

”به نام یزدان پاک و مهربان“



پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق-گرایش کنترل

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

کنترل سیستم جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز با روش مود لغزشی

استاد راهنما

جناب آقای دکتر فاتح

ارائه دهنده

آرش خاتمیان فر

تیر ماه ۱۳۸۷





پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق-گرایش کنترل
دانشکده مهندسی برق و رباتیک

کنترل سیستم جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز با روش مود لغزشی

استاد راهنما

جناب آقای دکتر فاتح

ارائه دهنده

آرش خاتمیان فر

تیر ماه ۱۳۸۷

تقدیم

این پایان نامه را با تمام وجودم پیشکش می کنم

به پدرم به واسطه زحماتی که برای رسیدن من به این جایگاه از زندگی کشید،
و به مادرم که وجودش را برای من گذاشت تا یاد بگیرم سربلند زندگی کنم.

گرامی می دارم وجودشان را که مایه فخر و مباهات من هستند.

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می دانم از استاد گرامیم جناب آقای دکتر فاتح کمال تشکر را داشته باشم که در انجام این پایان نامه کمک شایان توجه ای کردند و در دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد زحمات فراوانی برای بالا بردن سطح علمی من کشیدند.

چکیده

کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ به شیوه دستی با نگاهی نو به کاربرد کنترل مود لغزشی در فرآیند های صنعتی برای بالا بردن سطح کیفیت جوش و سهولت انجام کار توسط فرد جوشکار در این پایان نامه ارائه می شود. کیفیت جوشکاری به شدت تحت تأثیر عدم قطعیت ها قرار می گیرد که مهمترین آنها لرزش دست جوشکار است. بنابراین از کنترل مقاوم برای غلبه بر عدم قطعیت ها استفاده می شود. مدل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی برای تعیین حدود عدم قطعیت ها معرفی و بررسی می شود و بر این اساس کنترل کننده مود لغزشی برای کنترل طول قوس طراحی و شبیه سازی می گردد. در سیستم کنترل به اندازه گیری متغیرهای طول قوس و جریان جوشکاری توجه شده است و از منبع توان بر مبنای اینورتر با استفاده از تکنیک پهنای عرض پالس برای تولید ولتاژ در ماشین جوشکاری استفاده می شود. نوآوری این پایان نامه بهره گیری از روش مود لغزشی به منظور غلبه بر عدم قطعیت ها در سیستم جوشکاری قوس الکتریکی صنعتی است و مراحل طراحی و شبیه سازی را به انجام رسانیده است. در شبیه سازی های انجام شده سعی شده است تا با در نظر گرفتن شرایط نسبتاً عملی در یک جوشکاری دستی، به خصوص حضور دینامیک منبع توان در ماشین جوشکاری، کنترل مناسبی بر روی فرآیند انجام شود. در این راستا شیوه های کنترل ترکیبی فازی- مود لغزشی هم برای بهبود عملکرد فرآیند کنترل طول قوس پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ، کنترل مود لغزشی، کنترل مقاوم، کنترل فازی- مود لغزشی، منبع توان جوشکاری، عدم قطعیت ها،

فهرست مطالب

فصل اول

۱

- ۱ - مقدمه
- ۱-۱ - انگیزه پایان نامه
- ۲-۱ - اهداف مورد نظر
- ۳-۱ - مرور کارهای قبلی
- ۴-۱ - طرح کلی پایان نامه

فصل دوم

۹

- ۲- فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ
- ۲-۱ - مقدمه ای بر جوشکاری
- ۲-۲ - معرفی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ

فصل سوم

۲۳

- ۳- مدل سازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی
- ۳-۱ - مرور کلی بر سیستم
- ۳-۲ - سیستم الکتریکی
- ۳-۳ - قوس الکتریکی
- ۳-۴ - دینامیک های قطره مذاب
- ۳-۵ - جدا شدن قطره مذاب
- ۳-۶ - نرخ ذوب
- ۳-۷ - مدل دینامیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی
- ۳-۸ - بحث و نتیجه گیری

فصل چهارم

۴۱

- ۴- اهداف سیستم کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی
- ۴-۱ - اهداف سیستم کنترل
- ۴-۲ - پیکربندی های سیستم کنترل طول قوس

- ۴۸ -۵- کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی
- ۴۸ -۱-۵- کنترل طول قوس
- ۵۰ -۲-۵- مدل های دینامیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی
- ۵۲ -۳-۵- خطی سازی فیدبکی
- ۵۸ -۴-۵- بررسی عدم قطعیت
- ۶۱ -۵-۵- تئوری مد لغزشی
- ۷۳ -۶-۵- شیوه کنترل فازی- مود لغزشی
- ۷۵ -۷-۵- بحث و نتیجه گیری

- ۷۶ -۶- نتایج شبیه سازی
- ۷۶ -۱-۶- خطی سازی فیدبکی به همراه کنترل مود لغزشی
- ۸۵ -۲-۶- کنترل مود لغزشی
- ۸۸ -۳-۶- کنترل فازی- مود لغزشی
- ۹۱ -۴-۶- کنترل مود لغزشی با حضور منبع توان
- ۹۷ -۵-۶- کنترل فازی- مود لغزشی با حضور منبع توان

- ۹۹ -۷- نتیجه گیری

- ۱۰۱ گازهای محافظ

- ۱۰۴ اصطلاحات و نمادها

فهرست شکل ها

فصل اول

- شکل ۱-۱- بلوک دیاگرام کلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ با دو حلقه کنترلی ۳

فصل دوم

- شکل ۱-۲- شمای کلی از یک سیستم نوعی جوشکاری قوس الکتریکی ۱۵
- شکل ۲-۲- مدار الکتریکی در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی ۱۶
- شکل ۳-۲- معماری منابع تغذیه مدرن در ماشین های جوشکاری قوس الکتریکی ۱۸
- شکل ۴-۲- دسته بندی حالت های انتقال فلز، (الف) نمایش طرح حالت های انتقال فلز ۱۹
- شکل ۴-۲- دسته بندی حالت های انتقال فلز، (ب) حالت های انتقال فلز بر مبنای افزایش جریان و ولتاژ جوشکاری ۲۰

فصل سوم

- شکل ۱-۳- طرح کلی یک سیستم جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز ۲۴
- شکل ۲-۳- قطره مذاب آویزان که به صورت یک سیستم جرم- فتر- دمپر مدل شده است ۳۱
- شکل ۳-۳- مسیر عبور جریان در ناحیه هدایت که توسط زاویه θ مشخص می شود ۳۳

فصل چهارم

- شکل ۱-۴- پیکربندی های سیستم کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در حالت انتقال اسپری ۴۶

فصل پنجم

- شکل ۱-۵- اعمال خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی بر روی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه کنترل کننده خطی ۵۷
- شکل ۲-۵- مسیرهای فاز سیستم در حالت کنترل مود لغزش ۶۱
- شکل ۳-۵- تعریف یک لایه مرزی برای حذف لرزش ۶۴
- شکل ۴-۵- ساختار کنترلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با استفاده از خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی و کنترل مود لغزشی برای هر دو مدل دینامیکی پیشنهاد شده ۶۷
- شکل ۵-۵- ساختار کنترلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به شیوه مد لغزش ۷۰

شکل ۵-۶- ساختار کنترلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه کنترل داخلی جریان به شیوه مد لغزشی

شکل ۷-۵- کنترل کننده ترکیبی فازی- مود لغزشی

فصل ششم

شکل ۶-۱- تغییرات فاصله لوله اتصال تا قطعه کار (l_c) که همان لرزش دست جوشکار می باشد

شکل ۶-۲- مقایسه طول قوس واقعی و طول قوس در استفاده از خطی سازی فیدبکی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۳- تغییرات فاصله لوله اتصال تا قطعه کار و جریان جوشکاری در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۴- طول قوس در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۵- ولتاژ ترمینال در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۶- سیگنال کنترلی در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۷- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۸- سیگنال کنترلی مود لغزشی و جریان جوشکاری در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره دو

شکل ۶-۹- طول قوس در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره دو

شکل ۶-۱۰- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ در استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره دو

شکل ۶-۱۱- طول قوس در استفاده از کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۱۲- ولتاژ ترمینال و جریان جوشکاری در استفاده از کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۱۳- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ در استفاده از کنترل مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۱۴- توابع تعلق ورودی های کنترل کننده فازی S و $\dot{S}$

شکل ۶-۱۵- توابع تعلق مربوط به خروجی کنترل کننده فازی

شکل ۶-۱۶- سطح مربوط به قوانین کنترل فازی

شکل ۶-۱۷- طول قوس در استفاده از کنترل فازی- مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۱۸- ولتاژ ترمینال و جریان جوشکاری در استفاده از کنترل فازی- مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

شکل ۶-۱۹- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ در استفاده از کنترل فازی- مود لغزشی بر روی مدل شماره یک

- شکل ۶-۲۰- فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه مدار منبع توان بر مبنای اینورتر و کنترل کننده طول قوس مود لغزشی
- شکل ۶-۲۱- پارامترهای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی قبل و بعد از شروع جوشکاری، (الف) ولتاژ ترمینال، (ب) جریان جوشکاری
- شکل ۶-۲۱- پارامترهای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی قبل و بعد از شروع جوشکاری، (ج) طول قوس، (د) سیگنال کنترلی مود لغزشی
- شکل ۶-۲۲- ولتاژ ترمینال و جریان جوشکاری با حضور منبع توان و کنترل مود لغزشی
- شکل ۶-۲۳- طول قوس با حضور منبع توان و کنترل مود لغزشی
- شکل ۶-۲۴- سیگنال کنترلی مود لغزشی با حضور منبع توان و کنترل مود لغزشی
- شکل ۶-۲۵- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ با حضور منبع توان و کنترل مود لغزشی
- شکل ۶-۲۶- طول قوس با حضور منبع توان و کنترل فازی- مود لغزشی
- شکل ۶-۲۷- ولتاژ ترمینال و جریان جوشکاری با حضور منبع توان و کنترل فازی- مود لغزشی
- شکل ۶-۲۸- سیگنال کنترلی با حضور منبع توان و کنترل فازی- مود لغزشی

پیوست - ب

- شکل الف-۱ شکل دانه جوش و الگوی نفوذ جوش در استفاده از گازهای محافظ گوناگون و مقایسه تأثیر افزودن اکسیژن و دی اکسید کربن به گاز آرگون در شکل جوش

فصل اول

۱- مقدمه

جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز (در پناه گاز محافظ یا زیر گاز محافظ^۱) که به اختصار GMAW^۲ بیان می شود، فرآیندی است که برای اتصال قطعات فلزی استفاده می شود و احتمالاً امروزه یکی از موفق ترین و پرکاربردترین شیوه های جوشکاری در صنعت به حساب می آید. کیفیت جوش یکی از عوامل کلیدی در جوشکاری می باشد و در بسیاری از جوشکاری ها بعضی از نیازمندی های خاص کیفی باید برآورده شود. به هر حال، دست یابی به یک کیفیت جوش مطلوب ممکن است امکان پذیر نباشد چرا که کنترل و اداره کردن عملیات جوشکاری قوس الکتریکی توسط فرد جوشکار کاری بسیار دشوار است. بنابراین، می توان ماشین داخلی جوشکاری را به منظور سهولت کار جوشکار بهبود بخشید. موضوع اصلی این پایان نامه نیز بر چنین ارتقاء کنترل فرآیند جوشکاری، به منظور دست یابی به یک کیفیت جوش مناسب، بنا نهاده شده است. در ادامه برای سهولت به جای استفاده از نام کامل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ از نام مختصر آن یعنی جوشکاری قوس الکتریکی استفاده می کنیم مگر آنجایی که نیاز به تفکیک انواع فرآیندهای جوشکاری باشد.

۱-۱- انگیزه پایان نامه

با توجه به این که در کشور ما کمتر اتفاق می افتد که موضوعات تحقیقاتی در دانشگاهها جنبه صنعتی به خود بگیرد و بتواند مایه پیشرفت هم در زمینه علمی و هم در زمینه صنعتی گردد، بر آن شدیم تا در یکی از این زمینه های صنعتی که همان کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی می باشد کار کرده و بتوانیم تحقیقات علمی را بر روی این فرآیند، که یکی از کاربردی ترین فرآیندها در صنعت امروز می باشد، در زمینه کنترل هرچه بهتر آن برای دست یابی به یک کیفیت جوش مناسب، در راستای تعریف یک پایان نامه کارشناسی ارشد برق

در کتب فنی و حرفه ای [۵۴] و [۵۵] به این نام ترجمه شده است^۱

^۲ Gas Metal Arc Welding: GMAW

در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شاهرود، انجام دهیم. گرچه این پایان نامه به صورت پروژه ساخت تعریف نشده است، اما سعی شد تا حد امکان تمامی جنبه های عملی و صنعتی موضوع مدنظر قرار گیرد تا به سوی ساخت دستگاه های جوش قوس الکتریکی با کیفیت جوش بالا و کاربری آسان برای کنترل کیفیت توسط جوشکاران قدم برداریم.

۱-۲- اهداف مورد نظر

با توجه به این که در کشورمان اکثر صنایع ترجیح می دهند تا از جوشکاری قوس الکتریکی به شیوه دستی استفاده کنند، چرا که نسبت به جوشکاری خودکار یا جوشکاری رباتیک که در صنایع بزرگ خودرو سازی به کار برده می شود بسیار ارزان تر بوده و همچنین از پیچیدگی کمتری برخوردار است، از همین رو هدف گذاری خود را در این پایان نامه بر مبنای ارائه شیوه های کنترلی جدید در جهت بهبود کیفیت جوش در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی دستی قرار می دهیم. باید توجه داشت فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به انواع گوناگونی طبقه بندی می شود. به همین منظور برای جلوگیری از پراکندگی موضوعی، زمینه تحقیق خود را بر روی کنترل یکی از این شیوه ها متمرکز کردیم که همانا کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی دستی در حالت انتقال اسپری^۱ می باشد. از دید کلی، نحوه کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی را می توان به دو حلقه کنترل داخلی و خارجی تجزیه کرده به گونه ای که در کنترل حلقه داخلی هدف کنترل طول قوس یا ولتاژ قوس^۲ و نحوه انتقال فلز به حوضچه جوش (کنترل نحوه افتادن قطره و یا ذوب الکتروود) می باشد و در کنترل حلقه خارجی هدف کنترل پارامترهای حوضچه جوش می باشد. به طور معمول در جوشکاری قوس الکتریکی دستی، ماشین جوشکاری به تنهایی کنترل حلقه داخلی را بر عهده دارد در حالی که کنترل حلقه خارجی را فرد جوشکار انجام می دهد. در این پایان نامه تمرکز ما بر روی کنترل حلقه داخلی می باشد و کنترل حلقه خارجی مد نظر نمی باشد. هدف نهایی در این پایان نامه بهینه سازی و پیشرفت الگوریتم های کنترلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در حالت انتقال اسپری به منظور افزایش کیفیت جوشکاری می باشد.

۱-۳- مرور کارهای قبلی

تحقیقات در زمینه فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با موضوعات بسیار زیادی سروکار دارد. این موضوعات را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد که شامل کنترل فرآیند، بررسی و مدل سازی مشخصه های فیزیکی و دینامیکی فرآیند می شود. همانطور که قبلاً اشاره کردیم، کنترل فرآیند خود به دو شاخه کنترل پارامترهای حوضچه

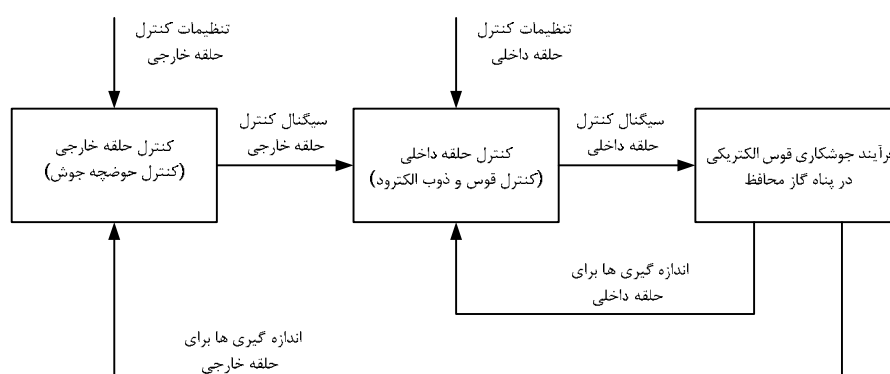
^۱ Spray Mode

^۲ Arc Length or Arc Voltage

جوش و کنترل قوس و ذوب الکتروود دسته بندی می شود. شاخه اول به موضوعاتی نظیر ابعاد و هندسه جوش، از قبیل میزان نفوذ جوش، نرخ سرد شدن و انتقال گرما به قطعه کار، سرعت حرکت انبر جوش، و فاصله انبر جوش با قطعه کار مربوط می شود که دارای نقش بسزایی در کیفیت جوش می باشند. نفوذ بیش از حد جوش منجر به اتصال ناحیه بیشتری از لبه های جوش می شود. اندازه دانه های جوش به نرخ سرد شدن و انتقال گرما وابسته است. از طرفی سرعت حرکت انبر جوش و فاصله آن تا قطعه کار نیز در شکل هندسی دانه های جوش بسیار مؤثر هستند.

شاخه دوم که همان کنترل قوس و ذوب الکتروود است نیز در کیفیت جوش مؤثر هستند. این شاخه از کنترل فرآیند مرتبط با الگوریتم های کنترلی است که در نحوه ذوب الکتروود، جدا شدن قطره، و پایدار سازی و تثبیت طول قوس الکتریکی به کار می روند. تحلیل و مدل سازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی خود انواع گوناگونی از موضوعات را دربر می گیرد که شامل تحلیل و مدل سازی نرخ ذوب الکتروود، قوس الکتریکی، نیروهای عمل کننده بر روی قطره مذاب، و نیروهای عمل کننده بر روی حوضچه جوش است. باید اشاره کرد که تحقیقات در زمینه استفاده از گازهای محافظ گوناگون و نقش آنها در نحوه انتقال فلز و کیفیت جوش نیز در حال انجام است [۱۴]. بهر حال تحقیقات در مورد فرآیند جوشکاری همچنان در حال پیشرفت است و در این پایان نامه سعی بر آن است تا آن را توسعه دهیم.

همانطور که در شکل ۱-۱- مشاهده می شود، بلوک دیاگرام کلی کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی نمایش داده شده است که در آن هر دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی نشان داده شده است. در جوشکاری قوس الکتریکی دستی، وظیفه کنترل حلقه خارجی بر عهده فرد جوشکار است و در جوشکاری خودکار سیستم جلوبرنده انبر جوش (که در جوشکاری رباتیک یک ربات است) این کار را انجام می دهد، در حالی که در هر دو نوع جوشکاری دستی و خودکار، حلقه داخلی توسط ماشین جوشکاری کنترل می شود.



شکل ۱-۱- بلوک دیاگرام کلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی که به دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی به صورت سری تقسیم می شود.

روی هم رفته برای دست یابی به یک سیستم جامع کنترل با کارایی بالا و توانایی برای تولید جوشهای با کیفیت بالا، هر دو حلقه کنترلی باید توسط کنترل کننده های با عملکرد بالا به کار برده شوند. در جوشکاری دستی کنترل کننده حلقه خارجی در حقیقت خود فرد جوشکار است و در صورتی که آن فرد از مهارت کافی برخوردار باشد می تواند یک کنترل سطح بالا را بر روی حلقه خارجی انجام دهد. در ادامه پایان نامه منظور از کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی همان کنترل حلقه داخلی کل فرآیند می باشد مگر آنجایی که نیاز به تفکیک موضوع باشد.

در حالت کلی، فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به سه حالت کاری عمده از نظر انتقال فلز مذاب به حوضچه جوش بسته به اندازه جریان الکتریکی و نیروهای دخیل در جداسازی قطره مذاب، تقسیم بندی می شود. این حالتها شامل حالت اتصال کوتاه یا قوس کوتاه^۱، حالت دانه ای^۲، و حالت اسپری^۳ می باشد. البته باید ذکر کرد که حالت اسپری پالسی^۴، که به جوشکاری قوس الکتریکی پالسی نیز معروف است و در آن از جریان الکتریکی پالسی متناوب استفاده می شود، را می توان به عنوان حالت خاصی از حالت اسپری در نظر گرفت یا به عنوان یک حالت مجزا تلقی کرد. در [۱۵]، [۵۴] و [۵۵] به این موضوع اشاره شده است. همچنین برای جریان های الکتریکی قویتر فرآیند به حالت جریان بخار فلز^۵ تبدیل می شود که در [۱۶] می توان آنرا یافت. در این پایان نامه تمرکز کاری بر روی حالت اسپری می باشد. در این حالت انتقال کافی است تا جریان و طول قوس در یک حد ثابتی نگه داشته شوند تا حالت انتقال اسپری در فرآیند حفظ شود.

یکی از ساده ترین شیوه ها برای دستیابی به کنترل جریان و طول قوس استفاده از اختلاف ولتاژ ثابت در فرآیند است. چرا که افت ولتاژ نسبتاً پایین بر روی الکتروود در مقایسه با ولتاژ قوس باعث می شود تا اغتشاشات موجود در فاصله بین انبر جوش تا قطعه کار تأثیر چندانی بر روی طول قوس نداشته باشند. در [۱۷] و بسیاری دیگر از منابع از این شیوه به رفتار "خود تنظیم" یاد می شود. برای کنترل فرآیند با عملکرد بالا، تنها استفاده از اعمال اختلاف ولتاژ ثابت بر روی سیستم کافی نیست، در عوض از روش کنترل فیدبک طول قوس و جریان استفاده می شود. چنین شیوه کنترلی در بسیاری از منابع ارائه شده است از جمله در [۱۸] و [۱۹]، که در آنها فرآیند جوشکاری به صورت یک سیستم چند ورودی-چند خروجی^۶ در نظر گرفته شده است و برای کنترل فرآیند از دو کنترل کننده تناسبی-انترگالی مستقل از هم برای یک نقطه کار ثابت بهره برده شده است. این رهیافت در [۲] و [۴] با استفاده از

¹ Short Circuit Mode or Short Arc Mode

² Globular Mode

³ Spray Mode

⁴ Pulsed Spray Mode

⁵ Streaming Mode

⁶ MIMO: Multi-Input Multi-Output

شیوه خطی سازی فیدبکی مستقل سازی شده و سپس کنترل تناسبی- انتگرالی به کار برده شده است. در [۶] شیوه کنترل مقاوم به سیستم کنترل قبلی اضافه شده است. در [۵] یک طرح کنترل تطبیقی چند متغیره برای کنترل سیستم ارائه شده است و همچنین در [۲۰] از الگوریتم شبه گرادیان برای به روز کردن پارامترهای کنترل کننده تناسبی- انتگرالی به شیوه تطبیقی بهره برده شده است. علاوه بر آن در [۷] یک الگوریتم کنترلی تناسبی- انتگرالی فازی بر روی سیستم اعمال شده است. در [۳] با نگاهی ابتکاری به فرآیند جوشکاری و با اذعان به این امر که عملاً در صنعت جوشکاری تنها ولتاژ ترمینال ماشین جوشکاری به عنوان سیگنال کنترلی در اختیار می باشد و همچنین با فرض ثابت بودن سرعت تغذیه الکتروود، سیستم را به صورت تک ورودی- تک خروجی^۱ در نظر گرفته و شیوه خطی سازی ورودی- خروجی و همراه با اعمال فیدبک حالت و کنترل انتگرالی را ارائه کرده است.

در جوشکاری قوس الکتریکی اسپری پالسی علاوه بر کنترل طول قوس باید نحوه انتقال فلز یا همان ذوب الکتروود را نیز کنترل نمود چرا که در این حالت مطلوب است به ازای هر پیک جریان الکتریکی یک قطره از الکتروود کنده شود تا به کیفیت جوش مناسب دست پیدا کنیم. شیوه های پیشرفته انتقال فلز در حالت اسپری پالسی را می توان در [۲۱] و [۲۲] یافت. همچنین در [۲۳] و [۲۴] از یک کنترل کننده خطی مقاوم در جوشکاری قوس الکتریکی پالسی استفاده شده است. در [۸] یک الگوریتم برمبنای مدل برای کنترل نحوه انتقال فلز استفاده شده است. در مورد کنترل حوضچه جوش، که همان کنترل حلقه خارجی در کل سیستم کنترل فرآیند جوشکاری می باشد، و دیگر جنبه های فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مطالب مفیدی را در [۲۵] و [۲۶] می توان یافت که در آنها تعداد بسیاری از منابع دیگر در این زمینه نیز آورده شده است.

الگوریتم های کنترلی که در این پایان نامه ارائه شده است بر مبنای اطلاعات و دانشی می باشند که از فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در قالب مدل دینامیکی فرآیند داریم. مسائل مهمی که در این زمینه مطرح می شوند شامل دینامک های نرخ ذوب، قوس الکتریکی، قطره مذاب، نیروهای عمل کننده بر روی قطره، جدا شدن قطره، مدار الکتریکی فرآیند و گازهای محافظ است. در جوشکاری قوس الکتریکی با توجه به انرژی قوس الکتریکی، سیم الکتروود با یک نرخ ذوب خاصی ذوب می شود و هم زمان از طریق سیستم تغذیه سیم، الکتروود به طور مداوم به سمت حوضچه جوش هدایت می شود. نرخ ذوب در فرآیند جوشکاری توسط افراد زیادی مدل سازی شده است، از جمله در [۲۷] و [۲۸]، که یکی از فاکتورهای مهم در مدل سازی نهایی می باشد.

در طی جوشکاری بین آند (سیم الکتروود) و کاتد (قطعه کار) یک قوس الکتریکی ایجاد می شود. مدل توصیف کننده ولتاژ قوس و طول قوس از اهمیت به سزایی در مدل کلی فرآیند جوشکاری برخوردار است. معمولاً از مدل ساده شده که ولتاژ قوس را به صورت تابعی از طول قوس و جریان الکتریکی بیان می کند، استفاده می شود که در

^۱ SISO: Single-Input Single-Output

[۱۵] و [۲۶] با آن اشاره شده است. اما باید توجه داشت که این مدل ساده دقیق نمی باشد و در حقیقت محاسبه مدل دقیق قوس الکتریکی بسیار سخت است. توصیف و بررسی دقیقتر در مورد فیزیک قوس الکتریکی را می توان در [۱۵] و [۲۹] یافت. همانطور که قبلاً بیان کردیم، موضوع مهم دیگر در مدل سازی فرآیند بحث قطره مذاب در انتهای الکتروود می باشد. در طی جوشکاری قطره مذاب همچنانکه فلز ذوب شده به آن اضافه می شود، شروع به رشد کرده و در نقطه ای خاص از الکتروود جدا می شود. نحوه شکل گیری و رشد قطره مذاب در [۳۰] و [۳۱] بیان شده است. در [۲۲] پارامترهای قطره مذاب و چگونگی جدا شدن قطره در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی پالسی بررسی شده است. قطره مذاب توسط نیروی کشش سطحی به سر انتهای الکتروود متصل است، از این رو همانطور که در [۸] می توان مشاهده کرد چنین سیستمی را می توان به صورت مدل سیستم جرم- فنر- دمپر مدل سازی کرد.

در طی جوشکاری نیروهای بسیاری بر قطره مذاب عمل می کنند که در میان آنها نیروی الکترومغناطیسی از اهمیت بسیاری برخوردار است. بحث مدل سازی نیروی الکترومغناطیسی و نحوه تأثیر آنها بر روی قطره مذاب را می توان در [۳۲] و [۸] یافت. همچنین در [۲۶] توصیفی جامع در مورد اهم نیروهایی که در فرآیند جوشکاری مؤثر هستند آورده شده است. جنبه مهم دیگر در فرآیند جوشکاری در ارتباط با قطره مذاب، نحوه جدا شدن آن است. قطره مذاب زمانی از سر انتهای الکتروود جدا می شود که نیروی کشش سطحی دیگر قادر به نگهداشتن قطره متصل به الکتروود نباشد. اساساً برای پیش بینی جدا شدن قطره مذاب دو مدل وجود دارد. مدل اول بر مبنای نیروی کشش سطحی و نیروهای محوری عمل کننده بر روی قطره می باشند و مدل دوم بر مبنای ناپایداری در استوانه مایع ایجاد شده بین قطره مذاب و الکتروود می باشد که در [۳۳] می توان یافت. بعد از جدا شده قطره مذاب از الکتروود، قطره به حوضچه جوش منتقل می شود و سرعت انتقال قطره مذاب بر حوضچه جوش و کیفیت نهایی قطره اثرگذار خواهد بود. اگر چه در مورد فرآیند کلی انتقال فلز که شامل رشد قطره مذاب و جدا شدن آن از الکتروود است در منابع ذکر شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است، اما در هر کدام از آنها به یکی از جنبه های این فرآیند توجه شده است. با این حال در [۳۴] کل فرآیند انتقال فلز در نظر گرفته شده است به گونه ای که نحوه انتقال فلز توسط تحلیل های ابعادی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

در مورد کنترل و شبیه سازی فرآیند، داشتن مدلی کامل از فرآیند جوشکاری ضروری می نماید به طوری که تمامی جنبه های گوناگون فرآیند را مد نظر قرار دهد. در مورد مسئله کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، موضوعات اساسی از قبیل دینامیک جریان الکتریکی، دینامیک نرخ ذوب، و دینامیک قوس الکتریکی باید در نظر گرفته شود. در منابعی از جمله [۱]، [۸]، [۱۵]، [۲۶]، [۲۸] و [۳۵] مدل کلی فرآیند جوشکاری در نظر گرفته شده است. بعلاوه در این منابع مدل توصیف کننده دینامیک جریان الکتریکی را می توان یافت.

۴-۱- طرح کلی پایان نامه

فصل دوم: فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ

در این فصل در ابتدا اشاره مختصری به انواع روش های جوشکاری و تاریخچه ای از فرآیند جوشکاری خواهد شد. سپس فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ مطرح می شود. بعد از آن توضیح مختصری راجع به فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، تجهیزات داخلی به خصوص ساختار منبع توان و نحوه کار آن و انواع حالت های انتقال فلز در این فرآیند ارائه می شود.

فصل سوم: مدل سازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در این فصل با توجه به دینامیک های حاکم بر رفتار فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ مدل ریاضی توصیف کننده فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی ارائه می شود.

فصل چهارم: اهداف سیستم کنترل جوشکاری قوس الکتریکی

در این فصل با بیان هدف مورد نظر در کنترل یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی دستی نتیجه می شود که کنترل طول قوس عامل تضمین کیفیت در جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ دستی می باشد که در حقیقت همان کنترل حلقه داخلی در حلقه کنترلی کلی در یک فرآیند جوشکاری است. در این راستا پیکربندی های سیستم کنترل در این زمینه بررسی شده است.

فصل پنجم: کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در این فصل با اشاره به کارهای انجام شده در زمینه کنترل طول قوس بعد از ساده سازی معادلات دینامیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، دو مدل دینامیکی تک ورودی- تک خروجی برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در نظر گرفته می شود. در مدل شماره یک دینامیک های جریان و طول قوس از مدل کلی ارائه شده در فصل سوم، به عنوان مدل دینامیکی برای کنترل طول قوس در نظر گرفته می شود و در مدل شماره دو با فرض وجود کنترل داخلی جریان برای منبع توان، دینامیک جریان در مدل شماره یک با یک مدل خطی تقریب زده می شود. سپس با استفاده از شیوه خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی و بیان ضعف آن در برابر عدم قطعیت های ساختاری و غیر ساختاری، کنترل طول قوس بر مبنای تئوری مود لغزشی در کنار خطی سازی فیدبکی و به تنهایی بر روی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی پیشنهاد می شود. همچنین عدم قطعیت های موجود در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مورد بررسی قرار می گیرد. در انتها با اشاره به استفاده از تئوری کنترل فازی در کنار شیوه مود لغزشی، برای بهبود عملکرد کنترل کننده طراحی شده از کنترل کننده فازی- لغزشی استفاده می شود.

فصل ششم: نتایج شبیه سازی

در این فصل با شبیه سازی کنترل کننده های طراحی شده در فصل پنجم نشان داده می شود که شیوه کنترل مود لغزشی پیشنهاد شده برای کنترل طول قوس چگونه می تواند با وجود تمام عدم قطعیت ها طول قوس پایداری را در سیستم جوشکاری قوس الکتریکی ایجاد کند. همچنین در این فصل با ارائه مدل منبع توان و شبیه سازی آن برای تهیه ولتاژ ترمینال برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی شرایطی نسبتاً عملی در شبیه سازی فراهم می شود تا نشان داده شود که کنترل کننده مود لغزشی قادر به کنترل طول قوس با وجود خطا در منبع توان جوشکاری به طور مقاوم می باشد.

فصل هفتم: نتیجه گیری

در این بخش نتایج پایان نامه مطرح می شود

پیوست ها

پیوست-الف: گازهای محافظ

در این پیوست نقش گازهای محافظ در افزایش کیفیت جوش و همچنین تأثیر این گازها در نحوه انتقال فلز در جوشکاری قوس الکتریکی مطرح می شود.

پیوست-ب: اصطلاحات و نمادها

در این پیوست فهرستی از اصطلاحات و نمادهای استفاده شده در معرفی مدل دینامیکی و کنترل کننده ها آورده شده است. همچنین مقدار عددی پارامترهای ثابت در مدل دینامیکی با ذکر واحد آنها معرفی می شوند.

فصل دوم

۲- فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ

در این فصل ابتدا مقدمه و تاریخچه ای مختصر از جوشکاری را بیان می کنیم [۴۹-۵۲]. سپس با بررسی انواع فرآیندهای جوشکاری، فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز (در پناه گاز محافظ) را به طور جامع توصیف خواهیم کرد.

۲-۱- مقدمه ای بر جوشکاری

اغلب سازه ها در صنعت از قطعات مختلف تشکیل شده اند که با روش های گوناگون به یکدیگر متصل می شوند. روشهای متفاوت اتصال قطعات به یکدیگر را بر حسب نوع فرآیند و یا بنیان علمی آنها به دسته های مختلفی به شرح زیر طبقه بندی نموده اند.

- روش های مکانیکی (پیچ، پرچ، پین، کشو، خار و ...)
 - روش های مکانیکی متالورژیکی (جوشکاری، لحیم کاری و ...)
 - روش های شیمیایی (چسب های معدنی و آلی)
 - و یا رده بندی بر اساس نوع اتصال
- 0 روش های اتصال موقت (پیچ و مهره، پین، خار و ...)
- 0 روش های اتصال نیمه موقت (پرچ، احتمالاً لحیم کاری نرم و بعضی چسب ها)
- 0 روشهای اتصال دائم (فرآیندهای جوشکاری و لحیم کاری سخت و اغلب چسب ها)

جوشکاری عبارت است از اتصال دو قطعه فلزی یا غیر فلزی به یکدیگر در اثر عوامل خارجی مثل حرارت و فشار که امروزه به صورت یک علم پیشرفته و موثر در خدمت صنایع در آمده است و دارای انواع گوناگونی است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می کنیم.

۲-۱-۱- تقسیم بندی فرآیندهای جوشکاری

با در نظر گرفتن تولید و نحوه حرارت و نحوه محافظت محل جوش و سایر موارد می توان هفت گروه زیر را در فرآیندهای جوشکاری مجزا نمود .

- فرآیندهای جوشکاری حالت جامد نظیر

0 جوشکاری اصطکاکی (Friction welding)

0 جوشکاری آهنگری (Forge welding)

0 جوشکاری فشاری (Pressure welding)

- فرآیندهای جوشکاری شیمیایی- حرارتی نظیر

0 جوشکاری با شعله یا گاز (Gas welding)

0 جوشکاری ترمیت یا مخلوط پودر آلومینیوم و اکسید آهن (Thermit welding)

- فرآیندهای جوشکاری مقاومتی نظیر

0 جوشکاری نقطه ای (Spot distance welding)

0 جوشکاری نواری (Seam resistance)

0 جوشکاری جرقه ای (Flush welding)

- فرآیندهای جوشکاری قوس الکتریکی محافظت شده با گاز خارجی نظیر

0 جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن (Gas tungsten arc welding: GTAW)

0 جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ (Gas metal arc welding: GMAW)

- فرآیندهای جوشکاری قوس الکتریکی محافظت نشده با گاز خارجی نظیر

0 جوشکاری قوس الکتریکی دستی (Manual metal arc welding or Stick-electrode welding)

یا جوشکاری قوس الکتریکی فلز پوششی (Shielded metal arc welding: SMAW) یا جوشکاری

قوس الکتریکی با هسته الکترودی گدازآور (Flux cored arc welding: FCAW)

0 جوشکاری الکتروود مداوم (Automatic metal arc welding)

• فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی پوششی زیر پودری (Submerged arc welding: SAW)

• فرآیند جوشکاری CO₂

• فرآیند های جوشکاری با انرژی تشعشعی نظیر

o جوشکاری با اشعه لیزر (Laser beam welding: LBW)

o جوشکاری با اشعه الکترونی (Electron beam welding: EBW)

۲-۱-۲- تاریخچه صنعت جوشکاری

جوشکاری در روزگار پیشین یک هنر به حساب می آمد. تاریخ نویسان نخستین روش های اتصال را در شرق به چینی ها و در غرب به رومی های باستان نسبت می دهند. چینی ها در سه هزار سال پیش از میلاد دانش اتصال برخی فلزات و غیر فلزات را آموخته بودند و رومی ها از لحیم هایی بهره می بردند که امروزه با اندک تغییری در صنایع جدید به کار می رود. مصریان، فنیقی ها، ایرانیان و پیشیان قوم آرتک به اصول و موازین اتصالات و به خصوص جوشکاری پی برده بودند، با این حال شروع جوشکاری به صورت یک فن آوری از سال ۱۸۰۰ میلادی رقم خود و در سال ۱۸۸۵ دو نفر انگلیسی به نامهای بناردز^۱ و اولزوسکی^۲ جوشکاری قوس الکتریکی را اختراع کردند. در سال ۱۸۹۰ میلادی برای اولین بار از میله فولادی به عنوان پر کننده استفاده شد و در سال ۱۹۰۰ میلادی جوشکاری با اکسیژن و استیلین به وسیله مشعل انجام گرفت. در همین سال بود که جوشکاری فشاری برای اولین بار به صورت اصطکاکی انجام شده و در سال ۱۹۴۰ میلادی یک سوئدی بنام اسکار شلبرگ^۳ الکتروودهای روکش دار را اختراع کرد که چون پایه گذار شرکت ESAB سوئد بود الکتروودهای روکش دار اولیه را به این کمپانی نسبت داده اند. امروزه نیز آن را با علامت اختصاری OK که مخفف نام مخترع آن است می شناسند.

با شروع فعالیت ها برای آغاز جنگ جهانی دوم (۳۰-۱۹۲۰) و با آغاز تلاشهایی برای ساخت، تعمیر و تکمیل تانکها، کشتی ها، هواپیما ها، آتشبارها، جوشکاری نیز اهمیت خود را پیدا کرد و در این راستا کشورهای پیشرو که خود را در شعله های فروزان جنگ درگیر می دیدند با افزایش تولیدات نظامی خود توجه خویش را به طراحی و ابداع روشهای ارزان، سریع و مطمئن جوشکاری معطوف داشتند و در طی همین سالها بود که بسیاری از روشهای ماشینی و جدید جوشکاری طراحی و آزمایش شدند. در سال ۱۹۳۰ روش استفاده از گازهای محافظ در اروپا و امریکا رایج شد و در اواسط همین سال برای اولین بار تکنیک جوشکاری زیر پودری اختراع شد. در همان سالها استفاده از گازهای

¹ Benarodos

² Olszewski

³ Oscar Kjellberg

خنثی مانند هلیوم و آرگون در امریکا و گاز فعال CO₂ در اروپا مرسوم گردید. به این ترتیب در دهه ۳۰ روشهای MIG/MAG^۱ (جوشکاری قوس الکتریکی با گاز خنثی یا فعال) در اروپا و امریکا شیوع پیدا کرد. با فروکش کردن آتش جنگ، فعالیت کارخانجات و صنایع در شرق و غرب زیاد شد و با آغاز دوران سازندگی مطالعه و تحقیق و علمی کردن جوشکاری در کشورهای مختلف دنیا آغاز شد. در اروپا و آلمان، جوشکاری استانداردسازی شده و در صنایعی چون فولاد، خودرو و ماشین آلات ارزش های خود را به نمایش گذاشت. در انگلستان در صنایع نفت و کشتی سازی جوشکاری به شکل علمی و مدرن به کار گرفته شد و در اندک زمانی رشد به سزایی نمود. در سال ۱۹۶۰ میلادی امریکا و شوروی نیز در مجموعه صنایع و به خصوص در صنایع خاص فضایی، هواپیمایی و غیره اطلاعات علمی و فنی جامعی درباره جوشکاری بدست آوردند و کاربرد جوشکاری در کلیه صنایع غیر قابل انکار شد و در همین سالها بود که استفاده از تشعشع الکترونی و لیزری مرسوم گردید. امروزه بیشترین کشورهای دنیا مطالعات وسیعی درباره جوشکاری انجام می دهند و آن را به عنوان یکی از علوم مادر و پایه در دروس مدارس و مؤسسات و دانشگاههای خود به شکل یک رشته تحصیلی مستقل در آورده اند.

در کشور ما نیز چند سالی است که امکان تحصیل و تحقیق در رشته جوشکاری در چند دانشگاه و در مقاطع عالی فراهم شده که به همت اساتید، پیشکسوتان و علاقه مندان به این رشته انجمن ها و مراکز آموزشی و پژوهشی نیز ایجاد گردیده است. حال با نگاهی دلسوزانه و دقیق به امکانات و سطح دانش جوشکاری موجود در کشور ((در مقایسه با کشورهای در حال توسعه صنعتی)) و با توجه به پتانسیل فراوان کار و نیاز پروژه های عظیم سازندگی و بازسازی در صنایع نفت، پالایش و پتروشیمی، نیروگاهی، خودرو، هواپیما، تسهیلات و غیره نیاز مبرم به افزایش فضا و امکانات فنی و ارتقاء سطح کیفی و دانش جوشکاری به گونه ای اجتناب ناپذیر مشخص می گردد.

۲-۱-۳- تاریخچه جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ

در ابتدا این روش را برای جوشکاری آلومینیم و دیگر فلزات غیر آهنی در دهه ۱۹۴۰ توسعه دادند، اما به زودی برای جوشکاری فولاد هم به کار برده شد چرا که در مقایسه با دیگر فرآیندهای جوشکاری، زمان کمتری برای جوشکاری لازم داشت. اما در همان زمان، هزینه بالای گازهای خنثی، استفاده از این فرآیند را در جوشکاری فولاد تا چندین سال بعد محدود کرد. با به کار بردن گازهای نیمه خنثی از قبیل دی اکسید کربن، استفاده از جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ در جوشکاری فولاد رواج یافت. در طی پیشرفت های بعدی که در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ صورت گرفت، قابلیت تطبیق این فرآیند افزایش پیدا کرد و در نتیجه به یک فرآیند صنعتی پرکاربرد تبدیل گشت. امروزه از جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ به طور معمول در صنایعی از قبیل صنایع

^۱ Metal Inert Gas: MIG, or Metal Active Gas: MAG

خودروسازی به خاطر تطبیق پذیری و سرعت بالای آن استفاده می شود. برخلاف فرآیند های جوشکاری که از گاز محافظ استفاده نمی کنند مانند جوشکاری قوس الکتریکی فلز پوششی^۱ و جوشکاری قوس الکتریکی با هسته الکترودی ذوب کننده یا گدازآور^۲، فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ، به علت فرار بودن گاز محافظ آن، به ندرت در فضای باز به کار برده می شود. فرآیند های جوشکاری که در فضای آزاد استفاده می شوند از قبیل جوشکاری قوس الکتریکی با هسته الکترودی ذوب کننده، اغلب از گاز محافظ استفاده نمی کنند، در عوض از یک الکترود سیمی توخالی استفاده می کنند که درونش با مواد ذوب کننده (گدازآور) پر شده است. همچنین در این جوشکاری ها موادی به صورت یک غشاء الکتروود فلزی را در بر می گیرند و در اثر حرارات جوشکاری به این مواد به گازهایی تجزیه می شوند که تا حدودی حوضچه جوش را پوشش می دهند.

اصول و پایه جوش قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ در اوایل قرن ۱۹ همراه با کشف قوس الکتریکی توسط همفری^۳ و داوی^۴ در سال ۱۸۰۰، شروع به گسترش کرد. در ابتدا کار از الکتروودهای کربنی در این فرآیند استفاده می کردند اما در اواخر دهه ۱۸۰۰ بعد از اختراع الکتروودهای فلزی توسط اسلاویانوف^۵ و کافین^۶، استفاده از الکتروودهای فلزی مرسوم شد. اولین سری سیستمی جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ توسط نوبل^۷ از شرکت General Electric اختراع شد. در آن سیستم از الکتروودهای سیمی بدون روکش و جریان مستقیم استفاده می شد و نیز از ولتاژ قوس برای تنظیم سرعت تغذیه سیم استفاده می شد. در آن زمان از گاز محافظ برای محافظت از حوضچه جوش استفاده نمی شد و پیشرفت ها در بکار گیری از آن در فضای اطراف جوش در اواخر همان دهه اتفاق افتاد. در سال ۱۹۲۶ فرم دیگری از جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ ارائه شد که برای کاربرد های عملی مناسب نبود. این اوضاع ادامه داشت تا بالاخره در سال ۱۹۴۸ سیستم جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ توسط موسسه Battle Memorial تکمیل شد. این موسسه از الکتروودهای با قطر کم و منبع تغذیه ولتاژ ثابت استفاده می کرد که توسط کندی^۸ گسترش داده شده بود. آنها یک روش با نرخ رسوب بالا را پیشنهاد دادند ولی به خاطر هزینه بالای گازهای خنثی، استفاده از این روش را برای جوشکاری فلزات غیر آهنی محدود می کرد. در سال ۱۹۵۳ استفاده از دی اکسید کربن به عنوان گاز محافظ جوشکاری توسعه یافت و به سرعت توانست جای خود را در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ ارتقاء بخشد چرا که صرفه اقتصادی زیادی برای جوشکاری

^۱ Shielded Metal Arc Welding: SMAW

^۲ Flux Cored Arc Welding: FCAW

^۳ Hemphry

^۴ Davy

^۵ N.G. Slavianoff

^۶ C.L. Coffin

^۷ P.O. Nobel

^۸ H.E. Kennedy

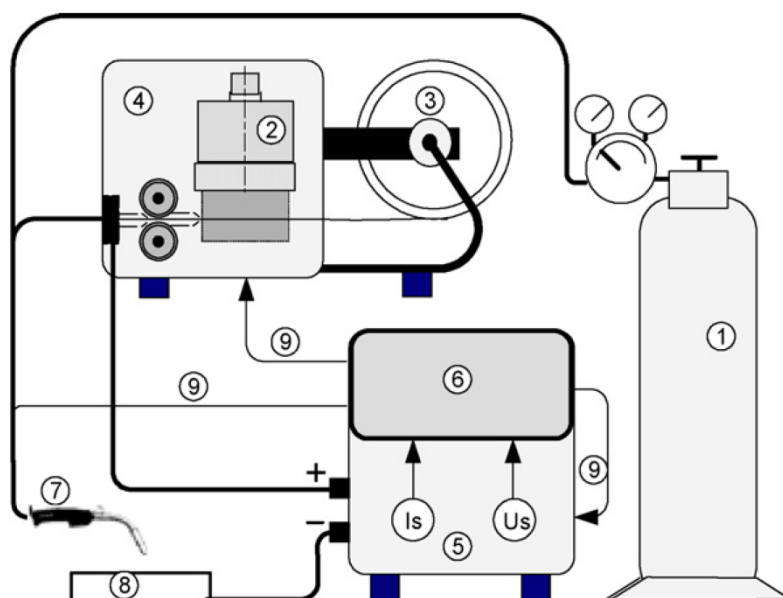
فولاد به همراه داشت. در سال ۱۹۵۸ و ۱۹۵۹، حالت انتقال اتصال کوتاه ارائه شد که تطبیق پذیری جوشکاری را افزایش داد و همچنین امکان جوشکاری فلزات نازک را به کمک استفاده از سیم های الکترو دباریکتر و منابع تغذیه پیشرفته تر، ایجاد کرد. این شیوه انتقال، به سرعت به محبوبترین نوع جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ تبدیل گشت. حالت انتقال اسپری در اوایل دهه ۱۹۶۰ گسترش یافت، بدین ترتیب که آزمایش کنندگان مقدار کمی اکسیژن را به گازهای خنثی اضافه کردند. در سال های اخیر، جریان پالسی به جای جریان مستقیم مورد استفاده قرار گرفته است که منجر به ظهور شیوه جدیدی در جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ گشت که به آن اصطلاحاً حالت انتقال اسپری پالسی می گویند.

امروزه فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ یکی از مشهورترین روش های جوشکاری می باشد، خصوصاً در محیطهای صنعتی از این شیوه به وفور در صنایع فلزات ورقه ای، و همچنین با کمی گسترش بیشتر، در صنایع خودرو سازی به کار برده می شود. در این صنایع اغلب از جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ برای جوشکاری نقطه ای استفاده می شود و به طبع آن توانست جایگزین سیستم های پرچ کردن و جوشکاری نقطه ای مقاومتری بشود. این فرآیند همچنین در جوشکاری رباتیک کاربرد فراوان دارد به گونه ای که ربات ها با نگه داشتن قطعه و بدست گرفتن انبر جوش، توانسته اند به پروسه های ساخت و تولید سرعت بیشتری ببخشند. معمولاً استفاده از این فرآیند در فضای باز نامناسب است، چرا که وزیدن هوای اطراف در محیط باز می تواند منجر به پراکنده شدن گاز محافظ از محل حوضچه جوش شود و جوشکاری را بسیار دشوار سازد. ضمن این که کیفیت جوش را هم کاهش می دهد. این مشکل را می توان تا حدودی با افزایش مقدار گاز محافظ در محل حوضچه جوش برطرف کرد، اما این کار می تواند گران تمام شود. در کل، فرآیند هایی از قبیل جوشکاری قوس الکتریکی فلز محافظت شده و جوشکاری قوس الکتریکی با هسته الکترو دی ذوب کننده برای جوشکاری در فضای باز ترجیح داده می شوند که این مسئله باعث شده است تا استفاده از جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ در صنایع ساختمان سازی محدود شود. علاوه بر این استفاده از یک گاز محافظ بیرونی در جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ موجب شده است که تا در جوشکاری زیر آب کارایی نداشته باشد، و به همین دلیل به ندرت در کاربرد های فضایی نیز استفاده می شود.

۲-۲- معرفی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ

جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ به صورت خودکار و یا دستی انجام می شود. این فرآیند خود شامل دو زیر مجموعه می شود. جوشکاری قوس الکتریکی با گاز خنثی که از گازهای آرگون و هلیوم استفاده می کند و جوشکاری با قوس الکتریکی با گاز فعال که از گاز دی اکسید کربن استفاده می کند.

برای انجام جوشکاری در شیوه جوشکاری قوس الکتریکی تجهیزات لازم به ترتیب شامل: انبر جوش^۱، قطعه کار^۲، منبع تغذیه جوشکاری و سیستم کنترل^۳، سیستم تغذیه سیم الکترو^۴، سیم الکترو^۵ و گاز محافظ^۶ می باشند. در شکل ۱-۲ می توان نمای کلی از یک سیستم جوشکاری قوس الکتریکی به همراه تجهیزات مورد نیازش را مشاهده کرد. در این فرآیند از الکترو^۴ مصرفی استفاده می شود و قوس الکتریکی بین این الکترو^۴، که معمولاً به سیم آند (سر مثبت منبع تغذیه) وصل می شود، و قطعه کار که به سیم کاتد (سر منفی یا زمین منبع تغذیه) وصل می شود، برقرار می شود. انرژی تولید شده در قوس الکتریکی منجر به ذوب الکترو^۴، شکل گیری قطره مذاب و جدا شدن آن از الکترو^۴ می شود و همزمان الکترو^۴ جدید توسط سیستم تغذیه الکترو^۴ جایگزین می شود. این فرآیند توسط گاز محافظ از تأثیرات هوای اطراف محافظت می شود که معمولاً از گازهای خنثی مانند آرگون و یا مخلوطی از آرگون و دی اکسید کربن استفاده می شود.



شکل ۱-۲- شمای کلی از یک سیستم نوعی جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ [۳۶]. (۱) مخزن گاز محافظ، (۲) موتور DC و جعبه دنده برای حرکت سیم الکترو^۴ به سمت قطعه کار، (۳) توپ الکترو^۴ جوشکاری، (۴) واحد تغذیه الکترو^۴، (۵) منبع توان جوشکاری، (۶) واحد کنترل، (۷) انبر جوشکاری، (۸) قطعه کار، (۹) کابل های انتقال دهنده سیگنال های کنترلی.

¹ Pistol or Torch or Gun

² Workpiece

³ Power Supply

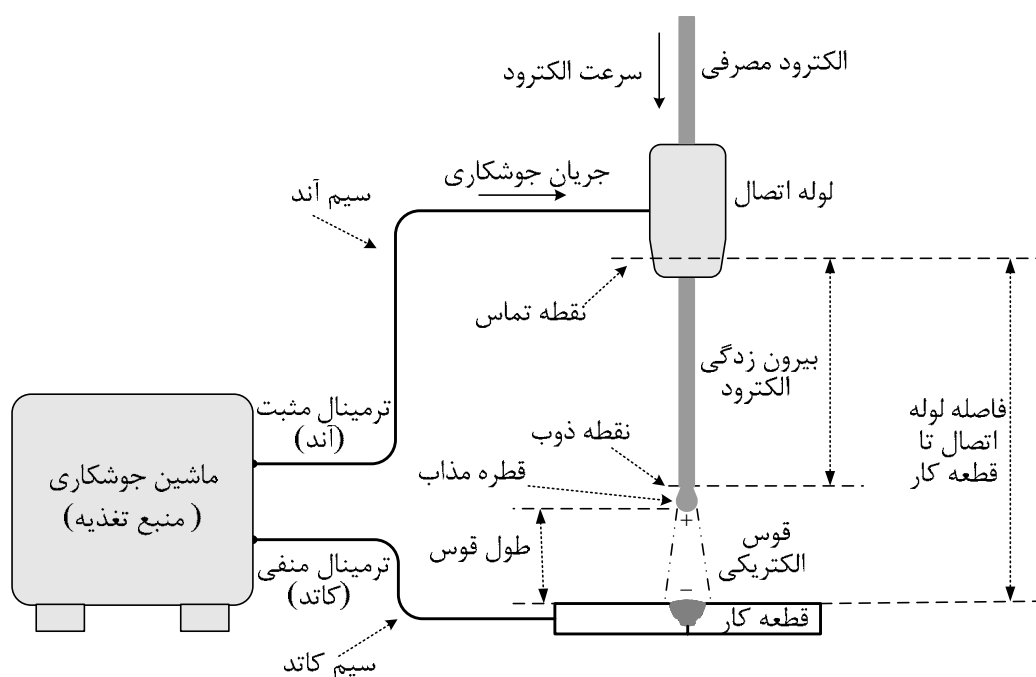
⁴ Wire Feed System

⁵ Electrode Wire

⁶ Shielding Gas

علت استفاده از گازهای محافظ در این نوع از جوشکاری به این دلیل می باشد که اکسیژن و نیتروژن موجود در هوای اطراف با حوضچه جوش واکنش نشان داده و ایجاد اکسید بر روی سطح جوش می کنند که یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت جوش به حساب می آیند و به "سرباره" معروف است. بنابراین گازهای محافظ مانند سدی در برابر نفوذ هوای اطراف به حوضچه جوش عمل می کنند. از طرفی استفاده از این گازهای محافظ تأثیر به سزایی در حالت انتقال فلز خواهد داشت که می تواند در کیفیت جوش مؤثر باشد. توضیحات بیشتر در مورد چگونگی تأثیر گازهای محافظ و نوع استفاده از آنها را می توان در پیوست-الف مشاهده کرد.

در شکل ۲-۲- مجدداً نمایی از یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با جزئیات بیشتر ارائه شده است که شامل مدار الکتریکی نیز می شود. سیم الکتروود در داخل انبر جوش از طریق لوله اتصال^۱ به سیم آند متصل می شود و جریان الکتریکی را به سمت قوس هدایت می کند. جریان گاز محافظ هم از همان مسیر در امتداد سیم آند به حوضچه جوش تزریق می شود و گاهی هم یک سیستم چرخش آب برای خنک کردن انبر جوش در مسیر سیم آند تعبیه می شود. انبر جوش می تواند به طور دستی و یا خودکار در امتداد شکاف جوش حرکت داده شود. در این پایان نامه تمرکز بر روی جوشکاری دستی می باشد.



شکل ۲-۲- مدار الکتریکی در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

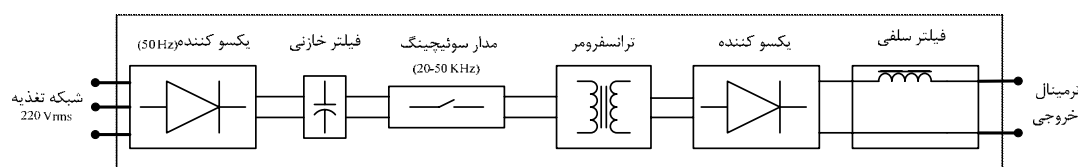
¹ Contact Tube

معمولاً در جوشکاری دستی فرد جوشکار برای رسیدن به کیفیت جوش خوب پارامترهای ماشین جوشکاری را تنظیم می کند که اغلب سرعت تغذیه سیم و ولتاژ ترمینال است. اگر چه فاصله انبر جوش تا قطعه کار یا به طور دقیق تر فاصله لوله اتصال تا قطعه کار و سرعت حرکت انبر جوش در امتداد شکاف هم از عوامل مهم در کیفیت جوش به حساب می آیند، اما برای فرد جوشکار بسیار سخت است که بتواند بعد از تنظیم پارامترهای ماشین جوشکاری فاصله لوله اتصال تا قطعه کار را تقریباً ثابت نگه دارد و با یک سرعت مشخصی هم انبر جوش را به جلو هدایت کند. بنابراین اعمال کنترل بر روی پارامترهای ماشین جوشکاری در جوشکاری دستی لازم به نظر می رسد.

۲-۲-۱- منابع تغذیه جوشکاری قوس الکتریکی

در سیستم های جوشکاری قوس الکتریکی معمولاً از منابع تغذیه ولتاژ ثابت در اکثر کاربردها استفاده می کنند. در نتیجه هرگونه تغییری در طول قوس، منجر به تغییرات زیادی در گرمای ورودی خواهد شد. به طور مثال طول قوس های کوچکتر گرمای ورودی بیشتر تولید می کنند که باعث خواهد شد تا الکتروود بسیار سریع تر ذوب شود و در نتیجه طول قوس آغازین حفظ می شود. این مسئله به کاربر کمک می کند تا طول قوس را پایدار و ثابت نگه دارد، حتی وقتی جوشکاری به صورت دستی انجام می شود. برای رسیدن به تأثیرات کمتر ناشی از تغییرات طول قوس، بعضی اوقات از یک منبع تغذیه جریان ثابت در ترکیب با یک واحد تغذیه الکتروود کنترل شده با ولتاژ قوس استفاده می کنند. در این حالت، تغییری در طول قوس منجر به تنظیم سرعت تغذیه الکتروود به گونه ای می شود تا یک طول قوس نسبتاً ثابت را برقرار کند [۵۰]. در شرایط نادری ممکن است یک منبع تغذیه جریان ثابت با یک واحد تغذیه الکتروود سرعت ثابت با هم کوپل شوند، خصوصاً در جوشکاری های فلزاتی با رسانایی حرارتی بالا مانند آلومینیم این کار انجام می شود. استفاده از این روش به کاربر این امتیاز را می دهد تا کنترل اضافی روی گرمای ورودی به جوش داشته باشد اما نیاز به مهارت عمده ای برای انجام موفقیت آمیز آن دارد.

منابع تغذیه جریان متناوب به ندرت در جوشکاری قوس الکتریکی استفاده می شود، در عوض جریان مستقیم بیشتر به کار برده می شود و الکتروود معمولاً به قطب مثبت منبع وصل است چرا که آند تمایل به جذب گرمای بیشتری دارد. این مسئله منجر به ذوب سریعتر الکتروود می شود که نفوذ جوش و سرعت جوش را افزایش می دهد. قطب های اتصال می تواند معکوس شود البته فقط زمانی که الکتروود های روکشدار تابنده خاص به کار برده شوند که این نوع الکتروود ها کمتر مورد استفاده قرار می گیرند. ماشین های جوشکاری قدیمی بر مبنای تکنولوژی ترانسفورمری استوار بودند به گونه ای که ولتاژ بالا و جریان پایین به ولتاژ پایین و جریان بالای مورد نیاز جوشکاری تبدیل می شد.



شکل ۲-۳- معماری منابع تغذیه مدرن در ماشین های جوشکاری قوس الکتریکی

چنین تبدیلی در ماشین های جوشکاری مدرن که بر اساس تکنولوژی مبدل های DC به DC بر مبنای اینورتر^۱ می باشند، نیز وجود دارد. در این ماشین های مدرن از یک ساختار سخت افزاری جدید که در [۸] و [۳۶] آورده شده است، استفاده می شود. شکل ۲-۳- ساختار این معماری را نشان می دهد. در این ساختار ابتدا منبع تغذیه سه فاز از طریق شبکه تغذیه به سیستم متصل می شود. سپس عمل یکسوسازی سه فاز انجام شده و توسط فیلتر پایین گذر ولتاژ یکسو شده صاف می گردد. این ولتاژ مستقیم توسط مدارات سوئیچینگ که اینورتر هم جزئی از آن است، به ولتاژ متناوب با دوره وظیفه^۲ متغیر توسط نرم افزار کنترلی ماشین جوشکاری تبدیل می شود. این ولتاژ متناوب یا دارای دو سطح ولتاژ مثبت و ولتاژ صفر و یا دو سطح ولتاژ صفر و ولتاژ منفی است. بعد از آن این ولتاژ توسط یک ترانسفورمر به یک ولتاژ پایین تر کاهش می یابد که این ترانسفورمر یک ایزولاسیون گالوانیک بین شبکه سه فاز و ماشین جوشکاری به وجود می آورد. سپس این ولتاژ آسنکرون خروجی از ترانسفورمر توسط یک مدار صافی سلفی فیلتر می شود تا بتواند جریان نسبتاً صافی را در خروجی تولید کند.

۲-۲-۲- تقسیم بندی انواع حالت های انتقال فلز در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

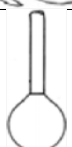
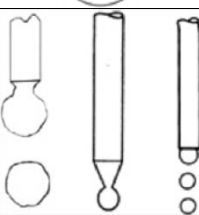
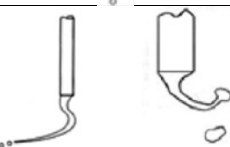
در حالت کلی از دو دید می توان به مسئله انتقال فلز در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی نگاه کرد. یکی از دید فیزیک انتقال فلز و دیگری از دید افزایش مقدار پارامترهای جوشکاری است. در مورد اول نیروهای مؤثر در جداسازی قطره مذاب از الکترود تعیین کننده حالت انتقال فلز هستند و در مورد دوم افزایش جریان الکتریکی جوشکاری و ولتاژ قوس باعث تغییر حالت انتقال فلز می شوند. در این حالت بسته به نیروهای عمل کننده بر روی قطره مذاب، سه حالت اصلی در انتقال فلز را می توان تعریف کرد [۱۴].

- حالت اتصال کوتاه یا قوس کوتاه- که عامل کلیدی در آن نیروی کشش سطحی می باشد.
- حالت دانه ای- که در آن عامل کلیدی نیروی گرانشی می باشد.
- حالت اسپری- که در آن عامل کلیدی نیروی فشاری قوس الکتریکی می باشد.

¹ Inverter based DC to DC converters

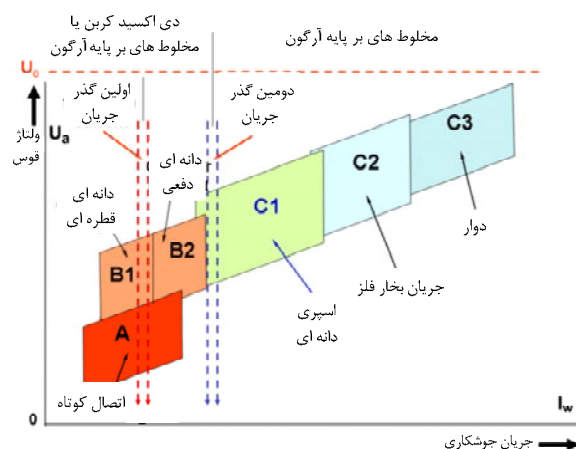
² Duty cycle

البته در تقسیم بندی های استاندارد با در نظر گرفتن افزایش جریان الکتریکی و ولتاژ قوس حالت های انتقال دیگری هم تعریف می شود که البته کاربردی نیستند چراکه باعث انتقال حرارت بسیار زیاد به قطعه کار شده و بازدهی کمی را از نظر صرف انرژی ایجاد می کنند و از طرفی در کیفیت جوش نیز تأثیر خوبی ندارند. در شکل ۲-۴- (الف) که در مقاله [۱۶] در سال ۲۰۰۸ ارائه شده، ۶ حالت اساسی را برای طبقه بندی انتقال فلز پیشنهاد داده است و با طبقه بندی مؤسسه بین المللی جوشکاری^۱ در سال ۱۹۸۴ آنرا مطابقت داده است. در این طبقه بندی نقش افزایش پارامترهای جوشکاری مد نظر قرار گرفته است و به عنوان کامل ترین، ساده ترین، و جدیدترین دسته بندی حالت های انتقال فلز معرفی شده است. همچنین منحنی تغییر حالت ها را بر اساس افزایش جریان و ولتاژ در شکل ۲-۴- (ب) رسم شده است. در اینجا فقط به تشریح سه حالت اولیه که در بالا بیان کردیم می پردازیم چرا که در صنعت بیشتر از این سه حالت استفاده می شود.

نام منطبق با IIW	طرح	حالت انتقال فلز	طبقه بندی
۲. انتقال به صورت پل ۱.۲. اتصال کوتاه		اتصال کوتاه	A
۱. انتقال آزاد ۱.۱. دانه ای ۱.۱.۱. قطره ای		قطره دانه ای	B1
۱. انتقال آزاد ۱.۱. دانه ای ۲.۱.۱. دفعی		دفعی دانه ای	B2
۱. انتقال آزاد ۲.۱. اسپری ۱.۲.۱. پرتابی		اسپری دانه ای	C1
۱. انتقال آزاد ۲.۱. اسپری ۲.۲.۱. جریان بخار فلز		جریان بخار فلز	C2
۱. انتقال آزاد ۲.۱. اسپری ۳.۲.۱. دوار		دوار	C3

(الف)

¹ International Institute of Welding (IIW)



(ب)

شکل ۲-۴- دسته بندی حالت های انتقال فلز، (الف) نمایش طرح حالت های انتقال فلز، (ب) حالت های انتقال فلز بر مبنای افزایش جریان و ولتاژ جوشکاری نمایش داده شده اند و به صورت زیر نامگذاری شده اند: A- حالت اتصال کوتاه، B1- حالت قطره دانه ای، B2- حالت دفعی دانه ای، C1- حالت اسپری دانه ای یا پرتابی، C2- حالت جریان بخار فلز، C3- حالت دوار. (ب) منحنی مشخصه ولتاژ- جریان جوشکاری و حالت های انتقال فلز بر اساس تغییرات جریان و ولتاژ به همراه گاز محافظ استفاده شده در هر حالت [۱۶].

حالت اتصال کوتاه اولین بار برای جوشکاری فولاد استفاده شده است و در آن از گاز دی اکسید کربن برای محافظت جوش استفاده می شود. در این حالت انتقال الکترون با قطر کمتر به کار می رود و جریان الکتریکی استفاده شده به نسبت بقیه حالت های انتقال فلز کمتر می باشد. به دلیل جریان جوشکاری کمتر، گرمای ورودی به قطعه کاهش می یابد که امکان جوشکاری فلزات نازکتر را ایجاد می کند، در حالیکه میزان اعوجاج در ناحیه جوش کاهش پیدا می کند. قطره های مذاب در انتهای الکترون شکل می گیرند ولی به جای افتادن داخل حوضچه جوش، به دلیل سرعت تغذیه سیم بیشتر در این حالت نسبت به بقیه حالت ها، پلی بین الکترون و حوضچه جوش ایجاد می شود. این کار باعث ایجاد یک اتصال کوتاه شده و قوس الکتریکی را خاموش می کند. اما بعد از اینکه نیروی کشش سطحی در حوضچه جوش دانه جوش را از انتهای الکترون به سمت خود کشید، سریعاً قوس الکتریکی دوباره روشن می شود. این فرآیند تقریباً ۱۰۰ بار در ثانیه تکرار می شود که منجر به ثابت دیده شدن قوس الکتریکی در چشم انسان می شود. این حالت از انتقال فلز کیفیت جوش بهتر و ترشحات کمتری نسبت به حالت دانه ای دارد و قادر به جوشکاری در تمام موقعیت ها می باشد. اگرچه که نرخ رسوب کمتری دارد. برای دست یافتن به این حالت، پارامترهای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی (ولتاژ قوس و جریان الکتریکی) را باید در محدوده نسبتاً کوچکی که برای پایدار ماندن قوس لازم است تنظیم کرد، که معمولاً کمتر از ۲۰۰ آمپر و ۲۲ ولت برای اکثر کاربردهاست. از این حالت انتقال فقط می توان در جوشکاری فلزات آهنی استفاده کرد.

فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با حالت انتقال دانه ای اغلب به عنوان نامطلوبترین حالت انتقال در بین حالت‌های اصلی در جوشکاری قوس الکتریکی در نظر گرفته می شود، بخاطر استفاده از جریان بالا تر نسبت به حالت اتصال کوتاه، تمایل آن به تولید حرارت بالا، سطح جوش ضعیف، و ترشحات زیاد بیشتر می شود. این حالت انتقال به عنوان یک راه به صرفه در جوشکاری فولاد گسترش پیدا کرد، چرا که در این حالت هم از دی اکسید کربن به عنوان گاز محافظ استفاده می شود که نسبت به آرگون ارزان تر است. علاوه بر مزیت اقتصادی اش، به خاطر نرخ رسوب بالا باعث افزایش سرعت جوشکاری تا حدود ۱۱۰ میلیمتر بر ثانیه (۲۵۰ اینچ بر ثانیه) می شود. در این حالت انتقال همچنان که قوس الکتریکی ایجاد می شود، یک قطره مذاب فلزی در انتهای الکترود به وجود می آید که اغلب دارای شکل نامنظم است و قطری بزرگتر از خود الکترود دارد. برعکس حالت اتصال کوتاه که قطره مذاب قبل از جدا شدن با قطعه کار حتماً یک اتصال کوتاه برقرار می کند، در این حالت قطره مذاب یا توسط نیروی گرانشی یا توسط اتصال کوتاه کنترل نشده از الکترود جدا می شود و به سمت قطعه کار می افتد که سطح جوش ناهموار و ترشحات زیادی را ایجاد می کند. به علت بزرگ بودن قطره مذاب، معمولاً کاربرد این فرآیند به جوشکاری در موقعیت های تخت و افقی محدود است. میزان گرمای تولیدی در این شیوه نیز مشکلات زیادی به همراه دارد از جمله این که جوشکار را مجبور می کند تا از الکترودهای ضخیم تری استفاده کند که این خود باعث افزایش اندازه حوضچه جوش شده و همچنین باعث اعوجاج در ناحیه جوش خواهد شد.

حالت اسپری در جوشکاری قوی الکتریکی اولین شیوه انتقال فلزی بود که برای جوشکاری آلومینیوم و فولاد ضدزنگ مورد استفاده قرار گرفت کاربری مناسبی را از خود نشان داد. در این شیوه از گازهای خنثی مانند آرگون برای محافظت از حوضچه جوش استفاده می شود و قطره مذاب به سرعت در طی قوس پایدار از انتهای الکترود به قطعه کار به صورت اسپری انتقال می یابد که ذاتاً باعث حذف ترشحات جوش و منجر به یک جوش با کیفیت در آخر کار می شود. همچنانکه جریان الکتریکی و ولتاژ قوس از محدوده حالت اتصال کوتاه افزایش می یابند، یک انتقال از حالت دانه های بزرگ مذاب به قطرات کوچک بلکه به جریان بخار فلز در انرژی های بالا، صورت می گیرد. چرا که این حالت انتقال نیاز به ولتاژ و جریان بالاتری از حالت اتصال کوتاه و دانه ای دارد و به دلیل گرمای ورودی بیشتر و حوضچه جوش بزرگتر (برای الکترود با قطر مشخص)، معمولاً از این روش فقط در جوشکاری قطعات با ضخامت بالای ۶/۴ میلیمتر (۰/۲۵ اینچ) استفاده می شود. همچنین به خاطر حوضچه جوش بزرگتر اغلب به جوشکاری در موقعیت های تخت و افقی محدود می شود. وقتی که از الکترود باریکتر در کنار گرمای ورودی کمتری استفاده شود، قابلیت تطبیق این روش افزایش می یابد. حداکثر نرخ رسوب در حالت اسپری مقداری نسبتاً بالا در حدود ۶۰ میلیمتر بر ثانیه (۱۵۰ اینچ بر ثانیه) می باشد.

حالت انتقال فلزی که اخیراً بسیار گسترش یافته است حالت انتقال اسپری پالسی می باشد که بر مبنای اصول حالت اسپری می باشد با این تفاوت که از جریان پالسی برای ذوب کردن الکتروود استفاده می کند و اجازه می دهد که به ازاء هر پالس یک قطره مذاب کوچکتر از قطر الکتروود از آن جدا شده و به حوضچه جوش منتقل شود. حالت پالسی این امکان را می دهد که سطح متوسط جریان پایین آید که این خود باعث کاهش گرمای ورودی کلی به قطعه کار شده و در نتیجه منجر به کاهش اندازه حوضچه جوش و منطقه تحت تاثیر گرما می شود، در حالیکه امکان جوشکاری قطعات نازک را هم فراهم می کند. حالت اسپری پالسی یک قوس پایدار بدون ترشحات را موجب می شود چرا که هیچ گونه اتصال کوتاهی بین الکتروود و قطعه رخ نمی دهد. این مسئله باعث شده است که این فرآیند تقریباً برای جوشکاری تمام فلزات مناسب باشد و الکتروودهای با ضخامت بالا هم می توانند در این شیوه مورد استفاده قرار گیرند. به خاطر ایجاد حوضچه جوش کوچکتر، این شیوه دارای تطبیق پذیری بیشتری بوده و این امکان را می دهد تا بتوان در تمام موقعیت ها جوشکاری را انجام داد. در مقایسه با حالت اتصال کوتاه، این شیوه تقریباً دارای حداکثر سرعت کمتری می باشد (۸۵ میلیمتر در ثانیه یا ۲۰۰ اینچ در ثانیه). در این شیوه اصولاً نیاز است تا از گاز آرگون مخلوط با دی اکسید کربن در غلظت پایین، به عنوان گاز محافظ استفاده شود. بعلاوه این شیوه نیاز به منابع تغذیه خاصی دارد تا قادر باشد که جریان پالسی با فرکانسی بین ۳۰ تا ۴۰ پالس در ثانیه را فراهم کند. در هر حال این شیوه توانسته محبوبیت و شهرت زیادی بدست آورد چراکه به گرمای ورودی کمتری نیاز دارد و می توان از آن برای جوشکاری قطعات نازک مواد آهنی و غیر آهنی استفاده کرد که این خود از نظر بهینه سازی انرژی در جوشکاری بسیار قابل توجه است.

جزئیات و مطالب کاملتر در مورد حالت های انتقال فلز و چگونگی کاربرد آنها در صنعت را می توان در

منابعی از جمله [۱۴] و [۳۷] مشاهده کرد.

فصل سوم

۳- مدل سازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در این فصل قسمت های مختلف فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مدل می شود و با ترکیب کردن این قسمت ها، یک مدل کلی برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی بدست خواهد آمد.

۳-۱- مرور کلی بر سیستم

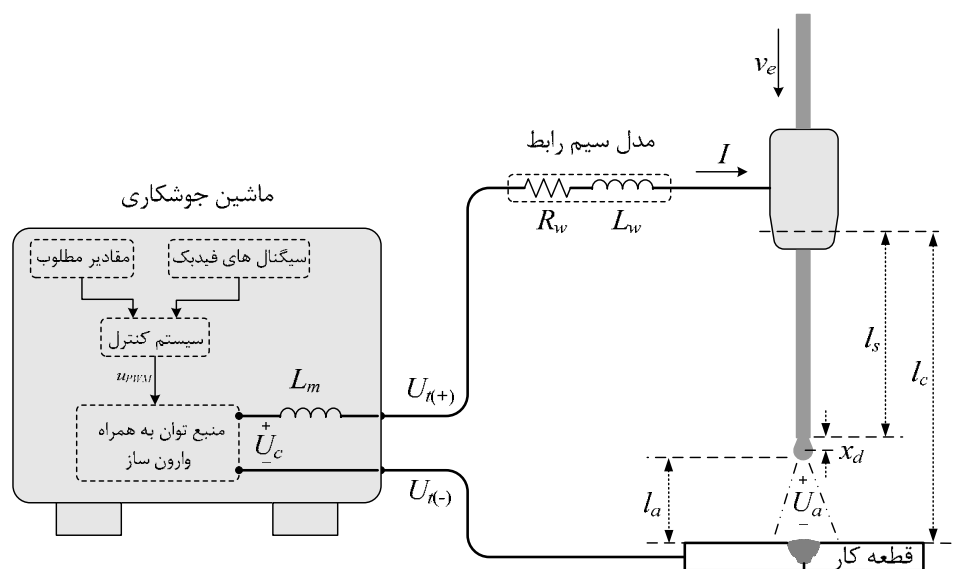
هدف کلی این پایان نامه، ارتقاء کیفیت جوش توسط توسعه طرح های کنترلی پیشرفته برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی می باشد. یک روش برای یافتن چنین طرح کنترلی توسعه مدل ریاضی توصیف کننده رفتار فرآیند تحت کنترل می باشد و سپس بر مبنای آن مدل می توان کنترل کننده مناسب را طراحی کرد. چنین رهیافتی در این پایان نامه مدنظر قرار خواهد گرفت. بنابراین در این فصل مدل ریاضی توصیف کننده رفتار فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی بر اساس کارهای انجام شده در [۱]، [۸]، [۱۵]، [۲۶] بدست خواهد آمد. علاوه بر مدل ریاضی بدست آمده در این فصل، این مدل می تواند برای شبیه سازی رفتار فرآیند نیز مورد استفاده قرار گیرد. این بسیار مهم است که تمامی آزمایشات بر روی کنترل کننده سیستم در محیط شبیه سازی انجام می شود و نه بر روی یک سیستم جوشکاری واقعی، اگرچه که در این پایان نامه سعی خواهد شد تا در شبیه سازی تمامی جنبه های عملی جوشکاری تا حد امکان مد نظر قرار گیرد.

در شکل ۳-۱- فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه پارامتر های مربوط به مدل دینامیکی آن نمایش داده شده است. معمولاً ماشین های جوشکاری امروزه به صورت یک ماشین دیجیتال است و بنابراین فرآیند کنترل بر مبنای یک فرکانس نمونه برداری معینی انجام می شود. به طور کلی در هر زمان نمونه برداری مقدار سیگنال های فیدبک گرفته شده از متغیر هایی که باید کنترل شوند، با مقادیر مطلوب در سیستم کنترل مقایسه شده و بر مبنای الگوریتم کنترلی به کار گرفته شده یک سیگنال کنترلی به نام u_{pwm} برای اینورتر محاسبه می شود. از آنجایی که

اینورترها می توانند با تکنولوژی مدولاسیون پهنای پالس^۱ کار کنند، این سیگنال کنترلی توسط مبدل پهنای پالس مدوله شده و برای اینورتر ارسال می شود تا سیگنال ولتاژ کنترلی U_c که همان سیگنال u_{pwm} توان دار شده است را به سر ترمینال ماشین جوشکاری منتقل کند.

برای محافظت از اینورتر و نرم کردن جریان الکتریکی، یک سیم پیچ کوچک با مقداری ثابت به نام L_m بعد از اینورتر قرار می گیرد. سرهای ترمینال ماشین جوشکاری بعد از سیم پیچ قرار گرفته است و ولتاژ ترمینال ماشین، U_c را در این قسمت می شود اندازه گیری کرد.

به طور مرسوم در جوشکاری قوس الکتریکی سرهای ترمینال ماشین جوشکاری به فرآیند متصل می شوند، همانطور که در شکل ۳-۱- نشان داده شده است. این بدان معنا است که سیم آند به الکترود مصرفی و سیم کاتد به قطعه کار متصل است. جریان الکتریکی قوی در سیم های رابطی که به ترمینال ها متصل است جاری می باشد و به همین دلیل افت ولتاژ بر روی سیم های رابط باید مدنظر قرار گیرد. همان طور که در شکل ۳-۱- نشان داده شده است سیم های رابط به صورت یک سلف کلی L_m و یک مقاومت کلی R_m مدل شده اند. الکترود در انبر جوش درون یک قطعه فلزی استوانه ای حرکت می کند که به سیم آند ترمینال متصل می باشد و به دلیل تماس مماسی الکترود با قطعه فلزی تماس الکتریکی آند با الکترود برقرار می شود. جریان الکتریکی از طریق الکترود در داخل قوس الکتریکی جاری می شود و بنابراین مدار الکتریکی با اتصال قطعه کار به سیم ترمینال کاتد کامل می شود.



شکل ۳-۱- طرح کلی یک سیستم جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ به همراه معرفی پارامتر های مربوط به مدل دینامیکی فرآیند.

^۱ Pulse Width Modulation: PWM

در وضعیت حالت دائم یعنی زمانی که تغییرات طول قوس صفر می شود و ولتاژ ترمینال هم ثابت است، سرعت ذوب الکتروود v_m با سرعت پایین رونده الکتروود v_e برابر می شود و بنابراین در شرایط حالت دائم طول قوس به مقدار ثابتی همگرا خواهد شد. در قسمت های بعدی جنبه های متفاوتی از فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مدل خواهند شد. در بخش ۲-۳ فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی از دید سیستم الکتریکی آن مدل خواهد شد که از قوانین مقدماتی مربوط به تئوری مدارهای الکتریکی استفاده می کند. توصیف دینامیک قوس الکتریکی و رابطه ریاضی که ولتاژ قوس را تشریح می کند در بخش ۳-۳ ارائه می شود. بعد از آن در بخش ۳-۴ دینامیک های قطره مذاب آویزان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس در بخش ۳-۵ جدا شدن قطره مذاب از الکتروود بررسی می شود و در بخش ۳-۶ مدل نرخ ذوب الکتروود ارائه می شود. در بخش ۳-۷ تمامی دینامیک های بدست آمده از قسمت های مختلف فرآیند در یک مجموعه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول جمع آوری می شوند که توصیف کننده فرآیند کلی جوشکاری قوس الکتریکی می باشد.

۲-۳- سیستم الکتریکی

فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی می تواند به صورت یک مدار الکتریکی در نظر گرفته شود. چنین مداری در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. اگر ولتاژ کنترل U_c به عنوان ورودی سیستم ملاحظه شود، اجزاء مدار الکتریکی شامل سلف ماشین جوشکاری L_w (که بسیار کوچک است)، سیم های آند و کاتد، لوله اتصال، الکتروود، قوس الکتریکی و قطعه کار خواهند بود. وقتی که یک ولتاژ کنترلی U_c به فرآیند اعمال شود، جریان الکتریکی I در مدار برقرار می شود همانطور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

به چندین دلیل نیاز است که مدل الکتریکی سیم های رابط از ماشین جوشکاری به سمت فرآیند در مدل سیستم جوشکاری قوس الکتریکی نظر گرفته شوند. یک دلیل آن افت ولتاژ بر روی سیم های رابط ناشی از جریان الکتریکی بالا در جوشکاری می باشد که نیاز است در طراحی کنترل کننده برای فرآیند در نظر گرفته شوند. دلیل دیگر دینامیک های جریان الکتریکی می باشد که به طور کلی توسط همین سیم ها تعیین می شوند. در این حالت سیم های رابط مدار به صورت یک مقاومت R_w و یک سلف L_w مدل شده اند. در شکل ۱-۳ L_w و R_w به عنوان مجموع مقاومت و سلف آند و کاتد در نظر گرفته شده اند.

در داخل لوله اتصال که به سیم آند متصل است، الکتروود در یک یا چندین نقطه با لوله برخورد دارد و بنابراین تماس الکتریکی با الکتروود برقرار می شود. به طور نرمال افت ولتاژ کوچکی در نقاط تماس الکتروود با لوله اتصال به وجود می آید که می تواند به صورت یک مقاومت مدل شود. چنین مقاومتی را به صورت مقاومت تماسی R_c مشخص می کنند که به طور مثال در [۳۶] مقداری برای آن در نظر گرفته است.

از نقطه تماس الکترود با لوله اتصال تا شروع شدن قوس الکتریکی، جریان در قسمتی از الکترود جاری می شود. طول این قسمت از الکترود در مقایسه با طول سیم های رابط بسیار کوچک است، اما چون الکترود بسیار باریک است مقاومت آن بالا می رود و بنابراین افت ولتاژ بر روی الکترود باید در مدل مداری به حساب آورده شود. مقاومت این قسمت از الکترود با R_e مشخص می شود. آن طولی از الکترود که جریان الکتریکی از آن عبور می کند اصطلاحاً بیرون زدگی^۱، l_s تعریف می شود.

عمده ترین افت ولتاژ در مدار الکتریکی ولتاژ قوس U_a می باشد. برای جریان های ضعیف، ولتاژ کنترل U_c تقریباً با ولتاژ قوس برابر است. هرچند، برای جریان های قوی تر ولتاژ کنترل باید مقداری بیشتر باشد به خاطر مقاومت های الکترود و سیم های رابط و همچنین به خاطر سلف هایی که جریان الکتریکی را تغییر می دهند. در اینجا یک مدل از مدار الکتریکی را می توان بدست آورد.

$$U_c = (L_m + L_w)\dot{I} + (R_w + R_c + R_e)I + U_a \quad (۱-۳)$$

که در آن I جریان الکتریکی جوشکاری می باشد. اگر ولتاژ ترمینال U_t به عنوان ورودی فرآیند در نظر گرفته شود، آنگاه رابطه مدار الکتریکی به صورت زیر خواهد بود.

$$U_t = L_w\dot{I} + (R_w + R_c + R_e)I + U_a \quad (۲-۳)$$

مقاومت الکترود R_e می تواند بر حسب مقاومت ویژه الکترود ρ_r ضرب در کل طول الکترود در مدار الکتریکی که شامل قطره مذاب هم می شود، مدل شود. طول قطره مذاب می تواند به صورت میانگین موقعیت قطره x_d ، که از انتهای سر الکترود تا مرکز جرم قطره سنجیده می شود، و شعاع قطره r_d مدل شود.

$$R_e = \rho_r \left(l_s + \frac{1}{2}(x_d + r_d) \right) \quad (۳-۳)$$

با این وجود، هم x_d و هم r_d در مقایسه با بیرون زدگی الکترود l_s بسیار کوچکتر می باشند و بنابراین با تقریب خوبی می توان از آنها در مدل مقاومت الکترود صرف نظر کرد. بنابراین خواهیم داشت.

$$R_e = \rho_r l_s \quad (۴-۳)$$

^۱ Stick-Out

همانطور که در شکل ۳-۱- نشان داده شده است، بیرون زدگی الکتروود l_s فاصله بین لوله اتصال و نقطه ذوب الکتروود است. با توجه به این که الکتروود در طی جوشکاری در حال ذوب شدن است و دائم از طول آن کم می شود و همچنین از طریق سیستم تغذیه سیم الکتروود این کاهش طول جبران می شود، بیرون زدگی الکتروود l_s یک مقدار ثابت نیست و دارای دینامیک می باشد که به شدت در تغییرات طول قوس مؤثر است. دینامیک l_s از طریق سرعت حرکت الکتروود یا همان سرعت تغذیه سیم الکتروود v_e و سرعت ذوب الکتروود v_m بدست می آید، تغییرات فاصله عمودی لوله اتصال (سر اتصال هم گفته می شود) تا قطعه کار^۱ نیز در تعیین این دینامیک مؤثر است. این تغییرات به عنوان یکی از اساسی ترین اغتشاشها در سیستم های جوشکاری دستی به حساب می آید که از لرزش دست فرد جوشکار ناشی می شود و در بعضی مواقع می تواند تأثیر بسیار نامطلوبی در کیفیت جوش داشته باشد. فاصله سر اتصال تا قطعه کار را با l_c نمایش می دهند و سرعت سر اتصال با قطعه کار را با v_c نمایش می دهند. بنابراین دینامیک بیرون زدگی الکتروود به صورت زیر بدست می آید.

$$\dot{l}_s = v_e - v_m \quad (۵-۳)$$

در هنگام طراحی کنترل کننده، کنترل طول قوس نسبت به کنترل بیرون زدگی عملی تر است چرا که سنسوری وجود ندارد که بتواند بیرون زدگی را عملاً اندازه گیری کند در حالی که سنسورهایی از قبیل اندازه گیر نور قوس همچنانکه در [۳۸] ذکر شده است قادر به اندازه گیری طول قوس می باشند. بنابراین همان طور که در شکل ۳-۱- نیز دیده می شود، با صرف نظر از طول قطره رابطه بین طول قوس و بیرون زدگی را می توان به صورت زیر نوشت.

$$l_a = l_c - l_s \quad (۶-۳)$$

بنابراین با تلفیق معادلات (۵-۳) و (۶-۳) می توان دینامیک طول قوس را به صورت زیر نوشت که در بخش ۳-۶- راجع به آن توضیح داده خواهد شد.

$$\dot{l}_a = v_m - v_e + v_c \quad (۷-۳)$$

^۱ Contact Tube/Tip to Workpiece Distance

۳-۳- قوس الکتریکی

در جوشکاری قوس الکتریکی الکتروود مصرفی به ترمینال مثبت ماشین جوشکاری و قطعه کار به ترمینال منفی متصل است. بنابراین وقتی که قوس الکتریکی را در نظر می گیریم، سر انتهای الکتروود مصرفی آند خواهد بود و قطعه کار (یا الکتروود دیگر) کاتد خواهد بود. در طی جوشکاری، قوس الکتریکی بین آند و کاتد به وجود می آید که آن را می توان به صورت تخلیه بار الکتریکی بین الکتروود ها در نظر گرفت. مشخصه این تخلیه بار الکتریکی وجود یک جریان الکتریکی بالا و افت ولتاژ کم بین الکتروود ها می باشد. در داخل قوس الکتریکی، الکترون ها از کاتد آزاد شده و به سمت آند حرکت می کنند و در همین زمان، یونهای مثبت به سمت کاتد حرکت می کنند.

هدف در این بخش این نیست که وارد جزئیات تمام جنبه های مربوط به قوس های الکتریکی شویم بلکه با توصیف و تعیین یک مدل برای قوس الکتریکی زمینه برای شبیه سازی فرآیند و طراحی کنترل کننده فراهم شود. در هنگام کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، رسیدن به یک طول قوس ثابت و پایدار بسیار مهم است. همچنین باید از رخ دادن اتصال کوتاه های اتفاقی الکتروود با قطعه کار جلوگیری شود. اما از طرف دیگر داشتن یک طول قوس کوچک از نظر بهینه سازی انرژی ضروری می باشد که آن را در فصل بعدی توضیح خواهیم داد. با توجه به این که ولتاژ قوس U_a بین دیگر متغیر های جوشکاری بیشترین وابستگی را به طول قوس دارد، از این رو در نظر گرفتن قوس الکتریکی با هدف تعیین رابطه بین ولتاژ قوس U_a و طول قوس l_a از اهمیت بسیاری برخوردار خواهد بود.

از نظر فیزیکی قوس الکتریکی را می توان به سه ناحیه یا سه لایه تقسیم بندی کرد؛ ناحیه آندی، ستون قوس و ناحیه کاتدی. طول نواحی آندی و کاتدی که از طرف آند و کاتد اندازه گیری می شوند بسیار کوچک است، اما این دو ناحیه به خصوص ناحیه کاتدی تأثیر عمده ای بر روی افت ولتاژ قوس دارند.

۳-۳-۱- بررسی نواحی سه گانه در قوس الکتریکی

مکانیزم اصلی نگه داشتن تخلیه بار الکتریکی در داخل قوس در ناحیه کاتدی اتفاق می افتد. علاوه بر آن، از کل ولتاژ قوس بیشترین افت ولتاژ در این ناحیه قرار دارد. ناحیه کاتدی خود به سه قسمت تقسیم بندی می شود که به ترتیب: سطح کاتدی (سطح قطعه کار)، ناحیه بارفضا و ناحیه یونیزاسیون می باشد. سطح کاتدی توسط الکترون ها باردار می شود و این الکترون ها از سطح رها شده و وارد ناحیه بارفضایی می شوند که یون های مثبت در آنجا قرار دارند. ناحیه بارفضایی به صورت لایه ای بسیار باریک است و در این مکان به طور تصادفی برخوردی بین الکترون ها و دیگر ذرات رخ نمی دهد. الکترون ها تحت میدان الکتریکی موجود بین ناحیه بارفضا و سطح کاتدی شتاب می گیرند. سپس در ناحیه یونیزاسیون این الکترون های شتاب دار با سرعت بالا به ذرات موجود در این ناحیه (اتم ها و ملوکول های ماده الکتروود) برخورد می کنند که انرژی حاصل از این برخورد باعث یونیزاسیون ذرات در این ناحیه شده و

الکترون آزاد و یون مثبت ایجاد می کنند. این الکترون های آزاد در داخل میدان الکتریکی موجود به سمت آند شتاب می گیرند و یون ها هم به سمت کاتد شتاب خواهند گرفت. یون های سنگین تر که سرعت کمتری دارند جای یون هایی را در ناحیه بارفضایی پر می کنند که به سطح کاتد منتقل شده اند. بنابراین جریان الکتریکی در ناحیه کاتدی عملاً توسط الکترون ها و یون های مثبت منتقل می شود.

در ستون قوس، الکترون های شتاب دار وارد پلاسمای متشکل از ذرات خنثی (اتم ها و ملوکول ها) و ذرات باردار (الکترون های و یون های مثبت) می شوند. از نظر الکتریکی این ناحیه خنثی به حساب می آید چرا که تعداد ذرات باردار با بار مثبت و منفی در یک حجم کوچک با هم برابر است و در نتیجه باعث ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت در این ناحیه می شوند که از میدان الکتریکی موجود در ناحیه کاتدی و آندی بسیار کوچکتر است. جریان الکتریکی در این ناحیه مانند ناحیه کاتدی توسط الکترون ها و یون های مثبت منتقل می شود.

در ناحیه آندی که مانند ناحیه کاتدی خود از سه قسمت سطح آندی (سطح قطره مذاب از الکتروود)، ناحیه بارفضا و ناحیه یونیزاسیون تشکیل می شود، جریان الکتریکی تماماً توسط الکترون ها منتقل می شود چرا که از سطح آندی هیچ یونی ساطع نمی شود و به جای آن اتم های سطح قطره مذاب به سبب بخار شدن از سطح آندی ساطع می شوند. این اتم ها در ناحیه بارفضایی در ناحیه آندی در اثر برخورد با الکترون های آزاد موجود در این ناحیه یونیزه می شوند. هر چی انرژی ناشی از یونیزاسیون بیشتر باشد یعنی تعداد بیشتری یون مثبت ایجاد شود، ناحیه بارفضای بزرگتر شده و در نتیجه افت ولتاژ نیز بیشتر خواهد شد. با توجه به این که بیشترین انرژی یونیزاسیون در ناحیه کاتدی وجود دارد، طول ناحیه بارفضایی ناحیه کاتدی خیلی بیشتر از طول ناحیه بارفضایی ناحیه آندی می باشد و بنابراین افت ولتاژ در ناحیه کاتدی بسیار بیشتر از ناحیه آندی خواهد بود که اهم افت ولتاژ قوس را شامل می شود.

۳-۳-۲ مدل ریاضی برای قوس الکتریکی

با در نظر گرفتن هر کدام از نواحی قوس الکتریکی که در بخش قبل توضیح دادیم، یک مدل ریاضی که توصیف کننده رفتار قوس الکتریکی باشد قابل استخراج است. مدل های ارائه شده در [۱۵] وابسته به متغیر هایی از قبیل حرارت در نقاط مختلف قوس الکتریکی می باشند که اندازه گیری و تخمین آنها بسیار مشکل است. علاوه بر آن یک مدل پیچیده با جزئیات زیاد برای طراحی کنترل کننده ضروری نمی باشد. در عوض می توان قوس الکتریکی را به صورت رابطه ای میان کل ولتاژ قوس U_a ، جریان الکتریکی جوشکاری I و طول قوس l_a مدل کرد. در اینجا یک مدل خطی برای این منظور ارائه شده است که چنین مدلی در بسیاری از موارد استفاده شده است. این مدل را می توان صورت زیر نوشت.

$$U_a = U_0 + R_a I + E_a l_a \quad (۸-۳)$$

جمله های موجود در این معادله را با توجه به آنچه که در بخش قبل شرح داده شد، می توان توضیح داد. ثابت U_0 نشان دهنده مجموع کل افت ولتاژهای مربوط به دو ناحیه بار فضایی می باشد که به ثابت ولتاژ قوس معروف است. دو جمله آخر هم نشان دهنده افت ولتاژ بر روی ستون قوس می باشد، چرا که افت ولتاژ در این ناحیه وابسته به جریان الکتریکی و طول قوس می باشد. برای جریان های قوی برخورد بیشتری بین الکترون ها و ذرات خنثی در آن ناحیه نسبت به جریان های ضعیف اتفاق می افتد و همانطور که قبلاً توضیح دادیم، چون برخورد بیشتر انرژی یونیزاسیون بیشتری هم تولید می کند بنابراین افت ولتاژ بیشتر خواهد شد. این وابستگی افت ولتاژ به اندازه جریان را می توان به صورت یک مقاومت R_a مدل کرد. از طرفی، هر چقدر طول قوس بیشتر باشد، مسیر طی شده توسط الکترون ها و یون های مثبت بیشتر خواهد بود. این مسئله باعث می شود که احتمال برخورد و یونیزاسیون بیشتر شود و به دنبال آن افت ولتاژ افزایش خواهد یافت. بنابراین نسبت افزایش ولتاژ قوس با افزایش طول قوس را می توان با ضریب ثابتی به نام E_a مدل کرد که به فاکتور طول قوس معروف است.

واضح است که (۸-۳) یک مدل تقریبی و غیر دقیق است. مدل های بسیار پیچیده رابطه ای غیر خطی با جریان و طول قوس دارند که در بعضی مراجع ذکر شده در اول فصل ارائه شده اند. این سادگی در مدل سازی مصالحه ای است برای طراحی کنترل کننده است. اگر چه باید در طراحی کنترل کننده این مسئله را جزو قسمتی از عدم قطعیت در مدل سازی منظور کرد و تا حد امکان کنترل کننده را به صورت مقاوم در برابر تمام عدم قطعیت ها طراحی کرد.

۳-۴- دینامیک های قطره مذاب

در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، الکتروود توسط گرمای اهمی و گرمای آندی ذوب می شود. گرمای اهمی انرژی است که توسط جریان الکتریکی و مقاومت اهمی در الکتروود ایجاد می شود. گرمای آندی موجود در قوس الکتریکی است که آند (همان سر انتهایی الکتروود) را ذوب می کند. بنابراین در طی جوشکاری فلز سیال به طور پیوسته به قطره مذاب در سر انتهایی الکتروود اضافه می شود و در نقطه ای قطره فلزی آویزان، از الکتروود جدا می شود. مقداری فلز در سر انتهایی الکتروود باقی می ماند و قطره جدیدی شروع به شکل گرفتن می کند. اساساً قطره مذاب وقتی جدا می شود که نیروی کشش سطحی، که قطره مذاب را به الکتروود متصل نگه می دارد، قادر به جلوگیری از حرکت روبه پایین قطره مذاب توسط عوامل دیگر تأثیرگذار بر روی آن نباشد. بنابراین در مدل سازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی باید نیروهای مؤثر بر حرکت قطره و همچنین دینامیک قطره مذاب را مد نظر قرار داد. در یکی از مدل های معروف ارائه شده دینامیک قطره مذاب آویزان به صورت یک سیستم جرم- فنر- دمپر توصیف

شده است. اگرچه که مدل های پیچیده تری هم ارائه شده اند [۳۳]. مدل جرم- فنر- دمپر که در شکل ۳-۲ آورده شده است توصیف کننده رفتار قطره مذاب آویزان می باشد. در این شکل m_d جرم قطره است که با زمان تغییر می کند، F_T مجموع تمام نیروهای است که بر قطره مذاب اثر می گذارند، x_d موقعیت قطره از نقطه ذوب، b_d ثابت دمپر و k_d ثابت فنر می باشد. بنابراین معادله حاکم بر دینامیک این سیستم را می توان به صورت زیر نوشت.

$$m_d \ddot{x}_d = F_T - b_d \dot{x}_d - k_d x_d \quad (۹-۳)$$

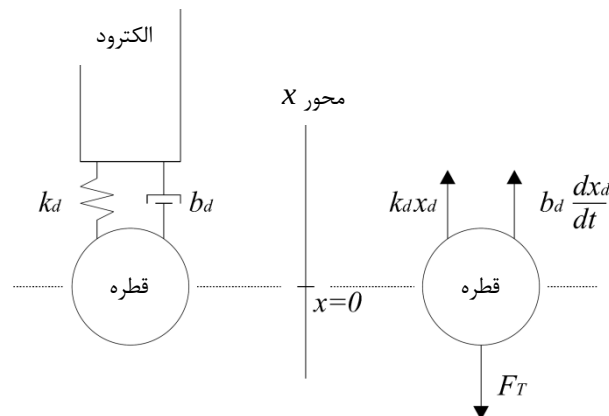
تغییرات در جرم قطره مذاب آویزان وابسته به نرخ ذوب یا همان سرعت ذوب است. این تغییر جرم را می توان به صورت زیر نوشت که در آن M_R نرخ ذوب است و ρ_e چگالی ماده سیال الکتروود می باشد.

$$\dot{m}_d = M_R \rho_e \quad (۱۰-۳)$$

نیروهای که بر قطره مذاب اثر می گذارند شامل نیروی گرانشی، نیروی ناشی از القای الکترومغناطیسی، نیروی ناشی از کشش آیرودینامیک و نیروی ناشی از اندازه حرکت به علت تغییر در جرم قطره مذاب و همچنین سرعت اضافه شده ماده سیال به قطره می باشد. اگرچه نیروهای دیگری نیز بر دینامیک قطره مذاب تأثیر می گذارند، اما این چهار نیرو که در اینجا مطرح شده اند به عنوان عمده ترین نیروهای مؤثر بر قطره مذاب در نظر گرفته می شوند. بنابراین مجموع نیروها F_T را می توان به صورت زیر نوشت.

$$F_T = F_g + F_{em} + F_d + F_m \quad (۱۱-۳)$$

که در آن F_g نیروی گرانشی، F_{em} نیروی الکترومغناطیسی، F_d نیروی کشش آیرودینامیک و F_m نیروی ناشی از اندازه حرکت است.



شکل ۳-۲- قطره مذاب آویزان که به صورت سیستم جرم- فنر- دمپر مدل شده است [۸].

در ادامه با فرض این که قطعه کار در سطح افق قرار دارد و الکتروود به طور عمودی به سمت پایین قرار خواهد داشت، معادلات مربوط به هر کدام از نیروها با شرح مختصری از نحوه محاسبه آنها ارائه خواهد شد.

۳-۴-۱ نیروی گرانشی

قطره مذاب دارای جرم می باشد و از طرف زمین بر آن نیروی گرانشی با شتاب $g=9.81$ اعمال می شود که به صورت زیر می توان نوشت.

$$F_g = m_d g \quad (3-12)$$

۳-۴-۲ نیروی الکترومغناطیسی

جریان الکتریکی جاری در الکتروود و قطره مذاب عامل به وجود آمدن نیروی الکترومغناطیسی می باشد. این جریان الکتریکی در داخل الکتروود تولید میدان مغناطیسی می کند که حول مسیر جریان، بنا به قانون دست راست، دور می زند. مسیر جریان الکتریکی الزاماً یک خط مستقیم در راستای الکتروود نیست، بلکه مسیر جریان در داخل قطره تمایل به همگرا شدن یا واگرا شدن دارد. در هر دو صورت جریان الکتریکی و میدان القایی ناشی از آن، یک نیروی محوری عمل کننده بر روی قطره را تولید می کنند. کل نیروی الکترومغناطیسی وارد بر قطره که به نیروی لورنتس نیز معروف است، توسط انتگرال گیری بر روی نیروی الکترومغناطیسی وارد بر هر جزء داخل قطره می تواند بدست آید. نحوه کامل محاسبه نیروی الکترومغناطیسی به طور جامع در [۸] و [۳۲] آورده شده است و نهایتاً معادله نهایی مربوط به نیروی الکترومغناطیسی را می توان به صورت زیر نوشت.

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[\frac{1}{4} - \ln \left(\frac{r_d \sin \theta}{r_e} \right) + \frac{1}{1 - \cos \theta} - \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \left(\frac{2}{1 + \cos \theta} \right) \right] \quad (3-13)$$

که در آن I جریان الکتریکی می باشد، r_e شعاع الکتروود، r_d شعاع قطره و زاویه θ که برای توصیف اندازه ناحیه هدایت جریان به کار می رود. در شکل ۳-۳ این پارامترها را می توان مشاهده کرد.

۳-۴-۳ نیروی کشش آیرودینامیک

همان طور که در فصل ۲ توضیح داده شد، استفاده از گاز محافظ ناحیه قوس الکتریکی را پوشش می دهد و از ایجاد ناخالصی در قطعه کار و جوش جلوگیری می کند. در جوشکاری قوس الکتریکی، گاز محافظ از طریق انبر جوش که الکتروود را در بر دارد به سمت قطعه کار هدایت می شود. این گاز محافظ با سرعت v_p از کنار الکتروود و

قطره عبور می کند و از طریق نیروی کشش آیرودینامیک بر قطره اثر می گذارد. اعمال نیروی آیرودینامیک را می توان با نیروی وارد بر شیء کروی شناور در جریان سیال به صورت زیر تقریب زد.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A_d \rho_p v_p^2 \quad (۱۴-۳)$$

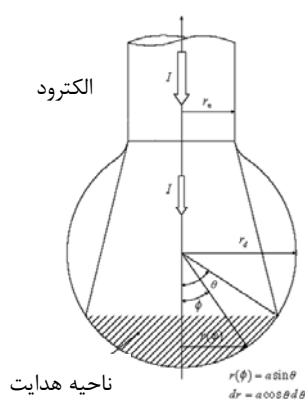
که در آن C_d مشخصه شکل قطره است که در اینجا یک کره فرض شده است، A_d سطح مقطعی از قطره است که از بالا دیده می شود و توسط سطح مقطع الکتروود پوشیده نمی شود، ρ_p چگالی پلاسما می باشد (گاز محافظ یونیزه شده) و v_p سرعت حرکت پلاسما می باشد.

۳-۴-۴- نیروی ناشی از اندازه حرکت

در جوشکاری قوس الکتریکی جرم قطره مذاب به طور پیوسته با اضافه شدن فلز ذوب شده از قسمت جامد الکتروود به قطره، تغییر می کند. برای مدل کردن این تغییر جرم و سرعت اضافه شدن فلز ذوب شده به قطره نیرویی به نام نیروی ناشی از اندازه حرکت معرفی شد. نیروی ناشی از اندازه حرکت به صورت زیر می باشد.

$$F_m = v_e \dot{m}_d \quad (۱۵-۳)$$

که در آن v_e سرعت حرکت الکتروود به سمت قطره مذاب است و $\dot{m}_d$ سرعت تغییر جرم قطره مذاب است.



شکل ۳-۳- مسیر عبور جریان در ناحیه هدایت که توسط زاویه θ مشخص می شود [۳۲].

۳-۵- جدا شدن قطره مذاب

در طی فرآیند جوشکاری، فلز مذاب به طور پیوسته به قطره در انتهای الکترود اضافه می شود و در نقطه ای قطره مذاب از الکترود جدا می شود. این جدا شدن زمانی اتفاق می افتد که نیروی کشش سطحی دیگر قادر به نگه داشتن قطره مذاب متصل به الکترود نباشد. نیروی کشش سطحی در ناحیه ای از انتهای الکترود که شروع به باریک شدن می کند یا اصطلاحاً گردن قطره مذاب شروع به شکل گرفتن می کند، به وجود می آید. رابطه مربوط به نیروی کشش سطحی را می توان به صورت زیر نوشت.

$$F_s = 2\pi r_e \gamma \quad (۱۶-۳)$$

که در آن γ ثابت کشش فلز تحت جوش است. با توجه به کارهای انجام شده در این زمینه می توان سه مدل برای جدا شدن قطره مذاب را دسته بندی کرد. مدل تعادل نیرویی ایستا (SFBM)^۱، مدل تعادل نیرویی دینامیک (DFBM)^۲ و تئوری ناپایداری فشار (PIT)^۳. در SFBM پیش بینی جدا شدن قطره بر مبنای مقایسه نیروی کشش سطحی قطره مذاب با نیروهای خارجی اعمال شده به قطره می باشد. در این روش دینامیک حرکتی قطره مذاب در نظر گرفته نشده است. بنابراین در این مدل جدا شدن زمانی اتفاق می افتد که مجموع نیروهای عمل کنند بر قطره مذاب، F_T در (۳-۱۱)، از حداکثر نیروی کشش سطحی تجاوز کند که به طور خلاصه می توان آنرا به صورت زیر نوشت.

$$F_T > F_s \quad \text{در SFBM جدا شدن قطره به شرط} \quad (۱۷-۳)$$

در DFBM با اضافه کردن دینامیک حرکتی قطره مذاب، روش قبلی را در پیش بینی جدا شدن قطره اصلاح کرده است و به طور خلاصه آن را می توان به صورت زیر نوشت.

$$F_T + m_d \ddot{x}_d > F_s \quad \text{در DFBM جدا شدن قطره به شرط} \quad (۱۸-۳)$$

در هر دو مدل پیش بینی جدا شدن قطره بر اساس نیروهای وارد شده به قطره مذاب بر ضد نیروی کشش سطحی قطره می باشد، حال آن که در PIT معیار جدا شدن قطره مذاب نه بر مبنای تعادل نیروهای محوری بلکه بر مبنای نیروهای شعاعی می باشد. این بدان معناست که جدا شدن قطره مذاب زمانی اتفاق می افتد که شعاع قطره مذاب از یک شعاع بحرانی تجاوز کند. در حالت کلی تقابل جریان الکتریکی با میدان مغناطیسی القایی باعث ایجاد

^۱ Static Force Balance Model: SFBM

^۲ Dynamic Force Balance Model: DFBM

^۳ Pinch Instability theory: PIT

نیروی می شود که به صورت شعاعی و از درون به قطره مذاب وارد می شود و باعث اعمال نیروی فشاری از سمت الکتروود به قطره مذاب می شود. به این پدیده اثر فشار^۱ می گویند. در این حالت، همزمان با افزایش جرم قطره و این نیروی فشاری زمانی که شعاع قطره مذاب به یک اندازه بحرانی برسد، قطره از الکتروود جدا خواهد شد. بنابراین به طور خلاصه این معیار را می توان به صورت زیر نوشت.

$$\text{در PIT جدا شدن قطره به شرط } r_d > r_{dc} \quad (۱۹-۳)$$

$$r_{dc} = \frac{\pi(r_d + r_e)}{1.25 \left(\frac{x_d + r_d}{r_d} \right) \left(1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 \gamma(r_d + r_e)} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad r_d = \left(\frac{3m_d}{4\pi\rho_e} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۲۰-۳)$$

که در آن r_d شعاع قطره مذاب و r_{dc} شعاع بحرانی است که در (۱۹-۳) آمده است.

در جریان های الکتریکی قوی اثر فشار بیشتر خود را نشان می دهد و بنابراین نسبت به دو مدل قبلی که این عامل در آنها لحاظ نشده است، مدل PIT در جوشکاری با جریان های بالا مدلی کامل تر در پیش بینی جدا شدن قطره به حساب می آید. با توجه به این که در جریان های پایین اثر دو مدل اول بیشتر است، بهترین راه حل برای این موضوع می تواند ترکیبی از مدل های ارائه شده باشد.

بعد از جدا شدن قطره مذاب از الکتروود، مقداری فلز مذاب در انتهای الکتروود باقی می ماند که مبنای تشکیل قطره مذاب بعدی خواهد بود. در [۱] رابطه ای برای حجم این مقدار فلز مذاب باقی مانده در انتهای الکتروود آورده شده است که با V_d معرفی شده است.

$$V_d = \frac{m_d}{2\rho_e} \left(\frac{1}{1 + e^{-kx}} + 1 \right), \quad k = 100 \text{ s/m} \quad (۲۱-۳)$$

۳-۶- نرخ ذوب

جریان الکتریکی در الکتروود و قوس الکتریکی جاری است و با توجه به این که معمولاً الکتروود به آند متصل است، سطح انتهایی آن توسط الکترون هایی که از میدان الکتریکی قوی ناحیه آندی می آیند بمباران می شود. میدان الکتریکی به الکترون ها شتاب می دهد و انرژی بالای این الکترون های شتاب دار جذب آند شده که منجر به ذوب آند یا همان الکتروود خواهد شد. علاوه بر آن، الکتروود در اثر عبور جریان الکتریکی گرم می شود. این گرما که گرمای اهمی نامیده می شود، به علت مقاومت گرمایی الکتروود در برابر عبور جریان الکتریکی است که خود یکی از

^۱ Pinch Effect

عوامل ذوب الکتروود است. نرخ ذوب در واقع حجمی از الکتروود است که در واحد زمان ذوب شده و به صورت قطره مذاب به قطعه کار منتقل می گردد. در [۲۷] و [۲۸] مشخص شده است که دو عامل گرمایی بر آند اثرگذار هستند. این دو عامل یک گرمای آندی H_a است و دیگری گرمای اهمی می باشد. گرمای آندی را می توان به صورت زیر نوشت.

$$H_a = c_{an}(V_{an} + \phi_w)I \quad (۲۲-۳)$$

که در آن V_{an} افت ولتاژ بر روی آند می باشد (نباید با ولتاژ قوس اشتباه شود)، ϕ_w تابع کار ترمیونیک آند می باشد، I جریان الکتریکی جوشکاری می باشد و c_{an} یک ضریب ثابت است. جمله اول در معادله (۲۲-۳) یعنی $c_{an}V_{an}I$ بیان کننده انرژی جنبشی الکترون هایی است که آند را بمباران می کنند. انرژی جنبشی در میدان الکتریکی در نزدیکی آند افزایش می یابد. جمله دوم در معادله (۲۲-۳) یعنی $c_{an}\phi_w I$ بیان کننده انرژی تراکمی می باشد. این انرژی است که وقتی الکترون ها جذب شبکه اتمی ماده الکتروود می شود باعث گرم شدن آن می شود. بنابراین نرخ ذوب ناشی از گرمای آندی که با $M_{R,a}$ نمایش داده می شود را می توان به صورت ضریبی از جریان به صورت زیر نوشت.

$$M_{R,a} = c_1 I \quad (۲۳-۳)$$

که در آن c_1 یک ضریب ثابت است. گرمای اهمی در آند به دلیل مقاومت الکتریکی قسمتی از الکتروود است که از لوله اتصال بیرون آمده و در مسیر عبور جریان الکتریکی قرار می گیرد که همان بیرون زدگی الکتروود l_s می باشد. بنابراین نرخ ذوب ناشی از گرمای اهمی که با $M_{R,j}$ نمایش داده می شود را می توان به صورت زیر مدل کرد.

$$M_{R,j} = c_2 \rho_r l_s I^2 \quad (۲۴-۳)$$

که در آن c_2 یک ضریب ثابت است.

معادلات (۲۳-۳) و (۲۴-۳) توصیف کننده مدل نرخ ذوب حالت دائم به ترتیب برای گرمای آندی و گرمای اهمی می باشد. بنابراین با جمع کردن این دو معادله مدل کلی نرخ ذوب حالت دائم که با M_R نمایش داده می شود، را می توان به صورت زیر نوشت.

$$M_R = M_{R,a} + M_{R,j} = c_1 I + c_2 l_s \rho_r I^2 \quad (۲۵-۳)$$

ضریب C_2 را می توان با استفاده از پارامتر های مربوط به الکتروود که همان مقاومت ویژه الکتروود و قطر آن است محاسبه کرد. ثابت دیگر یعنی C_1 هم به پارامتر های دیگر الکتروود وابسته است. معادله (۳-۲۵) را می توان بر حسب سرعت ذوب v_m نیز بازنویسی کرد.

$$v_m = \frac{M_R}{\pi r_e^2} = k_1 I + k_2 l_s \rho_r I^2, \quad k_i = \frac{C_i}{\pi r_e^2} \quad i = 1, 2 \quad (۳-۲۶)$$

که در آن k_1 و k_2 ضرایب ثابتی هستند که از تقسیم C_1 و C_2 بر سطح مقطع الکتروود بدست می آیند.

همانطور که در انتهای بخش ۳-۲- بیان شد، کنترل طول قوس در جوشکاری قوس الکتریکی از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین نیاز است که معادلات دینامیکی حاکم بر رفتار طول قوس بدست آید. با استفاده از (۳-۶)، (۳-۷) و (۳-۲۶) می توان دینامیک طول قوس را به صورت زیر بدست آورد.

$$\dot{l}_a = k_1 I + k_2 \rho_r I^2 (l_c - l_a) - v_e + v_c \quad (۳-۲۷)$$

که در آن عبارت v_c به عنوان یک عامل اغتشاش خارجی در دینامیک طول قوس در نظر گرفته می شود که همان لرزش دست جوشکار است.

۷-۳- مدل دینامیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در این قسمت با تلفیق معادلات توصیف کننده رفتار فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی که در بخش های قبلی ارائه شد، مدل دینامیکی کلی حاکم بر سیستم بدست خواهد آمد. برای معرفی مدل ابتدا باید متغیر های حالت سیستم، ورودی ها و خروجی های سیستم مشخص شود.

متغیر های حالت:

$$x_1 = I : \text{جریان جوشکاری}$$

$$x_2 = l_a : \text{طول قوس}$$

$$x_3 = x_d : \text{فاصله قطره}$$

$$x_4 = v_d : \text{سرعت حرکت قطره}$$

$$x_5 = m_d : \text{جرم قطره}$$

خروجی ها:

$$y_1 = I : \text{جریان جوشکاری}$$

$$y_2 = l_a : \text{طول قوس}$$

ورودی ها:

$$u_1 = U_t : \text{ولتاژ ترمینال}$$

$$u_2 = v_e : \text{سرعت تغذیه الکتروود}$$

حال می توان معادلات دینامیکی غیر خطی فرآیند جوشکاری را به فرم کلی به صورت زیر نمایش داد.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + w(x)n \quad (۳-۲۸)$$

$$y = h(x) \quad (۳-۲۹)$$

$$x = m(x) , \text{ if } L(x, u) > 0 \quad (۳-۳۰)$$

که در آن بردار متغیرهای حالت سیستم، $y_{2 \times 1}$ بردار متغیرهای خروجی، $u_{2 \times 1}$ بردار ورودی های سیستم، $f(x)_{5 \times 1}$ ، $g(x)_{5 \times 2}$ و $h(x)_{2 \times 1}$ معادلات دینامیکی سیستم و $w(x)_{5 \times 1}$ بردار ضرایب اغتشاش ناشی از لرزش دست جوشکار $n = v_e$ است. معادله (۳-۳۰) شرط رهایی قطره مذاب را توصیف می کند و همچنین وضعیت متغیرهای حالت را پس از جدا شدن قطره بیان می کنند. بنابراین داریم.

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_w} \left((R_w + R_c + R_a + \rho_r(l_c - x_2))x_1 + U_0 + E_a x_2 \right) \\ k_1 x_1 + k_2 \rho_r x_1^2 (l_c - x_2) \\ x_4 \\ \frac{1}{x_5} (F_{em} + F_g + F_d - b_d x_4 - k_d x_3) \\ (c_1 x_1 + c_2 \rho_r x_1^2 (l_c - x_2)) \rho_e \end{bmatrix} \quad (۳-۳۱)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_w} & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{x_5} M_R \rho_e \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۳-۳۲)$$

$$w(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33-3)$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (34-3)$$

در معادله (۳۱-۳) ترم F_m از رابطه (۱۲-۳)، F_{em} از رابطه (۱۳-۳) و F_d از رابطه (۱۴-۳) به دست می آید. همچنین در معادله (۳۲-۳) ترم M_R از رابطه (۲۵-۳) محاسبه می شود.

در ادامه مقادیر متغیرهای حالت پس از جدا شدن قطره مذاب بیان می شود. این مطابق است با جمله $m(x)$ در معادله (۳۰-۳). شرط رهایی $L(x, u)$ در (۳۰-۳) نیز از یکی از مدل های SFBM, DFBM, PIT یا ترکیبی از سه مدل بدست می آید. برای توضیحات بیشتر به بخش ۳-۵- مراجعه کنید.

شرایط رهایی:

اگر معیارهای جداشدن برقرار شود آنگاه:

$$x_1 := x_1 \quad (35-3)$$

$$x_2 := x_2 \quad (36-3)$$

$$x_3 := 0 \quad (37-3)$$

$$x_4 := 0 \quad (38-3)$$

$$x_5 := \frac{x_5}{2} \left(\frac{1}{1 + e^{-kx_4}} + 1 \right), \quad k = 100 \text{ s/m} \quad (39-3)$$

رابطه (۳۹-۳) از معادله (۲۱-۳) بدست می آید.

۳-۸- بحث و نتیجه گیری

در این فصل مدل ریاضی حاکم بر دینامیک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی بیان شد. مدل ارائه شده بر مبنای روابط ریاضیاتی توصیف کننده قسمت های مختلف کل فرآیند به جز قسمت حوضچه جوش می باشد. این قسمت ها عبارت اند از مدار الکتریکی، قوس الکتریکی، دینامیک های قطره مذاب، فرآیند جدا شدن قطره و دینامیک نرخ ذوب. اگرچه این مدل توصیف کننده رفتار کلی فرآیند می باشد اما نمی توان ادعا کرد که از دقت بالایی در مدل

سازی برخوردار است. در حقیقت اکثر قسمت های مدل دارای عدم قطعیت در مدل سازی می باشد که به صورت زیر می توان شرح داد.

- دینامیک جریان الکتریکی از طریق توصیف مداری فرآیند بدست آمده است که وابسته به پارامتر های سیم های رابط و الکتروود است. از جمله این پارامتر ها سلف و مقاومت آنها می باشد که بسته به نوع و طول سیم های رابط، الکتروود و شدت جریان جوشکاری مقدار آنها تفاوت خواهد کرد.
 - رفتار قوس الکتریکی بسیار پیچیده است و مدل تنها می تواند بعضی از مشخصات پایه ای ولتاژ قوس را در فرآیند توصیف کند. این مدل خطی عملاً در یک محدوده خاصی از جریان و طول قوس معتبر است و همچنین پارامترهای مدل هم دارای عدم دقت می باشند. برای مثال این پارامتر ها بر اساس مخلوط گاز محافظ و اجزاء ماده الکتروود می تواند تفاوت کند.
 - دینامیک های قطره مذاب بر مبنای یک مدل بزرگ شده از سیستم ساده جرم- فنر- دمپر می باشد، بنابراین بعضی تفاوت ها بین مدل و فرآیند واقعی قابل انتظار است. همچنین در محاسبه نیروی الکترومغناطیسی که مهمترین نیروی عمل کننده بر قطره مذاب است، به خاطر بعضی فرض های استفاده شده مانند کروی بودن شکل قطره، عدم قطعیت وجود دارد.
 - مدل های جدا شدن قطره مذاب همگی غیر دقیق هستند و هیچ کدام نمی توانند به طور کامل فرآیند پیچیده جدا شدن قطره را توصیف کنند.
 - مدل نرخ ذوب یک مدل حالت دائم است و بنابراین در حالت های گذرا نمی تواند دقیق باشد. این مسئله به خصوص در مورد جوشکاری در حالت اسپری پالسی بسیار تأثیرگذار است چرا که جریان دارای پالس های متناوب است و باید از مدل نرخ ذوب دینامیک برای تحلیل آن استفاده شود. در این مورد در [۸] می توان مطالب مفیدی را مطالعه کرد.
- با تمام این مشکلات در مدل سازی فرآیند نباید از مدل بدست آمده صرف نظر کرد چرا که در تمامی فرآیند های صنعتی مدل های به کار رفته برای توصیف سیستم و طراحی کنترل کننده همگی غیر دقیق بوده و با عدم قطعیت مواجه هستند و این وظیفه طراح کنترل کننده می باشد که با علم کافی به رفتار سیستم و آگاهی از این تفاوت ها در مدل سازی بتواند یک کنترل کننده مقاوم در تمام عدم قطعیت ها و اغتشاشات داخلی و خارجی به گونه ای مناسب طراحی کند.

فصل چهارم

۴- اهداف سیستم کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در این فصل کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در نظر گرفته شده است. عوامل و پارامترهای مؤثر در کیفیت جوش و پیکربندیهای مختلف سیستم کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی بیان خواهند شد.

۴-۱- اهداف سیستم کنترل

در فصل اول اهداف کلی در این پایان نامه تبیین شد. این هدف عبارت است از بهینه سازی الگوریتم های کنترلی برای کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی دستی در پناه گاز محافظ در حالت انتقال اسپری برای رسیدن به یک کیفیت خوب جوش. به هر حال لفظ بهینه سازی الگوریتم های کنترلی کمی نامشخص است و همچنین منظور از یک کیفیت خوب جوش چندان واضح نیست. در این بخش این ابهامات برطرف شده و به دنبال آن هدف نهایی در کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مشخص خواهد شد. توجه شود که در این پایان نامه جوشکاری قوس الکتریکی در حالت انتقال اسپری مد نظر است و نه حالت اتصال کوتاه، چرا که نوع کنترل این دو باهم تفاوت دارند.

۴-۱-۱- عوامل و پارامترهای مؤثر در کیفیت جوش در جوشکاری قوس الکتریکی

جوشکاری صنعتی به صورت دستی عملاً مشکل است. برای تولید جوش با کیفیت به طور مداوم و پایدار به فرد جوشکار با مهارت و تجربه کافی نیاز است. یک دلیل آن این است که برای انجام یک جوشکاری مشخص نیاز به تنظیم پارامترهای منبع تغذیه برای آن کار خاص الزامی است. منابع تغذیه صنعتی نوعاً دارای دکمه های زیادی بر روی دستگاه کنترل ماشین جوشکاری می باشند که باید به طور مناسب تنظیم شوند. یک جوشکار خوب کسی است که بهترین روش را برای مشخص کردن پارامترهای منبع تغذیه برای یک کاربرد خاص بداند. متأسفانه این مسئله بیشتر به یک هنر می ماند تا یک علم. در اکثر اوقات بیشتر این پارامترها با توجه به تنظیمات خود شرکت سازنده عمل می کنند چرا که جوشکارها ممکن است شیوه تنظیم مناسب همه این پارامترها را ندانند. بنابراین در مقیاس

وسیعتر می توان گفت که "هدف از گسترش کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی این است که نیاز جوشکاران به دانستن نحوه تعیین ورودی های فرآیند جوشکاری برای دست یافتن به یک جوش خوب را از بین ببریم". به هر حال به منظور پیاده سازی چنین کنترل کننده ای، ابتدا باید منظورمان را از یک "جوش خوب" مشخص کنیم.

عموماً یک جوش خوب توسط خواص ریزساختاری آن و دیگر عوامل (مانند حجم ترشحات و پاشش جوش و یا میزان پرشدگی یا خالی ماندن شکاف جوش، میزان رسوب و نفوذ جوش و غیره...) تعیین می شود. اگر چه این پارامترها به آسانی قابل اندازه گیری و تعیین کیفیت نیستند، اما می توان آنها را به خصوصیات دیگری از قبیل سرعت سرد شدن حوضچه جوش، نحوه انتقال فلز، هندسه جوش یا هندسه شیار، نقایص قطعه کار و غیره ربط داد. همچنین بسیاری از این خواص را می توان به مقدار گرما و جرم منتقل شده از فرآیند به حوضچه جوش ارتباط داد. این ویژگی ها به نوبه خود از خواص جریان قطرات مذاب که در حال کنده شدن از الکترود می باشند تأثیر می پذیرند. در این حالت مطلوب است که جریان قطرات مذاب از نظر اندازه یکنواخت و در فواصل زمانی یکسانی از الکترود کنده شوند. اگر درجه آزادی کنترل مناسب روی خواص قطره (فواصل زمانی جدا شدن و اندازه قطره) در اختیار باشد، این امکان وجود خواهد داشت که میزان گرما و جرم منتقل شده و به دنبال آن "خوبی" کیفیت جوش را کنترل کرد.

بنابراین یک دستاورد در کنترل کیفیت جوش در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، تنظیم پارامترهای منبع تغذیه ماشین جوشکاری بر مبنای اندازه گیری متغیرهای جوشکاری برای کنترل میانگین گرما و جرم ورودی به حوضچه جوش و به طور بسیار خاص، خواص جدا شدن قطره، می باشد. عنصر کلیدی این است که سیستم کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی بر مبنای مدل^۱ است. بدین معنا که باید درکی صحیح از تأثیر ورودی های سیستم بر روی خروجی ها و اهداف وجود داشته باشد. به عبارت دیگر مدل دینامیکی سیستم، اصول و پایه طراحی و تحلیل کنترل کننده را فراهم می آورد. از طریق همین عامل کلیدی می باشد که اصول اولیه دستاورد تکنیکی بدست می آید. البته این تفکر مانع از آن نمی شود که از شیوه های کنترل به اصطلاح مدل آزاد^۲ از قبیل کنترل فازی و شبکه عصبی استفاده نشود.

در این راستا باید توجه داشت که جنس ماده ای که قرار است روی آن جوشکاری انجام شود در تعیین پارامترهای مناسب ماشین جوشکاری برای رسیدن به یک جوش خوب تعیین کننده است. در این پایان نامه یک فلز خاص برای جوشکاری مد نظر قرار خواهد گرفت که آن فولاد زنگ نزن خواهد بود. البته باید توجه داشت که جدا از نوع فلز تحت جوش اهداف کنترلی می تواند برای حالت کلی کنترل یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در نظر گرفته شود. فولاد زنگ نزن یکی از آلیاژهای فولاد می باشد که آلیاژهای به کار رفته در آن خواص مناسبی به آن می

^۱ Model Base

^۲ Model Free

دهد. این خواص باید بعد از جوشکاری نیز حفظ شود. بنابراین در طی جوشکاری اگر فولاد بیش از اندازه گرم شود خواص آلیاژی خود را از دست می دهد. برای جلوگیری از این مسئله حرارت حوضچه جوش باید پایین نگه داشته شود. این بدان معناست که باید جوشکاری با حداقل میزان انرژی لازم انجام شود. بنابراین میزان گرمای ورودی به قطعه کار باید حداقل مقدار ممکن باشد. عملاً یک روش برای بهینه سازی انرژی ناشی از کاهش کنترل شده گرمای ورودی به قطعه کار، مطمئن بودن از داشتن یک طول قوس کوچک در حین جوشکاری می باشد.

داشتن طول قوس پایین در طی جوشکاری یک مزیت دیگر هم دارد که آن کنترل راحت تر مسیر طی قوس برای فرد جوشکار است. در جوشکاری شکاف های افقی بین دو قطعه یا شکاف های دو قطعه عمود بر هم، طول قوس زیاد باعث عدم تمرکز قوس بر روی شکاف شده و کاهش کیفیت را در پی دارد. در حالی که با داشتن طول قوس پایین تمرکز قوس بر روی شکاف آسان تر انجام می شود. بنابراین برای دستیابی به شرایط بهینه در کنترل مسیر قوس، کاهش طول قوس گزینه مناسبی می باشد. البته باید توجه داشت که اگر طول قوس بیش از حد کاهش یابد احتمال رخ دادن اتصال کوتاه بین الکترود و قطعه کار افزایش می یابد. این مسئله خود می تواند باعث ایجاد جوش های ضعیف در سطح کار گردد. بنابراین تا حد امکان در عین پایین نگه داشتن طول قوس باید از رخ دادن اتصال کوتاه ها جلوگیری کرد. در این حالت با توجه به این که لرزش دست جوشکار خود یکی از عوامل اغتشاش در سیستم است و باعث تغییر طول قوس می شود باید کنترل کننده به گونه ای طراحی شود که طول قوس مد نظر را تا حد امکان ثابت نگه دارد. علاوه بر آن در جوشکاری قوس الکتریکی در حالت اسپری به علت استفاده از جریان های الکتریکی قوی، میزان گرمای ورودی به قطعه کار نیز زیاد می شود و یک راه دیگر برای کاهش آن کنترل جریان جوشکاری در حداقل مقدار ممکن می باشد درحالی که حالت انتقال اسپری همچنان حفظ شود.

عملاً با کنترل جریان می توان میزان جرم انتقالی به حوضچه جوش را نیز کنترل کرد چرا که افزایش جریان جوشکاری افزایش ذوب را به دنبال خواهد داشت و ماده بیشتری از الکترود به قطعه کار منتقل می شود. از طرفی دینامیک طول قوس با توجه به معادلات بدست آمده در فصل قبل به جریان جوشکاری وابسته است. بنابراین کنترل این دو متغیر وابسته به هم هستند، یعنی کنترل جریان و طول قوس هر دو نقش تعیین کننده ای در بهینه سازی انرژی جوشکاری و کیفیت نهایی جوش ایفا خواهند کرد. حال با توجه به ورودی های فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی که در فصل سوم به آنها اشاره شد، باید دید که این ورودی ها چگونه قادر به کنترل طول قوس و جریان الکتریکی می باشند.

۲-۴- پیکربندی های سیستم کنترل طول قوس

همانطور که در زیربخش ۴-۱-۱- بیان شد، پارامترهای ماشین جوشکاری که بر کیفیت جوش مؤثر هستند به ترتیب ولتاژ ترمینال U_t ، سرعت تغذیه سیم الکترو v_e ، فاصله لوله اتصال تا قطعه کار l_c ، و سرعت حرکت انبر جوش در راستای شکاف R می باشد. از بین این پارامترها دو عامل آخری یعنی l_c و R در جوشکاری دستی به فرد جوشکاری برمی گردد و به عنوان سیگنال های کنترلی برای فرآیند نمی توانند به حساب آورده شوند. از طرفی تغییرات l_c در جوشکاری دستی همان لرزش دست جوشکاری است که با تغییر کنترل نشده طول قوس کاهش کیفیت جوش را به همراه دارد. بنابراین ولتاژ ترمینال و سرعت تغذیه سیم الکترو به عنوان تنها ورودی های کنترلی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی دستی به حساب می آیند که توسط آنها می توان خروجی های سیستم یعنی جریان الکتریکی I و طول قوس l_a را کنترل نمود. معمولاً سرعت تغذیه سیم در کنترل جریان به کار می رود و تنظیم ولتاژ ترمینال در کنترل طول قوس مؤثر است، گرچه که این دو به شدت به یکدیگر وابسته هستند.

در [۲]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]، [۱۸] و [۳۶] همگی از هر دو ورودی کنترلی برای کنترل جریان و طول قوس استفاده می کنند. اما معمولاً در عمل در سیستم های جوشکاری قوس الکتریکی دستی سرعت تغذیه الکترو قبل از آغاز جوشکاری بر روی یک مقدار ثابت تنظیم می شود و در تمام مدت جوشکاری سرعت تغذیه الکترو بدون تغییر خواهد بود. در این پایان نامه نیز چون جوشکاری دستی مد نظر است سرعت تغذیه الکترو را به عنوان یک پارامتر ثابت در سیستم تلقی خواهیم کرد. اگرچه در صورت استفاده از سرعت تغذیه سیم الکترو به عنوان ورودی باید دینامیک مربوط به موتوری که الکترو را به جلو هدایت می کند در طراحی کنترل کننده مد نظر قرار داده شود که در [۳۶] این کار بر روی یک سیستم جوشکاری اتوماتیک صورت گرفته است. اما با توجه به لخت بودن دینامیک موتورها نسبت به دینامیک جریان الکتریکی در مدل مداری سیستم جوشکاری قوس الکتریکی، تأخیر ایجاد شده در سیستم کنترل خود می تواند مسئله ساز باشد. بنابراین عملاً تنها ولتاژ ترمینال U_t به عنوان ورودی فرآیند در نظر گرفته خواهد شد.

با توجه به این که در فصل قبل خروجی های سیستم جریان جوشکاری و طول قوس معرفی شدند باید دید که آیا این دو متغیر خروجی قابل اندازه گیری هستند یا خیر. اندازه گیری جریان الکتریکی در اکثر فرآیند های جوشکاری به سادگی توسط انواع اندازه گیرهای جریان الکتریکی از جمله حسگر اثر میدانی هال^۱ ([۸] و [۳۹]) انجام می شود. در مورد اندازه گیری طول قوس در [۳۸] از شیوه اندازه گیری نور قوس الکتریکی برای اندازه گیری طول

^۱ HALL Effect Sensor

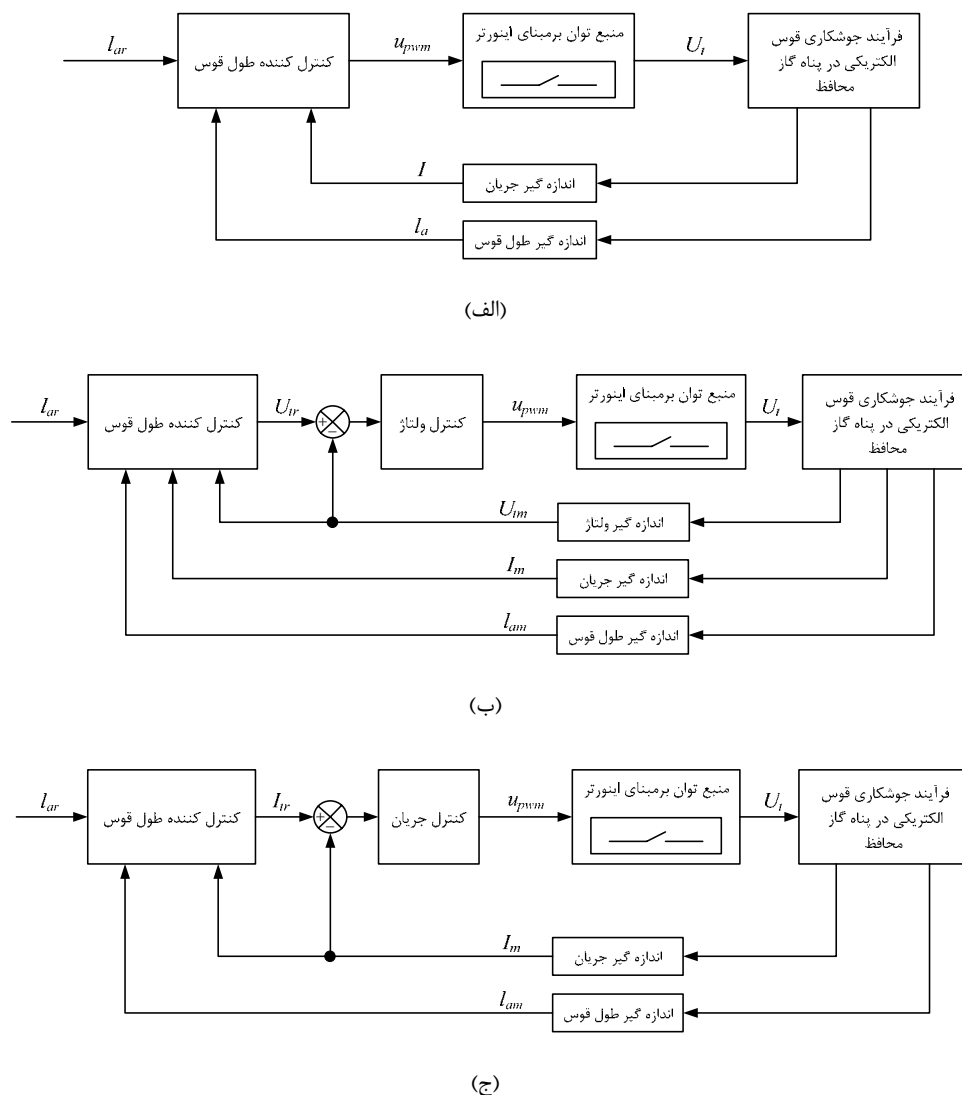
قوس استفاده شده است و اندازه گیر مربوطه ساخته شده و مورد آزمایش عملی قرار گرفته است. نتایج آزمایشات دقت بسیار خوبی را در اندازه گیری طول قوس با درصد خطای $\pm 0.5\%$ میلیمتر نشان می دهد.

حال با توجه به این که تنها ولتاژ ترمینال به عنوان ورودی کنترلی فرآیند در اختیار است، یکی از متغیر های جریان یا طول قوس را به عنوان خروجی در نظر می گیریم. در نتیجه می توان فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی را به صورت یک سیستم تک ورودی- تک خروجی با دو متغیر حالت در نظر گرفت. در این حالت با توجه به ثابت بودن سرعت تغذیه الکتروود، تنها عامل تغییر جریان جوشکاری تغییر ولتاژ ترمینال است. تغییر جریان هم خود باعث تغییر طول قوس می شود.

بنابراین برای کاهش میزان گرمای ورودی به قطعه کار می توان جریان جوشکاری را از طریق کنترل طول قوس کنترل کرد. این بدان معناست که با تنظیم ولتاژ ترمینال جریان را به گونه ای تغییر دهیم تا به یک طول قوس پایین بهینه دست پیدا کنیم. بنابراین طول قوس به عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته می شود و در طراحی کنترل کننده، کنترل طول قوس از طریق تنظیم ولتاژ ترمینال مد نظر قرار خواهد گرفت. در این حالت داشتن یک طول قوس ثابت و نگه داشتن آن در سطح پایین برای دست یابی به حداقل انرژی مصرفی در فرآیند به عنوان هدف اصلی در کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مطرح می شود. باید توجه داشت که سیگنال ولتاژ ترمینال که توسط کنترل کننده طول قوس محاسبه می شد نمی تواند به طور مستقیم به فرآیند اعمال شود.

در حقیقت مانند تمامی مسائل مربوط به طراحی کنترل کننده، همواره یک محرک^۱ بین فرآیند و سیستم کنترل وجود دارد که وظیفه تبدیل سیگنال کنترلی به سیگنال قابل اعمال به فرآیند را بر عهده دارد. در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی همانطور که در فصل دوم اشاره کردیم این محرک همان منبع توان سیستم می باشد که وظیفه تأمین ولتاژ توان دار شده و جریان مورد نیاز جوشکاری را به عهده دارد. در این منابع تغذیه امروزی از سیستم اینورتر استفاده می شود که توسط روش مدولاسیون عرض پالس، سیگنال مورد نظر را به سیگنال ولتاژ توان دار تبدیل کرده و به ترمینال ماشین جوشکاری منتقل می کند. بنابراین با در نظر گرفتن منبع توان به عنوان محرک در فرآیند، سه پیکربندی کلی برای سیستم کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در حالت انتقال اسپری می توان در نظر گرفت که در شکل ۴-۱- این سه پیکربندی نمایش داده شده اند.

^۱ Actuator



شکل ۴-۱- پیکربندی های سیستم کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در حالت انتقال اسپری. (الف) منبع توان قسمتی از فرآیند در نظر گرفته می شود. (ب) منبع توان دارای کنترل ولتاژ داخلی است. (ج) منبع توان دارای کنترل جریان داخلی است.

در شکل ۴-۱- (الف) منبع توان به عنوان محرک سیستم عمل می کند و تنها کنترل کننده قوس در حلقه کنترلی حضور دارد. در شکل ۴-۱- (ب) و (ج) یک پیکربندی سری^۱ دیده می شود که در حقیقت به عنوان یک حلقه کنترلی داخلی برای فرآیند می باشد. در این حالت منبع توان خود دارای کنترل کننده مجزا بوده که نقش تثبیت ولتاژ یا جریان را بر عهده دارد. در این شیوه کنترلی معمولاً یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی برای کنترل داخلی منبع توان در نظر گرفته می شود. در استفاده از پیکربندی های شکل ۴-۱- (ب) و (ج) معمولاً دینامیک منبع

^۱ Cascade

توان و دینامیک جریان جوشکاری در طراحی کنترل کننده در نظر گرفته نمی شود و آنرا با یک دینامیک خطی تقریب می زند. مشابه این کار در [۳] انجام شده است. در این حالت قسمتی از عدم قطعیت های مدل در طراحی کنترل کننده نادیده گرفته می شود. در این پایان نامه منبع توان به عنوان بخشی از فرآیند در طراحی کنترل کننده طول قوس در نظر گرفته می شود و شبیه سازی ها با حضور آن انجام می شود تا هرچه بیشتر شبیه سازی به آنچه که در عمل اتفاق می افتد نزدیک شود.

فصل پنجم

۵- کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در این فصل از شیوه کنترل مود لغزشی^۱ که یکی از شیوه های کنترل ساختار متغیر از نوع کنترل مقاوم می باشد برای کنترل طول قوس در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی استفاده شده است. عدم قطعیت ها در فرآیند جوشکاری بررسی می شود و کنترل کننده های طراحی شده بر روی فرآیند به صورت شبیه سازی آزمایش می شوند.

۵-۱- کنترل طول قوس

در فصل چهارم بیان شد که کنترل طول قوس یکی از مهمترین ارکان کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی می باشد. با توجه به پیکربندی هایی که در شکل ۴-۱ مطرح شدند، کنترل کننده طول قوس طراحی می گردد. در حالت انتقال اسپری که مبنای کاری این پایان نامه است دینامیک های قطره در مدل دینامیکی فرآیند شامل نخواهد شد. این مسئله به این خاطر است که در این حالت انتقال فلز از جریان مستقیم استفاده می شود و این در حالی است که دینامیک های قطره مذاب در حالت استفاده از جریان های پالسی در تعیین کیفیت جوش بسیار مؤثر خواهند بود. این وضعیت برای جوشکاری قوس الکتریکی در حالت انتقال اسپری پالسی رخ می دهد که در راستای کاری این پایان نامه قرار ندارد. به همین دلیل هم در پیکربندی های مطرح شده در شکل ۴-۱ بخش کنترل انتقال فلز لحاظ نشده است. بنابراین فرض می شود که فلز مذاب به طور پیوسته در طی جوشکاری از الکتروود به سمت قطعه کار منتقل می شود. این فرض در حالت انتقال اسپری با توجه به توضیحات فصل دوم فرضی درست به حساب می آید.

با توجه به اینکه تغییرات طول قوس وابسته به نرخ ذوب الکتروود می باشد، بنابراین برای کنترل طول قوس باید نرخ ذوب الکتروود کنترل شود. همانطور که در معادله (۳-۲۷) دیده می شود نرخ ذوب الکتروود یک دینامیک غیر

^۱ Sliding Mode Control: SMC

خطی با طول قوس و جریان جوشکاری دارد. در نتیجه کنترل کننده طول قوس باید به گونه ای طراحی شود که اثرات غیر خطی فرآیند در کار کنترل کننده اختلال ایجاد نکند.

در کارهای انجام شده در این زمینه می توان به [۲] و [۴] اشاره کرد که با استفاده از یک خطی سازی فیدبکی اثرات غیر خطی سیستم را حذف و سپس از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی برای پایدار سازی استفاده شده است. در این کارها فرآیند جوشکاری به صورت یک سیستم چند ورودی-چند خروجی در نظر گرفته شده است. در [۶] از شیوه ترکیبی کنترل مقاوم به همراه کنترل خطی برای فرآیند جوشکاری به کار برده شده است و در [۵] نیز از رهیافت کنترل تطبیقی بر مبنای مدل برای کنترل فرآیند بهره برده است. در این کارها نیز از فرض چند متغیره بودن سیستم استفاده شده است. اما باید توجه کرد عموماً در سیستم های جوشکاری قوس الکتریکی دستی تنها ولتاژ ترمینال به عنوان سیگنال کنترلی در اختیار می باشد و شیوه های کنترل چند متغیره نمی توانند چندان کارایی صنعتی داشته باشند. در [۳] با در نظر گرفتن این مسئله و فرض ثابت بودن سرعت تغذیه سیم الکتروود یک مدل تک ورودی-تک خروجی برای حالتی از فرآیند که دارای کنترل داخلی جریان برای منبع توان است، معرفی می کند. سپس از خطی سازی فیدبکی ورودی-خروجی برای غلبه بر اثرات غیر خطی بهره برده و بعد از آن با استفاده از یک فیدبک حالت به همراه کنترل انتگرالی طول قوس را کنترل کرده است. مسلماً این شیوه کنترلی به طور کافی قادر به مقابله با عدم قطعیت ها به خصوص عدم قطعیت های ساختاری نخواهد بود. بنابراین در این پایان نامه با فرض تک ورودی-تک خروجی بودن فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، تئوری مود لغزشی برای کنترل طول قوس در دو حالت حضور کنترل کننده داخلی منبع توان و عدم حضور کنترل کننده داخلی منبع توان در فرآیند جوشکاری توسعه داده خواهد شد.

در ادامه ابتدا در بخش ۵-۲- مدل دینامیکی فرآیند برای کنترل طول قوس در دو حالت حضور و عدم حضور کنترل کننده داخلی منبع توان بنابه مطالب فصل سوم بازنویسی خواهد شد. سپس در بخش ۵-۳- تئوری خطی سازی فیدبکی مطرح شده و کنترل کننده طول قوس بر مبنای آن بر روی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی طراحی خواهد شد و ضعف این شیوه کنترلی در برابر عدم قطعیت ها نشان داده می شود. در ادامه در بخش ۵-۴- بحث عدم قطعیت ها در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مطرح خواهد شد. در بخش ۵-۵- تئوری مود لغزشی ارائه می شود و کنترل کننده طراحی شده در بخش ۵-۳- برای مقابله با عدم قطعیت ها بر مبنای آن اصلاح خواهد شد. در بخش ۵-۶ برای تخمین بهره سوئیچینگ در کنترل کننده مود لغزشی از یک کنترل کننده فازی استفاده می شود.

۵-۲- مدل های دینامیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

برای کنترل طول قوس بر مبنای تئوری های کنترل غیر خطی نیاز به دانستن مدل دینامیکی فرآیند می باشد. بنابراین در این بخش با توجه به مطالب فصل سوم مدل مورد نیاز بدست خواهد آمد. با توجه به این که در کنترل طول قوس در جوشکاری قوس الکتریکی در حالت انتقال اسپری دینامیک های قطره مذاب در نظر گرفته نمی شوند، بنابراین دینامیک های طول قوس و جریان الکتریکی به عنوان مدل توصیف کننده سیستم در این حالت مورد استفاده قرار می گیرد. این موضوع در [۱] نیز اشاره شده است. بنابراین معادلات (۳-۲)، (۳-۸) و (۲-۲۷) مبنای استخراج مدل دینامیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی برای کنترل طول قوس خواهند بود که در این جا دوباره باز نویسی می شوند.

$$\dot{I} = \frac{1}{L_w} (U_t - (R_w + R_c + R_a + \rho_r(l_c - l_a))I - U_0 + E_a l_a) \quad (۱-۵)$$

$$\dot{l}_a = k_1 I + k_2 \rho_r I^2 (l_c - l_a) - v_e + v_c \quad (۲-۵)$$

معادله (۱-۵) همان معادلات مداری فرآیند جوشکاری است که بر حسب مشتق زمانی جریان بیان شده است و توصیف کننده دینامیک جریان جوشکاری می باشد. معادله (۲-۵) دینامیک طول قوس را بر حسب سرعت ذوب الکتروود بیان می کند. در این حالت سرعت تغییرات فاصله لوله اتصال تا قطعه کار $\dot{l}_c = v_c$ به عنوان اغتشاش خارجی در نظر گرفته می شود. بنابراین معادلات دینامیکی فضای حالت سیستم به صورت زیر تعریف می شود.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ l_a \end{bmatrix} \quad (۳-۵)$$

$$u = U_t \quad (۴-۵)$$

$$y = l_a \quad (۵-۵)$$

متغیرهای حالت سیستم در معادله (۳-۵) تعریف شده اند که همانا جریان جوشکاری و طول قوس می باشند. ورودی سیستم در معادله (۴-۵) ولتاژ ترمینال تعریف می شود و معادله (۵-۵) خروجی سیستم را نشان می دهد که باید تحت کنترل قرار گیرد که همان طول قوس است. حال می توان شکل کلی معادلات دینامیکی را در فضای حالت نمایش داد.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (۶-۵)$$

$$y = h(x) \quad (۷-۵)$$

که در آن $f(x) \in \mathcal{R}^2$ دینامیک های سیستم را نشان می دهد، $g(x) \in \mathcal{R}^2$ تابع بهره سیستم می باشد و $h(x)$ تابع خروجی را بیان می کند که به صورت زیر بدست می آیند.

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{L_w} \left((R_w + R_c + R_a + \rho_r(l_c - x_2))x_1 + U_0 + E_a x_2 \right) \\ k_1 x_1 + k_2 \rho_r x_1^2 (l_c - x_2) \end{bmatrix} \quad (۸-۵)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_w} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۹-۵)$$

$$h(x) = x_2 \quad (۱۰-۵)$$

مدل دینامیکی در این بخش بر مبنای دینامیک جریان جوشکاری و مدل حالت دائم نرخ ذوب بدست آمده است. بنابراین باید توجه داشت که از این مدل نمی توان برای توصیف و طراحی کنترل کننده در حالت انتقال اسپری پالسی استفاده کرد. چراکه در این حالت جریان جوشکاری به صورت پالس های جریان می باشند و مدل حالت دائم نمی تواند کارایی مناسبی داشته باشد. از طرفی دینامیک های قطره مذاب هم در نظر گرفته نشده اند.

با فرض وجود کنترل داخلی جریان برای منبع توان می توان دینامیک جریان جوشکاری را به صورت یک تابع انتقال مرتبه اول با یک ثابت زمانی τ_i تقریب زد [۳].

$$\dot{I} = -\frac{1}{\tau_i} I + \frac{1}{\tau_i} I_r \quad (۱۱-۵)$$

در این حالت همانطور که در شکل ۴-۱ (ج) هم دیده می شود، ورودی فرآیند یک سیگنال مرجع جریان I_r خواهد بود. در این حالت کنترل کننده طول قوس بسته به خطای موجود سیستم منبع توان را مجبور می کند که یک جریان جوشکاری مرجع با تنظیم ولتاژ ترمینال توسط کنترل کننده داخلی تولید نماید و به فرآیند اعمال شود. بنابراین در معادلات دینامیکی فرآیند با حضور کنترل کننده داخلی جریان جوشکاری فقط دو جمله f_1 و g_1 تغییر خواهند کرد و متغیرهای حالت همان جریان و طول قوس باقی خواهند بود. در نتیجه مدل دینامیکی فضای حالت طول قوس را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\dot{f}(x) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1 \\ \dot{f}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_i} x_1 \\ k_1 x_1 + k_2 \rho_r x_1^2 (l_c - x_2) \end{bmatrix} \quad (12-5)$$

$$\dot{g}(x) = \begin{bmatrix} \dot{g}_1 \\ \dot{g}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_i} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13-5)$$

$$\dot{h}(x) = x_2 \quad (14-5)$$

برای عدم تداخل نمادهای معرفی کننده مدل های دینامیکی طول قوس، مدل (۸-۵)، (۹-۵) و (۱۰-۵) را مدل شماره یک و مدل (۱۲-۵)، (۱۳-۵) و (۱۴-۵) را مدل شماره دو می نامیم و از نماد پریم در معادلات شماره دو استفاده خواهد شد.

۵-۳- خطی سازی فیدبکی

در تئوری خطی سازی فیدبکی همانطور که در [۱۳] بیان شده است، هدف یافتن تابع تبدیلی مانند $z = T(x)$ و یک قانون کنترل غیر خطی به گونه ای است که ترم های غیر خطی در یک معادلات دینامیکی مانند (۶-۵) و (۷-۵) حذف شوند. در این صورت سیستم غیر خطی به یک سیستم خطی با متغیرهای جدید مانند z و ورودی کنترلی جدید مانند v تبدیل خواهد شد. بنابراین می توان از تئوری های کنترل خطی برای کنترل سیستم استفاده کرد. در این حالت می توان معادلات جدید سیستم را به صورت زیر در نظر گرفت.

$$\dot{z} = Az + B(\alpha(x) + \gamma(x)u) \quad (15-5)$$

$$y = Cz \quad (16-5)$$

که در آن ماتریس های A ، B و C ماتریس های فضای حالت خطی در فرم کانونی کنترل پذیر هستند که برای یک سیستم مرتبه دو به صورت زیر می باشند.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0] \quad (17-5)$$

جملات $\alpha(x)$ و $\gamma(x)$ توابعی از متغیرهای اصلی سیستم می باشند. در این صورت با انتخاب ورودی جدید v به صورت زیر خواهیم داشت.

$$v = \alpha(x) + \gamma(x)u \quad (۱۸-۵)$$

$$u = \gamma^{-1}(x)(v - \alpha(x)) \quad (۱۹-۵)$$

در این صورت (۱۹-۵) به عنوان قانون کنترل غیر خطی عمل خطی سازی فیدبکی را انجام می دهد. بنابراین سیستم جدید با جایگذاری (۱۸-۵) در (۱۵-۵) به صورت زیر بدست می آید.

$$\dot{z} = Az + Bv \quad (۲۰-۵)$$

$$y = Cz \quad (۲۱-۵)$$

در حالت کلی این امکان وجود ندارد که بتوان چنین تبدیل و قانون کنترل غیرخطی برای خطی سازی سیستم های غیرخطی بدست آورد. این بدان معناست که همه سیستم های غیرخطی قابلیت خطی شدن را ندارند. در این صورت بخشی از سیستم خطی پذیر خواهد بود و دینامیک های داخلی در سیستم ایجاد می شود. از طرف دیگر بعضی از سیستم ها که قابلیت خطی سازی دارند را سیستم های کاملاً خطی پذیر می گویند و آن تبدیل و قانون کنترل از طریق یک سری روابط استاندارد بدست می آید [۱۳]. در حالت کلی خطی سازی فیدبکی را می توان به دو صورت خطی سازی ورودی- حالت و خطی سازی ورودی- خروجی تقسیم بندی کرد. در خطی سازی ورودی- حالت قابلیت خطی سازی متغیرهای حالت نسبت به ورودی سیستم وجود دارد. در خطی سازی ورودی- خروجی همانطور که از اسمش پیداست، قابلیت خطی سازی خروجی نسبت به ورودی وجود دارد. بررسی خطی پذیر بودن سیستم در دو حالت ورودی- حالت و ورودی-خروجی کمی با هم تفاوت دارد. اما اگر سیستمی کاملاً خطی پذیر ورودی- خروجی باشد ثابت می شود که سیستم خطی پذیر ورودی- حالت نیز خواهد بود [الم ۳.۶ در ۱۳]. با توجه به این که در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی طول قوس به عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته شده است و هدف کنترل طول قوس می باشد، بررسی خطی پذیری ورودی- خروجی در نظر گرفته خواهد شد. در بررسی خطی پذیری ورودی- خروجی در یک سیستم غیرخطی درجه نسبی سیستم r تعیین کننده خواهد بود.

در این حالت یک سیستم غیرخطی کاملاً خطی پذیر گفته می شود اگر درجه نسبی سیستم با مرتبه آن سیستم برابر باشد. در غیر این صورت خطی سازی سیستم دینامیک های داخلی ایجاد می کند که پایداری این دینامیک ها باید بررسی شود. درجه نسبی سیستم آن مرتبه از مشتق زمانی تابع خروجی $h(x)$ می باشد که در آن ورودی سیستم ظاهر می شود. در این حالت اگر سیستم کاملاً خطی پذیر باشد تبدیل $z = T(x)$ و قانون کنترل غیر خطی از طریق روابط زیر بدست می آیند.

$$T(x) = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \vdots \\ L_f^{r-1} h(x) \end{bmatrix} \quad (۲۲-۵)$$

$$\alpha(x) = L_f^r h(x) \quad (۲۳-۵)$$

$$\gamma(x) = L_g L_f^{r-1} h(x) \quad (۲۴-۵)$$

عبارت $L_f h(x)$ مشتق لی تابع برداری $h(x)$ نسبت به تابع برداری $f(x)$ می باشد که به صورت ضرب نقطه ای گرادیان $h(x)$ در $f(x)$ تعریف می شود.

$$L_f h(x) = \left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right) \cdot f(x) = \nabla h(x) \cdot f(x) \quad (۲۵-۵)$$

و در این صورت مشتقات لی مراتب بالاتر هم تعریف می شود که به عنوان نمونه مشتق لی مرتبه دوم تابع $h(x)$ نسبت به تابع $f(x)$ صورت زیر تعریف می شود.

$$L_f^2 h(x) = L_f (L_f h(x)) = \nabla (\nabla h(x) \cdot f(x)) \cdot f(x) \quad (۲۶-۵)$$

یک سیستم مرتبه دو اگر کاملاً خطی پذیر ورودی- خروجی باشد ورودی سیستم با دو بار مشتق گیری از خروجی بر حسب زمان ظاهر خواهد شد. بنابراین معادلات دینامیکی سیستم را به جای نوشتن در فرم فضای حالت می توان در فرم یک معادله دیفرانسیل مرتبه دو، که توصیف کننده خروجی نسبت به ورودی می باشد، به صورت زیر نوشت.

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x) u \quad (۲۷-۵)$$

در این صورت با انتخاب قانون کنترل به صورت (۱۹-۵) و با استفاده از (۲۳-۵) و (۲۴-۵) معادله (۲۷-۵) به صورت زیر خواهد شد.

$$\ddot{y} = v \quad (۲۸-۵)$$

حال با اعمال قوانین کنترل خطی مانند کنترل کننده تناسبی- مشتقی- انتگرالی و تعریف خطای خروجی به صورت $e = y_d - y$ می توان سیستم حلقه بسته را پایدار کرد.

$$u = \ddot{y}_d + K_d(\dot{y}_d - \dot{y}) + K_p(y_d - y) + K_i \int (y_d - y) dt \quad (۲۹-۵)$$

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt = 0 \quad (۳۰-۵)$$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow e \rightarrow 0 \quad (۳۱-۵)$$

۵-۳-۱ اعمال خطی سازی فیدبکی بر روی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی

همانطور که در هر دو مدل شماره یک و دو مشاهده می شود، درجه نسبی سیستم برابر ۲ می باشد چرا که مشتق دوم خروجی همان مشتق دوم طول قوس است که بنا به (۵-۲) به مشتق جریان وابسته خواهد شد و در مشتق جریان هم بنا به (۵-۱) ورودی سیستم دخالت دارد. بنابراین سیستم جوش قوس الکتریکی در هر دو مدل کاملاً خطی پذیر می باشد. در نتیجه خواهیم داشت.

$$\alpha(x) = L_f^2 h(x) = (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) f_1 - k_2 x_1^2 \rho_r f_2 \quad (۳۲-۵)$$

$$\gamma(x) = L_g L_f h(x) = \frac{1}{L_w} (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) \quad (۳۳-۵)$$

$$T(x) = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (۳۴-۵)$$

و برای مدل شماره دو داریم.

$$\dot{\alpha}(x) = L_f^2 \dot{h}(x) = (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) \dot{f}_1 - k_2 x_1^2 \rho_r \dot{f}_2 \quad (۳۵-۵)$$

$$\dot{\gamma}(x) = L_{\dot{g}} L_f \dot{h}(x) = \frac{1}{\tau_i} (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) \quad (۳۶-۵)$$

$$\dot{T}(x) = \begin{bmatrix} \dot{h}(x) \\ L_f \dot{h}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{f}_2 \end{bmatrix} \quad (۳۷-۵)$$

پیاده سازی روابط خطی سازی فیدبکی با نماد های مدل شماره یک انجام می شود چرا که برای مدل شماره دو نیز این روابط یکسان خواهند بود و تنها در مقدار پارامتر ها و جنس خروجی کنترل کننده تفاوت خواهند داشت که در مدل اول از جنس ولتاژ بوده (شکل ۴-۱-الف) و در مدل دوم از جنس جریان می باشد (شکل ۴-۱-ج). در

این حالت با استفاده از تبدیل (۳۴-۵) و (۳۷-۵) متغیر حالت اول با طول قوس برابر است، $z_1 = l_a$ و متغیر حالت دوم با مشتق طول قوس برابر می شود، $z_2 = \dot{l}_a$ که برای هر دو مدل دینامیکی یکسان خواهد بود. این بدان معناست که نتیجه خطی سازی فیدبکی بر روی هر دو مدل باعث خطی شدن رابطه طول قوس با ورودی جدید v خواهد شد.

باید توجه داشت که مدل دینامیکی دارای عدم قطعیت می باشد. این بدین معناست که قانون کنترل (۱۹-۵) با توجه به تخمین مدل سیستم محاسبه خواهد شد. از طرفی تمام سیستم های کنترل با اغتشاش های خارجی مواجه هستند (مانند لرزش دست جوشکار یا همان v_c که منجر به تغییر نامطلوب طول قوس خواهد شد) که در طراحی کنترل کننده باید در نظر گرفته شوند. بنابراین در حالت کلی خواهیم داشت.

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u + d \quad (۳۸-۵)$$

$$u = \hat{\gamma}^{-1}(x)(v - \hat{\alpha}(x)) \quad (۳۹-۵)$$

$$\hat{\alpha}(x) = L_f^2 \hat{h}(x) \quad (۴۰-۵)$$

$$\hat{\gamma}(x) = L_g L_f \hat{h}(x) \quad (۴۱-۵)$$

$$\hat{T}(x) = \begin{bmatrix} \hat{h}(x) \\ L_f \hat{h}(x) \end{bmatrix} \quad (۴۲-۵)$$

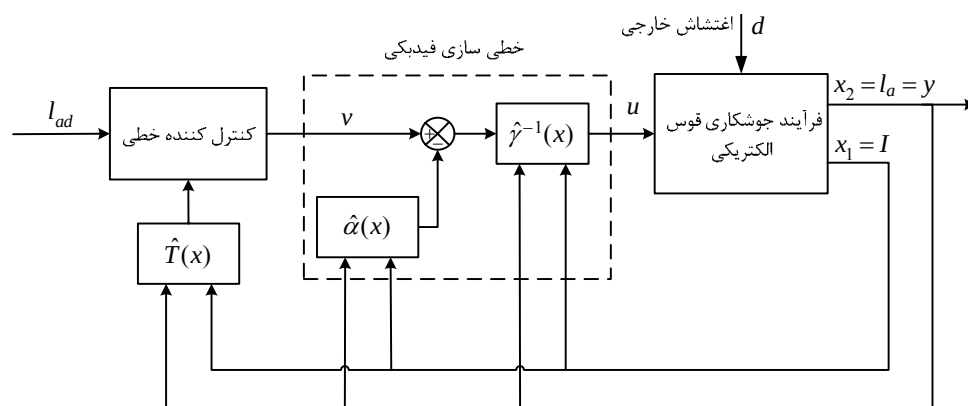
که در آن $\hat{f}(x)$ ، $\hat{g}(x)$ و $\hat{h}(x)$ تخمین های دینامیک طول قوس در سیستم جوشکاری قوس الکتریکی می باشند و d به عنوان اثر اغتشاشات خارجی در نظر گرفته می شود. در این صورت بعد از اعمال قانون کنترل (۳۹-۵) در (۵-۳۸) خواهیم داشت.

$$\ddot{y} = \alpha(x) - \gamma \hat{\gamma}^{-1}(x) \hat{\alpha}(x) + \gamma \hat{\gamma}^{-1}(x) v + d \quad (۴۳-۵)$$

که می توان آنرا به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\ddot{y} = v + \phi(x) \quad (۴۴-۵)$$

$\phi(x)$ در (۴۴-۵) مجموع تمام عدم قطعیت ها در فرآیند می باشد.



شکل ۵-۱- اعمال خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی بر روی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه کنترل کننده خطی

$$\phi(x) = \alpha(x) - \hat{\alpha}(x) + (\gamma \hat{\gamma}^{-1}(x) - 1)(v - \hat{\alpha}(x)) + d \quad (45-5)$$

دراین صورت به دلیل وجود ترم $\phi(x)$ بعد از اعمال قانون کنترل خطی سیستم حلقه بسته پایدار نخواهد شد.

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt = \phi(x) \quad (46-5)$$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow e \neq 0 \quad (47-5)$$

بنابراین همانطور که مشاهده می شود تنها استفاده از خطی سازی فیدبکی نمی توان کنترل مناسبی بر روی طول قوس داشته باشیم. شکل ۵-۱- بلوک دیاگرام کنترلی به روش خطی سازی فیدبکی را نشان می دهد. در این راستا استفاده از روش های کنترل مقاوم می تواند این مشکل را برطرف کند. اگرچه که می توان این شیوه های کنترل مقاوم را به طور مستقیم بر روی سیستم اعمال کرد. در استفاده از شیوه های کنترل مقاوم از جمله تئوری مود لغزشی نیاز به دانستن باند عدم قطعیت در سیستم می باشد، زیرا این روش یک کنترل بر مبنای مدل است. بنابراین باید محدوده عدم قطعیت های غیر ساختاری (دینامیک های مدل نشده) و ساختاری (غیر دقیق بودن پارامترهای مدل دینامیکی سیستم) در سیستم مشخص شوند. در بخش بعدی عدم قطعیتها در سیستم بررسی خواهند شد و سپس نشان داده خواهد شد که رهیافت استفاده از تئوری کنترل مود لغزشی چگونه در برطرف کردن ضعفهای خطی سازی فیدبکی، به خاطر وجود عدم قطعیت هادر سیستم، قدرتمند عمل می کند و همچنین رهیافت استفاده مستقیم از این شیوه در کنترل طول قوس ارائه خواهد شد.

۵-۴- بررسی عدم قطعیت

همانطور که در بخش قبل مشاهده شد، در استفاده از تئوری های کنترلی غیر خطی بر مبنای مدل مانند خطی سازی فیدبکی نیاز به استفاده از مدل سیستم در قانون کنترل می باشد. با توجه به این که مدل استفاده شده دارای عدم قطعیت در ساختار و پارامترها می باشد، کنترل کننده قادر به عملکرد مناسب در حضور این عدم قطعیت ها نخواهد بود. بنابراین نیاز است تا محدوده این عدم قطعیت ها تعیین شده تا بتوان کنترل کننده ای مقاوم برای بدترین حالت عدم قطعیت در سیستم طراحی کرد. در این راستا با توجه به پارامترهای استفاده شده در دینامیک های جریان و طول قوس در دو مدل شماره یک و دو می توان دقت تخمین هر کدام از پارامترها را در نظر گرفت و نهایتاً دقت تخمین دینامیک مدل های شماره یک و دو را محاسبه کرد.

عدم قطعیت در دینامیک جریان

در دینامیک جریان جوشکاری در مدل شماره یک پارامترهایی از قبیل مدل مقاومت و سلف سیم های رابط R_w و L_w ، مقاومت تماسی R_c ، مقاوت ویژه الکترو د ρ_r ، ثابت ولتاژ قوس U_0 ، فاکتور طول قوس E_a ، مقاومت الکتریکی قوس R_a و فاصله لوله اتصال تا قطعه کار l_c وجود دارند. همچنین در مدل شماره دو ثابت زمانی τ_i برای دینامیک جریان در نظر گرفته شده است. درصد عدم قطعیت یا درصد تخمین را می توان با تعریف یک حد بالا و یک حد پایین برای هر کدام به صورت زیر در نظر گرفت.

$$(1 - a_{R_w})\tilde{R}_w \leq R_w \leq (1 + a_{R_w})\tilde{R}_w \quad , \quad a_{R_w} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۴۸-۵)$$

$$(1 - a_{L_w})\tilde{L}_w \leq L_w \leq (1 + a_{L_w})\tilde{L}_w \quad , \quad a_{L_w} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۴۹-۵)$$

$$(1 - a_{R_c})\tilde{R}_c \leq R_c \leq (1 + a_{R_c})\tilde{R}_c \quad , \quad a_{R_c} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۵۰-۵)$$

$$(1 - a_{\rho_r})\tilde{\rho}_r \leq \rho_r \leq (1 + a_{\rho_r})\tilde{\rho}_r \quad , \quad a_{\rho_r} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۵۱-۵)$$

$$(1 - a_{U_0})\tilde{U}_0 \leq U_0 \leq (1 + a_{U_0})\tilde{U}_0 \quad , \quad a_{U_0} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۵۲-۵)$$

$$(1 - a_{E_a})\tilde{E}_a \leq E_a \leq (1 + a_{E_a})\tilde{E}_a \quad , \quad a_{E_a} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۵۳-۵)$$

$$(1 - a_{R_a})\tilde{R}_a \leq R_a \leq (1 + a_{R_a})\tilde{R}_a \quad , \quad a_{R_a} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۵۴-۵)$$

$$(1 - a_{\tau_i})\tilde{\tau}_i \leq \tau_i \leq (1 + a_{\tau_i})\tilde{\tau}_i \quad , \quad a_{\tau_i} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (۵۵-۵)$$

که در آن نماد ($\sim$) نشان دهنده مقدار تقریبی پارامتر است. تخمین پارامترهای مدل در مراجع گوناگون آمده است [۱] و [۸]. در پیوست-ب تمامی پارامترهای استفاده شده در این پایان نامه با مقادیرشان معرفی شده اند. a_i درصد این عدم دقت در تخمین را نشان می دهد. در این حالت مقدار واقعی پارامتر در مدل دینامیکی نامعلوم بوده و بین حدود تعیین شده بر حسب درصدی از مقدار تخمینی می تواند متغیر باشد. به عنوان مثال مقدار واقعی مقاومت سیم رابط R_w می تواند بین 0.95 تا 1.05 مقدار تخمینی یعنی $\tilde{R}_w$ تغییر کند. این مسئله با توجه به این که در جوشکاری های مختلف طول سیم رابط ممکن است تغییر کند فرضی درست به نظر می رسد.

در مورد فاصله لوله اتصال تا قطعه کار l_c با توجه به این که در جوشکاری دستی لرزش دست جوشکار باعث تغییر مقدار از پیش تعیین شده آن، $\tilde{l}_c$ می شود، بیشترین خطا را در طول قوس ایجاد می کند. بنابراین می توان فرض کرد که تا 15% در بدترین حالت مقدار آن می تواند عوض شود. می توان این تغییرات را به عنوان یک اغتشاش خارجی مدل کرد همان طور که در فصل سوم بیان شد. بنابراین (۵-۶) و (۵-۷) را در حالت کلی برای هر دو مدل شماره یک و دو می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + w(x)n \quad (56-5)$$

$$y = h(x) \quad (57-5)$$

که در (۵۶-۵) عبارت n همان تغییرات فاصله لوله اتصال تا قطعه کار v_c می باشد و

$$w(x) = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (58-5)$$

همانطور که در فصل چهارم اشاره شد جریان الکتریکی را می توان توسط اندازه گیر اثر میدانی هال اندازه گیری کرد. باید توجه داشت که در عمل کنترل کننده یک پروسسور است که به صورت دیجیتال اطلاعات اندازه گیری شده را دریافت می کند. در این حالت متعلقاتی همراه این اندازه گیر وجود دارند که شامل یک فیلتر پایین گذر، مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی و خود حسگر هال می باشد که در [۸] به آن اشاره شده است. حسگر هال جریان را بر حسب ولتاژ اندازه گیری می کند. این ولتاژ به فیلتر پایین گذر اعمال می شود تا نویزهای فرکانس بالای آن حذف شود و سیگنال فیلتر شده توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال نمونه برداری شده و به یک عدد باینری تبدیل می شود. برای حسگر هال می توان ضریب خطای $\pm 1\%$ را فرض کرد. فیلتر پایین گذر حداکثر خطای $\pm 0.2\%$ و حداکثر خطای انحراف جریان ± 1 آمپر فرض می شود. مبدل آنالوگ به دیجیتال خروجی ۱۲ بیتی دارد و جریان بین صفر تا ۱۰۰۰ را نمایش می دهد. بنابراین دارای دقت 0.25 آمپر خواهد بود. بنابراین محدوده خطای اندازه گیری جریان را می توان به صورت زیر نمایش داد.

$$(1 - a_I)\tilde{I} - 1.25 \leq I \leq (1 + a_I)\tilde{I} + 1.25, \quad a_I = 0.02 \triangleq 2\% \quad (5-59)$$

عدم قطعیت در دینامیک طول قوس

در دینامیک طول قوس پارامترهایی مانند ضرایب سرعت ذوب k_1 و k_2 و سرعت تغذیه سیم الکتروود v_e وجود دارد. برای ضرایب سرعت ذوب تا ۵٪ خطای تخمین می توان فرض کرد و برای سرعت تغذیه سیم الکتروود با توجه به خطای کدگذار نوری که سرعت موتور جلو برنده الکتروود را می سنجد، حداکثر خطای ۱٪ را می توان در نظر گرفت بنابراین داریم.

$$(1 - a_{k_1})\tilde{k}_1 \leq k_1 \leq (1 + a_{k_1})\tilde{k}_1, \quad a_{k_1} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (5-60)$$

$$(1 - a_{k_2})\tilde{k}_2 \leq k_2 \leq (1 + a_{k_2})\tilde{k}_2, \quad a_{k_2} = 0.05 \triangleq 5\% \quad (5-61)$$

$$(1 - a_{v_e})\tilde{v}_e \leq v_e \leq (1 + a_{v_e})\tilde{v}_e, \quad a_{v_e} = 0.01 \triangleq 1\% \quad (5-62)$$

در مورد اندازه گیری طول قوس با توجه به این که می توان از اندازه گیر طیف نور قوس برای سنجش طول قوس استفاده کرد، مجموع خطاهای ناشی از دوربین آشکار سازی طیف نور و دیگر ادوات استفاده شده که در [۳۸] ارائه شده است می توان حداکثر خطای اندازه گیری طول قوس را ۲٪ در نظر گرفت.

$$(1 - a_{l_a})\tilde{l}_a \leq l_a \leq (1 + a_{l_a})\tilde{l}_a, \quad a_{l_a} = 0.02 \triangleq 2\% \quad (5-63)$$

حال می توان با اعمال حداکثر و حداقل مقادیر پارامترها در مدل (۵-۸)، (۵-۹)، (۵-۱۰) و مدل (۵-۱۲)، (۵-۱۳)، (۵-۱۴) حد بالا و پایین عدم قطعیت را در بدترین حالت برای ترم های f, g, h و $\dot{f}, \dot{g}, \dot{h}$ به صورت زیر بدست آورد.

$$0.9\tilde{f}(x) \leq f(x) \leq 1.1\tilde{f}(x), \quad 0.9\tilde{\dot{f}}(x) \leq \dot{f}(x) \leq 1.1\tilde{\dot{f}}(x) \quad (5-64)$$

$$0.95\tilde{g}(x) \leq g(x) \leq 1.05\tilde{g}(x), \quad 0.95\tilde{\dot{g}}(x) \leq \dot{g}(x) \leq 1.05\tilde{\dot{g}}(x) \quad (5-65)$$

$$0.98\tilde{h}(x) \leq h(x) = \dot{h}(x) \leq 1.02\tilde{h}(x) \quad (5-66)$$

که در آن $\tilde{h}$, $\tilde{g}$, $\tilde{f}$ و $\tilde{h}$, $\tilde{g}$, $\tilde{f}$ با توجه به مقادیر معلوم پارامترهای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پیوست-ب محاسبه شده و به عنوان دینامیک های در دسترس فرآیند برای طراحی کنترل کننده استفاده خواهند شد. بنابراین با توجه به (۴۰-۵)، (۴۱-۵) و (۴۲-۵) دینامیک های تخمینی را به صورت زیر انتخاب می کنیم.

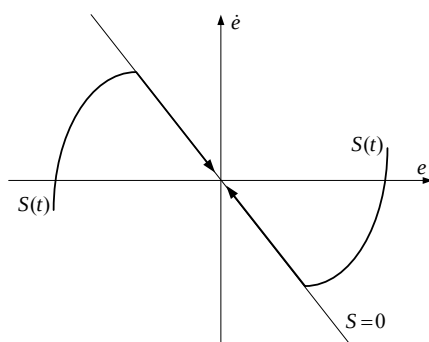
$$\hat{f}(x) = \tilde{f}(x) \quad , \quad \hat{\dot{f}}(x) = \tilde{\dot{f}}(x) \quad (۴۷-۵)$$

$$\hat{g}(x) = \tilde{g}(x) \quad , \quad \hat{\dot{g}}(x) = \tilde{\dot{g}}(x) \quad (۴۸-۵)$$

$$\hat{h}(x) = \tilde{h}(x) = \tilde{\dot{h}}(x) \quad (۴۹-۵)$$

۵-۵- تئوری مود لغزشی

تئوری مود لغزشی که به عنوان کنترل ساختار متغیر مطرح است، یکی از شیوه های کنترل مقاوم در بحث های کنترل غیر خطی به حساب می آید، همانطور که در [۹]، [۱۰] و [۱۱] نیز اشاره شده است. تفکر اصلی در این شیوه کنترلی با تعریف یک سطح خطی یا غیرخطی [۱۲] به نام S که در حالت کلی تابعی از متغیرهای حالت سیستم و زمان در صفحه فاز سیستم است آغاز می شود که به سطح لغزش^۱ معروف است. این سطح باید دارای دینامیک پایدار باشد، یعنی حل $S = 0$ جواب محدود داشته باشد، چراکه قرار است ورودی کنترلی به گونه ای بدست آید که مسیرهای حالت یا $S(t)$ را به سمت سطح برده و بدون تغییر بر روی آن نگه دارد. در این صورت به علت پایدار بودن دینامیک سطح لغزش حالت های سیستم به سمت نقطه تعادل سیستم حرکت خواهند کرد و سیستم اصلی پایدار خواهد شد. این موضوع در مورد مسئله ردگیری نیز صدق می کند که در آن S تابعی از متغیرهای خطای سیستم بوده و مسیرهای حالت با ردگیری متغیرهای مطلوب به سمت خطای صفر حرکت خواهند کرد. این حالت را می توان در شکل ۵-۲ در صفحه فاز خطای سیستم مرتبه دو مشاهده کرد.



شکل ۵-۲- مسیرهای فاز سیستم در حالت کنترل مود لغزشی

¹ Sliding Surface

یک تعریف ساده برای سطح لغزش را می توان یک دینامیک خطی پایدار از متغیر های خطای سیستم به صورت زیر در نظر گرفت [۱۳].

$$S(e, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e, \quad e = x - x_d \quad (۷۰-۵)$$

که در آن n مرتبه سیستم است، $\frac{d}{dt}$ اپراتور مشتقگیری و λ ضریب مثبت است که در سرعت صفر شدن خطا مؤثر است و به شیب سطح لغزش معروف است. در مواردی که مسئله تنظیم در کنترل فرآیند مطرح است می توان کنترل انتگرالی را در سطح لغزش وارد کرد. بدین صورت که سطح لغزش را بر اساس انتگرال خطا تعریف کرد. بنابراین به عنوان مثال در سیستم مرتبه دو سطح لغزش به همراه کنترل انتگرالی نسبت به متغیر خطا از مرتبه سوم خواهد شد.

$$S(e, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 \int_0^t e \, dr = \dot{e} + 2\lambda e + \lambda^2 \int_0^t e \, dr \quad (۷۱-۵)$$

از دید هندسی می توان گفت که حرکت به سمت سطح لغزش اتفاق نمی افتد مگر آنکه مربع فاصله مسیرها تا سطح در حال کاهش باشد. این موضوع را می توان با رابطه زیر نشان داد که به شرط لغزشی^۱ یا فاز رسیدن^۲ شهرت دارد.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 \leq -\eta |S| \quad (۷۲-۵)$$

که در آن η ضریب مثبت است و در زمان رسیدن به سطح مؤثر می باشد. از دید دیگر می توان (۷۲-۵) را به عنوان شرط لازم برای پایداری لیاپانوف در نظر گرفت که در آن $V = \frac{1}{2} S^2$ تابع منتخب لیاپانوف بوده و شرط (۷۲-۵) همان شرط منفی بودن مشتق تابع لیاپانوف و پایداری لیاپانوفی سیستم خواهد بود. بنابراین در کنترل سیستم به شیوه مود لغزش بعد از تعیین یک سطح لغزش پایدار دو هدف دنبال خواهد شد.

۱- رسیدن به سطح لغزش با وجود تمام عدم قطعیت ها در سیستم

۲- ماندن بر روی سطح و لغزیدن به سمت خطای صفر بر روی سطح با وجود تمام عدم قطعیت ها در سیستم

بعد از رسیدن به سطح واضح است دینامیک سیستم از $S = 0$ تبعیت می کند، اما برای باقی ماندن بر روی سطح بایستی تغییرات بر روی سطح نیز صفر گردد. این بدان معناست که مشتق زمانی تابع S نیز باید صفر گردد.

$$\dot{S} = 0 \quad (۷۳-۵)$$

¹ Sliding Condition

² Reaching Phase

بنابراین ورودی کنترل معادل به صورت زیر بدست می آید.

$$S = 0 \text{ and } \dot{S} = 0 \Rightarrow u = u_{eq} \quad (۷۴-۵)$$

اما این ورودی به تنهایی قادر به نگه داشتن دینامیک سیستم بر روی سطح و پایدار سازی سیستم نیست. به دلیل وجود عدم قطعیت ها و اغتشاشها در سیستم مسیرها از سطح جدا می شوند و باید قانون کنترل را به گونه ای اصلاح کرد که مسیرها در هر کجای صفحه فاز سیستم باشند به سمت سطح برگردانده شوند. توجیح دیگر آنکه ورودی کنترل معادل بر اساس مدل دینامیکی سیستم محاسبه می شود که غیر دقیق می باشد و عملاً شرط (۷۳-۵) را برقرار نمی کند و دینامیک سیستم بر روی سطح قرار نمی گیرد. این موضوع همان شرط لغزشی (۷۲-۵) را ایجاب می کند که قانون کنترل بدست آمده باید آنرا ارضاء کند. بنابراین با اضافه کردن یک ترم سوئیچینگ قانون کنترل به صورت زیر اصلاح می شود.

$$u = u_{eq} - k(x)sgn(S) \quad (۷۵-۵)$$

ضریب $k(x)$ در (۷۵-۵) می تواند تابعی از متغیر های حالت و یا ثابت باشد. در این حالت در صورت جدا شدن مسیرهای حالت از روی سطح به دلیل تغییر علامت S ، ورودی کنترل بر روی مقداری جدیدی سوئیچ می کند تا همچنان مسیرها را بر روی سطح نگه دارد. همانطور که بیان شد برای این منظور قانون کنترل باید شرط لغزشی (۷۲-۵) را برقرار کند. بنابراین ضریب $k(x)$ از حل نامعادله (۷۲-۵) بدست خواهد آمد. اندازه $k(x)$ در حقیقت به میزان حجم عدم قطعیت در سیستم بستگی دارد. این بدان معناست که هرچه عدم قطعیت در سیستم بیشتر باشد اندازه تغییرات ورودی کنترلی برای مقابله با آن بیشتر خواهد بود.

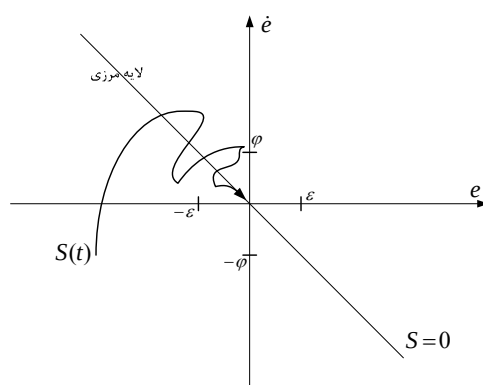
استفاده از قانون کنترل به صورت (۷۵-۵) ایجاب می کند که برای پایداری مجانبی سیستم یک سوئیچینگ فرکانس بالا بر روی سطح انجام شود. این مسئله منجر به پدیده ای به نام لرزش^۱ می شود که در بعضی از سیستم ها به علت فعال کردن مدهای مخفی فرکانس بالا باعث رفتار پیش بینی نشده سیستم و عدم کنترل مناسب آن و در بعضی موارد ناپایداری سیستم می گردد. برای رفع این ناپیوستگی در قانون کنترل از ترم های به اصطلاح نرم کننده^۲ قانون کنترل استفاده می شود [۴۰]. این عمل می تواند با تعریف یک لایه مرزی باریک به ضخامت φ و پهنای ϵ در همسایگی سطح لغزش انجام شود که در شکل ۵-۳ این حالت نشان داده شده است. در این حالت شرط لغزش باید

^۱ Chattering

^۲ Smoothing

بیرون لایه مرزی برقرار باشد تا مسیرها را به سمت لایه مرزی بکشاند و درون لایه مرزی نگه دارد. در این صورت قانون کنترل پیوسته را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$u = u_{eq} - k(x) \text{sat}(S/\varphi) \quad (۷۶-۵)$$



شکل ۵-۳- تعریف یک لایه مرزی برای حذف لرزش

در این حالت یک مصالحه بین دقت ردگیری و فرکانس سوئیچینگ ایجاد می شود که به ازاء حذف لرزش یک باند خطای محدود برای ردگیری خواهیم داشت که رابطه آن با ضخامت و پهنای لایه مرزی به صورت زیر خواهد بود.

$$|S| \leq \varphi \Rightarrow |e| \leq \epsilon \quad (۷۷-۵)$$

$$\epsilon = \frac{\varphi}{\lambda^{n-1}} \quad (۷۸-۵)$$

بنابراین می توان با در نظر گرفتن یک حداکثر خطای مجاز در سیستم، که معمولاً در سیستم های عملی وجود دارد، پارامترهای قانون کنترل مود لغزش را محاسبه کرد.

۵-۵-۱ اعمال کنترل مود لغزشی در کنار خطی سازی فیدبکی بر روی فرآیند جوشکاری قوس

الکتریکی

همان طور که در بخش ۵-۳-۱- نشان داده شد، اعمال خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی همراه با یک کنترل کننده خطی قادر به کنترل مطلوب فرآیند نمی باشد. گرچه استفاده از خطی سازی فیدبکی مزیت حذف ترم های غیرخطی را فراهم می کند اما به دلیل وجود عدم قطعیت در مدل سازی و اغتشاش های خارجی نمی تواند به تنهایی کارایی مناسبی در کنترل فرآیند داشته باشد. بنابراین استفاده را یک شیوه کنترل مقاوم در کنار خطی سازی فیدبکی می تواند رهیافت مناسبی در عملکرد کنترلی سیستم داشته باشد. از این رو در این بخش با استفاده از تئوری

مود لغزشی کنترل کننده طراحی شده در بخش ۵-۳-۱ را اصلاح می کنیم. در بخش بعدی از این شیوه کنترل مقاوم به طور مستقیم برای طراحی کنترل کننده طول قوس بر روی هر دو مدل ارائه شده استفاده خواهد شد. سپس کنترل کننده مقاوم طراحی شده را در حضور منبع توان در فصل ۶ شبیه سازی کرده و نشان خواهیم داد که با در نظر گرفتن شرایط عملی در یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی، کنترل کننده مود لغزشی عملکرد بسیار قابل قبولی را از خود نشان خواهد داد.

برای طراحی کنترل کننده مود لغزشی ابتدا باید یک سطح لغزش تعریف کرد که دینامیک پایدار داشته باشد. از آنجایی که در کنترل طول قوس هدف ثابت نگه داشتن یک طول قوس پایین برای بهینه سازی انرژی منتقل شده به حوضچه جوش می باشد، بنابراین سطح لغزش به صورت (۷۱-۵) در نظر گرفته می شود تا در حذف خطای حالت دائم مؤثر واقع شود.

$$S = \dot{e} + 2\lambda e + \lambda^2 \int_0^t e \, dr \quad (79-5)$$

که در آن خطا بر حسب متغیرهای حالت جدید بعد از خطی سازی فیدبکی به صورت زیر تعریف می شود.

$$e = z_1 - z_{1d} = l_a - l_{ad} = y - y_d \quad (80-5)$$

$$\dot{e} = z_2 - z_{2d} = \dot{l}_a - \dot{l}_{ad} = \dot{y} - \dot{y}_d \quad (81-5)$$

در (۸۱-۵) مشتق زمانی طول قوس مطلوب صفر است، $\dot{l}_{ad} = 0$ چرا که هدف درگیری یک طول قوس ثابت است. با توجه به دینامیک سیستم بعد از خطی سازی فیدبکی در (۴۴-۵) می توان ورودی کنترل معادل را با استفاده از (۷۳-۵) به صورت زیر بدست آورد.

$$\dot{S} = \ddot{e} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e = 0 \quad (80-5)$$

$$\ddot{y} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e = 0 \quad (81-5)$$

با جایگذاری $\ddot{y} = v_{eq}$ در (۸۱-۵) داریم.

$$v_{eq} = -(2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \quad (82-5)$$

توجه شود که عبارت $\phi(x)$ در قانون کنترل معادل ظاهر نمی شود چرا که به عنوان یک اغتشاش نامعلوم در نظر گرفته می شود و فقط محدوده آن قابل محاسبه است. حال قانون کنترل مود لغزشی بر اساس (۷۵-۵) به صورت زیر بدست می آید.

$$v = v_{eq} - k(x)sgn(S) \quad (۸۳-۵)$$

همانطور که اشاره شد $k(x)$ برای مقابله با عدم قطعیت و مقاوم سازی سیستم به قانون کنترل اضافه می شود و مقدار آن به میزان عدم قطعیت در سیستم بستگی دارد. حال با استفاده از شرط لغزشی (۷۲-۵) مقدار $k(x)$ برای هر دو مدل دینامیکی شماره یک و دو به صورت زیر بدست می آید.

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (۸۴-۵)$$

$$S(\ddot{y} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \leq -\eta|S| \quad (۸۵-۵)$$

با جایگذاری $\ddot{y}$ از (۴۳-۵) داریم.

$$S(\alpha(x) - \gamma\hat{\gamma}^{-1}(x)\hat{\alpha}(x) + \gamma\hat{\gamma}^{-1}(x)v + d + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \leq -\eta|S| \quad (۸۶-۵)$$

قانون کنترل (۸۳-۵) را در (۸۶-۵) قرار داده و داریم.

$$S(\alpha(x) - \gamma\hat{\gamma}^{-1}(x)\hat{\alpha}(x) + \gamma\hat{\gamma}^{-1}(x)(v_{eq} - k(x)sgn(S)) + d + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \leq -\eta|S| \quad (۸۷-۵)$$

با استفاده از (۸۲-۵) و اضافه و کم کردن جمله v_{eq} به هدف ساده سازی رابطه نهایتاً $k(x)$ به صورت زیر بدست می آید.

$$k(x) \geq \hat{\gamma}\gamma^{-1}(x)(|\hat{\phi}(x)| + \eta) \quad (۸۸-۵)$$

$$\hat{\phi}(x) = \alpha(x) - \hat{\alpha}(x) + (\gamma\hat{\gamma}^{-1}(x) - 1)(v_{eq} - \hat{\alpha}(x)) + d \quad (۸۹-۵)$$

اگر فرض شود که $|\hat{\phi}(x)| \leq \Phi$ آنگاه با در نظر گرفتن (۶۴-۵)-(۶۶-۵) و با توجه به (۴۰-۵) و (۴۱-۵) می توان محدودیت های زیر را برای تعیین Φ تعریف کرد.

$$|\alpha(x) - \hat{\alpha}(x)| \leq A \quad (۹۰-۵)$$

$$\gamma_{min} \leq \gamma(x) \leq \gamma_{max} \quad (۹۱-۵)$$

حال با انتخاب $\hat{\gamma}(x)$ به صورت زیر خواهیم داشت.

$$\hat{\gamma}(x) = \sqrt{\gamma_{min}\gamma_{max}} \Rightarrow -\Gamma \leq \gamma\hat{\gamma}^{-1}(x) \leq \Gamma \quad (92-5)$$

$$\text{or} \quad -\Gamma \leq \hat{\gamma}\gamma^{-1}(x) \leq \Gamma$$

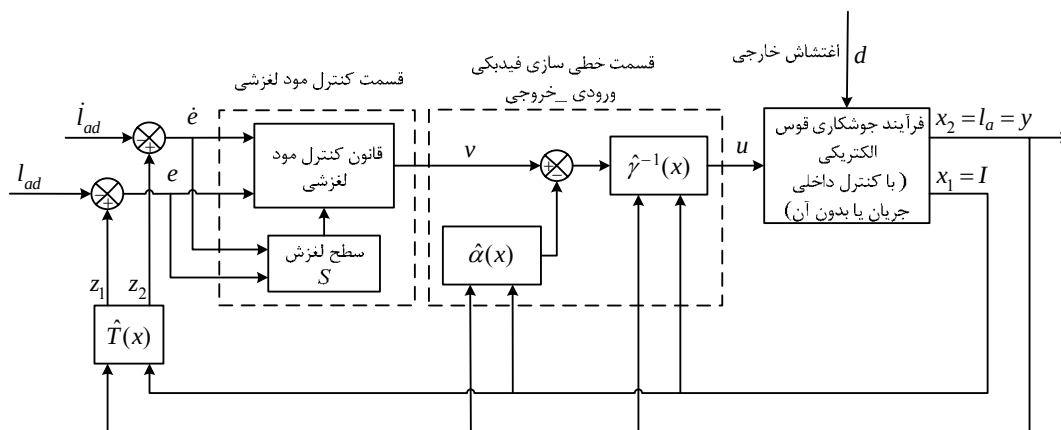
$$\Gamma = \sqrt{\frac{\gamma_{max}}{\gamma_{min}}} \text{ که در آن}$$

در نتیجه با فرض این که اغتشاش خارجی هم محدود می باشد، یعنی $|d| \leq D$ ، حد بالای $|\hat{\phi}(x)|$ و نهایتاً حداقل مقدار $k(x)$ را به صورت زیر بدست آورد.

$$\Phi = A + D + (\Gamma - 1)|v_{eq} - \hat{\alpha}(x)| \quad (93-5)$$

$$k(x) \geq \Gamma(\Phi + \eta) \quad (94-5)$$

پس با انتخاب $k(x)$ به صورت (۹۴-۵) علاوه بر ارضاء شرط لغزشی پایداری سیستم در کنترل طول قوس تضمین می شود. استفاده از این شیوه برای دو مدل دینامیکی مطرح شده یکسان است و فقط در محاسبه حداقل اندازه $k(x)$ در (۹۴-۵) تفاوت خواهند داشت. در شکل ۴-۵- بلوک دیاگرام کنترلی سیستم فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با استفاده از شیوه خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی به همراه کنترل مود لغزشی نشان داده شده است. این ساختار کنترل در حالت کلی نشان داده شده و بر روی هر دو مدل ارائه شده قابل پیاده سازی است. این رهیافت را در [۴۶] ارائه کرده ایم.



شکل ۴-۵- ساختار کنترلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با استفاده از خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی و کنترل مود لغزشی برای هر دو مدل دینامیکی پیشنهاد شده

۵-۵-۲ طراحی کنترل کننده مد لغزشی بر روی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در این بخش از تئوری کنترل مود لغزشی برای کنترل طول قوس در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی استفاده می شود. جدا از آنکه مدل دینامیکی توصیف کننده فرآیند دارای کنترل داخلی جریان باشد یا نه، این شیوه کنترل مقاوم قادر به پایدار سازی فرآیند بوده و ردگیری قابل قبولی را در حضور عدم قطعیت ها مهیا خواهد کرد. بنابراین در ابتدا طراحی کنترل کننده را بر روی مدل دینامیکی شماره یک انجام داده و سپس به طول مشابه بر روی مدل شماره دو اعمال می شود.

با در نظر گرفتن مدل شماره یک در (۵-۸) - (۵-۱۰) برای کنترل طول قوس با تعریف خطا به صورت $e = l_a - l_{ad} = y - y_d$ سطح لغزش را مشابه (۵-۷۹) تعریف کرده و با استفاده شرط ماندن بر روی سطح (۵-۷۳) ورودی کنترل معادل به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow \ddot{y} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e = 0 \quad (۵-۹۵)$$

$$\ddot{x}_2 = -(2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \quad (۵-۹۶)$$

$$k_1\dot{x}_1 + 2k_2\rho_r x_1\dot{x}_1(l_c - x_2) - k_2\rho_r x_1^2\ddot{x}_2 = -(2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \quad (۵-۹۷)$$

حال با جایگذاری از رابطه (۵-۸) در (۵-۹۷) به جای $\ddot{x}_2$ و $\dot{x}_1$ خواهیم داشت.

$$\left(f_1 + \frac{1}{L_w}u\right)(k_1 + 2k_2\rho_r x_1(l_c - x_2)) - k_2\rho_r x_1^2 f_2 = -(2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \quad (۵-۹۸)$$

با توجه به اینکه در مدل شماره یک ورودی سیستم ولتاژ ترمینال می باشد ورودی کنترل معادل به صورت زیر بدست می آید.

$$u_{eq} = U_{t-eq} = L_w \left(\frac{k_2\rho_r x_1^2 f_2 - (2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e)}{k_1 + 2k_2\rho_r x_1(l_c - x_2)} - f_1 \right) \quad (۵-۹۹)$$

با استفاده از تغییرمتغیر زیر، (۵-۹۹) به صورت زیر ساده سازی می شود.

$$a(x) = k_2 x_1^2 \rho_r f_2 - (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) f_1 \quad (۵-۱۰۰)$$

$$b(x) = \frac{1}{L_w} (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) \quad (۵-۱۰۱)$$

$$U_{t-eq} = b^{-1}(x)(a(x) - (2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e)) \quad (۱۰۲-۵)$$

باید توجه کرد که ترم های $a(x)$ و $b(x)$ از روی دینامیک سیستم تعریف شده اند که با عدم قطعیت همراه است. بنابراین تخمین آنها در محاسبه ورودی کنترل معادل استفاده می شود.

$$\hat{U}_{t-eq} = \hat{b}^{-1}(x)(\hat{a}(x) - (2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e)) \quad (۱۰۳-۵)$$

حال با انتخاب قانون کنترل مشابه (۷۵-۵) و برقراری شرط لغزشی (۷۲-۵) و در نظر گرفتن مدل دینامیکی طول قوس همراه با اغتشاش خارجی در (۵۶-۵) برای محاسبه $k(x)$ خواهیم داشت.

$$U_t = \hat{U}_{t-eq} - k(x)sgn(s) \quad (۱۰۴-۵)$$

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (۱۰۵-۵)$$

$$\begin{aligned} & S \left((k_1 + 2k_2x_1\rho_r(l_c - x_2))f_1 - k_2x_1^2\rho_rf_2 \right. \\ & + (k_1 + 2k_2x_1\rho_r(l_c - x_2))\frac{1}{L_w}(\hat{U}_{t-eq} - k(x)sgn(s)) + d \\ & \left. + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e \right) \leq -\eta|S| \end{aligned} \quad (۱۰۶-۵)$$

$$d = (k_1 + 2k_2x_1\rho_r(l_c - x_2))v_c \quad (۱۰۷-۵)$$

در (۱۰۷-۵) عبارت d ضریبی از اغتشاش ناشی از لرزش دست جوشکار است. برای سادگی در نمایش رابطه (۵-۱۰۶) می توان از همان تغییر متغیرهای (۵-۱۰۰) و (۵-۱۰۱) به صورت زیر استفاده کرد

$$S(-a(x) + b(x)(\hat{U}_{t-eq} - k(x)sgn(s)) + d + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) \leq -\eta|S| \quad (۱۰۸-۵)$$

حال با جایگذاری U_{t-eq} از (۱۰۳-۵) و ساده سازی خواهیم داشت.

$$k(x) \geq \hat{b}b^{-1}(x)(|\hat{b}b^{-1}(x) - 1||\hat{U}_{t-eq}| + \hat{b}^{-1}|\hat{a}(x) - a(x) + \eta + d|) \quad (۱۰۹-۵)$$

با در نظر گرفتن فرض هایی مشابه (۹۰-۵)-(۹۲-۵) مبنی بر محدود بودن عدم قطعیت بر روی تخمین $a(x)$ و $b(x)$ و همچنین $|d| \leq D$ می توان حداقل مقدار $k(x)$ را محاسبه کرد.

$$k(x) \geq B \left((B-1)|\hat{U}_{t-eq}| + (A+\eta+D)|\hat{b}^{-1}| \right) \quad (۱۱۰-۵)$$

که در آن

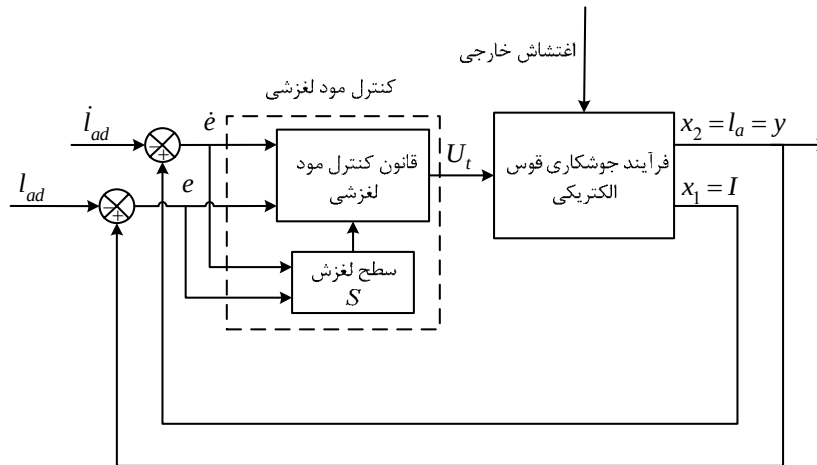
$$|a(x) - \hat{a}(x)| \leq A \quad (۱۱۱-۵)$$

$$b_{min} \leq b(x) \leq b_{max} \quad (۱۱۲-۵)$$

$$\begin{aligned} \hat{b}(x) = \sqrt{b_{min}b_{max}} &\Rightarrow -B \leq b\hat{b}^{-1}(x) \leq B \\ or \quad -B &\leq \hat{b}b^{-1}(x) \leq B \end{aligned} \quad (۱۱۳-۵)$$

$$B = \sqrt{\frac{b_{max}}{b_{min}}}$$

بلوک دیاگرام کنترلی برای کنترل طول قوس به شیوه مود لغزشی برای مدل شماره یک در شکل ۵-۵- نشان داده شده است.



شکل ۵-۵- ساختار کنترلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به شیوه مود لغزشی

به طور مشابه برای مدل شماره دو با اعمال همین روند در محاسبه ورودی کنترلی، که از جنس جریان می باشد، با استفاده از (۵-۱۲) و (۵-۱۴) و تعریف خطا به صورت $e = l_a - l_{ad} = y - y_d$ و سطح لغزش به صورت (۵-۷۹) خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} \dot{S} = 0 &\Rightarrow \left(\dot{f}_1 + \frac{1}{\tau_i} u \right) (k_1 + 2k_2 \rho_r x_1 (l_c - x_2)) - k_2 \rho_r x_1^2 \dot{f}_2 \\ &= -(2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e) \end{aligned} \quad (۵-۱۱۴)$$

با توجه به اینکه در مدل شماره یک ورودی سیستم ولتاژ ترمینال می باشد ورودی کنترل معادل به صورت زیر بدست می آید.

$$u_{eq} = I_{r-eq} = \tau_i \left(\frac{k_2 \rho_r x_1^2 \dot{f}_2 - (2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e)}{k_1 + 2k_2 \rho_r x_1 (l_c - x_2)} - \dot{f}_1 \right) \quad (۵-۱۱۵)$$

مشابه (۵-۱۰۰) و (۵-۱۰۱) برای ساده سازی روابط از تغییرمتغیرهای زیر استفاده کرده و ورودی کنترل معادل به صورت زیر بدست در (۵-۱۱۸) بدست می آید.

$$\dot{a}(x) = k_2 x_1^2 \rho_r \dot{f}_2 - (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) \dot{f}_1 \quad (۵-۱۱۶)$$

$$\dot{b}(x) = \frac{1}{\tau_i} (k_1 + 2k_2 x_1 \rho_r (l_c - x_2)) \quad (۵-۱۱۷)$$

$$I_{r-eq} = \dot{b}^{-1}(x) (\dot{a}(x) - (2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e)) \quad (۵-۱۱۸)$$

با وجود عدم قطعیت در دینامیک ترم های $\dot{a}(x)$ و $\dot{b}(x)$ به صورت تقریبی در دسترس می باشند. بنابراین ورودی کنترل معادل با احتساب این مسئله به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$\hat{I}_{r-eq} = \hat{b}^{-1}(x) (\hat{a}(x) - (2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e)) \quad (۵-۱۱۸)$$

بنابراین با انتخاب ورودی کنترل به صورت (۵-۱۱۹) و برقراری شرط لغزشی (۵-۷۲) و در نظر گرفتن مدل دینامیکی طول قوس همراه با اغتشاش خارجی در (۵-۵۶) برای محاسبه $\hat{k}(x)$ خواهیم داشت.

$$I_r = \hat{I}_{r-eq} - \hat{k}(x) \operatorname{sgn}(s) \quad (۵-۱۱۹)$$

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (۱۲۰-۵)$$

$$\begin{aligned} & S \left((k_1 + 2k_2x_1\rho_r(l_c - x_2))\dot{f}_1 - k_2x_1^2\rho_r\dot{f}_2 \right. \\ & + (k_1 + 2k_2x_1\rho_r(l_c - x_2))\frac{1}{\tau_i}(\hat{I}_{r-eq} - \dot{k}(x)\text{sgn}(s)) + d \\ & \left. + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2e \right) \leq -\eta|S| \end{aligned} \quad (۱۲۱-۵)$$

$$d = (k_1 + 2k_2x_1\rho_r(l_c - x_2))v_c \quad (۱۲۲-۵)$$

در این حالت با استفاده از تغییر متغیرهای (۱۱۶-۵) و (۱۱۷-۵) مشابه آنچه که برای مدل شماره یک انجام شد، مقدار $\dot{k}(x)$ به صورت زیر بدست می آید و بلوک دیاگرام کنترلی مربوطه در شکل ۵-۶- نشان داده شده است.

$$\dot{k}(x) \geq \dot{B} \left((\dot{B} - 1)|\hat{I}_{r-eq}| + (A + \eta + D) \left| \hat{b}^{-1} \right| \right) \quad (۱۲۳-۵)$$

که در آن

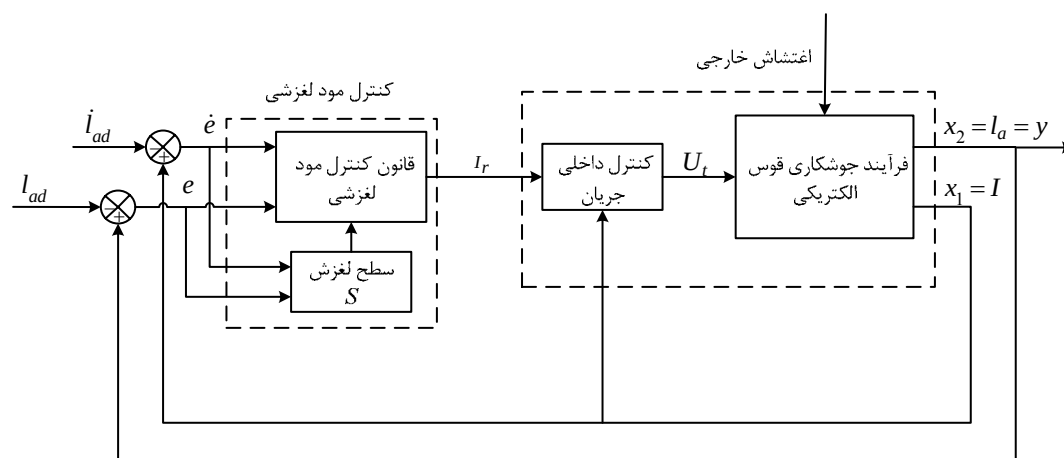
$$|\dot{a}(x) - \hat{\dot{a}}(x)| \leq \dot{A} \quad , \quad |d| \leq D \quad (۱۲۴-۵)$$

$$\dot{b}_{min} \leq \dot{b}(x) \leq \dot{b}_{max} \quad (۱۲۵-۵)$$

$$\hat{\dot{b}}(x) = \sqrt{\dot{b}_{min}\dot{b}_{max}} \Rightarrow -\dot{B} \leq \dot{b}\hat{\dot{b}}^{-1}(x) \leq \dot{B}$$

$$\text{or} \quad -\dot{B} \leq \hat{\dot{b}}\dot{b}^{-1}(x) \leq \dot{B} \quad (۱۲۶-۵)$$

$$\dot{B} = \sqrt{\frac{\dot{b}_{max}}{\dot{b}_{min}}}$$



شکل ۵-۶- ساختار کنترلی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه کنترل داخلی جریان به شیوه مد لغزشی

۵-۶- شیوه کنترل فازی- مود لغزشی

همانطور که در بخش های قبلی مطرح شد در قانون کنترل مود لغزشی ترم $k(x)sgn(s)$ عامل پایدار سازی و مقاوم سازی فرآیند می باشد. اما در محاسبه $k(x)$ نیاز به دانستن تخمینی از مدل دینامیکی و محدوده عدم قطعیت می باشد که معمولاً نمی توان به طور دقیق آنرا محاسبه کرد. از این رو استفاده از تئوری های کنترل مدل آزاد مانند تئوری فازی برای بهبود عملکرد کنترل مود لغزشی می تواند بسیار سودمند واقع شود. استفاده از شیوه های کنترل ترکیبی فازی مود لغزش در موارد زیادی برای بهبود عملکرد کنترل مود لغزشی به کار گرفته شده است. به عنوان مثال در [۴۱] از کنترل فازی برای چرخاندن سطح لغزش استفاده شده تا اثر خطای لحظه صفر را کاهش داده و مسیرهای سیستم زودتر با سطح برخورد کرده و عملیات سوئیچینگ آغاز شود. در [۴۲] تخمین بهره سوئیچینگ در کنترل ربات به گونه ای است که کمترین لرزش ایجاد شود. همچنین در [۴۳] برای تنظیم ضخامت لایه مرزی در کنترل هموار مود لغزش از کنترل فازی استفاده شده است.

بنابراین در این بخش همانطور که در شکل ۵-۷- نشان داده شده است از یک کنترل کننده فازی به همراه بهره مقیاس K_0 در خروجی برای تخمین $k(x)$ در قانون کنترل مود لغزش استفاده شده است. با توجه به این که اندازه $k(x)$ به میزان فاصله از سطح و سرعت حرکت به سمت سطح لغزش بستگی دارد، ورودی های کنترل کننده فازی $\dot{S}$ و $\dot{S}$ در نظر گرفته می شود. پایگاه قواعد فازی برای این منظور در جدول ۵-۱- پیشنهاد داده شده است. قواعد فازی به صورت زیر تعریف می شوند.

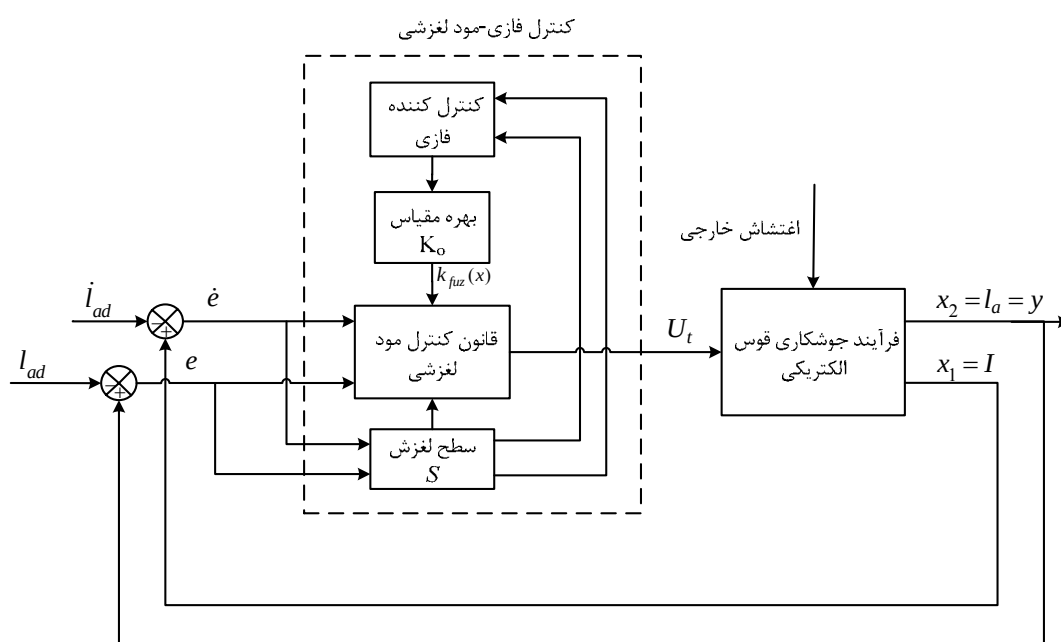
اگر S عضو MF_i و $\dot{S}$ عضو MF_j باشد، آنگاه $k_{fuz}(x)$ عضو MF_k است،

برای $i = 1, 2$ و $j = 1, 2$ و $k = 1, 2$.

در جدول ۵-۱ N مخفف گروه فازی منفی، P مخفف گروه فازی مثبت، L مخفف گروه فازی کم و H مخفف گروه فازی زیاد است. بنابراین با اصلاح (۵-۱۴۰)، قانون نهایی کنترل ترکیبی فازی-مود لغزشی بر روی مدل شماره ۲ به صورت خواهد بود.

$$U_t = \hat{U}_{t-eg} - k_{fuz}(x)sgn(s) \quad (119-5)$$

$k_{fuz}(x)$		S	
		N	P
$\dot{S}$	N	H	L
	P	L	H



شکل ۵-۷- کنترل کننده ترکیبی فازی-مود لغزشی

۵-۷- بحث و نتیجه گیری

در این فصل کنترل کننده طول قوس به شیوه های خطی سازی فیدبکی، مود لغزش و فازی- مود لغزش بر روی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی توسعه داده شد. از طرفی عدم قطعیت در فرآیند مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که کنترل کننده مود لغزشی چگونه به صورت مقاوم قادر به کنترل طول قوس خواهد بود. در این راستا شبیه سازی هایی که در فصل ۶ انجام خواهد شد تأییدی بر این مطلب خواهد بود. موضوعی که باید مد نظر قرار گیرد این است که سیگنال های کنترلی باید توسط منبع توان تولید شده و به فرآیند اعمال شوند. حال این که سیگنال های کنترلی در محدوده کاری منبع توان قرار خواهند داشت یا نه در فصل ۶ با در نظر گرفتن یک مدل صنعتی از یک منبع توان بر مبنای اینورتر و اعمال آن در سیستم و شبیه سازی نشان داده خواهد شد.

فصل ششم

۶- نتایج شبیه سازی

در این فصل برای نشان دادن عملکرد کنترل سیستم، شبیه سازی هایی انجام شده است. نتایج شبیه سازی هر کدام از کنترل کننده ها همراه با نحوه انتخاب پارامترهای کنترل کننده مربوطه ارائه شده است. در انتها کنترل کننده مد لغزشی طراحی شده بر روی فرآیند با در نظر گرفتن مدل منبع توان اعمال می شود. در این حالت شرایط نسبتاً عملی برای فرآیند کنترل طول قوس در محیط شبیه فراهم آورده شده است تا قدرت مقاوم سازی کنترل کننده طول قوس بر روی فرآیند در شرایط عملی نشان داده شود.

در تمامی کنترل کننده ها، هدف ثابت نگه داشتن طول قوس بر روی مقدار مطلوب ثابت است، که در این جا طول قوس سه میلی متر $l_{ad} = 0.003^m$ به عنوان نقطه تنظیم و مقدار مطلوب خروجی در تمام شبیه سازی های در نظر گرفته می شود. در بسیاری از کارهای انجام شده در این زمینه از جمله در [۲]، [۳] و [۴] تنظیم طول قوس ثابت مد نظر قرار گرفته شده است. برای جلوگیری از اثر لرزش قوانین کنترل مود لغزشی با در نظر گرفتن یک لایه مرزی به صورت شکل ۵-۲ و قانون کنترل (۵-۷۶) در نظر گرفته خواهد شد و شبیه سازی ها بر همین اساس انجام می شود.

۶-۱- خطی سازی فیدبکی به همراه کنترل مود لغزشی

در پیاده سازی خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی بنا به (۵-۳۹) نیاز به داشتن تخمین مدل دینامیکی فرآیند برای محاسبه ترم های $\alpha(x)$ و $\gamma(x)$ می باشد. از طرفی در شبیه سازی خود فرآیند هم باید از مدل های ارائه شده در بخش ۵-۲ استفاده شوند که با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۵-۴ مدل واقعی فرآیند با عدم قطعیت همراه است. بنابراین برای انجام شبیه سازی ها، دینامیک های تخمینی برای طراحی کنترل کننده ها را بر اساس فرض ارائه شده در (۵-۶۷)-(۵-۶۹) در نظر می گیریم و دینامیکهای واقعی برای شبیه سازی خود فرآیند با توجه به محدوده عدم قطعیت در (۵-۶۴)-(۵-۶۶) برای هر دو مدل دینامیکی شماره یک و دو به صورت زیر در نظر گرفته می شوند.

$$f(x) = 0.9\tilde{f}(x) \quad , \quad \dot{f}(x) = 0.9\dot{\tilde{f}}(x) \quad (۱-۶)$$

$$g(x) = 0.95\tilde{g}(x) \quad , \quad \dot{g}(x) = 0.95\dot{\tilde{g}}(x) \quad (۲-۶)$$

$$h(x) = \dot{h}(x) = 0.98\tilde{h}(x) \quad (۳-۶)$$

که در آن $\tilde{f}$, $\tilde{g}$, $\tilde{h}$ و $\tilde{f}$, $\tilde{g}$, $\tilde{h}$ همانطور که در بخش ۵-۴- اشاره شد دینامیک های در دسترس از فرآیند می باشند. حال با توجه به این که مدل دینامیکی فرآیند برای اعمال خطی سازی فیدبکی به صورت یک معادله دیفرانسل مرتبه دو در (۵-۳۸) بر حسب $\alpha(x)$ و $\gamma(x)$ در نظر گرفته شده است، با در نظر گرفتن رابطه های (۵-۳۲)-(۵-۳۷) می توان مقادیر $\alpha(x)$ و $\gamma(x)$ و تخمین هایشان $\hat{\alpha}(x)$ و $\hat{\gamma}(x)$ را با توجه به فرض های (۵-۹۰)-(۵-۹۲) برای هر دو مدل به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\alpha(x) = 0.79\tilde{\alpha}(x) \quad , \quad \hat{\alpha}(x) = \tilde{\alpha}(x) \quad (۴-۶)$$

$$\dot{\alpha}(x) = 0.84\dot{\tilde{\alpha}}(x) \quad , \quad \hat{\dot{\alpha}}(x) = \dot{\tilde{\alpha}}(x)$$

$$\gamma(x) = 0.83\tilde{\gamma}(x) \quad , \quad \hat{\gamma}(x) = \tilde{\gamma}(x) \quad (۵-۶)$$

$$\dot{\gamma}(x) = 0.83\dot{\tilde{\gamma}}(x) \quad , \quad \hat{\dot{\gamma}}(x) = \dot{\tilde{\gamma}}(x)$$

که در آن $\tilde{\alpha}(x)$, $\tilde{\gamma}(x)$, $\tilde{\dot{\alpha}}(x)$ و $\tilde{\dot{\gamma}}(x)$ بر حسب دینامیک های در دسترس بدست می آیند. بنابراین می توان پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه $k(x)$ و $\dot{k}(x)$ در (۵-۹۳) و (۵-۹۴) را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$A = 0.21|\tilde{\alpha}(x)| \quad , \quad \Gamma = 1.18 \quad (۶-۶)$$

$$\dot{A} = 0.16|\dot{\tilde{\alpha}}(x)| \quad , \quad \dot{\Gamma} = 1.18$$

برای نشان دادن عملکرد این کنترل کننده باید اثر اغتشاشات خارجی را مد نظر قرار داد. یکی از اغتشاشات عمده در فرآیند جوشکاری دستی، لرزش دست جوشکار است که منجر به تغییر در فاصله لوله اتصال تا قطعه کار شده و طول قوس را از مقدار مطلوب منحرف می کند. با توجه به فرضیهایی که در [۳] و [۷] اعمال شده اند، این لرزش دست دارای حداکثر فرکانس ۲۰ هرتز می باشد. بنابراین می توان این اثر را به صورت یک نویز گوسی در نظر گرفت که دارای مقدار میانگین صفر و واریانس ۰/۰۰۲ بوده و به مقدار نامی $l_c = 0.15^m$ اضافه کرد. همچنین در طول زمان شبیه سازی مقدار l_c در دو زمان ۰/۵ ثانیه و ۱/۵ ثانیه به ترتیب ۵ میلی متر کاهش و ۱۰ میلی متر افزایش داده می

شود، (شکل ۶-۱) تا قدرت کنترل کننده در اثر تغییر ناگهانی فاصله دست جوشکار از قطعه کار سنجیده شود. زمان شبیه سازی ها ۲ ثانیه در نظر گرفته شده است زیرا زمان پایدار شدن پاسخ سیستم باید خیلی سریع باشد.

همانطور که قبلاً مطرح شد، برای جلوگیری از لرزش فرکانس بالا در سیستم، از یک لایه مرزی در قانون کنترل به صورت (۵-۷۶) استفاده خواهد شد. بنابراین خطایی محدود در پاسخ سیستم به وجود خواهد آمد که بنا به (۵-۷۷) می توان محدوده آن را با انتخاب ضخامت و شیب سطح لغزش تحت کنترل در آورد. در این راستا باید حد خطای مجاز برای طول قوس را تعیین کنیم تا کیفیت جوش خراب نشود. بنابراین با فرض حداکثر خطای ۵٪ و انتخاب مقدار شیب سطح به اندازه ۲۰۰، ضخامت لایه مرزی بنا به (۵-۷۸) بدست می آید.

$$\epsilon = 0.05^{mm}, \lambda = 200 \Rightarrow \varphi = 0.01 \quad (۷-۶)$$

همچنین مقدار η در (۵-۷۲) برای تضمین رسیدن مسیر ها به سطح برابر یک فرض می شود و در تمامی شبیه سازی ها از (۶-۷) و $\eta = 1$ برای طراحی کنترل کننده مود لغزش استفاده خواهد است. حال با توجه به محدوده خطای مجاز می توان $|d|$ یعنی محدوده اغتشاش های خارجی در (۵-۸۹) را برای هر دو مدل $D = 10$ فرض کرد. بنابراین عبارت Φ در (۵-۹۳) برای هر دو مدل به صورت زیر خواهد بود.

$$\Phi = 0.21|\tilde{\alpha}(x)| + 0.18|v_{eq} - \hat{\alpha}(x)| + 10 \quad (۸-۶)$$

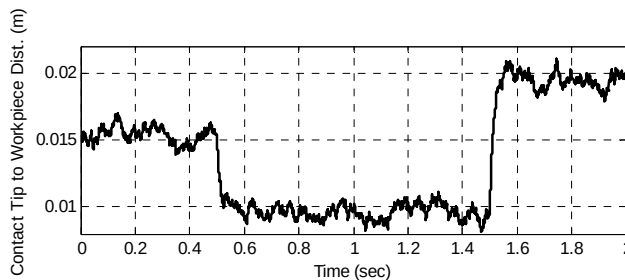
$$\dot{\Phi} = 0.16|\tilde{\alpha}(x)| + 0.18|\dot{v}_{eq} - \hat{\dot{\alpha}}(x)| + 10 \quad (۹-۶)$$

نهایتاً بهره سوئیچینگ به صورت زیر محاسبه می شود.

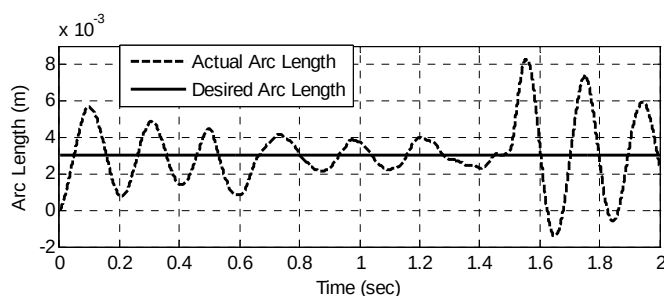
$$k(x) \geq 1.18(\Phi + 1) \quad (۸-۶)$$

$$\dot{k}(x) \geq 1.18(\dot{\Phi} + 1) \quad (۹-۶)$$

البته برای کنترل کننده های مختلف بسته به پاسخ سیستم مقدار بهره سوئیچینگ را می توان بیشتر از مقدار بدست آمده در (۶-۸) و (۶-۹) انتخاب کرد.

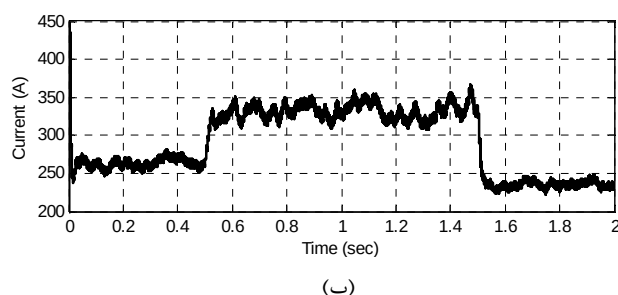
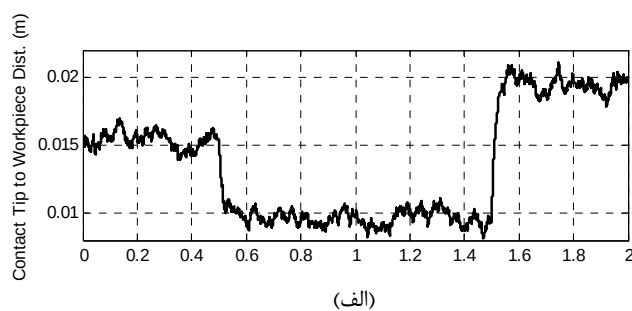


شکل ۶-۱- تغییرات فاصله لوله اتصال تا قطعه کار (l_c) که همان لرزش دست جوشکار می باشد.

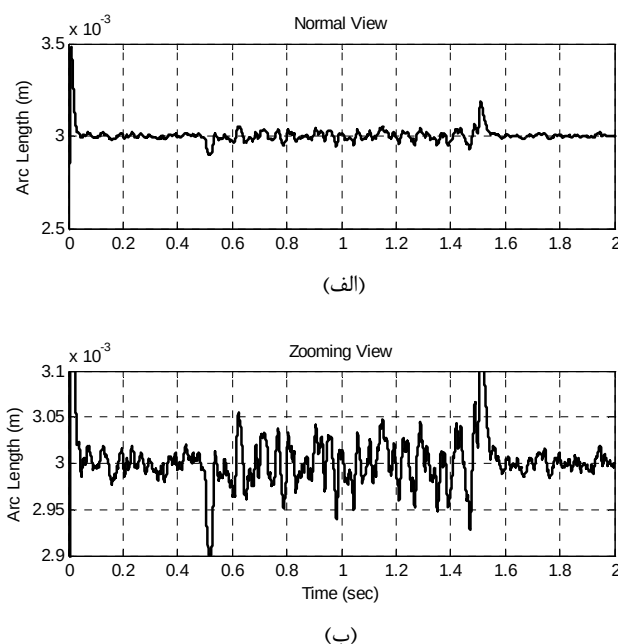


شکل ۶-۲- مقایسه طول قوس واقعی (منحنی خط چین) و طول قوس مطلوب (منحنی خط ممتد) در استفاده از خطی سازی فیدبکی بر روی سیستم جوشکاری بدون حضور کنترل داخلی جریان (مدل شماره یک)

ابتدا نتایج شبیه سازی کنترل طول قوس بر روی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی بدون حضور کنترل داخلی جریان (مدل شماره یک) بررسی می شود. در شکل ۶-۲ پاسخ سیستم با اعمال خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی و استفاده از یک کنترل کننده خطی تناسبی- مشتقی- انتگرالی با بهره های $K_p = 3500$ ، $K_i = 650000$ و $K_d = 6600$ مشاهده می شود. این پاسخ که در حضور عدم قطعیت و لرزش دست جوشکار می باشد نسبت به طول قوس مطلوب بسیار نامناسب بوده و حتی با بهره های بسیار بالا که غیر عملی هم می باشند، کنترل کننده خطی قادر به ثابت نگه داشتن طول قوس نمی باشد. بنابراین واضح است که باید از روش های کنترل غیر خطی مقاوم در کنار خطی سازی فیدبکی استفاده شود. شکل های ۶-۳ تا ۶-۷ نتایج شبیه سازی کنترل کننده طول قوس به روش خطی سازی فیدبکی ورودی- خروجی همراه با کنترل مود لغزش بر روی مدل شماره یک را نشان می دهند.



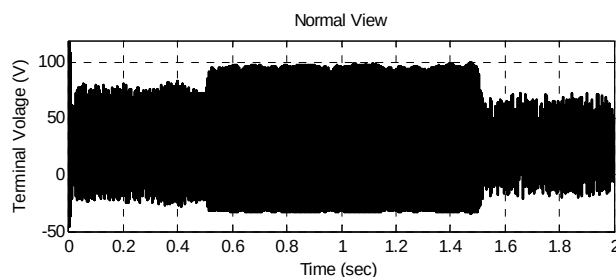
شکل ۶-۳- (الف) منحنی تغییرات فاصله لوله اتصال تا قطعه کار، (ب) جریان جوشکاری



شکل ۶-۴- طول قوس، (الف) نمای معمولی، (ب) نمای بزرگ برای نمایش حداکثر خطای طول قوس

در شکل ۶-۳- (ب) جریان جوشکاری نشان داده شده است و همانطور که در مقایسه با شکل ۶-۳- (الف) دیده می شود، تغییرات جریان برخلاف تغییرات I_c بوده تا اثرات مخرب آنرا بر روی طول قوس خنثی کند. میزان این جریان که تقریباً از ۲۲۰ آمپر تا ۳۶۰ آمپر تغییر می کند در محدوده حالت انتقال اسپری می باشد. بنابراین نحوه انتقال فلز به صورت اسپری حفظ شده است. در شکل ۶-۴- طول قوس نمایش داده شده است. همانطور در شکل ۶-۴- (الف) دیده می شود تنها در مواقعی که I_c ناگهان تغییر می کند طول قوس تغییرات نسبتاً زیادی در حدود ۱۵٪ دارد اما بلافاصله پایدار می شود. در شکل ۶-۴- (ب) نمای بزرگ شده از طول قوس نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود تغییرات طول قوس درون باند ۵٪ درصد محدود مانده است که با انتخاب پارامترهای شیب سطح لغزش و ضخامت لایه مرزی رسیدن به چنین خطایی دور از انتظار نبود. باید توجه کرد که در مدتی که I_c بر روی ۱ سانتی متر قرار دارد کنترل کننده با دشواری بیشتری در کنترل طول قوس مواجه است چرا که اصولاً کنترل طول قوس های پایین مانند ۳ میلی متر بسیار دشوار می باشد. بنابراین تأثیر کنترل کننده مود لغزشی در ثابت نگه داشتن طول قوس پایین با خطای محدود و مجاز ۵٪ به وضوح دیده می شود.

شکل ۶-۵- ولتاژ ترمینال یا همان ورودی فرآیند جوشکاری را نشان می دهد. همانطور که از شکل ۶-۵- (الف) پیداست، سیگنال ولتاژ ترمینال با تغییراتی بین تقریباً ۳۵- ولت تا حداکثر ۱۰۰ ولت همراه است و در مدت زمانی که I_c کاهش یافته است متوسط ولتاژ ترمینال افزایش یافته تا با افزایش جریان جوشکاری، کاهش طول قوس جبران شود.

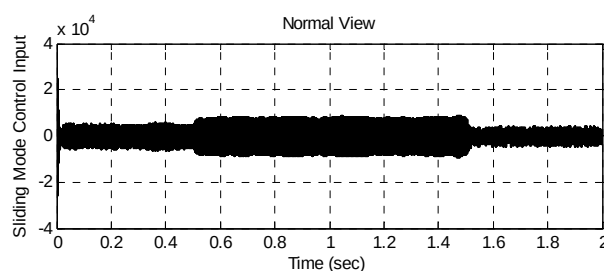


شکل ۶-۵- ولتاژ ترمینال.

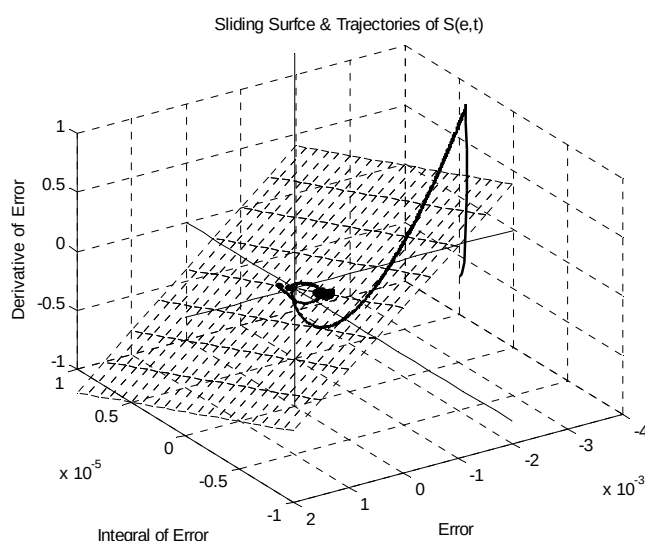
تغییرات شدید در ولتاژ ترمینال به دلیل سوئیچینگ سیگنال کنترلی مود لغزشی در همسایگی سطح لغزش در لایه مرزی می باشد. اگر چه که استفاده از لایه مرزی تا حد زیادی فرکانس لرزش را کاهش می دهد اما برای رسیدن به خطای محدود ناگزیر از کوچک گرفتن ضخامت لایه مرزی می باشیم. باید توجه داشت دینامیک جریان در مدل شماره یک برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی از المان های مانند سلف و مقاومت تشکیل شده اند که در برابر ولتاژهای ورودی فرکانسی نقش فیلترینگ را ایفا می کنند. بنابراین جریان مدار جوشکاری نرم تر از ولتاژ ترمینال اعمالی خواهد بود. این موضوع به وضوح در شکل ۶-۳- (ب) دیده می شود.

بنابراین به طور عملی می توان گفت که جریان جوشکاری که یکی از متغیرهای سیستم می باشد به متوسط ولتاژ ترمینال پاسخ می دهد. همچنین دینامیک طول قوس بنا به (۵-۸) وابسته به جریان است، بنابراین تغییرات شدید در ولتاژ ترمینال بر روی طول قوس کم اثر بوده و طول قوس نیز به متوسط ورودی پاسخ می دهد. در نتیجه می توان ادا کرد که فرکانس ولتاژ ترمینال در محدوده کاری سیستم قرار دارد و عملاً مشکلی برای کنترل طول قوس ایجاد نمی کند. از دید دیگر باید این موضوع را مد نظر قرار داد که آیا محرک سیستم قادر به تولید چنین ولتاژی هست یا نه.

در اینجا به طور اجمالی با اشاره به بخش ۳-۱- یادآوری می شود که در ماشین های جوشکاری منابع توان اینورتر با استفاده از روش مدولاسیون پهنای پالس ولتاژ مورد نیاز را در خروجی ترمینال تولید می کنند. مبدل پهنای پالس و مدارات سوئیچینگ در قسمت اینورتر با فرکانس های بالا تا حد ۵۰ کیلوهرتز کار می کنند. بنابراین تولید چنین ولتاژی میسر خواهد بود. این موضوع در قسمت آخر این فصل با شبیه سازی یک منبع توان بر مبنای اینورتر در کنار سیستم جوشکاری قوس الکتریکی برای تولید ولتاژ مورد نیاز که توسط کنترل کننده تولید شده است، بررسی خواهد شد.



شکل ۶-۶- سیگنال کنترلی مود لغزش

شکل ۶-۷- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ به سمت سطح لغزش و ماندن در همسایگی آن در محدوده لایه

مرزی در کنترل کننده خطی سازی فیدبکی به همراه کنترل مود لغزشی بر روی مدل مدل دینامیکی شماره دو

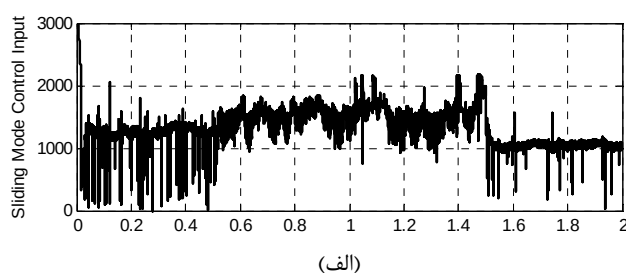
در شکل ۶-۶- نیز سیگنال کنترلی مود لغزشی نشان داده شده است. مسلماً اندازه بالای آن برای مقابله با عدم قطعیت در سیستم است. شکل ۶-۷- مسیر خطای سیستم در فضای سه بعدی خطای سیستم به همراه سطح لغزش ترسیم شده است. همانطور که دیده می شود مسیرهای حالت یا $S(t)$ بعد از خطای اولیه که ناشی از صفر بود طول قوس در لحظه صفر است، با حرکت به سمت سطح و ماندن در حول مبداء پایداری سیستم را نشان می دهد و خطای محدود در طول قوس را تضمین می کند. مبداء فضای سه بعدی توسط سه محور متقاطع مشخص شده است.

شکل های ۶-۸ تا ۶-۱۰- نتایج شبیه سازی کنترل کننده طول قوس به روش خطی سازی فیدبکی ورودی-خروجی همراه با کنترل مود لغزش بر روی مدل شماره دو را نشان می دهند. همانطور که در شکل ۶-۸- (الف) سیگنال کنترلی مود لغزش دیده می شود که نسبت به سیگنال کنترلی مود لغزش در کنترل کننده مدل شماره یک دامنه کمتر دارد. این امر به دلیل تفاوت دو مدل دینامیکی می باشد. با مقایسه (۵-۸) و (۵-۱۲) دیده می شود که

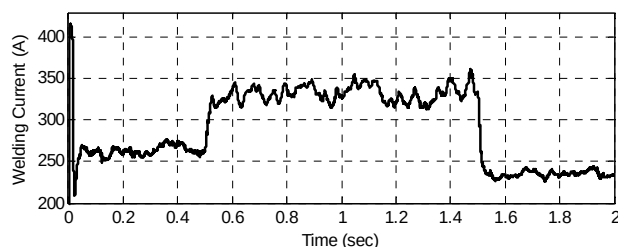
دینامیک جریان در مدل شماره دو خطی شده دینامیک جریان در مدل شماره یک است که دلیل آن هم فرض وجود کنترل داخلی جریان در منبع توان است.

بنابراین واضح است که کنترل کننده به آسانی قادر به مقابله با عدم قطعیت های سیستم می باشد. این موضوع در کاهش نوسانات در جریان جوشکاری در شکل ۶-۸ (ب) نسبت به شکل ۶-۳ (ب) به وضوح دیده می شود. تغییرات جریان جوشکاری نیز در محدوده حالت انتقال اسپری می باشد و همچنین در هنگامی که l_c تغییرات ناگهانی دارد کنترل کننده با تغییر جریان جوشکاری باعث حفظ طول قوس می گردد. این موضوع در شکل ۶-۹ که پاسخ طول قوس است، دیده می شود. همانطور که در شکل ۶-۹ (الف) دیده می شود با وجود تمام عدم قطعیت ها طول قوس در با تغییرات اندکی در نزدیکی مقدار مطلوب پایدار مانده است. همچنین مشابه حالت قبل به دلیل انتخاب لایه مرزی انتظار می رفت که خطای طول قوس از حد ۵٪ تجاوز نکند که این مسئله در نمای بزرگ شده طول قوس در شکل ۶-۹ (ب) دیده می شود.

در شکل ۶-۱۰- مانند شکل ۶-۷- حرکت مسیرهای حالت در فضای خطای سیستم به همراه سطح لغزش نمایش داده شده است. نحوه حرکت $S(t)$ به سمت سطح و ماندن در نزدیکی مبدا نشان از طراحی صحیح کنترل کننده مود لغزشی و پایداری طول قوس دارد.

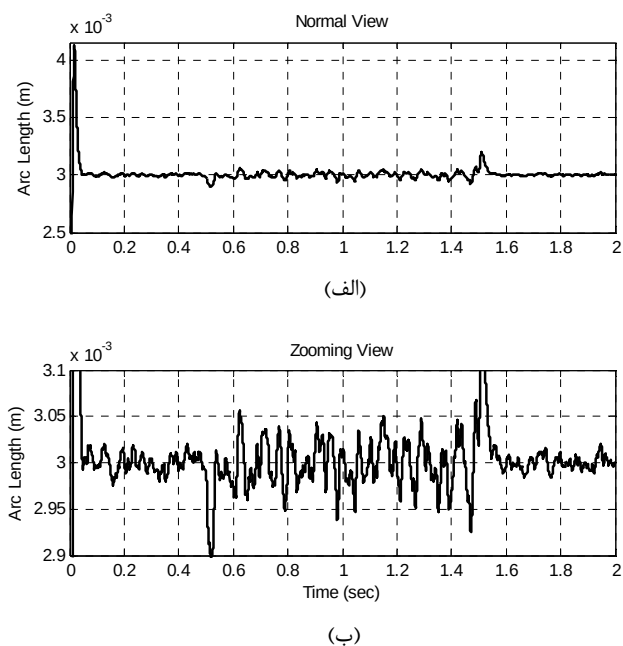


(الف)

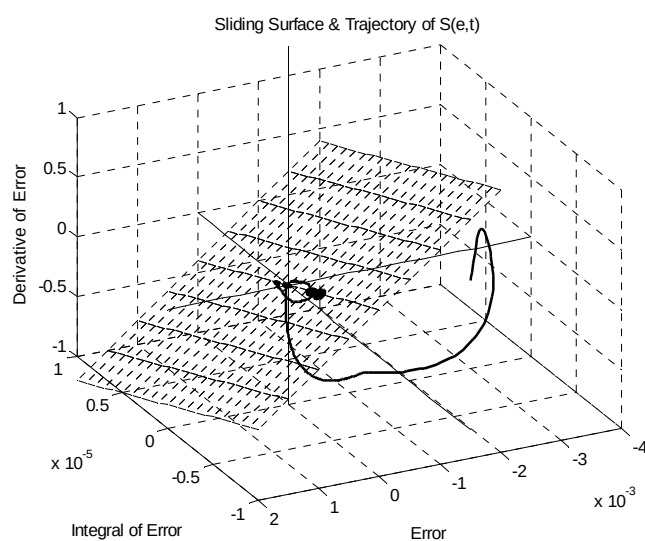


(ب)

شکل ۶-۸- (الف) سیگنال کنترلی مود لغزش، (ب) جریان جوشکاری



شکل ۶-۹- طول قوس، (الف) نمای معمولی، (ب) نمای بزرگ



شکل ۶-۱۰- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ به سمت سطح لغزش و ماندن در همسایگی آن در محدوده لایه مرزی در کنترل کننده خطی سازی فیدبکی به همراه کنترل مد لغزشی بر روی مدل مدل دینامیکی شماره دو

۲-۶- کنترل مود لغزشی

در این قسمت با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۵-۵-۲- با در نظر گرفتن مدل شماره یک کنترل کننده مود لغزشی را برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی شبیه سازی می کنیم. در پیاده سازی کنترل کننده همانطور که در بخش قبل ذکر شد از قانون هموار مود لغزشی در (۷۶-۵) استفاده می شود. بنابراین پارامترهای مربوط به ضخامت لایه مرزی و شیب سطح لغزش مشابه (۷-۶) انتخاب می شود و حداکثر خطای ۵٪ در کنترل طول قوس مد نظر قرار خواهد گرفت. همچنین $\eta = 1$ در نظر گرفته می شود. در این حالت برای محاسبه ورودی کنترل معادل و بهره سوئیچینگ نیاز به دانستن مدل تخمین و محدوده عدم قطعیت در آن است. بنابراین بنا به (۵-۱۰۳) کافی است که محدوده عدم قطعیت بر روی تغییر متغیرها در $a(x)$ و $b(x)$ تعیین شوند. از آنجایی که این تغییر متغیرها از روی مدل دینامیکی شماره یک محاسبه می شوند و عدم قطعیت بر روی مدل دینامیکی شماره یک در (۶-۱) تا (۶-۳) بر حسب دینامیک های در دسترس مشخص شده اند، بنابراین با استفاده از فرض های (۵-۱۱۱) تا (۵-۱۱۳) داریم.

$$a(x) = 0.79\tilde{a}(x) \quad , \quad \hat{a}(x) = \tilde{a}(x) \quad (۱۰-۶)$$

$$b(x) = 0.83\tilde{b}(x) \quad , \quad \hat{b}(x) = \tilde{b}(x) \quad (۱۱-۶)$$

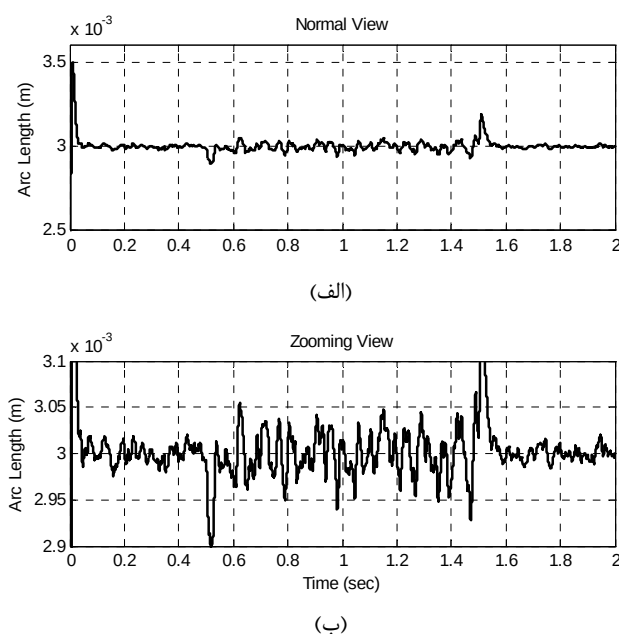
$$A = 0.21|\tilde{a}(x)| \quad , \quad B = 1.18 \quad (۱۲-۶)$$

که در آن $\tilde{a}(x)$ ، $\tilde{b}(x)$ بر حسب دینامیک های در دسترس بدست می آیند. حال با فرض محدود بودن اغتشاش خارجی به صورت $D = 10$ می توان بهره سوئیچینگ $k(x)$ را به صورت زیر محاسبه کرد.

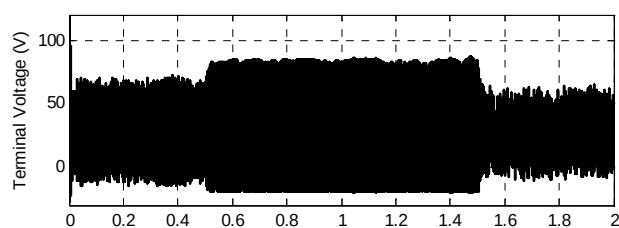
$$k(x) \geq 1.18(1.18|\hat{U}_{t-eq}| + 11.79|\hat{b}^{-1}|) \quad (۱۲-۶)$$

شکل های ۶-۱۱ تا ۶-۱۳ نتایج شبیه سازی کنترل کننده مود لغزشی بر روی مدل دینامیکی شماره یک نشان می دهند. شکل ۶-۱۱ طول قوس کنترل شده را نشان می دهد. همانطور که انتظار می رفت علی رغم تمام عدم قطعیت ها و همچنین تغییرات در فاصله لوله اتصال تا قطعه کار، پاسخ مطلوبی با محدوده خطای ۵٪ در شکل ۶-۱۱-ب) مشاهده می شود. در شکل ۶-۱۲ تغییرات ولتاژ و جریان نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود با توجه به تغییرات ناگهانی در l_c ولتاژ ترمینال، که مستقیماً توسط کنترل کننده مود لغزش تعیین می شود، برای جبران تغییر طول قوس در زمان های $t = 0.5$ و $t = 1.5$ ثانیه به ترتیب افزایش و کاهش یافته تا با تنظیم جریان طول قوس را در حد مطلوب نگه دارد. در شکل ۶-۱۳- نیز مشابه قبل مسیرهای حالت و سطح لغزش در

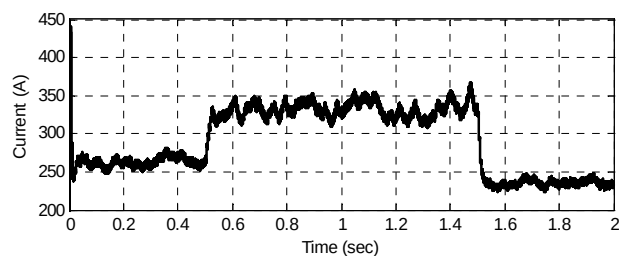
فضای خطا رسم شده است تا پایداری سیستم کنترل با حرکت $S(t)$ به سمت سطح و ماندن در محدوده مبداء نشان داده شود. اگر دقت شود شباهت های زیادی در نتایج شبیه سازی بین روش های خطی سازی فیدبکی به همراه کنترل مود لغزش بر روی مدل شماره یک و اعمال کنترل مود لغزش به صورت مستقیم بر روی مدل شماره یک در نحوه تغییر ولتاژ و جریان و همچنین حرکت $S(t)$ مشاهده می شود. اگرچه که تفاوت هایی در اندازه ولتاژ ترمینال دیده می شود. به اینصورت که حداکثر ولتاژ ترمینال در شکل ۶-۱۲-الف تقریباً ۸۰ ولت است. در حالی که در روش خطی سازی فیدبکی به همراه کنترل مود لغزش به ۱۰۰ ولت می رسد. در حقیقت کنترل به روش مود لغزشی در بخش ۵-۵- از یک خطی سازی تشکیل شده است که ورودی کنترل معادل (۵-۷۴) این عمل را انجام می دهد. این موضوع در [۱۳] نیز اشاره شده است. بنابراین این شباهت در نتایج شبیه سازی دور از انتظار نیست. به همین دلیل از شبیه سازی کنترل کننده طول قوس به شیوه مود لغزش بر روی مدل شماره دو صرف نظر می شود.



شکل ۶-۱۱- طول قوس، (الف) نمای معمولی، (ب) نمای بزرگ شده

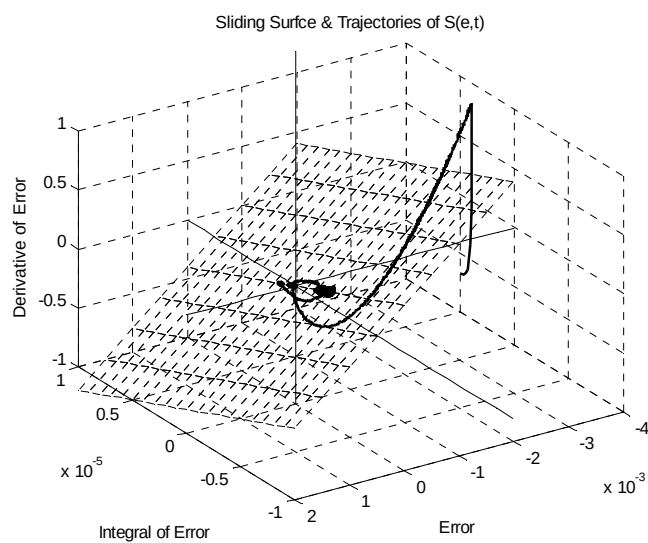


(الف)



(ب)

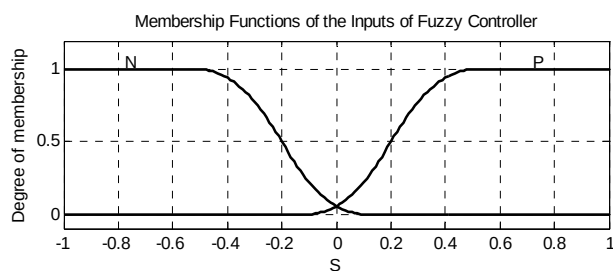
شکل ۶-۱۲- (الف) ولتاژ ترمینال، (ب) جریان جوشکاری

شکل ۶-۱۳- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ به سمت سطح لغزش و ماندن در همسایگی آن در محدوده

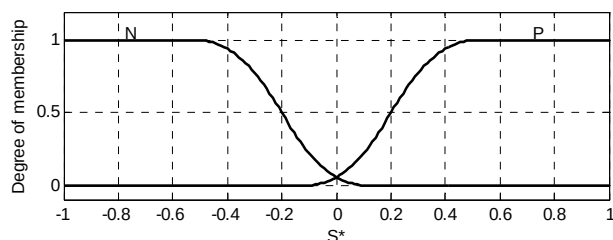
لایه مرزی در کنترل کننده مد لغزشی بر روی مدل مدل دینامیکی شماره یک

۳-۶- کنترل فازی- مود لغزشی

در این بخش برای بهبود عملکرد کنترل کننده مود لغزشی بر روی مدل شماره یک از یک کنترل کننده فازی برای تخمین بهره سوئیچینگ استفاده شده است. امتیاز استفاده از کنترل کننده فازی سادگی در پیاده سازی و همچنین بهینه کردن اندازه سیگنال کنترلی با تنظیم بهره سوئیچینگ می باشد. چرا که در حالت قبل اندازه $k(x)$ بنا به شرط لغزش همواره باید بزرگتر از یک مقدار خاصی برای پایداری سیستم حلقه بسته باشد. این در حالی است که در مواقعی که مسیرهای حالت در داخل لایه مرزی قرار دارند نیازی به بزرگ بودن $k(x)$ نیست. از آنجایی که اندازه S و $\dot{S}$ معلوم می کند که آیا مسیر های حالت به سمت سطح در حال حرکت هستند، کنترل کننده فازی قادر است با اندازه گیری این دو مناسب ترین مقدار $k(x)$ را برای نگه داشتن مسیرها در داخل لایه مرزی تعیین کند. بنابراین کنترل کننده فازی همانطور که در بخش ۵-۶- بیان شد، با دو ورودی و یک خروجی طراحی و شبیه سازی می شود. در شکل ۶-۱۴- توابع تعلق ورودی ها و در شکل ۶-۱۵- توابع تعلق خروجی کنترل کننده فازی نمایش داده شده است. تعداد گروه های فازی برای ورودی ها دو عدد و برای خروجی نیز دو عدد می باشد و پایگاه قوانین فازی که در جدول ۵-۱- آورده شده است با توجه به درک پایه ای از تئوری مود لغزش و حرکت مسیرها به سمت سطح لغزش می باشد. در شکل ۶-۱۶- سطح سه بعدی مربوط به کنترل کننده فازی که رابطه بین ورودی ها، خروجی و قوانین فازی است را نشان می دهد.

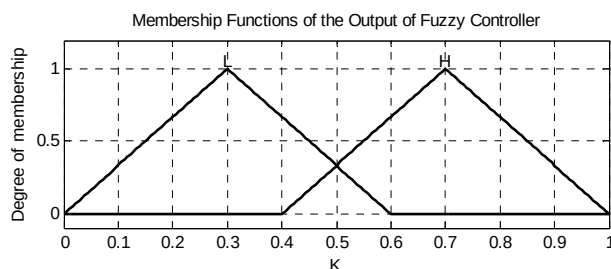


(الف)



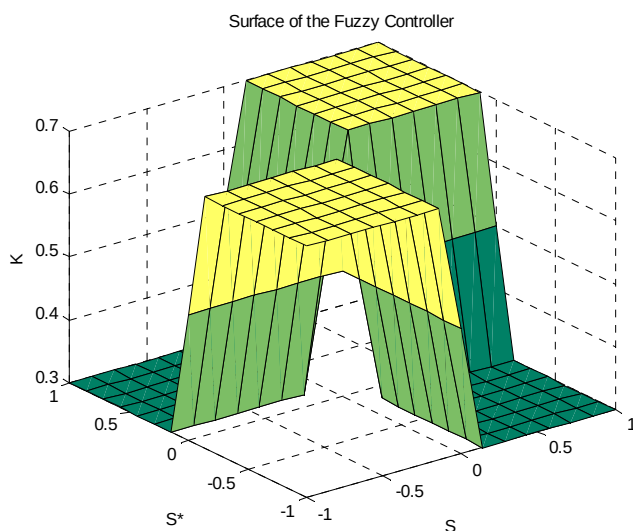
(ب)

شکل ۶-۱۴- توابع تعلق ورودی های کنترل کننده فازی، (الف) توابع تعلق S ، (ب) توابع تعلق $\dot{S}$



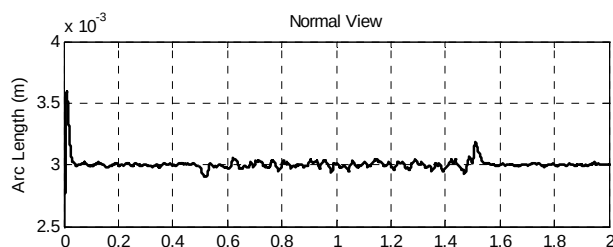
شکل ۶-۱۵- توابع تعلق مربوط به خروجی کنترل کننده فازی

در پیاده سازی کنترل کننده فازی با توجه به این که محدوده خروجی بین ۱ و ۱- است از روش مقیاس بندی استفاده شده است. این بدان معناست که در خروجی از یک بهره مقیاس استفاده شده است تا با تنظیم آن مقدار بهینه $k(x)$ برای برقرار شرط لغزشی بدست آید. اندازه این بهره در شبیه سازی برابر $K_0 = 30$ در نظر گرفته شده است. شکل های ۶-۱۷ تا ۶-۱۹- نتایج شبیه سازی اعمال کنترل کننده طول قوس به شیوه ترکیبی فازی- مود لغزش را نشان می دهند. همانطور که در شکل ۶-۱۷- دیده می شود کنترل کننده طول قوس پیشنهادی قادر به ثابت نگه داشتن طول قوس در همان محدوده ۵٪ نسبت به مقدار مطلوب طول قوس در ۳ میلی متر شده است. در این شبیه سازی نیز از لایه مرزی استفاده شده است و پارامترهای مربوط به ضخامت لایه مرزی و شیب سطح بنا به (۶-۷) و $\eta = 1$ فرض شده اند. در شکل ۶-۱۸- ولتاژ ترمینال و جریان جوشکاری نمایش داده شده است.

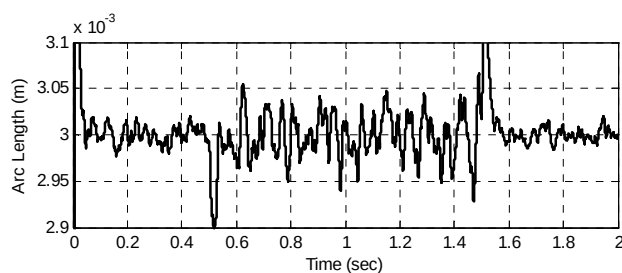


شکل ۶-۱۶- سطح مربوط به قوانین کنترل فازی و رابطه آن با ورودی ها و خروجی های کنترل کننده

همانطور که انتظار می رفت اندازه سیگنال کنترلی ولتاژ ترمینال نسبت به دو شبیه سازی قبلی بر روی مدل شماره یک کمتر است و به حدود ۵۰ ولت رسیده است. این به علت تخمین بهینه اندازه بهره سوئیچینگ است که فقط در مواقعی که خطا زیاد می شود و مسیر ها از داخل لایه مرزی خارج می شوند باید بیشترین مقدار $k(x)$ به قانون کنترل اضافه شود.

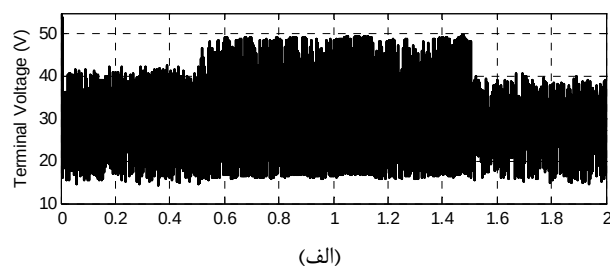


(الف)

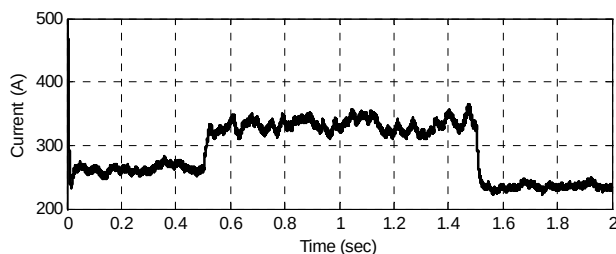


(ب)

شکل ۶-۱۷- طول قوس، (الف) نمای معمولی، (ب) نمای بزرگ شده

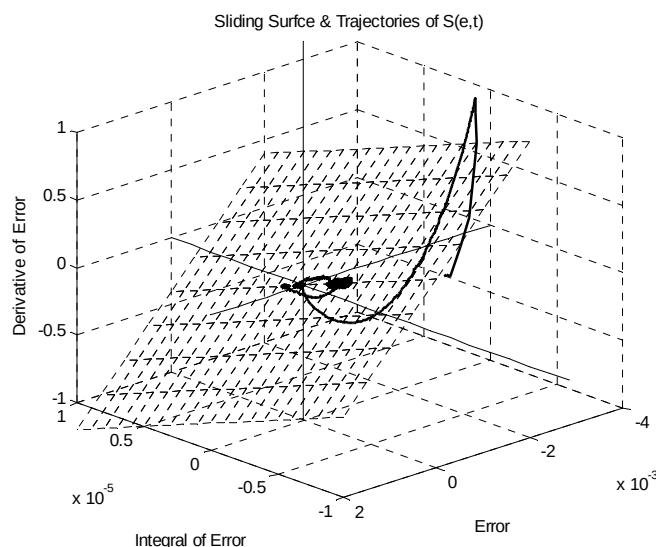


(الف)



(ب)

شکل ۶-۱۸- (الف) ولتاژ ترمینال، (ب) جریان جوشکاری



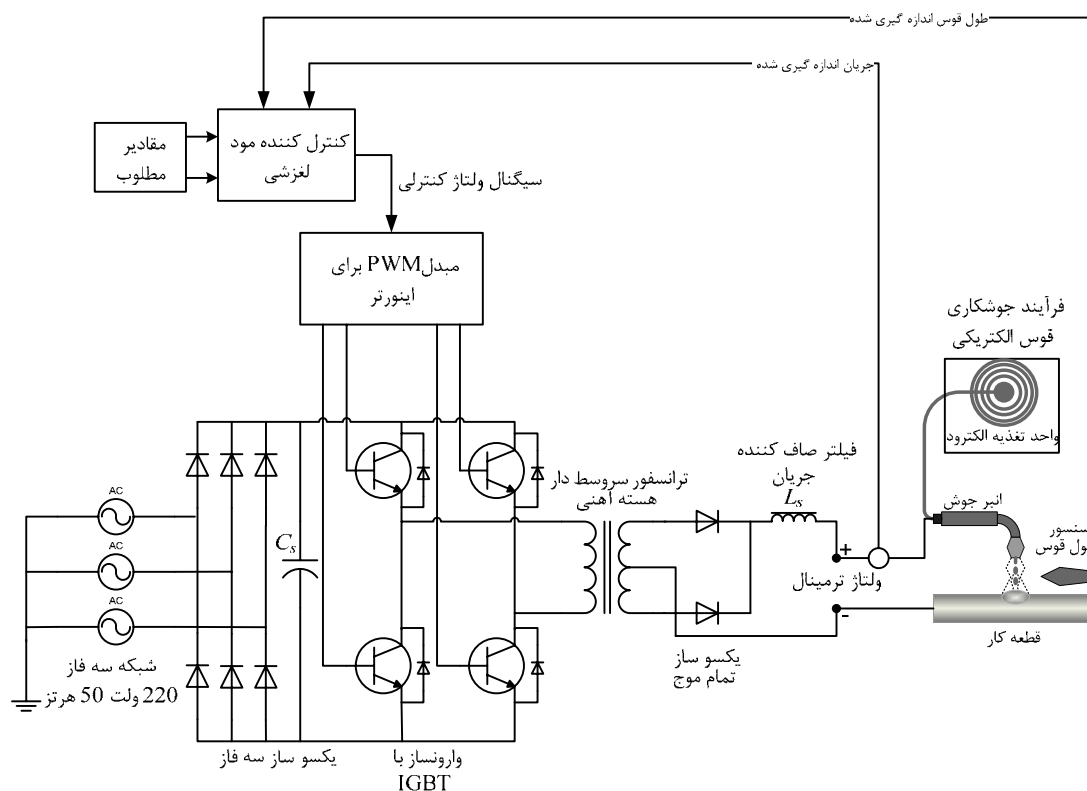
شکل ۶-۱۹- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ به سمت سطح لغزش و ماندن در همسایگی آن در محدوده لایه مرزی در کنترل کننده ترکیبی فازی-مد لغزشی بر روی مدل دینامیکی شماره یک

اندازه جریان هم مانند شبیه سازی های قبلی بر مبنای ثابت نگه داشتن طول قوس با تغییر ولتاژ تغییر می کند و اندازه آن هم در محدوده حالت انتقال اسپری می باشد. باید به این نکته توجه کرد که استفاده از فقط ۴ قانون در پایگاه قوانین فازی و مقاوم عمل کردن سیستم کنترل طول قوس نشان از قدرت کنترل کننده فازی در تخمین بهینه بهره سوئیچینگ دارد. این امر به عنوان یک مزیت بزرگ در پیاده سازی سیستم کنترل در صنعت می باشد، چرا که در اکثر کارهای مربوط، استفاده از کنترل کننده های ترکیبی فازی-مود لغزش بر روی اکثر فرآیند ها مانند ربات ها با تعداد قوانین بسیار همراه است که خود نیاز به پردازنده های سرعت بالا دارد. در شکل ۶-۱۹- مسیرهای حالت در فضای خطای سیستم به همراه سطح لغزش رسم شده است. همگرایی $S(t)$ به سمت سطح و ماندن در نزدیکی مبدا نشان از پایداری سیستم و برقرار شرط لغزش در سیستم دارد.

۴-۶- کنترل مود لغزشی با حضور منبع توان

در شکل ۶-۲۰- طرح کلی یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با حضور دینامیک منبع توان نمایش داده شده است. طرح مداری منبع توان مورد استفاده در فرآیند جوشکاری در مراجع زیادی از جمله در [۴۴]، [۴۵] و [۳۶] آورده شده است. در این جا از پارامترهای به کار برده شده در [۳۶] برای شبیه سازی منبع توان استفاده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، در طی فرآیند جوشکاری جریان جوشکاری و طول قوس الکتریکی، اندازه گیری می شود و به کنترل کننده برای مقایسه با مقادیر مطلوب می رود. در صورت عدم وجود کنترل داخلی جریان برای منبع توان سیگنال کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده که همان فرمان ولتاژ ترمینال می باشد، به

یک مبدل پهنای پالس داده می شود. این مبدل سیگنال های کنترلی سوئیچینگ فرکانس بالایی را برای IGBT^۱ ها^۱ که به صورت پل به هم متصل شده اند ارسال می کند. این ترکیب که همان اینورتر است، ولتاژ یکسو شده ورودی را به یک ولتاژ متناوب با فرکانس بالا تبدیل می کند. فرکانس سوئیچینگ اینورتر در شبیه سازی ۲۵ کیلوهرتز در نظر گرفته می شود. ولتاژ ورودی اینورتر از یک یکسوساز سه فاز تأمین می شود که از شبکه سه فاز برق متناوب شهری با مقدار مؤثر ۲۲۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز، ولتاژ یکسو شده را تولید می کند. در این حالت دامنه ولتاژ یکسو شده در حالت بی باری به اندازه ولتاژ خط شبکه سه فاز می رسد که مقداری برابر ۵۳۹ ولت دارد. در حالت اتصال به بار به طور متوسط این ولتاژ به علت افت ولتاژ ناشی از برقراری جریان الکتریکی در مدار به حدود ۵۰۰ ولت می رسد. ولتاژ متناوب تولیدی توسط اینورتر به یک ترانسفورمر کاهنده ولتاژ با ضریب کاهش پنج اعمال می شود.

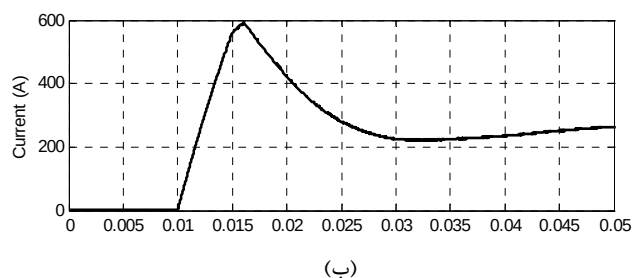
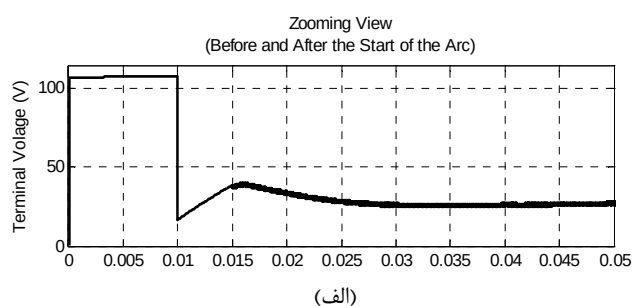


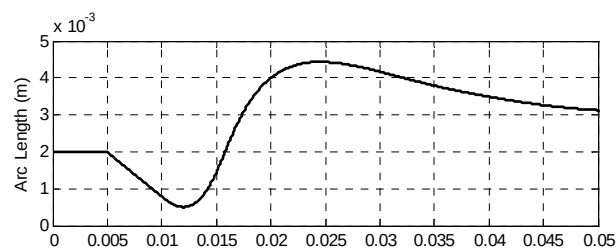
شکل ۴-۶-۲۰- فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه مدار منبع توان بر مبنای اینورتر و کنترل کننده طول قوس مود لغزشی

¹ Isolated Gate Bipolar Transistor: IGBT

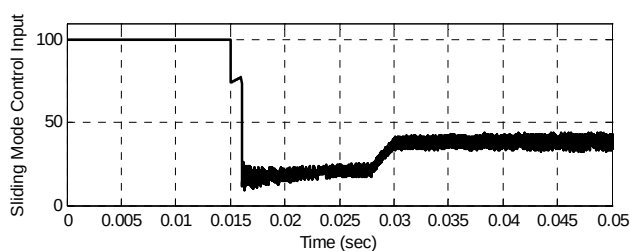
در ادامه این ولتاژ متناوب به یک یکسوساز تمام موج اعمال شده تا یک ولتاژ یکسو شده با دامنه متغیر ایجاد شود. در انتهای مدار از یک سلف هسته آهنی استفاده شده است که نقش صاف کردن جریان خروجی را دارد که سلف L_m در شکل ۳-۱ را نیز شامل می شود. در صورت استفاده تا ۱۰۰٪ دوره وظیفه مبدل پهنای پالس، منبع توان بر مبنای اینورتر قادر به تولید ولتاژهای یکسو شده بین صفر تا ۱۰۰ ولت خواهد بود. توان نامی ترانسفورمر باید تا حدی باشد که بتواند جریان های بالا تا حداکثر ۱۰۰۰ آمپر را مهیا کند و همچنین در اتصال کوتاه هایی که ممکن است رخ بدهد با رفتن به اشباع از ۱۰۰۰ آمپر بیشتر جریان وارد سیستم جوشکاری نشود. بنابراین ترانسفورمر انتخابی باید توان خروجی بالای ۱۰۰ کیلو ولت آمپر داشته باشد. از طرفی به علت فرکانس بالا بودن ولتاژ ورودی باید نوع ترانسفورمر انتخاب شده از نوع فرکانس بالا باشد تا قادر به عبور دادن این ولتاژ فرکانس بالا باشد. بنابراین ترانسفورمر با توان خروجی ۱۲۰ کیلو ولت آمپر با فرکانس کاری ۵۰ کیلوهرتز در نظر گرفته می شود. بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که منبع توان سیگنال های کنترلی مود لغزشی فرکانس بالا را می تواند تحمل کند.

شکل های ۶-۲۱ تا ۶-۲۵ نتایج شبیه سازی شیوه کنترل مود لغزشی بر روی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی با حضور منبع توان مطابق شکل ۶-۲۰ را نمایش می دهد. کنترل کننده استفاده شده بر مبنای کنترل کننده مود لغزشی طراحی شده برای مدل شماره یک می باشد که در بخش ۶-۲ نتایج شبیه سازی آن ارائه شد. در بخش ۶-۲- دینامیک منبع توان در نظر گرفته نشده است. در این شبیه سازی سعی شده است تا حتی الامکان شرایط یک جوشکاری واقعی در عمل شبیه سازی شود. بنابراین روند شبیه سازی بر مبنای فلوچارت ارائه شده در [۳۶] خواهد بود. در شکل ۶-۲۱ وضعیت پارامترهای فرآیند جوشکاری قبل و بعد از لحظه شروع قوس الکتریکی نمایش داده شده است.





(ج)

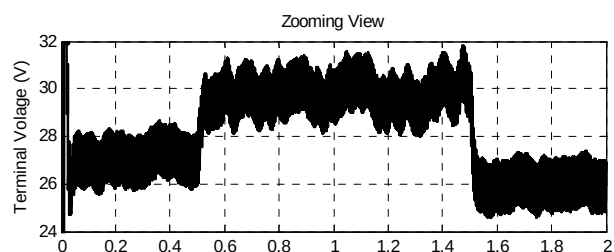


(د)

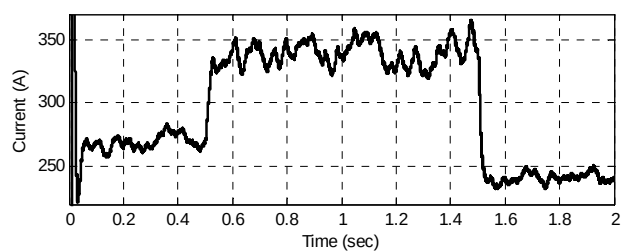
شکل ۴-۶-۲۱- پارامترهای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی قبل و بعد از شروع جوشکاری، (الف) ولتاژ ترمینال،

(ب) جریان جوشکاری، (ج) طول قوس، (د) سیگنال کنترلی مود لغزشی

بر همین اساس در ابتدا سوئیچ ماشین جوشکاری زده می شود تا ولتاژ ترمینال مدار باز در شکل ۴-۶-۲۱- (الف) به مقدار نامی خود بعد از یک تاخیر بسیار کوتاه برسد. بعد از مدت کوتاهی موتور تغذیه کننده الکتروود در زمان $t = 0.05$ روشن شده و حرکت الکتروود به سمت قطعه کار از یک فاصله اولیه ۲ میلی متری آغاز می شود. کاهش طول قوس ناشی از حرکت الکتروود در شکل ۴-۶-۲۱- (ج) مشاهده می شود.



(الف)

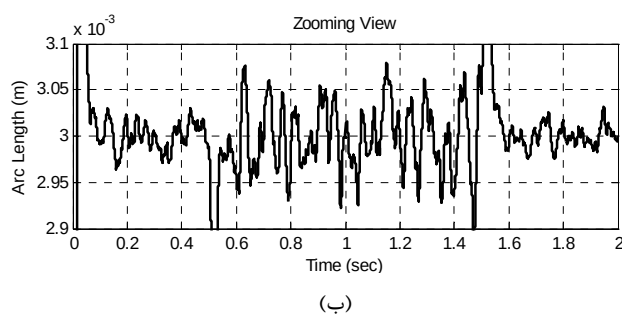
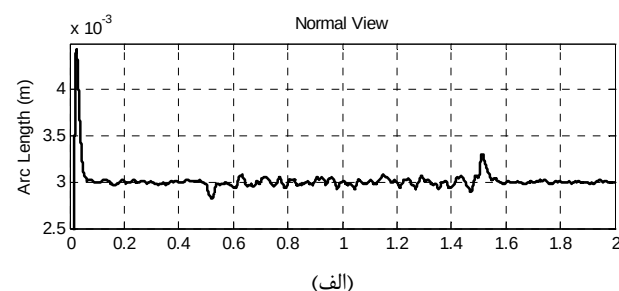


(ب)

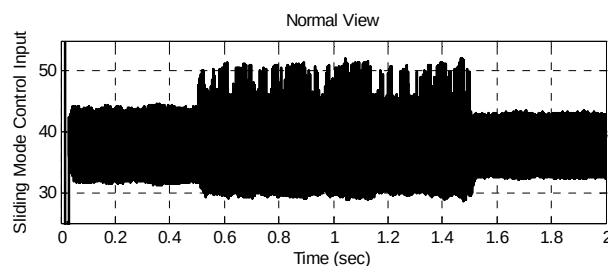
شکل ۴-۶-۲۲- (الف) ولتاژ ترمینال، (ب) جریان جوشکاری

سپس قبل از رسیدن الکتروود به قطعه کار قوس روشن شده و جوشکاری در زمان $t = 0.01$ آغاز می شود. تا قبل از روشن شدن قوس، جریان الکتریکی باید در مدار صفر باشد. در ابتدای روشن شدن قوس، تغییرات شدیدی در ولتاژ ترمینال و جریان کشیده شده از منبع مشاهده می شود که ناشی از یک وضعیت شبه اتصال کوتاه در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی است، این موضوع به ترتیب در شکل های ۲۱-۶ (الف) و ۲۱-۶ (ب) دیده می شود. عملیات کنترل طول قوس بعد از پایدار شدن قوس و تثبیت ولتاژ ترمینال و جریان جوشکاری در زمان $t = 0.015$ انجام می شود. تا قبل از آغاز کار کنترل کننده سیگنال کنترلی اعمالی به مبدل پهنای پالس در شکل ۲۱-۶ (د) بر روی حداکثر دوره وظیفه تنظیم می شود. به خاطر جریان شدید در شروع قوس الکتروود سرعت ذوب الکتروود افزایش می یابد که باعث یک فراجش در طول قوس می شود. در حین این افزایش طول قوس کنترل کننده وارد مدار شده و با ارسال سیگنال کنترلی مود لغزشی به منبع توان ولتاژ ترمینال را تنظیم می کند. در نتیجه این تنظیم جریان جوشکاری به گونه ای کاهش پیدا می کند تا طول قوس بر روی مقدار مطلوب خود قرار گیرد.

همانطور که در شکل ۲۳-۶ (الف) دیده می شود در حین جوشکاری با وجود تمام عدم قطعیت ها به خصوص لرزش دست جوشکار طول قوس در محدوده مقدار مطلوب با محدوده خطای زیر ۱۰٪ در شکل ۲۳-۶ (ب) ثابت نگه داشته شده است. با توجه به انتخاب ضخامت لایه مرزی و شیب سطح به صورت (۶-۷) چنین نتیجه ای در یک شبیه سازی نزدیک به شرایط واقعی جوشکاری چشمگیر است. چراکه کنترل کننده های طراحی شده در محیط های شبیه سازی معمولاً به خاطر در نظر نگرفتن شرایط عملی، جواب های ایده آل را در عمل بدست نمی دهند.

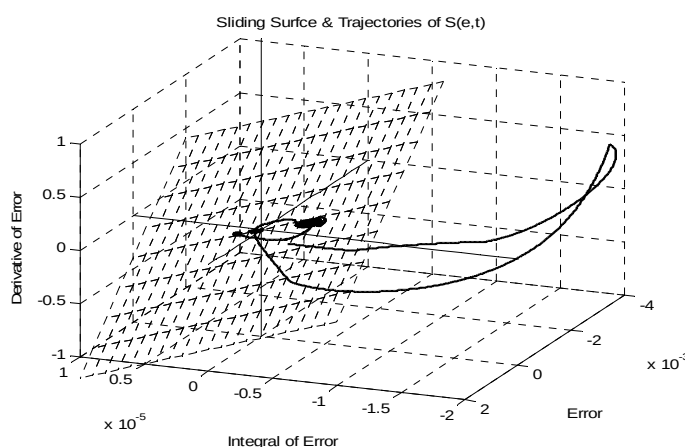


شکل ۲۳-۶- طول قوس، (الف) نمای معمولی، (ب) نمای بزرگ شده



شکل ۴-۶-۲۴- سیگنال کنترلی مود لغزشی

ولتاژ و جریان جوشکاری در شکل ۴-۶-۲۲- نیز در حد مناسبی قرار داشته و مقدار جریان با حالت انتقال اسپری مطابق است. از طرفی میزان فرکانس سیگنال کنترلی مود لغزشی در شکل ۴-۶-۲۴- نمایش داده شده است. باید توجه کرد که ممکن است اندازه سیگنال کنترلی مود لغزشی در مواقعی بیش از ۱۰۰ ولت بشود که در محدوده کاری منبع توان نبوده و ایجاد مشکل می کند. به همین دلیل برای پیشگیری یک محدود کننده ۱۰۰ ولت در خروجی کنترل کننده مود لغزشی قرار داده شده است تا در بدترین شرایط سیگنال فرمان بیش از ۱۰۰ ولت به مدار اینورتر داده نشود. با توجه به شکل های ۴-۶-۲۲- (الف) و ۴-۶-۲۴- تفاوت قابل توجه ای در سیگنال کنترلی اعمالی به منبع توان و ولتاژ ترمینال خروجی منبع مشاهده می شود. این موضوع حکایت از خطای زیاد در منبع توان می باشد. اما با توجه به کنترل مناسب طول قوس این مسئله روشن می شود که کنترل کننده مود لغزشی حتی با توجه به خطای موجود در کار منبع توان توانسته است علاوه بر غلبه بر عدم قطعیت های منبع توان عملکرد بسیار عالی در کنترل طول قوس از خود نشان دهد که مشابه آن تا اکنون در مرجعی ذکر نشده است و این کار در نوع خود می تواند بسیار ارزشمند باشد. از طرفی نتایج کار این مسئله را نشان می دهد که نیازی به استفاده از کنترل کننده داخلی برای منبع توان نیست و کنترل کننده مود لغزشی طراحی شده به تنهایی قادر به کنترل کل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی و ثابت نگه داشتن طول قوس و نهایتاً تضمین کیفیت جوش می باشد.



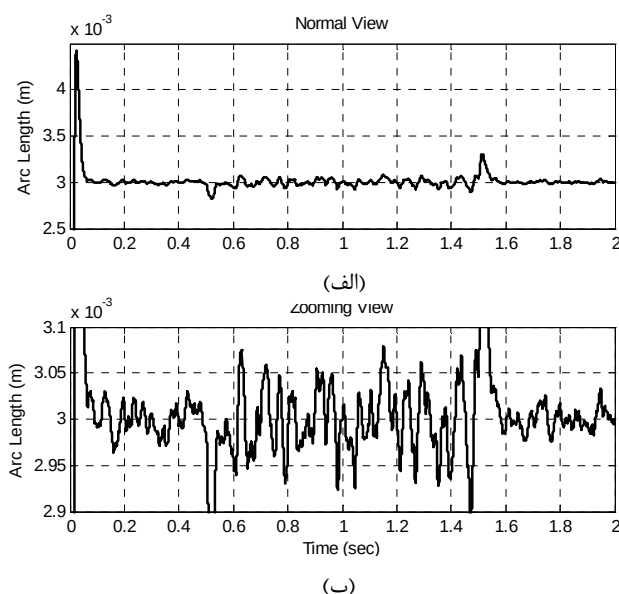
شکل ۴-۶-۲۵- نمایش حرکت مسیرهای حالت $S(t)$ به سمت سطح لغزش و ماندن در همسایگی آن در محدوده لایه مرزی در کنترل مود لغزشی بر روی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با حضور دینامیک منبع توان

شکل ۶-۲۵- نیز مسیرهای حالت را در فضای خطا نشان می دهد که پایداری سیستم کنترل با توجه به حرکت مسیر ها به سطح و ماندن در نزدیکی آن نشان می دهد.

۵-۶- کنترل فازی- مود لغزشی با حضور منبع توان

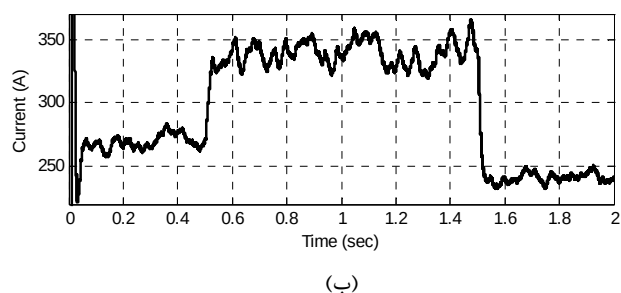
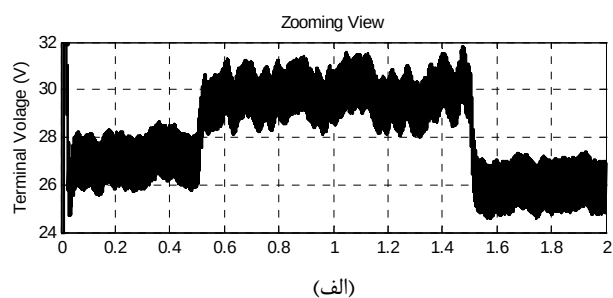
در این شبیه سازی از کنترل کنند ترکیبی فازی- مود لغزشی که در بخش ۶-۳- بر روی مدل شماره یک پیاده سازی و شبیه سازی شد بر روی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی با حضور دینامیک منبع توان استفاده شده است. شکل های ۶-۲۶- تا ۶-۲۸- نتایج شبیه سازی را نشان می دهند. همانطور که انتظار می رفت کنترل کننده قادر به کنترل مناسب طول قوس بر روی محدوده خطای زیر ۱۰٪ در شکل ۶-۲۶- (ب) می باشد. در شکل ۶-۲۷- ولتاژ ترمینال و جریان جوشکاری نمایش داده شده اند که در حد مناسبی بوده و جریان جوشکاری هم در محدوده حالت انتقال اسپری می باشد.

سیگنال کنترلی فازی- مود لغزشی در شکل ۶-۲۸- نمایش داده شده است. همانطور که پیداست این سیگنال کنترلی گرچه نسبت به سیگنال کنترلی مود لغزشی در بخش قبل اندازه متوسط بزرگتری دارد اما دامنه نوسانات آن در طول مدت جوشکاری با وجود لرزش دست جوشکار و تغییر ناگهانی آن در دو زمان مختلف در شکل ۶-۱- کمتر است و متوسط سیگنال تقریباً بدون تغییر و در حدود ۵۰ است. در هر حال می توان گفت که استفاده از یک کنترل کننده فازی بسیار ساده با فقط ۴ قانون توانسته در کنار کنترل کننده مود لغزشی در شرایط کاری عملی در یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی عملکرد بالایی از خود نشان دهد.

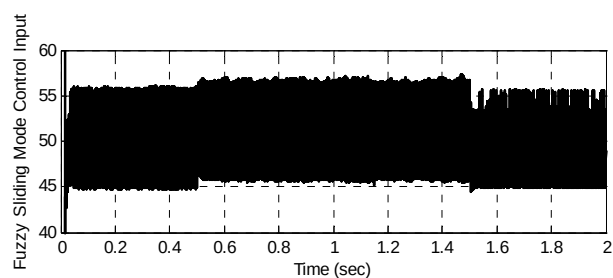


شکل ۶-۲۶- طول قوس، (الف) نمای معمولی، (ب) نمای بزرگ شده

این مزیت بسیار بزرگی در زمینه طراحی کنترل کننده طول قوس به شمار می آید. در حالی که کنترل کننده پیشنهادی بر عدم قعطیت های منبع توان هم مقابله می کند که این موضوع در تفاوت اندازه ولتاژ ترمینال و سیگنال کنترلی در شکل های ۲۷-۶- (الف) و ۲۸-۶- دیده می شود. همچنین در این شبیه سازی $K_o = 30$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۷-۶- (الف) ولتاژ ترمینال، (ب) جریان جوشکاری



شکل ۲۸-۶- سیگنال کنترلی فازی- مود لغزشی

فصل هفتم

۷- نتیجه گیری

در این پایان نامه با در نظر گرفتن فرآیند جوشکاری دستی، کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ برای رسیدن به کیفیت مناسب جوش بر مبنای شیوه کنترل مود لغزشی مطرح شد. در ابتدا با معرفی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ و این نکته که این نوع از جوشکاری به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع به حساب می آید، لزوم کنترل فرآیند جوشکاری دستی در حضور عدم قطعیت ها مطرح شد. در این راستا با بیان حلقه های کنترل داخلی و خارجی در کنترل کلی یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی مشخص شد که در جوشکاری قوس الکتریکی دستی عملاً کنترل جریان و طول قوس باید مد نظر قرار گیرد. دانستن مدل دینامیکی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی برای طراحی کنترل کننده از ملزومات می باشد.

مدل دینامیکی حاکم بر رفتار فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در فصل سوم همراه با جزئیات ارائه شد. بر این اساس با فرض ثابت بودن سرعت تغذیه سیم الکترو، دو نوع مدل دینامیکی ساده تک ورودی- تک خروجی برای طراحی کنترل کننده معرفی شد. در مدل شماره یک سیستم جوشکاری قوس الکتریکی بدون حضور کنترل داخلی منبع توان در نظر گرفته شد و در مدل شماره دو با فرض کنترل داخلی جریان مدل ساده تری ارائه شد. در ادامه در فصل چهارم با بررسی چگونگی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر روی کیفیت جوش و میزان درجه آزادی در کنترل فرآیند، ثابت نگه داشتن طول قوس در یک مقدار پایین به عنوان مهمترین عامل در رسیدن به کیفیت جوش خوب مطرح شد. در ادامه پیکربندی های کنترلی برای کنترل طول قوس در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی ارائه شدند.

معرفی شیوه کنترل خطی سازی فیدبکی و رهیافت استفاده از آن در کنترل طول قوس در فصل پنجم مطرح شد. با بررسی عدم قطعیت ها در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به خصوص مهمترین اغتشاش که همانا لرزش دست جوشکار است، ضعف استفاده از کنترل کننده طول قوس بر مبنای خطی سازی فیدبکی مشخص شد. در ادامه با معرفی مختصر تئوری کنترل مود لغزشی به عنوان یکی از شیوه های کنترل مقاوم، کنترل کننده بر مبنای خطی سازی فیدبکی اصلاح شد که به عنوان کاربرد جدیدی از تئوری مود لغزشی مطرح گردید. از طرفی از این دستاورد کنترلی برای طراحی کنترل کننده طول قوس به صورت مقاوم در برابر تمام عدم قطعیت ها بر روی فرآیند

جوشکاری قوس الکتریکی استفاده شد. در انتهای فصل پنجم با اشاره به استفاده از تئوری فازی در شیوه مود لغزشی، طرح جدید کنترل کننده ترکیبی فازی- مود لغزشی برای بهبود عملکرد کنترل کننده مود لغزشی در تخمین بهره سوئیچینگ با تعداد قوانین کم ارائه شد. نتایج شبیه سازی کنترل کننده های طراحی شده در فصل ششم ارائه شد. در این فصل برای اولین بار با شبیه سازی منبع توان به عنوان محرک در سیستم جوشکاری قوس الکتریکی و در نظر گرفتن شرایط نسبتاً علمی در روند شبیه سازی، نشان داده شد که کنترل کننده پیشنهادی مود لغزشی و فازی- مود لغزشی قادر به کنترل طول قوس با عملکرد بسیار بالا می باشند که در نوع خود کاری جدید به حساب می آید.

در انتها می توان اشاره کرد که این پایان نامه مدل سازی، کنترل و شبیه سازی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز به عنوان مرحله آغازین طراحی به منظور ساخت سیستم را پشت سر گذاشته است و اگر از حمایت مالی برخوردار شود گامی به سوی بومی سازی صنعت جوشکاری بر خواهد داشت.

پیوست - الف

گازهای محافظ

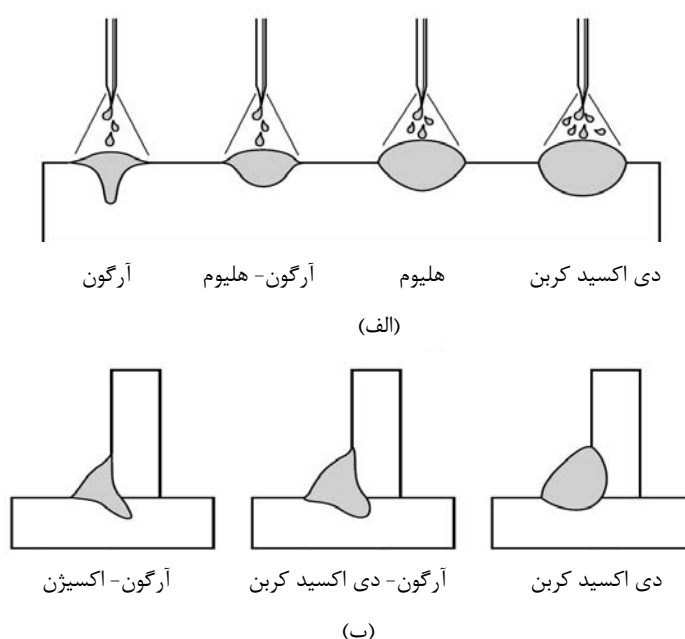
در این پیوست از مطالب بیان شده در [۴۷]، [۴۸] و [۵۰] استفاده می شود. گازهای محافظ در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی برای محافظت ناحیه جوشکاری از گازهای هوای اطراف از قبیل اکسیژن و نیتروژن که باعث ایجاد نقصهای جوش، تخلخل و شکنندگی جوش می شوند، ضروری هستند چراکه اگر آنها در تماس با الکتروود، قوس و یا فلز جوش قرار بگیرند، قادر به ایجاد نقایص گفته شده می باشند. این مشکل در تمام فرآیندهای جوشکاری امری عادی است اما در بسیاری از روش های جوشکاری از مواد ذوب کننده یا گدازآور به جای یک گاز محافظ استفاده می کنند که در اثر حرارت جوشکاری، به گازهای محافظ تجزیه می شوند. در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی هرچند الکتروود دارای روکش ذوب کننده نیست اما از یک گاز محافظ برای حفاظت جوش بهره می برد. این کار باعث حذف سرباره می شود. سرباره در حقیقت باقیمانده مواد ذوب کننده است که بعد از جوشکاری ایجاد می شوند و باید از سطح جوش برای اشکار شدن خود جوش پاک شوند.

انتخاب گاز محافظ به چندین فاکتور بستگی دارد که مهمترین آن فلزی است که باید جوش داده شود . حالت انتقال فلز به کار رفته در فرآیند یکی دیگر از فاکتور های انتخاب گاز محافظ است. گازهای خنثی خالص مانند آرگون و هلیوم فقط برای جوشکاری فلزات غیر آهنی به کار برده می شوند. استفاده از هلیوم در جوشکاری فولاد باعث ایجاد یک قوس نامنظم می شود و شدت ترشحات جوش را افزایش می هد. همچنین استفاده از آرگون در جوشکاری فولاد نفوذ کافی جوش را فراهم نمی کند.

از طرف دیگر دی اکسید کربن خالص که به عنوان گاز فعال شناخته می شود، در جوشکاری فولاد جوشهای با نفوذ بالا را ایجاد می کند اما شکل گیری اکسید را تقویت می کند که به طور زیان آوری بر خواص مکانیک جوش اثر می گذارد. قیمت پایین این گاز است که آنرا به عنوان یک انتخاب جذاب معرفی می کند، اما به خاطر سختی قوس ترشحات اجتناب ناپذیر است و جوشکاری فلزات نازک مشکل می شود. در نتیجه آرگون و دی اکسید کربن

معمولا به نسبت ۷۵٪ به ۲۵٪ یا ۸۰٪ به ۲۰٪ با هم مخلوط می شوند که باعث کاهش ترشحات می شود و جوشکاری فولاد های نازک را ممکن می سازد.

آرگون با دیگر گازها نیز مخلوط می شود از قبیل اکسیژن، هلیوم، هیدروژن، و نیتروژن. مقدار بیش از ۵٪ اکسیژن در ترکیب با آرگون حالت انتقال اسپری را تقویت می کند که این مقدار برای جوشکاری حالت اسپری و اسپری پالسی مهم است. در هر حال مقدار بیشتری اکسیژن باعث می شود گاز محافظ الکتروود را اکسید کند که می تواند منجر به تخلخل در جوش ته نشین شده بشود اگر الکتروود به مقدار کافی مواد اکسیژن زدا نداشته باشد.



شکل الف-۱، (الف) شکل دانه جوش و الگوی نفوذ جوش در استفاده از گازهای محافظ گوناگون، (ب) مقایسه تأثیر

افزودن اکسیژن و دی اکسید کربن به گاز آرگون در شکل جوش [۵۳]

مخلوط آرگون با هلیوم کاملا خنثی است و برای فلزات غیر آهنی به کار می رود. غلظت ۵۰٪ تا ۷۰٪ هلیوم باعث بالا رفتن ولتاژ و افزایش گرما در قوس می شود که برای جوشکاری فلزات ضخیم مفید است. همچنین درصد بالاتری از هلیوم باعث بهبود کیفیت جوش و سرعت استفاده از جریان متناوب در جوشکاری آلومینیم می شود.

هیدروژن نیز برای جوشکاری نیکل و فولاد ضدزنگ ضخیم تا تقریبا ۵٪ با آرگون مخلوط می شود. در غلظت های بالای هیدروژن تا حدود ۲۵٪ برای جوشکاری فلزات رسانا از قبیل مس مناسب است. به هر حال نباید از هیدروژن برای جوشکاری فولاد، آلومینیم و منیزیم استفاده کرد چرا که ریسک تخلخل در اثر هیدروژن وجود دارد. بعلاوه بعضی اوقات برای جوشکاری مس نیتروژن را در غلظت های ۲۵٪ تا ۵۰٪ به آرگون اضافه می کنند اما استفاده

از نیتروژن به خصوص در آمریکای شمالی محدود است. مخلوطهای دی اکسید کربن و اکسیژن با آرگون هم به ندرت در آمریکای شمالی به کار می رود برعکس در اروپا و ژاپن بیشتر معمول است.

پیشرفت های اخیر در مخلوط های گازهای محافظ نشان داده است که استفاده از مخلوط ۳ یا تعداد بیشتری گاز باعث بهبود کیفیت جوش می شود. مخلوط ۷۰٪ آرگون، ۲۸٪ دی اکسید کربن و ۲٪ اکسیژن برای جوشکاری فولاد بسیار خوب جواب داده است، درحالی که در دیگر مخلوط ها با اضافه کردن مقدار کمی هلیوم به ترکیب آرگون - اکسیژن باعث بالا بردن ولتاژ قوس و سرعت جوش می شود. هلیوم نیز بعضی مواقع به عنوان گاز پایه مخلوط استفاده می شود که مقدار کمی از آرگون و دی اکسید کربن به آن اضافه می شود. بعلاوه، دیگر مخلوطهای ویژه و اغلب اختصاصی ادعا می کنند که می توانند حتی برای کاربرد های خاص مزایای بیشتری هم ایجاد کنند.

میزان جریان گاز مطلوب اصولاً وابسته به هندسه جوش، جریان جوشکاری، نوع گاز، و حالت انتقال فلز استفاده شده می باشد. جوشکاری سطوح تخت نیاز به جریان گاز بیشتری نسبت به جوشکاری مواد شیار دار دارد چراکه گاز روی چنین سطوحی بسیار سریعتر پراکنده می شود. در جوشکاری های با سرعت بالا نیز جریان گاز بیشتری باید به کار برده شود تا پوشش کافی را فراهم کند. بعلاوه جریان جوشکاری بالاتر نیاز به جریان گاز بیشتری دارد و معمولاً هلیوم بیشتری برای فراهم کردن پوشش کافی نسبت به آرگون نیاز است. چهار حالت اصلی انتقال فلز در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی هر کدام نیاز به یک جریان گاز خاصی دارند، برای توضیح های جوش کوچک در حالت های اتصال کوتاه و اسپری پالسی تقریباً ۱۰ لیتر بر دقیقه مناسب است، درحالیکه برای حالت دانه ای حدود ۱۵ لیتر بر دقیقه معادل ۳۰ فوت مکعب بر دقیقه ترجیح داده می شود. در حالت اسپری به طور نرمال نیاز به مقدار بیشتری گاز محافظ داریم چراکه ایجاد گرمای ورودی بالاتر و بنابراین حوضچه جوش بزرگتری در حدود ۲۰ تا ۲۵ لیتر بر دقیقه معادل ۴۰ تا ۵۰ فوت مکعب بر دقیقه ایجاد می کند.

پیوست - ب

اصطلاحات و نمادها

در این پیوست لیست مربوط به متغیرها، پارامترها و ثابت های استفاده شده در زیر ارائه می شود. مقدار عددی ثابت ها با استفاده از [۱]، [۸] و [۳۶] استخراج شده اند.

مدار الکتریکی بدون در نظر گرفتن قوس

نماد	مقدار	واحد	توصیف
U_c		V	ولتاژ کنترلی
U_t		V	ولتاژ ترمینال
I		A	جریان جوشکاری
L_m	10^{-6}	H	سلف خروجی ماشین جوشکاری
L_w	15×10^{-6}	H	مقاومت کلی سیم های رابط جوشکاری
R_w	0.04	Ω	سلف کلی سیم های رابط جوشکاری
R_c	0.17	Ω	مقاومت تماسی الکتروود با لوله اتصال
R_e		Ω	مقاومت الکتروود
ρ_r	0.2821	Ω/m	مقاومت ویژه الکتروود

قوس الکتریکی

نماد	مقدار	واحد	توصیف
l_a		m	طول قوس
U_a		V	ولتاژ قوس
U_0	$15/7$	V	ثابت ولتاژ قوس
R_a	0.22	Ω	مقاومت قوس
E_a	636	V/m	فاکتور طول قوس

الکتروود

نماد	مقدار	واحد	توصیف
r_e	$5e-4$	m	شعاع الکتروود
A		V	سطح مقطع الکتروود
l_s		V	بیرون زدگی الکتروود
ρ_e	7860	kg/m ³	چگالی الکتروود

نرخ ذوب حالت دائم

نماد	مقدار	واحد	توصیف
M_R		m ³ /s	نرخ ذوب
v_m		m/s	سرعت ذوب
c_1	$2/885e-4$	m ³ /(A.s)	ثابت نرخ ذوب
c_2	$5/22e-10$	m ² /(A ² .s)	ثابت نرخ ذوب
k_1		m/(A.s)	ثابت سرعت ذوب
k_2		(A.s) ⁻¹	ثابت سرعت ذوب

قطره مذاب

نماد	مقدار	واحد	توصیف
x_d		m	جابجایی قطره مذاب
v_d		m/s	سرعت قطره مذاب
m_d		kg	جرم قطره مذاب

نیروهای عمل کننده بر قطره مذاب

نماد	مقدار	واحد	توصیف
F_{em}		N	نیروی القای الکترومغناطیسی
F_g		N	نیروی گرانشی
F_m		N	نیروی اندازه حرکت
F_d		N	نیروی کشش آیرودینامیک
F_s		N	نیروی کشش سطحی

دیگر نمادهای مربوط به قطره مذاب

نماد	مقدار	واحد	توصیف
r_d		m	شعاع قطره مذاب
k_d	۳/۵	N/m	ثابت مدل فتر قطره مذاب
b_d	$8e-4$	kg/s	ثابت مدل دمپر قطره مذاب
μ_0	$1/25664e-6$	(kg.m)/(A ² .s ²)	ضریب نوذ پذیری خلاء
γ	۲	N/m ²	ثابت کشش سطحی فلز سیال
θ		rad	ناحیه هدایت
A_d		m ²	سطح مقطعی از قطره مذاب که توسط الکتروود پوشیده نمی شود
C_d	۰/۴۴	-	ضریب کشش آیروودینامیک
v_p	۱۰	m/s	سرعت حرکت پلاسما
ρ_p	۱/۶	kg/m ³	چگالی پلاسما

نمادهای دیگر

نماد	مقدار	واحد	توصیف
τ_i	$6/66e-5$	s	ثابت زمانی تقریبی دینامیک جریان
l_c		m	فاصله لوله اتصال تا قطعه کار
v_m		m/s	سرعت تغذیه سیم الکتروود
v_c		m/s	سرعت تغییرات فاصله لوله اتصال تا قطعه کار

منابع و مراجع

- [1] K.L. Moore, D.S. Naidu, R. Yender, and J. Tyler, "Gas Metal Arc Welding Control: Part I –Modeling and Analysis–," Nonlinear Analysis, Methods and Application, vol. 30, no. 5, pp. 3101-3111, 1997.
- [2] K.L. Moore, D.S. Naidu, and M.A. Abdelrahman, "Gas Metal Arc Welding Control: Part II –Control Strategy–," Nonlinear Analysis, vol. 35, pp. 85-93, 1999.
- [3] J.S. Thomsen, "Feedback Linearization based Arc Length Control for Gas Metal Arc Welding," American Control Conference, Portland, USA, vol. 5, pp. 3568-3573, June 2005.
- [4] M.A. Abdelrahman, "Feedback Linearization Control of Current and Arc Length in GMAW Systems," Proc. of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, vol. 3, pp. 1757-1761, June 1998.
- [5] S. Ozcelik, K.L. Moore, and D.S. Naidu, "Application of MIMO Direct Adaptive Control to Gas Metal Arc Welding," Proc. of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, vol.3, pp. 1762-1766 June 1998.
- [6] M. Jalili-Kharaajoo, V. Gholampour, H. Ebrahimirad, and A.R. Asna Ashari, "Robust Nonlinear Control of Current and Arc Length in GMAW Systems," Proc. Conf. on Control Applications, vol. 2, pp. 1313-1316, 2003.
- [7] M. Golob, A. Koves, A. Puklavec, and B. Torvornik, "Modelling, Simulation and Control of the GMAW Welding Process," 15th Triennial World Congress, Int. Fed. Of Automatic Control, Barcelona, Spain, 2002.
- [8] J.S. Thomsen, "Advanced Control Methods for Optimization of Arc Welding," Ph.D. Dissertation, Department of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, 2005.
- [9] V.I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Mode," IEEE Transactions on Automatic Control, AC-22, pp. 212-222, 1977.

- [10] J.J. Slotine and S.S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surface, with application to robot manipulators," *International Journal of Control*, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983.
- [11] J.J.E. Slotine, "Sliding controller design for nonlinear system," *Int. J. Control*, vol. 40, no. 2, pp. 421-454, 1984.
- [12] M. Krothapally, J. C. Cockburn and S. Palanki, "Sliding mode control of I/O linearizable systems with uncertainty," *ISA Transactions*, vol. 37, pp. 313-322, 1998.
- [13] J.J.E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [14] H.B. Cary and S.C. Helzer, *Modern Welding Technology*, Prentice Hall, 2004.
- [15] J.F. Lancaster. *The Physics of Welding*. Pergamon Press, 1984.
- [16] D. Iordachescu and L. Quintino, "Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding," *J. Materials Processing Technology*, vol. 202, pp. 391-397, 2008.
- [17] G.E. Cook. "Decoupling of weld variables for improved automatic control," *Trends in Welding Research, Proc. 5th International Conference*, pp. 1007–1015, 1998.
- [18] R. Yender, J. Tyler, K.L. Moore and D.S. Naidu, "Modeling, calibration, and control-theoretic analysis of the gmaw process," *Nonlinear Analysis, Methods and Applications, Proc. American Control Conference (ACC)*, vol. 3, pp. 1747–1751, 1998.
- [19] S.D. Naidu, J. Tyler, S. Ozcelik and K.L. Moore, "Classical control of gas metal arc welding," *Trends in Welding Research, Proc. 5th International Conference*, pp. 1033–1038, 1998.
- [20] D.E. Henderson, P.V. Kokotovic, J.L. Schiano and D.S. Rhode, "Adaptive Control of an Arc Welding Process," *Proc. of the American Control Conference*, 1991.
- [21] P. Praveen, P.K.D.V. Yarlagadda and M.J. Kang, "Advancement in Pulse Gas Metal Arc Welding," *J. Materials Processing Technology*, pp. 164-165, 2005.
- [22] C.S.Wu, M.A. Chen and S.K. Li, "Analysis of Excited Droplet Oscillation and Detachment in Active Control of Metal Transfer," *Computational Materials Science* vol. 31, pp. 147-154, 2004.
- [23] B.L. Walcott, Y.M. Zhang and Liguó E, "Interval model based control of gas metal arc welding," *Proc. of the American Control Conference*, 1998.

- [24] B.L. Walcott, Y.M. Zhang and Ligu E, "Robust control of pulsed gas metal arc welding," J. Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 124, no. 2, pp. 281–289, 2002.
- [25] K.L. Moore and D.S. Naidu, "Automatic control strategies for gas metal arc welding," A status survey, Trends in Welding Research, Proc. 5th International Conference, pp. 1027–1032, 1998.
- [26] K.L. Moore, D.S. Naidu and S. Ozcelik, *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding*, Elsevier, 2003.
- [27] V.A. Nemchinsky, "Heat transfer in an electrode during arc welding with a consumable electrode," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 31, pp.730–736, 1998.
- [28] G.E. Cook and Z. Bingul, "Dynamic modeling of gmaw process," Int. Conf. on Robotics Automation, 1999.
- [29] J. Dowden, M. Thornton, I. Richardson, R. Ducharme and P. Kapadia, "A mathematical model of the arc in electric arc welding including shielding gas flow and cathode spot location," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 28, pp. 1840–1850, 1995.
- [30] G. Wang, P.G. Huang, and Y.M. Zhang, " Numerical analysis of metal transfer in gas metal arc welding under modified pulsed current conditions," J. Metallurgical and Materials Trans. B, Springer, vol. 35, pp. 857-866, 2004.
- [31] J. Haidar, "An analysis of the formation of metal droplets in arc welding," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 31, pp. 1233–1244, 1998.
- [32] J.H. Lang, L.A. Jones and T.W. Eagar, "Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 31, pp. 93–106, 1998.
- [33] J.H. Lang, L.A. Jones and T.W. Eagar, "A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 31, pp. 107–123, 1998.
- [34] Y.S. Kim, S.K. Choi and C.D. Yoo, "Dimensional analysis of metal transfer in gma welding," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 32, pp. 326–334, 1999.
- [35] S.W. Simpson, P. Zhu and M. Rados, "A theoretical study of a gas metal arc welding system," Plasma Sources Sci. Tech., vol. 4, pp. 495–500, 1995.
- [36] M.D. Ngo, V.H. Duy, N.T. Phuong, H.K. Kim and S.B. Kim, "Development of digital gas metal arc welding system," J. Materials Processing Technology, vol. 189, pp. 384-391, 2007.
- [37] C. Stinchcomb, *Welding Technology Today: Principles and Practices*, Pearson Education POD, 1997.

- [38] P. Li and Y.M. Zhang, " Robust Sensing of Arc Length," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 3, pp. 697-704, June 2001.
- [39] W.H. Chu, P.C. Tung, "Development of an automatic arc welding system using a sliding mode control," Int. J. Machine Tools & Manufacture, vol. 45, pp. 933-939, 2005.
- [40] M.R. Rafimanzelat, M.J. Yazdanpanah, " A novel low chattering sliding mode controller," Proc. 5th Asian Control Conference, vol. 3, pp. 1958 – 1963, July 2004.
- [41] Q.P. Ha, D.C. Rye and H.F. Durrant-Whyte, "Fuzzy moving sliding mode control with application to robotic manipulators," Automatica, vol. 35, no. 4, pp. 607-616, 1999.
- [42] M.M. Abdelhameed, "Enhancement of sliding mode controller by fuzzy logic with application to robotic manipulators," Mechatronics, vol. 15, pp. 439-458, 2005.
- [43] H. Lee, E. Kim, H.J. Kang and M. Park, "A new sliding-mode control with fuzzy boundary layer," Fuzzy Sets and Systems vol. 120, pp. 135–143, 2001.
- [44] Y.M. Chae, J.S. Gho, H.S. Mok, G.H. Choe and W.S. Shin, "A new Instantaneous Output Current Control Method for Inverter Arc Welding Machine," IEEE, PESC'33 Records, vol. 1, pp. 521-526, 1999.
- [45] K. Morimoto, T. Doi, H. Manabe, N. A. Ahmed, and H. W. Lee, "Advanced high frequency transformer linked soft switching pwm dc-dc power converter with utility ac dual voltages modes for low voltage and large current applications," in Proc. EPE'2005, Dresden, pp. P1–P10, 2005.
- [46] A. Khatamianfar, M.M. Fateh and S. Shahrabi Farahani, "On Sliding Mode Control of The Manual Gas Metal Arc Welding Process," Accepted in The 2008 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2008).
- [47] <http://www.weldingengineer.com/1mig.htm> , 2007.
- [48] <http://www.weldguru.com/Mig.html> , 2006.
- [49] <http://www.persianengineer.blogfa.com/post-18.aspx>, 1385.
- [50] <http://en.wikipedia.org/wiki/GMAW>, 2007.
- [51] <http://www.esab.com/handbook.htm>, 2007.
- [52] <http://www.millerwelds.com> , 2007.
- [53] <http://www.lincolnelectric.com> , 2007.

[۵۴] معینی. محمدتقی، خود آموز مهارت جوشکاری با قوس الکتریکی در پناه گازی محافظ MAGSCO2.

انتشارات دبستان، ۱۳۸۲.

[۵۵] غفاری. فریدون، آموزش جوشکاری MAG ام آی جی: جوشکاری قوس الکتریکی زیر گاز محافظ

:راهنمای کاربردی سیم جوشهای تولید شرکت صنایع مفتولی زنجان، انتشارات جواهری، ۱۳۸۲.

Abstract

Control of the manual gas metal arc welding process with novel view in application of sliding mode control in industrial processes to increase the quality of the weld and the facility of the welder task is presented in this thesis. The quality of the weld is extensively affected according to the uncertainties in the process, where the most of them is the vibration of the welder hand. Therefore, robust control is applied to overcome these uncertainties. The gas metal arc welding model is introduced and investigated for specifying the bound of uncertainties. To control the arc length, sliding mode controller is designed and simulated based on this model. Measurement of welding current and arc length has been noticed in the control system and the PWM inverter based power supply is used in welding machine to provide voltage. The novelty of this thesis is on the application of sliding mode theory in order to suppress the uncertainties in industrial gas metal arc welding system and the steps of design and simulation has been performed. It tried to have an appropriate control on the process by considering , to some extend, practical conditions in a manual welding, especially the presence of welding power supply dynamics in simulations. In this way, fuzzy sliding mode control approach is also proposed for enhancement of arc length control.

Keywords: Gas metal arc welding process, Sliding mode control, Robust control, Fuzzy sliding mode control, Welding power supply, Uncertainties.

IN THE NAME OF GOD



SHAHROOD UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Sliding Mode Control of the Gas Metal Arc Welding System

A Thesis

Presented in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree Master of Science in
Control Engineering

Supervisor

Prof. M.M. Fateh

By

Arash Katamianfar

Department of Electrical and Robotic Engineering
Shahrood University of Technology

Summer 2008