POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

Bo Yang , Jiale Li , Yulin Li, Zhengxun Guo, Kaidi Zeng, Hongchun Shu, Pulin Cao, Yaxing Ren, A critical survey of proton exchange membrane fuel cell system control: Summaries, advances, and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 9986-10020, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.065

بررسی بحرانی کنترل سیستم پیل سوختی غشای تبادل پروتون: خلاصه‌ها، پیشرفت‌ها و چشم اندازها

چکیده

پیل سوختی غشای تبادل پروتون[1] (PEMFC) یک منبع انرژی امیدوارکننده در آینده است که از انرژی هیدروژن برای تولید برق با محصول جانبی آب استفاده می‌کند. به طور کلی، PEMFC شامل چندین زیرسیستم کاملا جفت‌شده با فرآیندهای دینامیکی غیرخطی و پیچیده است. بنابراین، استراتژی‌های کنترل مناسب برای عملیات قابل اعتماد و موثر PEMFC بسیار مهم است. این مقاله با هدف انجام یک بررسی کلی جامع و سیستماتیک از استراتژی‌های کنترل PEMFC است. بر اساس بررسی کامل 180 مقاله، این استراتژی‌های کنترل به 9 دستهٔ اصلی طبقه‌بندی می‌شوند که شامل کنترل تناسبی- انتگرالی- مشتقی (PID)[2]، کنترل تطبیقی (APC)[3]، کنترل منطق فازی (FLC)[4]،کنترل قوی[5]، کنترل مبتنی بر ناظر[6]، کنترل پیش‌بینی مدل (MPC)[7]، کنترل تحمل خطا (FTC)[8]، کنترل بهینه[9] و کنترل هوش مصنوعی[10] است. علاوه بر این، یک ارزیابی جامع و خلاصه‌ای دقیق از طرح‌های کنترلی، اهداف، عملکرد، کاربردها، مزایا/ معایب، پیچیدگی، استحکام و دقت به طور کامل انجام شده است. در نهایت، پنج دیدگاه/ توصیهٔ ارزشمند و روشنگر برای تحقیقات آتی پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی؛ انرژی هیدروژنی، پیل سوختی غشای تبادل پروتون، کنترل، هوش مصنوعی.

نتیجه‌گیری و دیدگاه‌ها

---

[1] proton exchange membrane fuel cell
[2] Proportional integral derivative (PID)
[3] Adaptive control (APC)
[4] Fuzzy logic control (FLC)
[5] robust control
[6] observer-based control
[7] Model predictive control (MPC)
[8] Fault tolerant control (FTC)
[9] optimal control
[10] artificial intelligence control

این مقاله در مجموع 36 نوع عمده از استراتژی‌های کنترل PEMFC را در 9 گروه خلاصه می‌نماید که به طور کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، مزایا/ محدودیت‌های کلی، پیچیدگی، دقت، استحکام و همچنین قابلیت کاربرد آنها به طور سیستماتیک بررسی شده است. نتایج اصلی به شرح زیر خلاصه می‌شود:

• کنترل‌کننده‌های PID به دلیل وجود ساختار سادهٔ آنها و قابلیت اطمینان بالا که پایداری و بازده سیستم PEMFC را افزایش می‌دهد، به طور گسترده‌ای در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، عدم دقت به دلیل امکان جبران[1] متغیرهای کنترل و پاسخ آهسته وجود دارد؛

• APC می‌تواند به موقع از بحران شدید[2] پیل سوختی جلوگیری کرده و با به روزرسانی پارامترهای مدل‌های غیر خطی در زمان واقعی، از آسیب بالقوهٔ غشا به دلیل دقت بالای آن جلوگیری کند. اما شامل تعداد نسبتاً زیادی از پارامترهای کنترل و پیچیدگی بالا است؛

• FLC به طور گسترده‌ای برای کنترل نسبت اضافی اکسیژن (OER)[3] و نرخ‌های جریان هیدروژن به دلیل ساختار سادهٔ آن استفاده می‌شود که به راحتی می‌تواند در عمل به کار گرفته شود. با این حال، قوانین منطقی مناسب باید ساخته شوند و نمی‌توان بهینه بودن را تضمین نمود؛

• کنترل قوی می‌تواند استحکام PEMFC را در برابر شرایط مختلف عملیات افزایش دهد. با این حال، به طور کلی پدیدهٔ باز و بسته شدن نوسانی و سریع شیر ایمنی[4] را برای کنترل حالت کشویی (SMC)[5] به ارمغان می‌آورد که ممکن است عملکرد کلی کنترل PEMFC به ویژه توان خروجی را کاهش دهد. ضمنا، دیگر روش‌های قوی ممکن است عملکردی بیش از حد محافظه کارانه داشته باشند که منجر به دقت پایین در کنترل می‌شود؛

• کنترل‌کننده‌های مبتنی بر ناظر می‌توانند عدم قطعیت‌های سیستم‌های که با زمان سریعا تغییر می‌کنند را به دقت تخمین بزنند، به طوری که می‌توان به استحکام عالی دست یافت. با این‌حال، آنها معمولا نیاز به طراحیِ اضافی ناظر دارند، که باعث افزایش پیچیدگی و بار محاسباتی می‌شود؛

---

[1] offset
[2] Starvation
[3] Oxygen excess ratio (OER)
[4] Chattering
[5] Sliding mode control (SMC)

• MPC از نزدیک با مدل‌های شبکه عصبی (NN)[1] و الگوریتم‌های هوش مصنوعی ترکیب شده است، که می‌تواند دقت کنترل آنها را به طور قابل توجهی بهبود بخشد و سرعت ردیابی را تسریع کند. با این حال، معمولاً زمان بیشتری را برای آموزش[2] صرف می‌کند، زیرا ساختار آن نسبتاً پیچیده است؛

• FTC بر اساس نظارت بر خطا است تا به طور متناظر یک گزینه‌ی کنترل‌کنندهٔ مناسب برای PEMFC، پیش طراحی/ انتخاب کند، بنابراین یک سناریوی مورد به مورد برای بهبود دقت و اثربخشی کلی کنترل ساخته شده است. با این‌حال، چنین چارچوبی نیاز به بار محاسباتی بزرگ و پیش آماده‌سازی پیچیده دارد؛

• کنترل بهینه به طور کلی می‌تواند یک عملکرد کنترل رضایت‌بخش را از طریق جستجوی بهینه تحقق بخشد. اما، ممکن است در یک بهینهٔ محلی[3] به دام افتاده باشد. بنابراین، نمی‌توان بهینهٔ جهانی را تضمین نمود؛

• کنترل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند به پاسخ سریع، نوسان کوچک[4] و همگرایی سریع دست یابند. اما، در عمل اجرای آنها به دلیل وابستگی زیاد به مقدار زیادی داده و پیچیدگی بالا نسبتاً دشوار است. به عنوان مثال، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهدکه گرادیان سیاست قطعی عمیق (DDPG)[5] دارای زمان پاسخ کوتاه، سرعت پاسخ سریع و عملکرد دینامیکی و استاتیکی عالی می‌باشد به‌گونه‌ای که می‌تواند سرعت پاسخ OER و ولتاژ خروجی را به ترتیب تا 47٪ و 16٪ بهبود بخشد. این در حالی است که زمان پایدار شدن ولتاژ استک (دستهٔ)[6] آن در حدود 11/7٪ کنترل‌کنندهٔ PID و 15/7٪ از کنترل‌کنندهٔ PSO-fuzzy-PID[7] است. علاوه بر این، پنج دیدگاه امیدوارکننده برای تحقیقات آینده در استراتژی‌های کنترل سیستم PEMFC به شرح زیر خلاصه می‌شود:

• استراتژی کنترل هوش مصنوعی اخیراً به طور گسترده‌ای در کنترل PEMFC به دلیل دقت بالای آن به کار گرفته شده است. از این رو، باید به ترکیب روش‌های کنترل سنتی و کنترل هوشمند برای بهینه‌سازی کنترل سیستم توجه بیشتری نمود؛

---

[1] Neural network (NN)
[2] training
[3] local optimum
[4] small overshoot
[5] Deep deterministic policy gradient (DDPG)
[6] Stack voltage
[7] Particle swarm optimization (PSO)

- به‌کارگیری الگوریتم‌های بدون مدل[1]، مانند الگوریتم فرا ابتکاری[2]، برای تنظیم بهینهٔ دستاوردهای کنترل انواع مختلف کنترل‌کننده‌های ذکر شده در بالا توصیه می‌شوند؛

- طراحی کنترل‌کنندهٔ هماهنگ پیشرفته باید برای تنظیم هر زیرسیستم PEMFC به صورت دینامیکی و به طور بهینه مورد مطالعه قرار گیرد، به طوری که یک عملکرد کلی کنترل را می‌توان به طور چشمگیری با پایداری سیستم PEMFC متعادل، بهبود بخشید؛

- طراحی سیستم کنترل مناسب و هماهنگ بین سیستم ذخیره‌سازی انرژی (ESS)[3] و PEMFC برای حل بحران شدید سوخت، آسیب غشا و طول عمر کوتاه PEMFC ارزش بررسی دارد؛

- علاوه بر آزمون‌های شبیه‌سازی و سخت‌افزاری در حلقه (HIL)[4]، آزمایش‌های سخت‌افزاری بیشتری باید انجام شود تا عملی بودن و امکان سنجی اجرای سخت‌افزاری روش‌های کنترل فوق، به ویژه کنترل بهینه و کنترل هوش مصنوعی که تاکنون به ندرت در عمل به کار گرفته شده است، را معتبر سازند.

---

[1] Model-free
[2] Meta-heuristic
[3] Energy store system (ESS)
[4] Hardware- in-the-loop (HIL)