور و در نتیجه تولید الکتریسیته در شرایط مختلف می باشد. جهت تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مختلف سیستم کنترلی از چند تابع هدف ترمودینامیکی استفاده می شود. یکی از این توابع هدف، میزان اتلاف انرژی کل سیکل توربین گاز (\dot{I}_{Total}) است که از حاصل جمع اتلاف انرژی هر یک از اجزاء سیکل که شامل مقطع ورودی، کمپرسور، محفظه احتراق، توربین و مجرای خروجی است، به دست می آید. سایر توابع هدف میزان خطای کنترلی نسبت به ورودی مرجع، دمای ورودی به توربین و میزان مصرف سوخت در طی زمان کنترل می باشند. نتایج حاصل از این بهینه سازی ها که توسط الگوریتم ژنتیک انجام می شود، بهترین شرایط طراحی سیستم کنترلی را نتیجه خواهند داد.

کلید واژه: توربین گاز، مدل دینامیکی، خطی سازی، کنترل مرتبه دوم سروو، بهینه سازی

Abstract

Dynamical evaluation model and performance control of a gas turbine

Ebrahim Torabian

Utilizing of gas turbine has been developed for its widespread application in many tasks like power generation, transportation and other industrial systems. Gas turbine modeling is essential in designing and development of gas turbine control system. In the current work, nonlinear modeling of a gas turbine cycle which is derived from first engineering principles is utilized to design an appropriate controller. The control system is designed based on Input-Output Linearization method and Linear Quadric Servo Controller to the linearized system. In this way the gas turbine system can operate at different rotational speeds due to prescribed input references and can satisfy the necessity for the gas turbine to be able to work in various speeds. Four objective functions are used to approach optimized values from the controlling parameters. These objective functions, which are equal to exergy destruction in all gas turbine components, control system error with regard to reference input, turbine input temperature and fuel consumption will be operating in desired controlling conditions as well as being thermodynamically proper. The results of these optimizations, which have been performed by genetic algorithm, lead to the best conditions of control system design.

Key Words: Gas Turbine, Dynamic Modeling, Linearization, LQ Servo Controller, Optimization

فصل ۱

مقدمه‌ای بر

توربین‌های گازی

امروزه استفاده از توربین‌های گازی در امر تولید قدرت مکانیکی در مقایسه با سایر تجهیزات تولید قدرت رواج زیادی یافته است. از تولید انرژی برق گرفته تا پرواز هواپیماها همگی مرهون استفاده از این وسیله سودمند می‌باشند. این تجهیزات در نیروگاه‌ها برای تولید برق، موتورهای جلوبرنده (هواپیما، کشتی‌ها و حتی خودروها) و در صنایع نفت و گاز برای به حرکت درآوردن پمپ‌ها و کمپرسورها در خطوط انتقال فراورده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. توسعه توربین‌های گازی باعث پیشرفت زیادی در رشته‌های مهندسی مکانیک، متالورژی و سایر علوم مربوطه گشته است. بطوری که پیدایش سوپرآلیاژهای پایه نیکل و تیتانیوم به خاطر استفاده آنها در ساخت پره‌های ثابت و متحرک توربین‌ها که دماهای بالایی در حدود ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد و یا بیشتر را متحمل می‌شوند، از سرعت بیشتری برخوردار شده است. به همین خاطر امروزه به تکنولوژی توربین‌های گازی تکنولوژی مادر گفته می‌شود و کشوری که دارای این توانمندی باشد دارای صنعت گسترده و توانمندی خواهد بود.

توربین گاز یک موتور احتراق داخلی دوار می‌باشد که بارزترین نمونه آن موتور هواپیمای جت است. اساساً این موتور مخلوط رقیقی از سوخت و هوای فشرده را می‌سوزاند. گازهای محترق شده‌ی فشرده که دمای بالایی دارند در بین یک سری چرخ دوار توربین و مجموعه‌ی پره‌ها منبسط شده و نتیجه آن، تولید قدرت محوری خروجی، نیروش رانش یا ترکیبی از هر دو خواهد بود. توربین‌های گازی نسبت به موتورهای متعارف دیگر مثل موتورهای بخار و موتورهای دیزلی رفت و برگشتی دارای فوایدی از جمله موارد زیر می‌باشند:

- کوتاه بودن زمان شروع به کار و تحت بار قرار گرفتن
- قابلیت انعطاف جهت طراحی قسمت‌های مختلف
- وزن کم
- عدم نیاز به خنک کاری دراز مدت
- آسودگی در تعمیر و نگهداری

تحقیق‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد رفتار دینامیکی توربین گاز از سال ۱۹۵۰ توسط Taylor و Edward Otto انجام شد [۱]. این دو دانشمند اولین کسانی بودند که توانستند رفتار دینامیکی یک توربین گاز تک محوره را با یک سیستم مرتبه اول به دست آورند. مدتی پس از آن دانشمند دیگری به نام Novik مدل دینامیکی موتور یک توربوجت دو محوره را ارائه نمود [۲]. در حالت کلی شبیه سازی توربین گاز به سه صورت آنالوگ، دیجیتال و هیبریدی امکان پذیر است. در سالهای قبل که استفاده از کامپیوترها به شکل امروزی ممکن نبود، روش‌های آنالوگ که با استفاده از کامپیوترهای اولیه انجام می‌گرفت و زمان زیادی جهت تعیین شرایط نهایی فرآیند نیاز داشت، بستر مناسبی جهت مطالعه دانشمندان فراهم کرده بود. از جمله دانشمندانی که در این زمینه فعالیت نمودند می‌توان به Larrowe و Spencer [۳] و Saravanamuttoo [۴] اشاره کرد. کامپیوترهای هیبریدی که در مدت زمان کوتاهی مورد استفاده قرار گرفتند سرعت محاسباتی کامپیوترهای آنالوگ را افزایش دادند و پس از آن با گسترش کامپیوترهای دیجیتالی، امروزه محاسبات مربوط به رفتار دینامیکی توربین‌های گازی با سرعتی بالا انجام می‌شود. به طوری که توربین‌های گازی با یک یا دو محور و چندین متغیر حالت که بیان کننده‌ی کلیه رفتارهای دینامیکی و ترمودینامیکی سیستم می‌باشند به صورت دیجیتال مدل‌سازی و کنترل شده‌اند [۵].

یکی از موفق‌ترین و کاملترین مدل‌سازی‌های دینامیکی انجام شده برای شرایط گذرا و حالت پایدار توربین گاز در سال ۲۰۰۱ توسط Ailer انجام شده است. در این مدل که بر اساس معادلات اولیه مهندسی و معادلات بقای جرم و انرژی بنا نهاده شده از سه متغیر حالت استفاده شده است [۶]. اصول مدل‌سازی در این پایان‌نامه نیز بر اساس مرجع بیان شده می‌باشد.

تکنیک‌های کنترل توربین گاز معمولاً بر اساس روش‌ها و کنترلرهای خطی انجام می‌شود. به عنوان مثال انواع مختلفی از کنترلرهای PID و PI بر توربین‌های گاز به صورت تکه‌ای خطی شده^۱ اعمال شده‌اند [۷ و ۸]. گروه دیگری از کنترلرهای خطی انواع مختلف کنترل مرتبه دو (LQ) می‌باشند [۹ و ۱۰]. در مراجع [۱۱ و ۱۲] از کنترلر مرتبه دوم سرو^۲ جهت رسیدن به یک سیگنال مرجع استفاده شده است. همچنین روش‌های LQG/LTR و کنترلر مقاوم^۳ نیز در مراجع [۱۳] و [۱۴] جهت کنترل توربین گاز استفاده شده‌اند. در مرجع [۱۵] نیز روش زمان‌بندی بهره‌ای جهت کنترل توربین گازی با هفت متغیر حالت استفاده شده است.

¹ Locally Linearized Model

² LQ Servo Controller

³ Robust Control

همچنین می‌توان از روش‌های کنترل غیرخطی استفاده نمود. یکی از این روش‌ها کنترل پیشبینی کننده^۱ است که در مرجع [۱۶] از آن جهت کنترل توربین گازی که در شرایط اولیه سکون قرار دارد، استفاده شده است. هدف از این مدل کنترل توربین گازی در زمان راه‌اندازی آن، در جهت عبور از شرایط بحرانی کمپرسور مثل سرج^۲ و استال^۳ می‌باشد. از دیگر روش‌های غیرخطی کنترل توربین گازی می‌توان به روش‌های محاسباتی سیستمی^۴ [۱۷] همانند شبکه‌های عصبی [۱۸]، الگوریتم ژنتیک [۱۹] و روش کنترل فازی [۲۰] اشاره کرد.

یکی دیگر از روش‌های کنترل توربین گازی استفاده از روش‌های ریاضی و عددی در شرایطی است که به دلیل غیرخطی بودن سیستم امکان استفاده از روش‌های کنترلی معمول فراهم نباشد. به عنوان نمونه در مرجع [۲۱] از یک روش پیچیده ریاضی در تحلیل و کنترل توربین گازی با پنج متغیر حالت استفاده شده است.

۳-۱ طبقه بندی توربین‌های گاز

توربین‌های گاز به دو دسته‌ی عمده صنعتی و هوایی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته‌ی اول کلیه‌ی نیروگاه‌های گازی را نیز در بر می‌گیرد. توربین‌های گاز هوایی از سه نقطه دید اصلی از نوع صنعتی متمایز می‌گردند.

۱- طول عمر توربین‌های گاز صنعتی بدون تعمیرات اساسی حدود ۱۲۰۰۰۰ ساعت بوده در صورتی که برای نوع هوایی ۶۰۰-۱۲۰۰ ساعت می‌باشد.

۲- کم بودن اندازه و وزن در نوع هوایی در مقایسه با نوع صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۳- از انرژی جنبشی گاز خروجی از آگروز در نوع هوایی استفاده‌ی مفید می‌شود در صورتی که این انرژی در نوع دیگر به هدر رفته و بایستی در حد امکان در حداقل نگه داشته شود. هرچند تمایزات فوق اثر قابل توجهی در طراحی این دو دسته دارد ولی قوانین اساسی حاکم بر هر دو یکسان می‌باشد.

¹ MPT: Model Predictive Control

² Surge

³ Stall

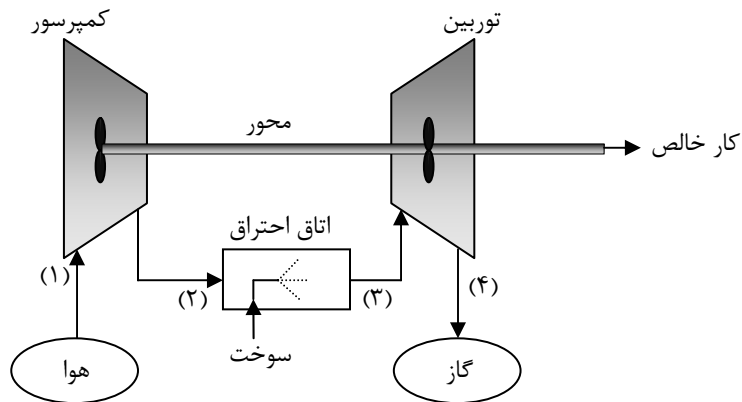
⁴ Soft Computing Methods

۴-۱ سیکل ایده آل موتور توربین گاز

موتور توربین گاز ساده به ترتیب شامل کمپرسور، اتاق احتراق و توربین می‌باشد. هوای ورودی توسط کمپرسور متراکم می‌شود و زمانی که تحویل محفظه احتراق می‌گردد اساساً به مقدار زیادی فشار و درجه حرارت آن افزایش یافته است. سپس در محفظه احتراق سوخت می‌سوزد و درجه حرارت گاز به مقدار خیلی بیشتری افزایش می‌یابد. بطوریکه درجه حرارت گاز در ورود به توربین تا حدود 1000°C یا 1832°F (در خلال کار ممتد) می‌باشد. این گازهای داغ پرفشار پس از عبور از توربین منبسط شده و آن را به دوران در می‌آورند. توربین، کمپرسور را به حرکت درمی‌آورد و انرژی باقیمانده آن قادر است نیروی محوری، نیروی رانش یا ترکیبی از هر دو را تولید نماید. هر موتور توربین گاز با جزئی تغییرات مانند سیکل مذکور کار می‌کند.

تعداد مراحل و یا پیکربندی می‌تواند تغییر کند ولی همواره متراکم شدن، گرم شدن و یا انبساط یافتن سیال عامل (در اینجا هوا) یکی پس از دیگری وجود دارد. شکل ۱-۱ سیکل ساده‌ی توربین گاز را نمایش می‌دهد. در این شکل حداقل عناصر یک سیکل توربین گاز مشخص شده است.

- ۱- هوا در (۱) هوای معمولی در شرایط جوی و در دمای محیط می‌باشد.
- ۲- فشار در (۲) بستگی به نوع کمپرسور دارد و می‌تواند بین ۴ تا ۳۰ اتمسفر یعنی ۴ تا ۳۰ برابر در کمپرسورهای مدرن اضافه گردد. در کمپرسورهای معمولی فشار (۲) بین ۲ تا ۱۰ می‌باشد.
- ۳- پره‌های توربین همیشه در معرض درجه حرارت بالا می‌باشند و جنس توربین عامل محدود کننده‌ی درجه حرارت خروجی از اتاق احتراق می‌باشد. یعنی مقدار نسبت سوخت به هوا را تعیین می‌کند.



شکل ۱-۱ سیکل ساده‌ی توربین گاز