



وزارت نیرو

پژوهشگاه نیرو

NRI

Niroo Research Institute



## خبرنامه تخصصی

### گروه پژوهشی پایش و کنترل نیروگاه

شماره ۲، زمستان ۱۳۹۶

«خبرنامه تخصصی گروه پژوهشی پایش و کنترل نیروگاه»

با هدف معرفی و ترویج دانش تخصصی گروه، مستندسازی یافته های نوین پژوهشی و انتشار به

موقع دستاوردهای علمی و عملی گروه، به صورت داخلی منتشر می شود.

موقع دستاوردهای علمی و عملی گروه، به صورت داخلی منتشر می شود.



NRI Combined Cycle Power Plant Simulator  
Developed by NRI © 2013.  
All rights reserved.



[www.nri.ac.ir](http://www.nri.ac.ir)

[M&C@nri.ac.ir](mailto:M&C@nri.ac.ir)







صاحب‌امتیاز: پژوهشگاه نیرو

مدیرمسئول: ادوارد غریبیان

سردبیر: ادوارد غریبیان

مدیر اجرایی: نوذر ایرانی

ویراستار و صفحه‌آرا: بهدخت امیدزاده



#### اهداف:

«بروندادهای تخصصی گروه پژوهشی سیکل و مبدل های حرارتی» با هدف معرفی و ترویج دانش تخصصی گروه، مستندسازی یافته‌های نوین پژوهشی و انتشار به موقع دستاوردهای علمی و عملی گروه، به صورت داخلی منتشر می‌شود.

#### ناشر:

نشانی الکترونیکی: M&C@nri.ac.ir

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان،

پژوهشگاه نیرو، گروه سیکل و مبدل‌های حرارتی

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۷۴۷۳۴

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۰۷۸۲۹۶

#### همکاران این شماره:

سیدعلی سلامتی

علی بخشی



## سیستم مدیریت باطری

بررسی روند تحقیقات کاربردی در زمینه کاربرد کنترل فرایند پیشرفته در صنعت تولید نیروگاهی برای نیروگاه‌های حرارتی



## سیستم مدیریت باتری

### سیدعلی سلامتی

نرم‌افزاری تشکیل شده است که شارژ و دشارژ باتری را ضمن تضمین عملکرد ایمن و قابل اعتماد کنترل می‌کند. همچنین اداره کردن کارکردهای دیگری مانند بالانس سلول و مدیریت گرمایی بر عهده BMS می‌باشد [۲]. با افزایش عرضه خودروهای الکتریکی (EV)<sup>۲</sup> به بازارهای جهانی و اهمیت باتری استفاده شده در این خودروها، نیاز به یک سیستم مدیریت باتری بیشتر احساس می‌شود. از اجزاء اصلی سیستم مدیریت باتری می‌توان به کنترل‌کننده شارژ باتری اشاره کرد. طراحی یک BMS خیره به منظور افزایش طول عمر و عملکرد باتری لازم است. همچنین یکی از وظایف کلیدی BMS، مشاهده حالت‌های باتری و دنبال کردن پارامترهای فیزیکی باتری در حین کهنه‌تر شدن باتری است [۲].

یکی از پارامترهای مهم باتری سطح شارژ باتری (SOC)<sup>۳</sup> است. سطح شارژ باتری عبارت است از نسبت ظرفیت باقیمانده در یک باتری به ظرفیت کل آن و شارژ موجود در الکتروود باتری را بر حسب غلظت یون موردنظر اندازه می‌گیرد. این پارامتر یکی از پارامترهایی است که توسط الگوریتم‌های سیستم مدیریت باتری به کار گرفته

در این شماره از رویداد به معرفی سیستم مدیریت باتری و اهمیت آن در برخی صنایع از جمله اتوموبیل سازی پرداخته می‌شود. از آنجا که ورود به این بحث مستلزم شناخت تاریخچه ای هرچند مختصر از باتری، انواع باتریهای مورد استفاده در صنعت و پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد باتری می‌باشد پس از معرفی ابتدایی سیستم مدیریت باتری و تبیین اهمیت فوق العاده آن در صنعت به این موارد نیز به صورت خلاصه پرداخته شده است.

باتری‌های الکتروشیمیایی در بسیاری از سیستم‌های الکتریکی از اهمیت زیادی برخوردارند، زیرا انرژی شیمیایی ذخیره شده در آنها می‌تواند به انرژی الکتریکی تبدیل شده و در مواقع نیاز به سیستم‌های الکتریکی تحویل داده شود [۱]. باتری‌ها باید در هر لحظه کاری دارای انرژی در حدود مشخص شده باشند که توان تأمین انرژی موردنیاز قطعه الکتریکی موردنظر را داشته باشند.

در اغلب کاربردها، سیستم باتری شامل یک باتری یا مجموعه‌ای از باتری‌ها و یک سیستم مدیریت باتری (BMS)<sup>۱</sup> است. یک BMS از سخت‌افزار و

<sup>3</sup>. State of Charge

<sup>1</sup>. Battery Management Systems

<sup>2</sup>. Electric Vehicle



۳- کاهش وقوع خرابی در وسیله نقلیه به دلیل عیب SOC پایین یا SOH پایین باتری

۴- اندازه و هزینه بهینه باتری و ژنراتور

۵- کاهش هزینه ضمانت باتری

۶- بهبود ایمنی و وسیله نقلیه با تعیین بهترین استفاده از قابلیت‌های باتری برای خصوصیات مرتبط با ایمنی

پس دانستن حالت شارژ باتری یکی از فاکتورهای مهم برای بهینه‌سازی مصرف سوخت خودرو و در پی آن کاهش میزان آلودگی و به طور کلی بهره‌وری توزیع انرژی است. از آنجایی که هر باتری دارای دو پایانه هم به عنوان ورودی و هم به عنوان خروجی است و از طرفی برای کنترل سیستم باتری نیاز به دانستن حالت شارژ باتری در هر لحظه ضروری است، بنابراین نیاز به استفاده از روش‌هایی که با استفاده از جریان و ولتاژ پایانه باتری و استفاده از دینامیک باتری مدل شده، انرژی داخلی آن را در حالت کار پیوسته باتری تخمین زده و همچنین کنترل نمایند ضروری است. در ضمن کنترل باتری به گونه‌ای که سطح شارژ باتری همواره در یک محدوده مشخص از قبل تعیین شده باشد باعث افزایش چشمگیر عمر باتری و سیکل‌های شارژ و دشارژ آن می‌گردد. بنابراین باید با استفاده از تخمین‌گر سطح شارژ و روش‌های کنترلی، حالت شارژ باتری را به صورت مطلوب کنترل کرد.

می‌شود تا انرژی ذخیره شده در مجموعه باتری را تخمین بزند. همچنین برای کاربردهای بالانس کردن سلول فقط کافی است SOC هر سلول را نسبت به سلول‌های دیگر در رشته باتری بدانیم. از طرفی ظرفیت سلول با گذشت عمر آن به تدریج کاهش پیدا می‌کند و علاوه بر عمر سلول، دما و سرعت دشارژ نیز در این امر مؤثر هستند. این کاهش ظرفیت با معیار کاهش سطح سلامت باتری (SOH)<sup>۱</sup> سنجیده می‌شود. به عنوان مثال، در یک سلول کهنه در حالت شارژ کامل، SOC فقط ۸۰ درصد خواهد بود. بنابراین برای یک تخمین دقیق باید فاکتورهای کهنه شدن سلول و عوامل محیطی را نیز در محاسباتمان وارد کنیم [۳]. اطلاع از SOH باتری این امکان را فراهم می‌سازد تا درباره عملکرد آینده باتری اظهار نظر کنیم، از قابلیت‌های آن برای تأمین توان بهترین استفاده را داشته باشیم و مهم‌تر از همه با دانستن انتهای عمر باتری، جایگزینی برای آن در نظر بگیریم. برای مثال در خودروهای الکتریکی و الکتریکی ترکیبی (HEV)<sup>۲</sup>، اطلاع دقیق از SOC و SOH باتری، پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریت توان پیشرفته را میسر ساخته و بنابراین مزایای زیر در رابطه با هزینه و ایمنی حاصل می‌شود [۴]:

۱- کاهش نرخ مصرف سوخت

۲- افزایش عمر باتری با نگهداری آن در یک محدوده SOC بهینه

<sup>2</sup>. Hybrid Electric Vehicles

<sup>1</sup>. State of Health



معرفی باتری و پارامترهای موثر در آن از جمله وضیت شارژ می‌پردازیم.

### باتری‌ها

یکی از تجهیزات مهم و پایه خودروهای الکتریکی و الکتریکی ترکیبی، یک منبع ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل است. یکی از این منابع ذخیره انرژی باتری الکتروشیمیایی می‌باشد. باتری‌های الکتروشیمیایی دارای اهمیت زیادی در بسیاری از سیستم‌های الکتریکی هستند. باتریوسپله‌ای است که انرژی شیمیایی موجود در مواد فعال خود را از طریق یک واکنش الکتروشیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و در مواقع نیاز به سیستم‌های الکتریکی تحویل می‌دهد. جزء پایه الکتروشیمیایی باتری، سلول نامیده می‌شود. یک باتری از دو یا چند سلول تشکیل شده است که از نظر الکتریکی به طور سری به هم متصل شده‌اند. هر سلول باتری شیمیایی از چهار جزء اصلی تشکیل شده است: الکتروود مثبت، الکتروود منفی، صفحه جداکننده<sup>۱</sup> و الکتروولیت. باتری را با ظرفیت کولومتریکی<sup>۲</sup> آن مشخص می‌کنند که عبارت است از مقدار آمپرساعتی که طی خالی شدن باتری از حالت شارژ کامل تا زمان رسیدن ولتاژ پایانه‌های آن به ولتاژ قطع می‌توان از باتری کشید [۳].

از طرفی، استک‌های باتری در HEV معمولاً از تعداد زیادی باتری که بطور سری بهم پیوسته‌اند، برای ایجاد ولتاژ ۳۰۰-۴۰۰ ولت DC تشکیل شده‌اند. وجود تفاوت‌هایی در خصوصیات شیمیایی سلول‌ها نظیر امپدانس داخلی و ظرفیت، عدم یکسانی دمای سلول‌های قرار گرفته درون یک استک و تفاوت‌های معمول در سیکل‌های شارژ و دشارژ منجر به پدیده‌ی عدم تعادل شارژ بین سلول‌های مختلف یک استک باتری خواهد گشت. با توجه به اینکه سیستم کنترل شارژ باتری‌ها معمولاً با توجه به ولتاژ کل استک تصمیم‌گیری می‌کند، احتمال آنکه ولتاژ یک سلول مجزا در حین شارژ از حد بیشینه‌ی تعیین شده بالاتر رود و یا در حین دشارژ بیشتر از حد مجاز تخلیه گردد وجود دارد. اگر یک سلول لیتیوم یون بیش از اندازه شارژ گردد، فشار و دمای آن سلول به شدت بالا رفته و می‌تواند حتی منجر به منفجر شدن سلول شود؛ درحالی‌که تخلیه بیش از حد سلول‌ها موجب کاهش شدید ظرفیت مفید آن‌ها می‌گردد. در صورت وقوع چنین رخدادی، استک باتری تأمین‌کننده‌ی انرژی خودرو می‌تواند با پدیده‌هایی نظیر از دست دادن ظرفیت یک یا چند سلول و یا حتی انفجار روبرو گردد. بنابراین استفاده از روشی که بتواند با پدیده‌ی عدم تعادل بین سلول‌های باتری مقابله کند بسیار مهم می‌باشد. در این شماره از رویداد به

<sup>2</sup>.Coulometric Capacity

<sup>1</sup>.Separator



## تاریخچه باتری

قدمت استفاده از باتری به ۲۵۰ سال پیش از میلاد مسیح برمی‌گردد که در بغداد از ظروف مسی به عنوان سلول‌های گالوانیک استفاده می‌شد. این ظروف حاوی آهن و مس به عنوان الکترود به همراه یک محلول اسید آلی بودند.

دو نفر که در توسعه علم الکتروشیمی و باتری نقش عمده‌ای داشته‌اند لوئیجی گالوانی<sup>۱</sup> و آلساندرو ولتا<sup>۲</sup> بوده‌اند [۳]. گالوانی در سال ۱۷۹۰ توانست توسط دو میله فلزی از جنس آهن و مس، عضلات پای یک قورباغه مرده را به حرکت درآورد. ولتا این پدیده را وابسته به ایجاد جریان الکتریکی بین الکترودهای آهن و مس دانست. وی یک پیل طراحی کرد که شامل دو الکترود نقره و روی بود و بین دو صفحه الکترود، یک صفحه آغشته به محلول الکترولیت قرار داشت. او این اختراعش را در سال ۱۸۰۰ به ثبت رساند و در سال ۱۸۳۴ مایکل فاراده<sup>۳</sup> قوانین الکتروشیمی حاکم بر کار ولتا را به دست آورد. در حقیقت این کار فاراده، پلی را بین انرژی شیمیایی و الکتریکی برقرار ساخت.

جدیدترین مشکل در راه توسعه باتری تشکیل گاز در الکترودها بود. مشکل از آنجا ناشی می‌شد که انرژی که صرف تشکیل گاز می‌گشت نمی‌توانست بازیافت شود. لکلانسه<sup>۴</sup> در سال ۱۸۶۶

بهترین راه را برای حل این مشکل یافت. او از اکسید منگنز که برای بهبود رسانایی با کربن مخلوط شده بود و روی یک صفحه گرافیتی قرار داشت، به عنوان الکترود مثبت استفاده نمود. وی همچنین از روی به عنوان الکترود منفی و از کلرید آلومینیوم به عنوان الکترولیت استفاده کرد. او توانست یک ولتاژ مدار باز ۱/۵ ولتی به کمک این باتری تولید نماید.

در سال ۱۸۹۵ تأثیر بکارگیری فلزات مختلف به عنوان الکترود و همچنین محلول با غلظت‌های مختلف اسید سولفوریک به عنوان الکترولیت توسط گاستون پلنت<sup>۵</sup> بررسی شد. او باتری را به شکل یک ساندویچ که از لایه‌های نازک هادی تشکیل شده بود ساخت. این صفحات فلزی توسط پارچه زبری جدا شده و در یک ظرف استوانه‌ای قرار داشتند که این ظرف با محلول اسید سولفوریک رقیق پر می‌شد و پس از شارژ و شکل‌گیری لایه‌های فعال می‌توانست ولتاژی در حدود ۲/۷ ولت ایجاد کند. این کار آغازی بر ایجاد باتری‌های قابل شارژ بود. یکی از اولین کاربردهای این‌گونه باتری‌ها برای روشنایی خانه‌ها بود که همراه با یک دینام که نقش شارژر را داشت توسط هنری تئودور در سال ۱۸۸۲ به کار گرفته شد.

<sup>4</sup> .Lechlanche

<sup>5</sup> .Gaston Plante

<sup>1</sup> .Luigi Galvani

<sup>2</sup> .Alessandro Volta

<sup>3</sup> .Michael Faraday





بین سال های ۱۹۰۵-۱۸۹۵ والدمر جانگنر<sup>۱</sup> در سوئد و توماس ادیسون<sup>۲</sup> در آمریکا، باتری های نیکل-کادمیوم، آلکالاین و نیکل-آهن را پایه گذاری کردند. این دست از باتری ها نیز همانند باتری های سرب-اسید قابل شارژ بودند. آنچه که باعث استفاده از محلول آلکالاین به عنوان الکترولیت می شد، امکان استفاده از بازه وسیعی از مواد به عنوان الکترولیت بود.

تلاش های دیگری نیز در زمینه توسعه باتری صورت گرفته است. بیشترین تلاش ها برای بهبود پارامترهای مختلف باتری مانند چگالی انرژی، انرژی مخصوص، عمر مفید، نرخ تخلیه خودبخود و غیره بوده است. همچنین در زمینه توسعه باتری های قابل حمل نیز تلاش هایی صورت گرفته است. از جمله می توان به ایجاد باتری های نیکل-متال هیدرید در سال ۱۹۹۰ و باتری لیتیم-یون در سال ۱۹۹۱ اشاره کرد. دو عامل مهم دیگر که به توسعه و پیشرفت صنعت باتری انجامید، نیاز به چگالی انرژی بیشتر و همچنین توجه به مسائل زیست محیطی باتری است [۵].

### تکنولوژی های باتری

تاکنون تحقیقات زیادی بر روی باتری های شیمیایی صورت گرفته است. این باتری ها بر حسب ساختار، راندمان، طول عمر، سهولت

استفاده و قیمت محصول تقسیم بندی می شوند. باتری های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی و الکتریکی ترکیبی عبارت اند از: باتری های سرب-اسیدی<sup>۳</sup>، باتری های نیکلی اعم از نیکل-آهن<sup>۴</sup>، نیکل-کادمیوم<sup>۵</sup> و نیکل-فلز و باتری های لیتیومی مانند لیتیم-پلیمر (Li-Pol)<sup>۶</sup> و لیتیم-یون (Li-ion)<sup>۷</sup> [۶].

### باتری های سرب-اسید

این باتری ها یکی از متداولترین باتری های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی ترکیبی هستند. یک سلول سرب-اسیدی دارای پنج جزء اصلی است که عبارتند از الکترولیت منفی، الکترولیت مثبت، الکترولیت، صفحه جداکننده و جداره های سلول. الکترولیت منفی از جنس سرب اسفنجی و الکترولیت مثبت در هنگام شارژ کامل، از جنس دی اکسید سرب ( $PbO_2$ ) می باشد. در طول زمان تخلیه شدن، الکترون ها از سمت بار به سمت الکترولیت مثبت جاری می شوند و این موضوع منجر به تغییر ترکیب شیمیایی این الکترولیت به سولفات سرب ( $PbSO_4$ ) می شود. الکترولیت، مدار داخل یک باتری را با تأمین کردن یون ها برای الکترولیت های مثبت و منفی تکمیل می کند. اسید سولفوریک رقیق ( $H_2SO_4$ ) در باتری های سرب-اسیدی به عنوان الکترولیت به

<sup>۵</sup>. Nickel-Metal

<sup>۶</sup>. Lithium-Polymer

<sup>۷</sup>. Lithium-Ion

<sup>۱</sup>. Waldmer Jungner

<sup>۲</sup>. Thomas Edison

<sup>۳</sup>. Lead-Acid

<sup>۴</sup>. Nickel-Iron



کار می‌رود. در حالت شارژ کامل این محلول تقریباً متشکل از ۲۵٪ اسید و ۷۵٪ آب است. یک صفحه جداکننده در هر سلول باتری استفاده می‌شود تا الکترودهای مثبت و منفی را از نظر الکتریکی از یکدیگر جدا کند. جنس این صفحه باید به گونه‌ای باشد که اجازه انتقال یون بین الکترودها و الکترولیت را بدهد [۳]. به طور کلی بسته به روش ساخت باتری، دو نوع باتری سرب-اسیدی وجود دارد که عبارتند از: باتری شناور و باتری سربسته. این دو نوع باتری از نظر عملکرد نیز متفاوت هستند.

تمامی باتری‌های سرب-اسیدی بر اساس یک واکنش شیمیایی یکسان عمل می‌کنند. زمانی که باتری تخلیه می‌شود، مواد فعال در الکترودها (دی‌اکسید سرب در الکتروود مثبت و سرب اسفنجی در الکتروود منفی) با اسید سولفوریک الکترولیت واکنش می‌دهد و منجر به تولید سولفات و آب می‌شوند. در زمان شارژ سولفات سرب در هر الکتروود دوباره به دی‌اکسید سرب (الکتروود مثبت) و سرب اسفنجی (الکتروود منفی) تبدیل می‌شود و یون‌های سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) دوباره به محلول الکترولیت برمی‌گردند تا اسید سولفوریک شکل گیرد [۳].

### باتری‌های نیکلی

نیکل نسبت به سرب سبک‌تر است و از خواص الکتروشیمیایی بسیار خوبی برخوردار می‌باشد. این

نوع باتری‌ها به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند: نیکل-آهن، نیکل-روی، نیکل-کادمیوم و نیکل-هیدرید فلز [۶].

باتری نیکل-آهن متشکل از الکتروود مثبتی از جنس نیکل-هیدروکسی‌اکسید ( $NiOOH$ )، الکتروود منفی آن‌ها از جنس آهن نقره‌ای و آن محلول غلیظ هیدروکسید پتاسیم (معمولاً  $gr/lit$  ۲۴۰) حاوی هیدروکسید لیتیم ( $gr/lit$  ۵۰) می‌باشد. از مزایای این باتری می‌توان به چگالی توان بالا نسبت به باتری‌های سرب-اسیدی و قابلیت تحمل عمیق آن اشاره کرد.

باتری نیکل-کادمیوم انرژی مخصوصی در همان حدود باتری سرب-اسیدی دارد. الکتروود مثبت و الکتروود منفی در این نوع باتری‌ها مثل باتری‌های نیکل آهن می‌باشد. الکتروود منفی از کادمیوم فلزی تشکیل شده است. از مزایای این باتری‌ها می‌توان به توان مخصوص بالا (بیشتر از  $W/kg$  ۲۲۰)، چرخه عمر طولانی (بالا تر از ۲۰۰۰ سیکل)، طولرانس بالای مکانیکی و الکتریکی، افت ولتاژ کم در گستره وسیعی از جریان‌های تخلیه، قابلیت شارژ سریع، گستره دمای کاری وسیع، نرخ تخلیه خودبخودی<sup>۱</sup> بسیار پایین، خوردگی ناچیز و وجود در اندازه‌های مختلف اشاره کرد.

باتری‌های نیکل-هیدرید فلز مشخصه‌ها و خصوصیات شبیه به باتری‌های نیکل-کادمیوم دارند، اما تفاوت عمده بین این دو باتری این است که در این نوع از باتری‌ها از هیدروژن موجود در

<sup>۱</sup> Self Discharging.



هیدرید فلز به عنوان ماده فعال به جای کادمیوم استفاده می‌شود. باتری‌های نیکل-فلز دارای انرژی مخصوص و ظرفیتی بیشتر از باتری‌های نیکل-کادمیوم و کارکرد و ولتاژی مثل باتری‌های نیکل-کادمیوم می‌باشند.

**باتری‌های لیتیومی**

لیتیم سبک‌ترین فلز می‌باشد و از نظر مشخصه‌های الکتروشیمیایی بسیار عالی می‌باشد. ولتاژ ترمودینامیکی بسیار بالا و در نتیجه انرژی و توان مخصوص بسیار بالایی دارد. این نوع باتری‌ها از دو دسته عمده تشکیل می‌شوند: لیتیم-پلیمر و لیتیم-یون [۶].

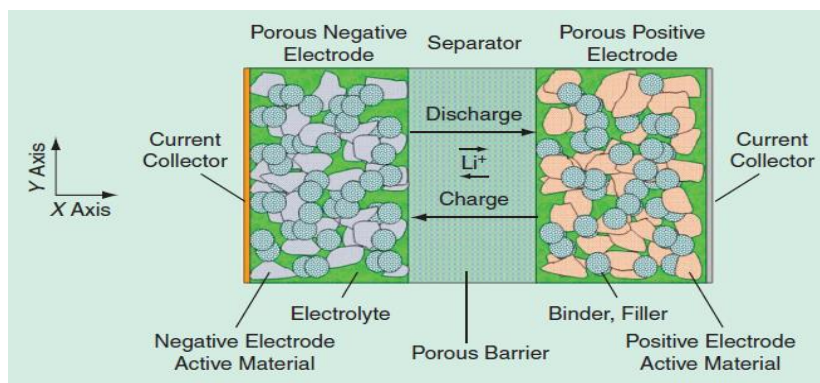
در باتری لیتیم-پلیمر از نوعی ماده که قابلیت هدایت یون را دارد به عنوان الکترولیت استفاده شده است. این باتری دارای انرژی مخصوص و توان مخصوص بالایی است. الکترولیت منفی از فلز لیتیم درست شده است و الکترولیت مثبت از اکسید فلز واسط ( $M_y O_z$ ) یک ساختار لایه‌ای دارد که می‌توان یون‌های لیتیم را در آن جای داد (حین فرایند تخلیه شدن) و یا از آن خارج نمود (حین فرایند شارژ شدن). در هنگام تخلیه یون‌های لیتیم تشکیل شده در الکترولیت منفی از طریق الکترولیت جامد به الکترولیت مثبت می‌روند و در ساختار کریستالی آن جای می‌گیرند. در هنگام شارژ شدن، این عملیات به طور معکوس انجام می‌گیرد. یکی از این باتری‌ها که بیشترین استفاده را دارد باتری

$Li/SPE/V_6O_{13}$  است. مشخصه‌های اصلی این باتری‌ها عبارتند از: انرژی مخصوصی معادل  $155 Wh/kg$  و توان مخصوصی برابر  $315 W/kg$ . باتری لیتیم-یون برای خودروهای الکتریکی و الکتریکی ترکیبی بسیار مناسب است؛ چرا که دارای انرژی مخصوص بالا، توان مخصوص بالا، بازده انرژی بالا، بازده بالا در دماهای زیاد است و قابل بازیافت نیز می‌باشد [۲-۳]. یک باتری لیتیم-یون دارای چهار جزء اصلی است (شکل Error! No text of specified style in document. الکترولیت. مثبت این نوع از باتری‌ها از موادی با رابطه شیمیایی کلی  $Li_{1-x}M_yO_z$  و الکترولیت منفی از کربن-لیتیم  $Li_zC$  یا معمولاً از گرافیت  $C$  (که یک ماده بین‌لایه‌ای<sup>۱</sup> است) تشکیل شده است. الکترولیت مثبت به پایانه مثبت و الکترولیت منفی به پایانه منفی سلول متصل شده است. یک صفحه جداکننده که یک واسط مشبک نازک می‌باشد، الکترولیت مثبت را از الکترولیت منفی جدا می‌کند. این صفحه جداکننده که یک عایق الکتریکی است، اجازه نمی‌دهد الکترون‌ها بین الکترولیت مثبت و منفی جریان پیدا کنند، اما به دلیل مشبک بودن، اجازه عبور یون‌ها را به وسیله الکترولیت می‌دهد [۲]. الکترولیت نوعی مایع حلال آلیاست که از ذرات باردار تشکیل شده است. این ذرات باردار می‌توانند در پاسخ به یک تغییر پتانسیل الکتروشیمیایی حرکت کنند. در برخی باتری‌های  $Li-ion$ ، الکترولیت یک جامد

<sup>۱</sup>. Intercalation material

صورت برعکس اتفاق می‌افتد. از مواد به کار رفته در الکتروود مثبت می‌توان به موارد  $Li_{1-x}CoO_2$ ،  $Li_{1-x}NiO_2$  و  $Li_{1-x}Mn_2O_4$  اشاره کرد که دارای مزایایی از قبیل پایداری در هوا، ولتاژ بالا و قابلیت بازگشت‌پذیری در واکنش‌ها هستند. بر اساس این که در الکتروود مثبت کدام یک از موارد بالا به کار رفته باشد، باتری لیتیم-یون به زیرشاخه‌هایی با پایه نیکل، پایه کبالت و پایه منگنز تقسیم نمود.

پلیمری است که هم به عنوان واسط هادی یون و هم به عنوان جداکننده عایق الکترونی به کار می‌رود. الکتروود مثبت، الکتروود منفی و جداکننده همگی در داخل الکتروولیت فرو رفته‌اند و الکتروولیت تمام منافذ مواد جامد را پر می‌کند. در هر دو نوع این باتری‌ها، ذرات باردار داخل باتری یون  $Li^+$  است. در هنگام تخلیه، یون‌های لیتیم از الکتروود منفی (گرافیت) جدا شده و به الکتروود مثبت وارد می‌شوند. در هنگام شارژ، این عمل به



شکل -Error! No text of specified style in document. شماتیک یک سلول لیتیم-یون [۲]

بیشتری می‌تواند داشته باشد، به طوری که در باتری سرب-اسیدی حداکثر SOC بین ۴۰٪ تا ۹۰٪ است، ولی در باتری‌های لیتیم-یون محدوده SOC حدود ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ می‌باشد [۱]. این خواص سودمند به همراه هزینه‌های رو به کاهش، باتری‌های لیتیم-یون را به عنوان یک انتخاب عمده برای نسل‌های بعدی صنایع خودرو و صنایع فضایی قرار داده است.

در بخش خودرو، تقاضای رو به افزایش برای HEV و EV، سازندگان خودرو را مجبور کرده است تا تکنولوژی‌های قابل اعتماد دیگری مانند

در میان تکنولوژی‌های معرفی شده برای باتری، باتری‌های لیتیم-یون به دلیل عملکرد خوب، چگالی انرژی بالا و قابلیت اعتماد بالایشان به طور گسترده در قطعات الکترونیکی قابل حمل زیادی از جمله موبایل، دوربین‌های دیجیتال و لپ‌تاپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. در مقایسه با تکنولوژی‌های دیگر باتری، باتری‌های لیتیم-یون بهترین نسبت انرژی به وزن را فراهم کرده و دارای دشارژ خودبخودکنندی می‌باشند [۲]. در مقایسه با باتری‌های سرب-اسیدی، SOC آن‌ها تغییرات



فاراده می‌باشد. این رابطه را به صورت زیر هم می‌توان نوشت:

**Error! No text of specified style in )**

$$Q_T = 0.278F \frac{m_R n}{M_m} \quad (2\text{-document.})$$

که در آن  $m_R$  جرم مواد تحت واکنش بر حسب کیلوگرم و  $M_m$  جرم مولی مواد تحت واکنش می‌باشند.

در عمل به خاطر محدودیت‌های عملی مانند نحوه شارژ باتری، ظرفیت عملی  $Q_p$  در مقایسه با ظرفیت تئوری  $Q_T$  همیشه از مقدار کمتری برخوردار است. ظرفیت عملی باتری از رابطه زیر به دست می‌آید:

**Error! No text of specified style )**

$$Q_p = \int_{t_0}^{t_{cut}} i(t) dt \quad (3\text{-in document.})$$

که در آن  $t_0$  لحظه‌ای است که باتری به طور کامل شارژ است و  $t_{cut}$  لحظه‌ای است که ولتاژ پایانه باتری به مقدار انتهایی خود ( $V_{cut}$ ) می‌رسد.

### سطح شارژ باتری

سطح شارژ عبارت است از نسبت ظرفیت باقیمانده در یک باتری به ظرفیت کل آن. البته ظرفیت باتری شدیداً به مقدار جریان کشیده شده از آن وابسته است. به عنوان مثال اگر جریان کشیده شده از یک باتری کاهش یابد، ظرفیت آن نیز

باتری‌های لیتیوم-یون را مد نظر قرار دهند تا آن را جایگزین تکنولوژی‌های معاصر باتری مانند باتری‌های سرب-اسید و باتری‌های نیکل-هیدرید فلز کنند. از آنجایی که باتری‌های لیتیوم-یون امکان احتراق یا انفجار را در شرایط شارژ اضافی یا سوء مصرف دارند، طراحی BMS مناسب برای این باتری‌ها نیز مسئله بسیار مهمی است [۲].

### پارامترهای باتری

برخی از پارامترهای مهم یک باتری عبارتند از: ظرفیت باتری، سطح شارژ باتری، سطح سلامت باتری، انرژی مخصوص باتری، تخلیه خودبخود باتری [۳].

### ظرفیت باتری

ظرفیت باتری مقدار بار آزاد تولید شده در داخل باتری است که واحد آن آمپرساعت (Ah) می‌باشد و هر آمپرساعت معادل ۳۶۰۰ کولن در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت باتری را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

**Error! No text of specified style )**

$$Q_T = x \times n \times F \quad (1\text{-in document.})$$

که در آن  $x$  تعداد مول تحت واکنش در کل طول فرایند تخلیه شدن،  $n$  تعداد الکترون‌های تولید شده توسط الکتروود منفی و  $F = 96412 \frac{C}{mol}$  ثابت



نشان داده می‌شود. پارامتر SOH می‌تواند از روی ظرفیت، مقاومت داخلی و دیگر پارامترهای باتری مانند امپدانس AC، نرخ دشارژ خودبخودی و چگالی توان به دست آید. SOH از روی ظرفیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

**Error! No text of specified style in )**

$$SOH(t) = \frac{C_{act}}{C_{nom}} \times 100\% \quad (\text{۷-document.})$$

که  $C_{act}$  ظرفیت واقعی باتری و  $C_{nom}$  ظرفیت نامی آن است.

### مراجع

- [1]. M. Chen, and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 2, pp. 504-511, Jun. 2006.
- [2]. N. A. Chaturvedi, R. Klein, J. Christensen, J. Ahmed, and A. Kojic, "Algorithms for Advanced Battery-Management Systems: Modeling, estimation, and control challenges for lithium-ion battery," IEEE Control Syst. Mag., vol. 30, no. 3, pp. 49-68, Jun. 2010.
- [۳]. امین رضایی پیش‌رابط، تخمین پارامترهای شارژ، تخلیه و وضعیت سلامت باتری با استفاده از روش‌های شناسایی و تخمین غیرخطی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، شهریور ۱۳۸۶.
- [4]. R. J. Grube, Automotive Battery State-of-Health Monitoring Methods, M.Sc. Thesis, Wright State University, Dec. 2008.

افزایش می‌یابد. لذا می‌توان تغییرات SOC را به صورت زیر تعریف کرد:

**Error! No text of specified style )**

**in**

$$SOC_T(t) = Q_T - \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (\text{۴-document.})$$

و یا به صورت دیفرانسیلی بیان کرد:

**Error! No text of specified style )**

$$\Delta SOC = -\frac{idt}{Q_{(i)}} \quad (\text{۵-in document.})$$

که  $Q_{(i)}$  ظرفیت باتری است هنگامی که جریان آن  $i$  باشد. در نتیجه داریم:

**Error! No text of specified style )**

**in**

$$SOC(t) = SOC_0 - \int_0^t \frac{i dt}{Q_{(i)}} \quad (\text{۶-document.})$$

که  $SOC_0$  وضعیت اولیه شارژ در باتری است.

### سطح سلامت باتری

وضعیت سلامت باتری (SOH) عبارت است از توانایی باتری برای ذخیره انرژی، دریافت و تحویل جریان‌های بالا و نگهداری شارژ در زمان‌های طولانی [۸]. کل شارژ ذخیره شده در یک سلول کاملاً شارژ شده، با استفاده مکرر از باتری کاهش می‌یابد، زیرا مواد فعال موجود در صفحات سلول با مکانیزم‌هایی همچون کاهش سطح فعال سلول، کم می‌شود. این کاهش ظرفیت با کاهش SOH



battery,” *Energy Convers. Manage.*, vol. 51, pp. 2857–2862, Jun. 2010. [8]. B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, and C. M. Bingham, “Nonlinear Observers for Predicting State-of-Charge and State-of-Health of Lead-Acid Batteries for Hybrid-Electric Vehicles”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 3, pp. 783-794, May 2005.

- [5]. C. Alaoui and Z. M. Salameh, “Experiments in Fast Charging Lead Acid Electric Vehicle Batteries”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 5, pp. 3326-3331, 2003.
- [6]. M. Ehsani, Y. GAO, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, New York: CRC Press LLT, 2005.
- [7]. K. M. Tsang, L. Sun, and W. L. Chan, “Identification and modeling of Lithium ion

## بررسی روند تحقیقات کاربردی در زمینه کاربرد کنترل فرایند پیشرفته در

### صنعت تولید نیروگاهی برای نیروگاه‌های حرارتی

نویسنده: علی بخشی

#### مقدمه

که هر اغتشاش حلقه داخلی توسط کنترل‌کننده همان حلقه پیش از تاثیر روی متغیر اصلی (خروجی) اصلاح می‌شود. سیستم کنترل حلقه داخلی بر روی ساقه شیر آب تغذیه اعمال می‌شود که پاسخ دینامیکی سریع‌تری نسبت به حلقه بیرونی دارد، بنابراین سرعت و دقت پاسخ فرایند بیشتر می‌شود.

با توجه به اهمیت فراوان کاربرد کنترل فرایند پیشرفته در صنعت نیروگاهی در چند دهه‌ی گذشته محققان زیادی بر روی روش‌هایی از قبیل کنترل پیش‌بین، کنترل مقاوم، روش‌های مبتنی بر کنترل هوشمند شامل شبکه‌های عصبی، کنترل فازی، کنترل تطبیقی و ... به منظور افزایش بازدهی و کارایی یک نیروگاه سیکل ترکیبی استفاده نموده‌اند که در ادامه به بررسی دقیق مقالات به چاپ رسیده و اختراعات به ثبت رسیده معتبر مبنی بر کاربرد روش‌های کنترل پیشرفته در زمینه نیروگاه‌های سیکل ترکیبی پرداخته می‌شود.

#### بررسی مقالات به چاپ رسیده در مجلات معتبر

در چند دهه‌ی گذشته روش‌های کنترل پیشرفته از قبیل کنترل‌کننده‌های PID خودتنظیم، کنترل

در چند دهه‌ی گذشته شاهد کاربرد کنترل فرایند پیشرفته به منظور کنترل بخش‌های مختلف نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌باشیم. امروزه بطور کلی روش‌های کنترل فرایند پیشرفته به دلیل توانایشان در بکارگیری محدودیت‌های فرایند در سیستم کنترل توجه زیادی را در صنعت به خود جلب نموده‌اند. امروزه شاهد تغییرات شدید و ناگهانی بار شبکه بخصوص اختلاف زیاد بار در شب و روز هستیم. بنابراین استفاده از تکنیک کنترلی که متغیرهای مهم نیروگاه را در محدوده‌ی قابل قبول قرار دهد، اهمیت زیادی دارد. در دیگ بخار نیروگاه متغیرهای مختلفی مانند دمای بخار، سطح آب درام و فشار بخار وجود دارند. به عنوان مثال سطح آب درام متغیر مهمی است که با محدودیت‌های ایمنی مشخص شده کنترل می‌شود. در عمل بخاطر وجود محدودیت‌ها بر روی مقدار جریان آب تغذیه و همچنین عدم قطعیت پارامترها و عدم دقت مدل‌سازی، کنترل سطح آب درام در یک نیروگاه سیکل ترکیبی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. برای غلبه بر این مشکل‌ها از کنترل آبشاری یا تودرتو استفاده می‌شود. به طوری





فرستاده می شود. لازم به ذکر است در بسیاری از کنترل کننده ها به علت حساسیت عبارت مشتق نسبت به نویز و دشواری اجرا، از آن صرف نظر و کنترل را به صورت PI پیاده سازی می کنند. سیگنال  $u(t)$  خروجی کنترل کننده PID براساس نسبتی از خطای کنونی سیستم (عملکرد حاضر) به اضافه مجموع خطاهای سیستم (رفتار گذشته) به اضافه مشتق خطای کنونی (تخمین خطی رفتار آینده) محاسبه می شود و برای اصلاح خطا به سیستم اعمال می گردد. ضریب تناسبی  $K_p$  سرعت سیستم را افزایش می دهد و خطای حالت دایم را تا حدودی کاهش می دهد، افزودن جمله انتگرالی (ضریب  $K_i$ ) خطای حالت دایم را صفر می نماید اما مقدار زیادی نوسانات ناخواسته (فراجش) به پاسخ گذرا اضافه می نماید. ضریب مشتق گیر  $K_d$  نوسانات پاسخ گذرا را تضعیف کرده و پاسخ پله را به شکل پله ایده آل نزدیک می کند. مسأله اساسی در طراحی این کنترل کننده تنظیم صحیح این ضرایب برای رسیدن به پاسخ مطلوب است. یک روش پیشنهادی برای حل این مسأله تنظیم اتوماتیک این ضرایب برای رسیدن به پاسخ مطلوب تحت عنوان روش های PID خودتنظیم می باشد.

تمامی مقالات مورد بررسی قرار گرفته در این بخش به نوعی با بکارگیری کنترل کننده PID و خانواده آن سعی در بهبود عملکرد یکی از زیرسیستم های واحد گازی و یا بخار نیروگاه سیکل ترکیبی از قبیل سوپرهیتر، ری هیتر و ... داشته اند. این روش کنترلی به عنوان یک روش

کننده های پیش بین، کنترل کننده های مقاوم، کنترل کننده های تطبیقی، کنترل بهینه شامل روش های LQR و LQG، سیستم های کنترل هوشمند شامل شبکه های عصبی، کنترل فازی و الگوریتم های تکاملی در سطوح مختلف هرم کنترل نیروگاه های حرارتی مورد توجه محققان قرار گرفته اند. بدین منظور برای بررسی جزئیات روش های ذکر شده به جمع بندی و بررسی مزایا و معایب هر کدام از روش ها پرداخته می شود.

### روش های مبتنی بر کنترل کننده های PID

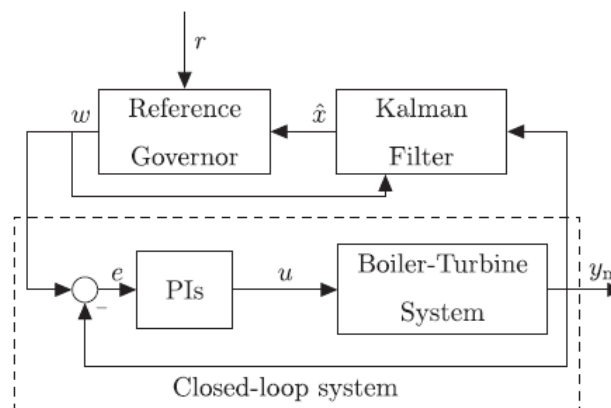
کنترل کننده های PID از رایج ترین نمونه های الگوریتم کنترل بازخوردی هستند که در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار، کنترل دما و ... کاربرد دارند. این روش در اوایل قرن بیستم با مشاهده رفتار سکان بان ها و با هدف اولیه هدایت خودکار کشتی ها پیشنهاد گردید. بعداً در بسیاری از فرایندها انواع مکانیکی این کنترل کننده به کار گرفته شد. این کنترل کننده ها مقدار خطا بین خروجی فرایند و مقدار ورودی مطلوب را محاسبه می نمایند. هدف طراحی به حداقل رساندن این خطا با تنظیم ورودی های کنترل فرایند است. این کنترل کننده از سه قسمت مجزا به نام های تناسبی، انتگرالی و مشتق گیر تشکیل شده که هر کدام از آنها سیگنال خطا را به عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام داده و در نهایت خروجیشان با هم جمع می شود. خروجی این مجموعه که همان خروجی کنترل کننده PID است برای اصلاح خطا به سیستم

قوانین کنترلی است. این شیوه بطور عمده ناشی از کارلوپونتریاگین و همکارانش در اتحاد شوروی و ریچارد بلمن در آمریکا است. موضوع کنترل بهینه مسأله یافتن یک قانون کنترلی برای سیستم داده شده به گونه‌ای است که معیار بهینگی معینی حاصل شود. در حالت کلی یک مسأله کنترلی دارای تابع هزینه است که تابعی از متغیرهای حالت و کنترلی است. یک کنترل بهینه یک مجموعه معادله دیفرانسیل است که مسیرهای متغیرهای کنترلی را توصیف می‌کند که تابع هدف را بهینه کنند. کنترل بهینه را می‌توان از اصل ماکسیمم پونتریاگین بدست آورد. در این راستا می‌توان به روش‌هایی چون LQR و LQG اشاره نمود. بعنوان نمونه در [۲] با بکارگیری الگوریتم کنترل بهینه به مقایسه روش‌های PI، روش MPC مستقیم و روش MPC به همراه رفرنس گاورنر پرداخته شده است. در شکل ۱ و ۲ به معرفی ساختار این دو کنترل‌کننده پرداخته شده است.

کنترل کلاسیک از توانایی کافی در کنترل سیستم‌های صنعتی برخوردار می‌باشد. بعلاوه با بکارگیری تکنیک مناسب می‌توان اغتشاشات ناخواسته را در این سیستم‌ها حذف نمود. در برخی مقالات هدف سیستم کنترلی پایداری و در برخی هدف ردیابی ورودی مرجع دلخواه می‌باشد. همچنین می‌توان از شبکه‌های عصبی نیز به منظور بروزرسانی ضرایب کنترل‌کننده‌های PID استفاده نمود. این امر سبب بهبود عملکرد این کنترل‌کننده خواهد شد، چرا که بسته به تغییرات بوجود آمده در سیستم، ضرایب کنترل‌کننده نیز تغییر کرده و منجر به تضمین پایداری حلقه بسته تحت شرایط جدید خواهد شد. بعنوان نمونه در [۱] به مقایسه دو ساختار کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده PID با قابلیت دفع اغتشاش پرداخته شده است.

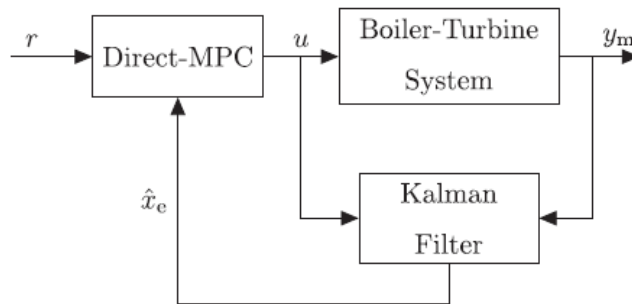
### روش‌های مبتنی بر کنترل‌کننده‌های بهینه شامل LQR و LQG

کنترل بهینه بسطی از حساب تغییرات و یک روش بهینه‌سازی ریاضی برای بدست آوردن



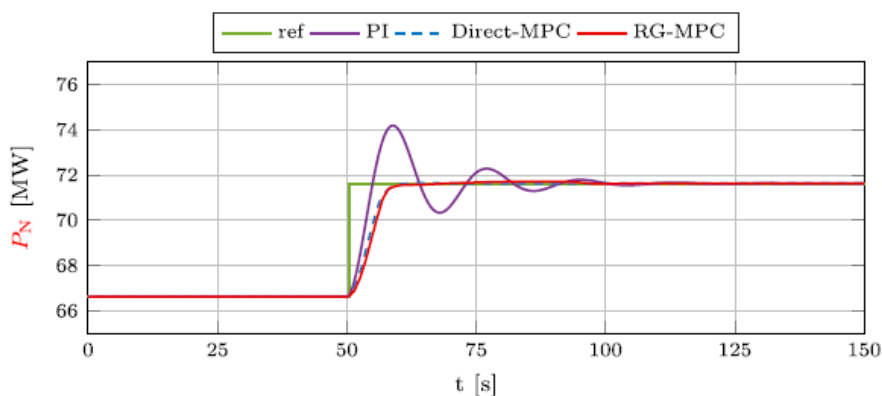


شکل ۱: شماتیک ساختار کنترل کننده پیشنهادی به همراه رفرنس گاورنر در [۲]



شکل ۲: شماتیک ساختار کنترل کننده پیشنهادی بدون رفرنس گاورنر در [۲]

نتایج شبیه سازی برای توان تولیدی توربین با مستقیم و MPC به همراه رفرنس گاورنر (RG-MPC) در شکل ۳ نشان داده شده است. کنترل کننده بهینه به همراه کنترل کننده MPC, PI



شکل ۳: شکل موج توان تولیدی با سه کنترل کننده PI، MPC ساده و RG-MPC در [۲]

محرك های سیستم شود. از روش LQG بر پایه ی کنترل مقاوم در بهبود عملکرد توربین گاز نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان نیز استفاده شده است. روش بکارگرفته شده در این مقاله، علاوه بر داشتن محاسن گفته شده در تئوری کنترل بهینه، از مقاومت کافی نیز در برابر نامعینی های احتمالی برخوردار می باشد. همچنین در تعدادی از مقالات نام برده شده از ترکیب این روش و روش کنترل PID در پایداری زیرسیستم نیروگاهی بهره گرفته اند.

همان گونه که مشاهده می شود، کنترل کننده بهینه به همراه دو کنترل کننده MPC و RG-MPC عملکرد قابل قبول تری نسبت به کنترل کننده PI معمولی دارد، چرا که خروجی بر خلاف کنترل کننده PI، بدون فرجهش ورودی مطلوب را دنبال می کند. کلیه روش های مورد استفاده در این مقالات شامل LQR، LQG و ... می باشد. از مزیت های استفاده از این تکنیک کنترلی آن است که می توان به عملکرد مطلوب حلقه بسته ضمن محدود بودن دامنه ی سیگنال کنترلی دست یافت. عدم توجه به این مسأله می تواند باعث به اشباع رفتن

## روش های مبتنی بر کنترل غیرخطی به همراه استراتژی دفع اغتشاش

کنترل غیرخطی یکی از زمینه‌های مهندسی کنترل است که با سامانه غیرخطی و یا سیستم‌های متغیر با زمان و یا هر دو سر و کار دارد. تحلیل‌ها و تکنیک‌های طراحی بسیاری برای سامانه‌های غیرخطی وجود دارد اما کنترل‌کننده یا سیستم تحت کنترل یا هر دوی آنها در حالت کلی ممکن است که سامانه غیرخطی نباشند و تکنیک‌های کنترل خطی را نمی‌توان به صورت مستقیم به آن‌ها اعمال کرد. موضوع اصلی کنترل غیرخطی آن است که به چه ترتیب می‌توان تکنیک‌های کنترل خطی را در مورد سیستم‌های غیرخطی بکار برد. همچنین از روش‌های کنترل جدیدی می‌توان استفاده کرد که با تحلیل خطی نمی‌توان به آنها رسید. در حالت کلی کنترل‌کننده‌های غیرخطی نیازمند تحلیل‌های ریاضی پیچیده‌تری در مقایسه با کنترل‌کننده‌های خطی هستند. منظور از خواص دینامیک غیرخطی خواصی از قبیل عدم پیروی از خاصیت جمع پذیری و همگنی، دارا بودن چند نقطه تعادل جدا از هم، دارا بودن خواصی مانند سیکل حدی و یا آشوب، دارا بودن زمان فرار محدود در سیستم‌های غیرخطی می‌باشند. از روش‌های کنترل غیرخطی می‌توان به روش تابع توصیفی، روش صفحه فاز، تحلیل پایداری لیاپانوف، روش پوپوف، روش کنترل مد لغزشی،

روش خطی سازی فیدبک و الگوریتم پس‌گام اشاره نمود.

در مقالات متعددی با بکارگیری تکنیک‌های کنترل غیرخطی به تضمین پایداری زیرسیستم‌های نیروگاه سیکل ترکیبی پرداخته شده است. در این مقالات با توجه به عدم دست‌یابی به متغیرهای حالت سیستم در حالت کلی، ابتدا با بکارگیری رویکردهای غیرخطی به تخمین متغیرهای حالت سیستم پرداخته شده سپس با بکارگیری استراتژی غیرخطی مناسب به بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته پرداخته‌اند. روش‌های کنترل غیرخطی به دلیل کاربرد وسیعشان سهم بسزایی در حوزه صنعت نیروگاهی داشته‌اند. همچنین در اکثر این مقالات با بهره‌گیری از پدیده‌ی اختتام انتگرالی از به اشباع رفتن محرک سیستم جلوگیری بعمل آمده است.

### روش‌های مبتنی بر کنترل پیش‌بین

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، نوعی کنترل پیشرفته فرایند است که از دهه ۱۹۸۰ در صنایع فرایند، صنایع شیمیایی، پالایشگاه‌های نفت و نیروگاه‌ها بکار گرفته شده است. کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل‌های دینامیکی فرایند، عمدتاً مدل‌های خطی تجربی، هستند که با شناسایی سیستم به دست آمده‌اند. مهم‌ترین مزیت MPC آن است که امکان بهینه‌سازی تایم اسلات جاری را با در نظر گرفتن تایم اسلات‌های آینده می‌دهد. این کار با بهینه‌سازی یک افق زمانی محدود اما اجرای



برخی موارد می توان از تغییر متغیرهای فرایند پیش و یا پس از مدل خطی برای کاهش غیرخطی بودن استفاده کرد. همچنین فرایند را می توان با MPC غیرخطی که مستقیماً از مدل غیرخطی استفاده می کند کنترل کرد. مدل غیرخطی می تواند به شکل یک برازش منحنی تجربی مانند شبکه های عصبی مصنوعی باشد.

روش کنترل پیش بین به عنوان یکی از روش های پرکاربرد در صنعت نیروگاهی مورد استفاده واقع شده است. تمامی مقالات مورد بررسی قرار گرفته در این حوزه از تئوری های مختلف کنترل پیش بین شامل GPC، MPC، کنترل پیش بین نظارتی و همچنین ترکیب روش های کنترل پیش بین و PID بهره گرفته اند. این روش ها به منظور عملکرد مناسب در کنترل زیر سیستم های واحد گازی و بخار نیروگاه سیکل ترکیبی، حائز اهمیت فراوان می باشند. به عنوان مثال از این روش در کنترل سطح آب درام نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان استفاده شده است. از آنجا که دینامیک درام نیروگاه سیکل ترکیبی شدیداً بستگی به شرایط کار و اغتشاش های داخلی و خارجی دارد، لذا کنترل پیش بین عملکرد مناسبی در این زمینه خواهد داشت.

### روش های مبتنی بر کنترل هوشمند

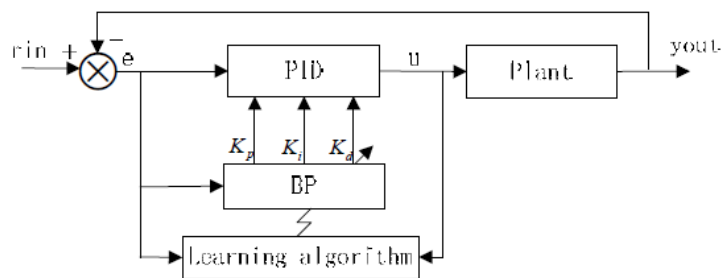
کنترل هوشمند نام شاخه ای پرکاربرد و امروزی از علوم کنترل است که به اعمال مجموعه ی وسیعی از فنون گوناگون هوش ماشینی در جهت کنترل فرایندهای پیچیده طبیعی و نیز ساخته ها و

آن تنها در تایم اسلات جاری انجام می گیرد. MPC توانایی پیش بینی رخداد های آینده و اتخاذ اعمال کنترلی متناسب با آن را دارد، در حالی که کنترل کننده های PID و LQR توانایی پیش بینی را ندارند. مدل های بکار رفته در MPC معمولاً مدل هایی برای نشان دادن رفتار یک سیستم دینامیکی پیچیده هستند. الگوریتم کنترل پیش بین پیچیدگی سیستم را افزایش می دهد و برای کنترل سیستم های ساده که اغلب با کنترل کننده های PID به خوبی کنترل می شوند لازم نیست. از مشخصه های دینامیکی رایجی که برای کنترل کننده های PID مشکل هستند می توان از تأخیرهای زمانی طولانی دینامیک های مرتبه بالا نام برد. با وجود آنکه بسیاری از فرایندهای واقعی خطی نیستند اغلب می توان آنها را در بازه ی کوچکی خطی در نظر گرفت. روش های MPC خطی در بیشتر کاربردها با مکانیزم فیدبک بکار می روند که خطاهای پیش بینی ناشی از عدم تطبیق بین مدل و فرایند را جبران می کند. در کنترل کننده های پیش بین که تنها از مدل های خطی تشکیل می شوند اصل بر هم نهی (جمع آثار) جبرخطی امکان می دهد اثر تغییرات متغیرهای وابسته چندگانه برای پیش بینی پاسخ متغیر وابسته با هم جمع گردند. با این کار مسأله کنترلی به یک سری محاسبات جبری ماتریسی مستقیم ساده می شود که سریع و مقاوم هستند. اما هنگامی که مدل های خطی به اندازه کافی برای نشان دادن غیرخطی بودن واقعی مدل دقیق نیستند از روش های گوناگونی می توان استفاده کرد. در

معمولاً از روش آموزشی پس انتشار خطا و روش های بهینه‌سازی همچون گرادیان نزولی، لوبنرگ مارکوات و ... استفاده می‌شود. در حالت کلی شبکه های عصبی ابزاری مناسب جهت مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های غیرخطی دینامیکی به حساب می‌آیند. منطق فازی نیز اولین بار توسط پروفیسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ در صحنه‌ی محاسبات نو ظاهر شده است. واژه‌ی فازی به معنای غیردقیق و مبهم می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های کنترل هوشمند شامل شبکه‌های عصبی، کنترل فازی و الگوریتم‌های تکاملی سهم بسزایی در کاربرد کنترل فرایند پیشرفته در صنعت نیروگاهی داشته‌اند.

به منظور غلبه بر نامعینی‌ها، زمان تأخیر زیاد و خواص غیرخطی سیستم کنترل دمای بخار در نیروگاه سیکل ترکیبی، یک کنترل‌کننده PID به همراه شبکه عصبی هوشمند بر پایه الگوریتم ژنتیک و روش آموزش BP در [۳] بکار گرفته شده است. با بکارگیری بهینه‌سازی سراسری بر پایه الگوریتم ژنتیک با همگرایی مناسب علاوه بر آموزش پارامترهای شبکه عصبی، پارامترهای کنترل‌کننده PID نیز آموزش می‌بینند. نتایج شبیه سازی نشان از عملکرد مقاوم سیستم کنترلی طراحی شده دارد. در شکل ۴ بلوک دیاگرام یک کنترل‌کننده PID بر پایه شبکه عصبی با روش آموزش پس انتشار خطا نمایش داده شده است.

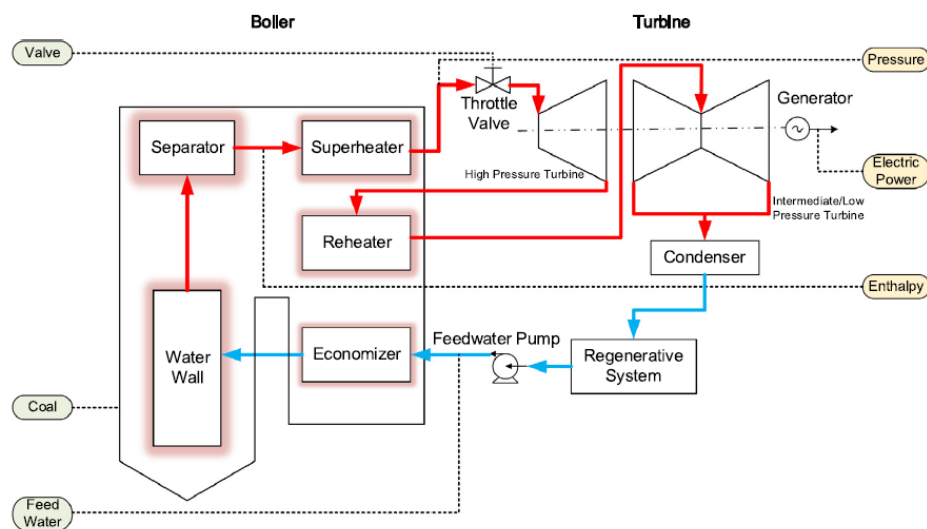
آفریده‌های دست انسان می‌پردازد. الگوریتم‌های تکاملی یکی از شاخه‌های پرکاربرد در این روش می‌باشند. از جمله شبکه‌های پرکاربرد در این روش‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی اشاره نمود. این شبکه‌ها، سیستم‌ها و روش‌های محاسباتی نوین برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش و در انتها اعمال دانش بدست آمده در جهت پیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سامانه‌های پیچیده هستند. ایده‌ی اصلی اینگونه شبکه‌ها تا حدودی الهام گرفته از شیوه‌ی کارکرد سیستم عصبی زیستی برای پردازش داده‌ها و اطلاعات به منظور یادگیری و ایجاد دانش قرار دارد. این شبکه از شمار زیادی عناصر پردازشی فوق‌العاده بهم پیوسته با نام نورون تشکیل شده که برای حل یک مسأله با هم هماهنگ عمل می‌کنند و توسط سیناپس‌ها اطلاعات را منتقل می‌کنند. در این شبکه‌ها چنانچه یک سلول آسیب ببیند بقیه سلول‌ها می‌توانند نبود آن را جبران کرده و نیز در بازسازی آن سهیم باشند. این شبکه‌ها قادر به یادگیری می‌باشند، این یادگیری به صورت تطبیقی صورت می‌گیرد، یعنی با توجه به داده‌های ورودی و خروجی سیستم پارامترهای قابل تنظیم وزن و بایاس شبکه بگونه‌ای تغییر می‌کنند که شبکه عصبی پاسخ صحیح و قابل قبولی تولید نماید. شبکه‌های عصبی دارای ساختارهایی همچون MLP، RBF، NRBF و ... می‌باشند. برای آموزش پارامترهای شبکه عصبی



شکل ۴: بلوک دیاگرام کنترل کننده PID بر پایه شبکه عصبی با روش آموزش BP [۳]

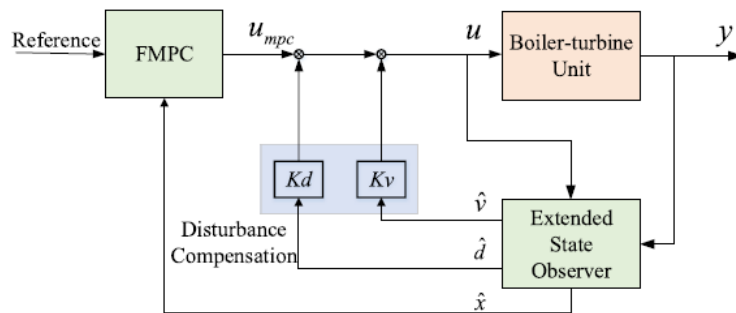
گردیده است. به علاوه یک رویکرد حالت تعمیم یافته که توانایی تخمین متغیرهای حالت و اغتشاش ناخواسته را دارد، طراحی شده است. کنترل کننده طراحی شده توانایی دفع اغتشاشات ناخواسته را داراست. در این مقاله پایداری کامل حلقه بسته تضمین شده است. نتایج شبیه سازی نشان از عملکرد مناسب روش پیشنهادی دارد. شماتیک خلاصه شده دیگ بخار مطرح شده در [۴] در شکل ۵ نمایش داده شده است.

در طراحی کنترل کننده برای یک نیروگاه دارای توربین بخار ابعاد بزرگ مسائلی از قبیل اغتشاشات ناخواسته و غیرخطی گری سیستم اجتناب ناپذیر می باشند. برای این منظور یک کنترل کننده پیش بین بر مبنای فازی به همراه رویکرد حالت تعمیم یافته برای دیگ بخار در [۴] طراحی شده است. بر این اساس در ابتدا مدل فازی غیرخطی دیگ بخار ۱۰۰۰ مگاواتی معرفی شده در این مقاله بدست آمده است. سپس یک کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل فازی برای مدل فازی بدست آمده، طراحی



شکل ۵: شماتیک خلاصه شده دیگ بخار ۱۰۰۰ مگاواتی در [۴]

همچنین بلوک دیگرام روش کنترلی پیشنهادی نیز در شکل ۶ به تصویر کشیده است.



شکل ۶: بلوک دیاگرام کنترل کننده طراحی شده بر مبنای Fuzzy MPC به همراه رویکرد حالت تعمیم یافته [۴]

موجب ناپایداری می‌شود. برای حل این مشکل از سیستم کنترلی استفاده می‌شود که از ابتدا خطاهای ممکن را در نظر گیرد و در این صورت حتی اگر خطایی در دامنه پیش‌بینی شده رخ دهد باز هم سیستم پایدار باقی بماند. به این نوع از طراحی که از این روش بهره می‌گیرد، تئوری کنترل مقاوم می‌گویند. یکی از مسائلی که در این زمینه وجود دارد بحث عدم قطعیت است. این مسأله می‌تواند هم در مدل هم در اندازه‌گیری وجود داشته باشد. حضور این موارد در سیستم‌های کنترل باعث می‌شود تا اهداف کنترلی آنچنان که باید تحقق پیدا نکنند. به همین منظور در این موارد ایده‌ی بکارگیری کنترل مقاوم مطرح می‌شود. در حقیقت کنترل مقاوم، کنترل در حضور عدم قطعیت‌هاست، بطوری که رفتار و عملکرد سیستم در تمام حالات ممکن قابل قبول باشد. حفظ پایداری در حضور عدم قطعیت‌ها یکی از چالش‌های اصلی کنترل مقاوم است. از اواخر دهه‌ی ۹۰ میلادی با توسعه روش‌های موثر برای حل نامساوی‌های ماتریسی خطی بسیاری از روش‌های کنترلی بگونه‌ای فرمول بندی شده‌اند که بتوان از این نامساوی‌ها در

روش‌های کنترل هوشمند شامل شبکه‌های عصبی، الگوریتم فازی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات و ... کاربردهای فراوانی در حوزه صنعت نیروگاهی در چند دهه‌ی اخیر داشته‌اند. شبکه‌های عصبی به عنوان ابزاری مناسب در مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های غیرخطی دینامیکی معرفی شده‌اند. روش‌های کنترل هوشمند از توانایی کافی در بهبود عملکرد کنترلی حلقه بسته سیستم‌های نیروگاهی دارای غیرخطی‌گری زیاد و در حضور اغتشاش و نامعینی برخوردار می‌باشند. به همین دلیل در چند دهه‌ی گذشته نویسندگان متعددی مقالات معتبری مبنی بر استفاده از این روش‌ها در کنترل زیر سیستم‌های نیروگاه سیکل ترکیبی شامل واحد گازی و بخار، به چاپ رسانیده‌اند.

### روش‌های مبتنی بر کنترل مقاوم

تئوری کنترل مدرن بر اساس تحلیل زمانی سیستم‌های معادلات دیفرانسیلی بنا نهاده شده است. اما پایداری این نوع از سیستم‌ها حساس به خطاهای بین سیستم حقیقی و مدل آن می‌باشد که این خود



انجامد که در بازه‌ی مشخصی به پایداری سیستم ختم شده بدون آنکه نیازی به تغییر قوانین کنترلی باشد، ولی با روش کنترل تطبیقی می‌توان قوانین کنترلی را بگونه‌ای با تغییر شرایط تطبیق داد که سیستم پایدار شود. کنترل تطبیقی به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شود که امروزه اکثر مقالات بر روی کنترل تطبیقی مستقیم تمرکز دارند. در چند دهه‌ی اخیر کنترل تطبیقی کاربرد بسیار وسیعی در حوزه‌ی کنترل فرایند پیشرفته در صنعت نیروگاهی داشته است.

هدف از طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی آن است که کنترل‌کننده طراحی شده نیز با تغییرات بوجود آمده در سیستم تطبیق پیدا کرده و پایداری حلقه بسته از بین نرود. امروزه کنترل‌کننده‌های تطبیقی کاربرد بسیار گسترده‌ای در کنترل زیربخش‌های نیروگاهی داشته‌اند و از آنها برای بهبود عملکرد زیرسیستم‌های واحد گازی و بخار نیروگاه سیکل ترکیبی استفاده می‌شود. مقالات متعددی در زمینه روش‌های مستقیم و غیرمستقیم در این حوزه با اهداف کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش کیفیت برق تولیدی و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

### نتیجه‌گیری

همان‌گونه که بیان گردید، از مزایای کاربرد کنترل فرایند پیشرفته در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌توان به افزایش بازدهی، کاهش مصرف سوخت، استفاده از محدودیت‌ها در طراحی کنترل،

طراحی استفاده نمود. در سال‌های اخیر از این نامساوی‌ها برای کنترل مقاوم سیستم‌های دینامیکی به وفور استفاده شده است و بخاطر روش‌های قدرتمند حل نامساوی‌ها و همچنین انعطاف قابل ملاحظه آنها، کاربرد آنها در کنترل مقاوم روز بروز در حال گسترش است.

همان‌گونه که بیان شد یک سیستم کنترل شده توسط کنترل مقاوم از توانایی کافی در حفظ پایداری در حضور نامعینی‌های مختلف برخوردار می‌باشد. از آنجا که وجود نامعینی در زیرسیستم های بخار و گاز یک نیروگاه سیکل ترکیبی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد، لذا طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم در حوزه صنعت نیروگاهی بسیار مهم می‌باشد. برای نمونه در [۵] یک کنترل‌کننده مقاوم  $H_{\infty}$  برای کنترل توربین گاز نیروگاه متظرقائم طراحی شده است. هدف از طراحی این کنترل کننده نگهداری سرعت و دمای گاز خروجی توربین در محدوده‌ای مشخص در حضور نامعینی های ممکن می‌باشد.

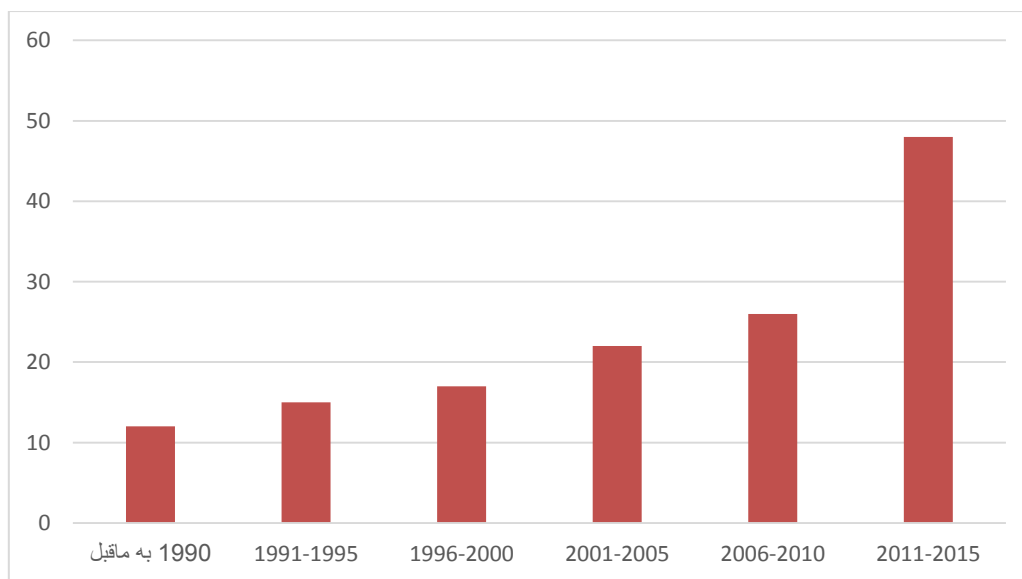
### روش های مبتنی بر کنترل تطبیقی

هدف از استفاده از یک کنترل‌کننده تطبیقی آن است که کنترل‌کننده طراحی شده بدین روش، بتواند در مقابل تغییرات آرام در سیستم و همچنین خطاهای مدل‌سازی پاسخ مناسب بدهد. تفاوت کنترل تطبیقی و مقاوم آن است که در کنترل تطبیقی نیازی به دانستن بازه‌ی کاری سیستم و یا میزان خطای پارامترها نیست. به عبارت دیگر، طراحی از دیدگاه کنترل مقاوم به کنترل‌کننده‌ای می

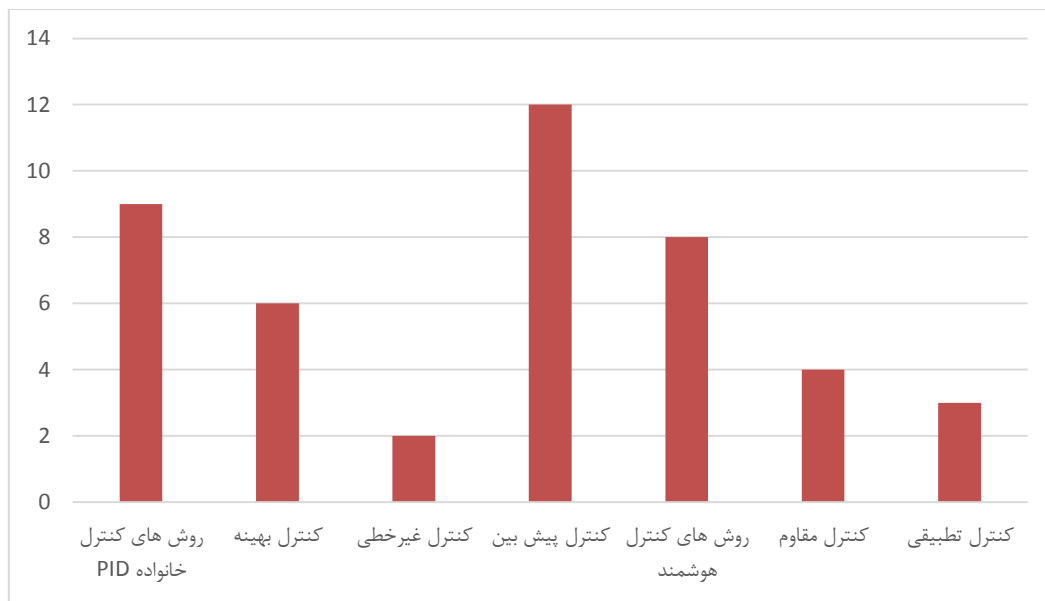


کنترل پیشرفته شامل کنترل PID، کنترل بهینه، کنترل غیرخطی، کنترل پیش‌بین، روش‌های کنترل هوشمند، کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی در چند سال اخیر که در مقالات معتبر چاپ شده‌اند پرداخته‌ایم. همچنین به بررسی انواع ساختارهای کنترلی از جمله زمان بندی بهره، کنترل آبشاری، smith predictor و override control پرداخته شد. شکل ۸ نتیجه این بررسی را در مقالات چاپ شده به صورت نموداری نمایش می‌دهد.

بکارگیری روش‌های تحلیلی در مواجهه با سیستم‌های چندورودی-چندخروجی، بکارگیری روش‌های تحلیلی در مواجهه با سیستم‌های غیرخطی، تعیین اندیس‌های عملکردی جهت فاصله بین عملکرد واقعی و عملکرد مورد انتظار سیستم در حالت آنالین و آفلاین و افزایش کیفیت محصولات نام برد. در شکل ۷ تعداد این مقالات در سال‌های اخیر مشخص شده است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع در این قسمت، از بین مقالات مطالعه شده، به بررسی روش‌های



شکل ۷: تعداد مقالات چاپ شده در مجلات معتبر در زمینه کاربرد کنترل فرایند پیشرفته در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی



شکل ۸: تعداد مقالات چاپ شده در مجلات معتبر به تفکیک روش در زمینه کاربرد کنترل فرایند پیشرفته (از بین ۴۵ مقاله بررسی شده)

- [2]. Klaučo, Martin, and Michal Kvasnica. "Control of a boiler-turbine unit using MPC-based reference governors." *Applied Thermal Engineering* 110 (2017): 1437-1447.
- [3] Li, Han, and Zhang Zhen-yu. "The application of immune genetic algorithm in main steam temperature of PID control of BP network." *Physics Procedia* 24 (2012): 80-86.
- [4] Zhang, Fan, Xiao Wu, and Jiong Shen. "Extended state observer based fuzzy model predictive control for ultra-supercritical boiler-turbine unit." *Applied Thermal Engineering* 118 (2017): 90-100.
- [5] Najimi, Ebrahim, and Mohammad Hossein Ramezani. "Robust control of speed and temperature in a power plant gas turbine." *ISA transactions* 51.2 (2012): 304-308.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه روش های کنترل پیشرفته فرایند (APC) در سطوح مختلف هرم کنترل نیروگاه های سیکل ترکیبی در چند دهه ی گذشته می توان به اهمیت این روش ها پی برد. همان گونه که ملاحظه گردید از بین روش های یاد شده روش های مبتنی بر کنترل پیش بین حائز اهمیت فراوانی بوده و جزء پرکاربردترین روش ها به حساب می آیند.

### مراجع

- [1]. Liang, Geng, Wen Li, and Zhijun Li. "Control of superheated steam temperature in large-capacity generation units based on active disturbance rejection method and distributed control system." *Control Engineering Practice* 21.3 (2013): 268-285.