دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- کنترل

کنترل غیرخطی پیل سوختی
در حالت اتصال به شبکه

به کوشش
طیبه عرفان منش

استاد راهنما
دکتر مریم دهقانی

مهر ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب طیبه عرفان منش دانشجوی رشته ی مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده ی مهندسی برق و کامپیوتر اظهارمی کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته ام .همچنین اظهارمی کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه ام تکراری نیست و تعهد می نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم . کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام ونام خانوادگی: طیبه عرفان منش

تاریخ و امضا: ۹۲/۷/۷

به نام خدا

کنترل غیر خطی پیل سوختی در حالت اتصال به شبکه

به کوشش
طیبه عرفان منش

پایان نامه ی
ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی لازم
برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی
مهندسی برق (کنترل)

دانشگاه شیراز
شیراز
جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان نامه، با درجه ی: عالی

دکتر مریم دهقانی، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر (استاد راهنما) .....

دکتر سید علی اکبر صفوی، استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر(استاد مشاور) .....

دکتر مهدی رئوفت، دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر (استاد مشاور) .....

مهر ۱۳۹۲

تقدیم به نگاه سبز مادرم و دست های پر مهر پدرم

آن دو فرشته ای که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی من است. به پاس عشق و فداکاری سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است. به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند و تا بی نهایت دنیا می توان به آن تکیه کرد.

بوسه بر دستان پر مهرتان...

سپاسگزاری

خداوند بزرگ را بسیار شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود و به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم رسیده و تحقیق خود را به پایان برسانم. اکنون که به یاری خدا این پایان نامه به انجام رسیده است، بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ و راهنمایی های ارزشمند استاد گرامی خانم دکتر مریم دهقانی کمال تشکر و قدر دانی را به عمل آورم. همچنین تشکر ویژه خود را تقدیم اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر سید علی اکبر صفوی و دکتر مهدی رئوفت می کنم که زحمت مشاوره این پایان نامه را بر عهده گرفتند. از خداوند منان سلامت و سعادت ایشان را خواستارم.

چکیده

کنترل غیرخطی پیل سوختی در حالت اتصال به شبکه

به کوشش

طیبه عرفان منش

نگرانی های زیست محیطی به دلیل تولید گازهای آلوده توسط منابع تولیدکننده برق و نیاز رو به افزایش انرژی برق در دنیا، توجه زیادی را به تولید پراکنده برق معطوف کرده است. پیل سوختی از جمله منابع تولید پراکنده برق می باشد که به دلیل بازدهی بالا، تولید انرژی پاک و نشر بسیار کم گازهای آلوده در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به منظور اتصال پیل سوختی به شبکه برق، مبدل های الکترونیک قدرت مورد نیاز هستند. معمولا یک مبدل dc/dc برای بالا بردن سطح ولتاژ خروجی پیل سوختی و یک مبدل dc/ac برای تبدیل به ولتاژ سه فاز استفاده می شوند. با طراحی کنترل کننده های مناسب برای این مبدل ها، سیستم می تواند ولتاژ خروجی دلخواه و یا توان های اکتیو و راکتیو مورد نیاز در شبکه ac را فراهم کند. کنترل کننده های طراحی شده باید به گونه ای باشند که در برابر نوسانات مقاوم بوده و با وجود عدم قطعیت های موجود در مدل در بازه کاری وسیعی بتوانند جوابگو باشند. همچنین توانایی حذف اغتشاش های وارد شده به سیستم را داشته باشند. بدین منظور در این پایان نامه به طراحی کنترل کننده های مقاوم برای مبدل های سیستم حاوی پیل سوختی با استفاده از روش های نامساوی ماتریسی خطی (LMI)، روش Fuzzy-LMI و روش مد لغزشی تطبیقی پرداخته شده است. در روش اول، پارامتر های بار و امپدانس خط به عنوان پارامتر های دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده و مدل چند ضلعی محدب برای مبدل ها ارائه می شود. سپس برای رسیدن به معیار های مطلوب در پاسخ خروجی مانند پایداری، مشخصات پاسخ گذرا و حذف اغتشاش، از تکنیک LMI در طراحی کنترل کننده ها استفاده می گردد. در روش دوم، مدل فازی T-S برای مبدل ها بیان شده و قوانین فازی برای آنها ارائه می گردد. در این روش فرض می شود که همه متغیر های حالت سیستم در دسترس نیستند. بنابراین با استفاده از تکنیک Fuzzy-LMI علاوه بر طراحی کنترل کننده، تخمینگر حالت نیز برای مدل فازی سیستم طراحی می شود. در روش سوم، برای رسیدن به خروجی های مطلوب ولتاژ و توان، سطوح لغزشی مناسبی تعریف شده و از کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی استفاده می گردد. در این روش، با در نظر گرفتن پارامتر های نامعلوم بار و امپدانس خط از تکنیک تطبیقی برای تخمین آنلاین پارامتر ها استفاده می شود. با استفاده از قضیه لیاپانف علاوه بر اثبات پایداری، قانون بروز رسانی پارامتر ها نیز محاسبه می شود. به منظور شبیه سازی، دو نوع از انواع پیل های سوختی، PEMFC و SOFC، در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی ها بیانگر این موضوع است که کنترل کننده های اعمال شده به میزان بسیار مطلوبی پاسخ سیستم را بهبود بخشیده اند.

واژگان کلیدی:

سیستم پیل سوختی - مبدل های الکترونیک قدرت – کنترل غیر خطی – کنترل مقاوم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱-کلیات ۲

۱-۲-مدل پیل سوختی ۴

۱-۳-انواع پیل سوختی ۵

۱-۴-مدار معادل پیل سوختی ۸

۱-۵-مدل دینامیکی پیل سوختی ۱۰

۱-۶-سیستم حاوی پیل سوختی متصل به شبکه ۱۲

۱-۷-پیشینه تحقیق ۱۴

۱-۸-هدف پایان نامه ۲۰

فصل دوم: مدل مبدل های الکترونیک قدرت متصل به شبکه در سیستم حاوی پیل سوختی

۲-۱- مبدل dc-dc افزاینده (بوستر) ۲۳

۲-۱-۱- مدل فضای حالت بوستر ۲۵

۲-۲- مبدل dc-ac (اینورتر) ۲۷

۲-۲-۱- مدل فضای حالت اینورتر ۲۹

عنوان **صفحه**

فصل سوم: طراحی کنترل کننده برای مبدل های الکترونیک قدرت در سیستم حاوی پیل سوختی

۳-۱- کنترل مبدل های سیستم پیل سوختی با استفاده از تکنیک نامعادلات ماتریسی خطی (LMI) ۳۶

۳-۱-۱- مقدمه ۳۶

۳-۱-۱-۱ کنترل کننده فیدبک حالت به کمک روابط LMI..... ۴۴

۳-۱-۱-۲ کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی برای سیستم دارای پارامتر های متغیر با زمان به کمک روابط LMI..... ۵۰

۳-۱-۲- کنترل مقاوم مبدل dc-dc افزاینده (بوستر) با استفاده از روش LMI ۵۲

۳-۱-۲-۱ مدل حاوی عدم قطعیت بوستر..... ۵۴

۳-۱-۲-۲ طراحی کنترل کننده PID مقاوم برای بوستر با استفاده از تکنیک LMI..... ۵۴

۳-۱-۲-۳ طراحی کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی مقاوم برای مدل LPV بوستر با استفاده از تکنیک LMI..... ۵۷

۳-۱-۳- کنترل مقاوم مبدل dc-ac (اینورتر) با استفاده از روش LMI ۶۰

۳-۱-۳-۱ مدل حاوی عدم قطعیت اینورتر..... ۶۰

۳-۱-۳-۲ طراحی کنترل کننده فیدبک حالت مقاوم برای اینورتر با استفاده از تکنیک LMI..... ۶۲

۳-۱-۳-۳ طراحی کنترل کننده فیدبک حالت مقاوم برای مدل LPV اینورتر با استفاده از تکنیک LMI..... ۶۲

۳-۲- کنترل مبدل های سیستم پیل سوختی با استفاده از روش Fuzzy-LMI..... ۶۶

۳-۲-۱- مقدمه ۶۶

۳-۲-۱-۱ تخمینگر حالت برای مدل فازی T-S..... ۶۹

۳-۲-۲ طراحی کنترل کننده به همراه تخمینگر حالت برای مدل فازی T-S مبدل های سیستم حاوی پیل سوختی ۷۱
۳-۳- کنترل مبدل های سیستم پیل سوختی با استفاده از روش کنترل مد لغزشی تطبیقی ۷۵
۳-۳-۱- مقدمه ۷۵
۳-۳-۲- طراحی کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی برای بوستر ۷۸
۳-۳-۳- طراحی کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی برای اینورتر متصل به شبکه..... ۷۹

فصل چهارم: نتایج شبیه سازی ها
۴-۱- نتایج شبیه سازی کنترل کننده مقاوم برای مدل دارای عدم قطعیت بوستر با استفاده از روش LMI ۸۴
۴-۲- نتایج شبیه سازی سیستم پیل سوختی با استفاده از کنترل کننده مقاوم برای مدل دارای عدم قطعیت اینورتر به کمک روش LMI ۸۹
۴-۳- نتایج شبیه سازی سیستم پیل سوختی با استفاده از کنترل کننده Fuzzy-LMI برای مبدل ها به همراه تخمینگر حالت ۱۰۳
۴-۴- نتایج شبیه سازی کنترل کننده مد لغزشی برای بوستر ۱۰۷
۴-۵- نتایج شبیه سازی کنترل کننده مد لغزشی برای اینورتر ۱۰۹

فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهادات
۵-۱- جمع بندی ۱۱۲
۵-۲- پیشنهادات ۱۱۳

فهرست مراجع ۱۱۴

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱ پارامتر های مربوط به جایگذاری قطب ها ۸۵
جدول ۴-۲ ضرایب کنترل کننده PID برای دو مقدار مختلف R.....۸۵

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ اساس عملکرد یک پیل سوختی ۴
شکل ۱-۲ دیاگرام و روابط شیمیایی PEMFC ۷
شکل ۱-۳ دیاگرام SOFC ۷
شکل ۱-۴ مدار معادل پیل سوختی ۹
شکل ۱-۵ بلوک دیاگرام مدل دینامیکی PEMFC ۱۲
شکل ۱-۶ عناصر اصلی سیستم انرژی حاوی پیل سوختی ۱۳
شکل ۱-۷ دیاگرام سیستم حاوی SOFC متصل به شبکه ۱۴
شکل ۲-۱ مبدل افزاینده dc-dc ۲۴
شکل ۲-۲ اینورتر منبع ولتاژ سه فاز شش پالسه ۲۷
شکل ۲-۳ شکل موج اینورتر منبع ولتاژ سه فاز شش پالسه ۲۸
شکل ۲-۴ مدل PLL ۳۲
شکل ۳-۱ نمایش جایابی قطب ها در صفحه مختلط ۴۶
شکل ۳-۲ دیاگرام مبدل dc-dc به همراه مدار کنترلی آن ۵۳
شکل ۳-۳ دیاگرام کنترل کننده LPV برای مبدل الکترونیک قدرت سیستم حاوی پیل سوختی ۶۶
شکل ۳-۴ نمایش توابع عضویت فازی برای بوستر ۷۴
شکل ۳-۵ رسیدن حالت های سیستم به سطح لغزشی و نگه داشتن آنها در این سطح ۷۶
شکل ۳-۶ دیاگرام کنترل تطبیقی ۷۷
شکل ۴-۱ ولتاژ خروجی سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC متصل به بوستر با بار خروجی ۵۰Ω در حضور اغتشاش ۸۷
شکل ۴-۲ ولتاژ خروجی سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC متصل به بوستر با بار خروجی ۴۰۰Ω در حضور اغتشاش ۸۷
شکل ۴-۳ ولتاژ خروجی سیستم حاوی پیل سوختی SOFC متصل به بوستر با بار خروجی ۵۰Ω در حضور اغتشاش ۸۸

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۴ ولتاژ خروجی سیستم حاوی پیل سوختی SOFC متصل به بوستر با بار خروجی ۴۰۰Ω در حضور اغتشاش ۸۸
شکل ۴-۵ ولتاژ خروجی سیستم حاوی پیل سوختی متصل به بوستر در حضور بار متغیر با زمان ۸۹
شکل ۴-۶ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده بهینه پیشنهادی با امپدانس شبکه R_s=۱۵Ω و X_s=۵۰Ω ۹۱
شکل ۴-۷ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده PI در مرجع [۱] با امپدانس شبکه R_s=۱۵Ω و X_s=۵۰Ω ۹۱
شکل ۴-۸ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده بهینه پیشنهادی با امپدانس شبکه R_s=۱۶.۵Ω و X_s=۵۵Ω ۹۴
شکل ۴-۹ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده مرجع [۱] با امپدانس شبکه R_s=۱۶.۵Ω و X_s=۵۵Ω ۹۴
شکل ۴-۱۰ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده بهینه پیشنهادی با امپدانس شبکه R_s=۵Ω و X_s=۴۰Ω ۹۵
شکل ۴-۱۱ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده مرجع [۱] با امپدانس شبکه R_s=۵Ω و X_s=۴۰Ω ۹۵
شکل ۴-۱۲ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده بهینه پیشنهادی با امپدانس شبکه R_s=۵.۵Ω و X_s=۴۴Ω ۹۶
شکل ۴-۱۳ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده مرجع [۱] با امپدانس شبکه R_s=۵.۵Ω و X_s=۴۴Ω ۹۶
شکل ۴-۱۴ اغتشاش پله ای در ولتاژ شبکه سه فاز ۹۷
شکل ۴-۱۵ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده $H\infty$ پیشنهادی در حضور اغتشاش ۹۸
شکل ۴-۱۶ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده PI مرجع [۱] در حضور اغتشاش ۹۸
شکل ۴-۱۷ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده LPV در حضور بار متغیر با زمان ۱۰۱

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۱۸ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده PI مرجع [۱] در حضور بار متغیر با زمان ۱۰۱
شکل ۴-۱۹ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده LPV در حضور بار متغیر با زمان..... ۱۰۲
شکل ۴-۲۰ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده PI مرجع [۱] در حضور بار متغیر با زمان..... ۱۰۲
شکل ۴-۲۱ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده Fuzzy-LMI با تخمین متغیر های حالت ۱۰۶
شکل ۴-۲۲ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی SOFC با کنترل کننده Fuzzy-LMI با تخمین متغیر های حالت.....۱۰۶
شکل ۴-۲۳ ولتاژ خروجی سیستم حاوی پیل سوختی متصل به بوستر با کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی ۱۰۸
شکل ۴-۲۴ سطح لغزشی در کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی برای سیستم حاوی پیل سوختی متصل به بوستر ۱۰۸
شکل ۴-۲۵ توان های اکتیو و راکتیو سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC با کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی ۱۱۰
شکل ۴-۲۶ سطح لغزشی در کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی برای سیستم حاوی پیل سوختی PEMFC متصل به شبکه ۱۱۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱-کلیات

رشد سریع در تقاضای الکتریسیته در کنار رشد کند در ظرفیت تولید آن در اواخر قرن بیستم، نیاز به تولید بیشتر برق را شدیدتر کرد. محدودیت های اقتصادی در ایجاد مراکز بزرگ تولید برق، توجه زیادی را به تولید پراکنده[1] (DG) معطوف کرد. DG ها اندازه کوچکتر و هزینه ساخت کمتری داشته و معمولا در سطوح توزیع یا نزدیک مراکز بار قرار می گیرند و می توانند بر اساس یک شاخص بهینه مانند تقویت شبکه، کم کردن تلفات شبکه و هزینه های عملکرد در حالت پیک بار، بهبود پروفیل ولتاژ و فاکتور های بار در شبکه قرار بگیرند. در نتیجه درافزایش بازدهی شبکه موثر هستند. DG ها موانعی هم بر سر راه خود دارند که از آن جمله می توان به مشکلات تکنیکی و اقتصادی، مباحث امنیتی شبکه، مباحث کیفیت توان و عملکرد آنها اشاره کرد. این منابع می توانند توان در حد چند KW تا حدود MW ۱۰ تولید کنند که در هر دو حالت مجزا[2] یا متصل به شبکه[3] استفاده می شوند. DG ها به دو دسته تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می شوند. [۱]

دسته تجدیدپذیر، منابع انرژی آنها پایدار بوده و آسیب های کمی به محیط زیست وارد می کنند. دسته تجدیدناپذیر، شامل نمونه هایی است که از انواع سوخت های فسیلی مثل بنزین، نفت، متان، گاز طبیعی یا زغال سنگ به عنوان منبع انرژی استفاده می کنند. اشکال اصلی این

[1] Distributed Generation
[2] stand-alone
[3] grid-connected

دسته، تولید گازهای آلوده و در بعضی مواقع سمی مثل SO_2 و NO_x می باشد.

پیل سوختی[1] (FC) مبدل تبدیل انرژی است که انرژی شیمیایی سوخت را به انرژی الکتریکی dc تبدیل می کند. FC ها کاربرد های فراوانی در هر دو حالت مجزا یا متصل به شبکه دارند. به دلیل بازدهی بالا و پاکیزگی فرآیند آنها، در دو دهه اخیر توجه زیادی به FC معطوف شده است. پیل سوختی بسته به نوع ورودی آن می تواند در هر دو دسته تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر قرار بگیرد.

- FC برای کاربرد های مجزا:

تعداد زیادی از سیستم های حاوی FC به منظور تولید توان برای استفاده در بیمارستان ها، هتل ها، ساختمان های اداری، مدارس و حتی فرودگاه ها در سراسر جهان نصب شده‌اند. همچنین در ماموریت های فضایی و در وسایل قابل حمل مثل لب تاپ از آنها استفاده می شود. وقتی هیدروژن به عنوان سوخت استفاده می شود، تنها محصولات جانبی FC، آب و گرما است. بنابراین، این امکان وجود دارد که از گرمای تولید شده توسط FC هم استفاده شود.

- FC برای کاربردهای متصل به شبکه:

DG ها می توانند به عنوان منابع تولید توان نزدیک محل مورد نیاز برای کاهش وابستگی به توان شبکه، حمایت از عملکرد ضعیف سیستم های انتقال و توزیع و ... استفاده شوند. پیشرفت سریع در تولید توان و نگرانی های محیط زیستی توجه زیادی را به FC به عنوان DG برای تولید توان جلب کرد. بعضی از تکنولوژی های FC، برق را به طور مستقیم از هیدروژن تولید می کنند ولی می توان از گرما و آب تولید شده توسط FC هم برای توربین بخار و تولید برق بیشتر استفاده کرد.

انتظار می رود تکنولوژی FC در نیمه اول قرن بیست و یکم همچون کامپیوتر در نیمه دوم قرن بیستم، رشد چشمگیری داشته باشد. در ادامه به معرفی مدل پیل سوختی و انواع آن پرداخته خواهد شد که عمدتا برگرفته از مرجع [۱] می باشد.

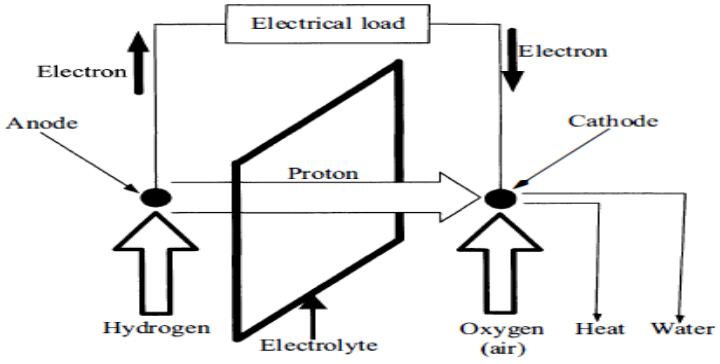
[1] Fuel Cell

۱-۲-مدل پیل سوختی

ساختار فیزیکی یک FC از دو الکترود منفذ دار (آند و کاتد) و یک لایه الکترولیت در وسط آن تشکیل شده است. شکل ۱-۱، اساس عملکرد یک FC با فلوی یون مثبت در الکترولیت را نشان می‌دهد که بر اساس قوانین الکتروشیمیایی می باشد.

با شکسته شدن مولکول های هیدروژن به یون های الکترون و پروتون به کمک یک کاتالیزور که واکنش را سریع‌تر می‌کند، پروتون ها از طریق الکترولیت از کاتد به سمت آند حرکت می کنند و الکترون ها از طریق یک مدار خارجی (بار) به حرکت در می آیند تا با مولکول های اکسیژن و پروتون های هیدروژن در کاتد باز ترکیب شده و آب را تشکیل دهند. واکنش شیمیایی اصلی درون یک FC هیدروژنی می تواند به دو نیم واکنش اکسایش و کاهش شکسته شود. نیم واکنش اکسایش شامل شکسته شدن مولکول هیدروژن به پروتون و الکترون در آند است. در نیم واکنش کاهش پروتون ها از الکترولیت عبور کرده و با الکترون های کاتد باز ترکیب می شوند. روابط یک نمونه پیل سوختی در زیر آورده شده است:

$$2H_2 \Rightarrow 4H^+ + 4e^- \qquad (۱-۱)$$
$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \Rightarrow 2H_2O$$



شکل ۱-۱ اساس عملکرد یک پیل سوختی [۱]

پلاریته یون و جهت حرکت آن می تواند در FC های مختلف متفاوت باشد و به همین دلیل محل تولید آب در FC های مختلف متفاوت است. اگر یون مثبت باشد، مانند شکل ۱-۱، آب در کاتد تولید می شود. در مقابل، اگر یون منفی باشد مثل SOFC و SCFC، آب در آند شکل می گیرد. در هر دو حالت، الکترون ها از یک مدار خارجی عبور کرده و جریان الکتریکی تولید می کنند.

۱-۳-انواع پیل سوختی

به طور کلی، FC ها با توجه به نوع الکترولیتی که استفاده می کنند دسته بندی می شوند و انتخاب نوع الکترولیت، محدوده دمای کاری FC را مشخص می کند.

FC های با دمای پایین، به دما های پایین تر از ۲۰۰ درجه محدود می شوند. انواع معمول FC های با دمای پایین عبارتند از:

Alkaline Fuel Cell (AFC)

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

Polymer Electrolyte Membrane (PEMFC)

در این FC ها، سوخت ورودی قبل از ورود باید به هیدروژن تبدیل شود. به علاوه، کاتالیزور مورد استفاده در اینها (که عمدتا پلاتین است) توسط مونوکسید کربن بسیار سمی می شود. بنابراین هیدروژن ورودی FC ها باید خالص باشد و این برای این نوع از FC ها یک عیب محسوب می شود.

در FC های با دمای بالا، CO و حتی هیدروکربن ها مثل CH_4 می توانند به صورت داخلی به هیدروژن تبدیل شوند یا حتی به صورت مستقیم اکسید شوند. انواع معمول FC های با دمای بالا عبارتند از:

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) محدوده دمای آن ۶۰۰-۷۰۰ درجه است.