تولید مخصوص

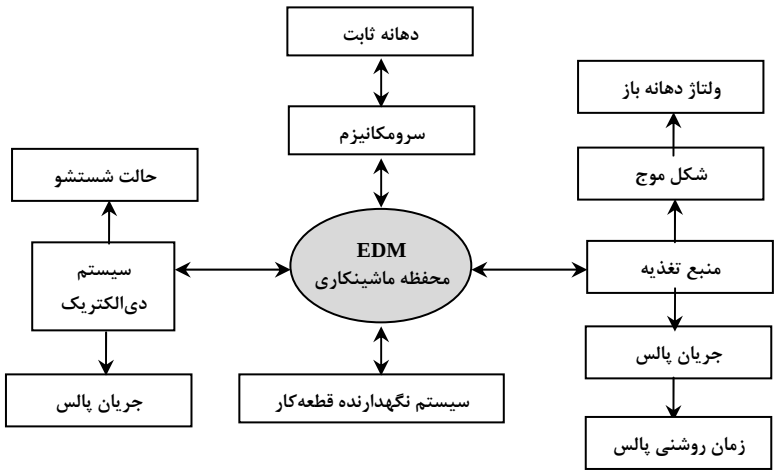
فصل اول

«ماشینکاری با تخلیه الکتریکی»

Electro Discharge Machining (EDM)

مقدمه

جوزف پریسلی در سال ۱۷۶۸ برای اولین بار، فرسایش فلز با تخلیه‌های جرقه‌ای (اسپارک) را تجربه کرد. ماشینکاری EDM که به **فرسایش جرقه‌ای** (Spark Erosion) نیز موسوم است، یک روش بار برداری غیرسنتی است که در آن بین دو الکترود به نام‌های ابزار و قطعه‌کار که در فاصله معین و کنترل شده‌ای از یکدیگر قرار دارند و فضای بین آن‌ها را سیالی به نام دی‌الکتریک پر کرده است، در نزدیکترین پیک مخالف بین ابزار و قطعه‌کار جرقه الکتریکی تولید می‌شود و بار برداری صورت می‌گیرد. نمودار شکل زیر، شمای کلی اجزای سیستم EDM را نشان می‌دهد.



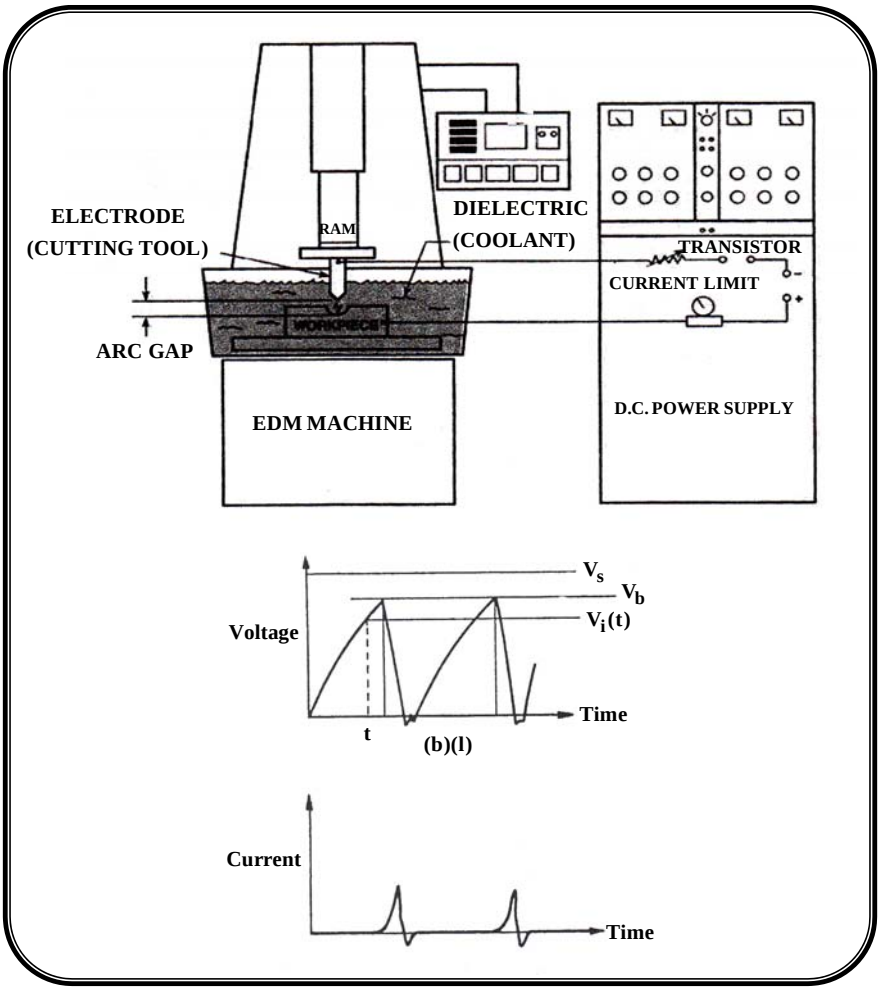
« **اجزای سیستم EDM** »

توجه: با این روش می‌توان مواد هادی یا نیمه‌هادی را ماشینکاری کرد. از مزیت‌های این روش، عدم وابستگی به سختی ماده، پلیسه‌دار نبودن قطعه‌کار، عدم نیاز به نیروی مکانیک، امکان ماشینکاری در زوایا و جهات مختلف و نیز در مواردی عدم نیاز به گیره و تثبیت قطعه‌کار را می‌توان نام برد.

✶ چون طبیعت باربرداری عمدتاً حرارتی است، به عملیات حرارتی بعد از ماشینکاری نیازی نیست، از این رو می‌توان به تلرانس‌های خوبی دست یافت. البته برای رسیدن به دقت زیاد، علاوه بر خشن‌کاری (Roughing)، مرحله پرداخت (Finishing) نیز لازم است که این مرحله به منظور کاهش پستی و بلندی زبری‌ها انجام می‌شود.

ایجاد تنش حرارتی پسماند کششی در سطح ماشینکاری از خصوصیات این روش باربرداری است که برای قطعات تحت فشار، مزیت و برای قطعاتی که تحت بارهای ارتعاشی و دینامیکی کششی ـ فشاری مداوم قرار دارند، نقص محسوب می‌شود. این فرآیند قادر است قطعات سنگین در حد چندین تن را ماشینکاری کند و به صافی سطحی بهتر از ۰/۰۴μm Ra دست یابد و همچنین در ورق‌های بسیار نازک چند ده میکرونی سوراخ‌هایی کمتر از پنجاه میکرون ایجاد نماید. در ابزار سازی و قالب سازی از EDM استفاده فراوانی می‌شود.

شکل زیر شمای کلی یک دستگاه EDM را نشان می‌دهد.



سوراخکاری بر روی پره‌های توربین با شکل پیچیده در صدها عدد در مدت زمانی کوتاه با این روش امکانپذیر است. قالب‌های فورج، پرس، دایکاست، پلاستیک، لاستیک و بویژه قالب‌های کاربایدی که سخت بوده و امروزه کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند با استفاده از EDM قابل تولید هستند.

در این روش فرسایش ابزار بسیارکم و در حدود کمتر از ۰/۵% می‌باشد. پارامتری که میزان خوردگی ابزار را معرفی می‌کند، **نسبت سایش حجمی (θ)** است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{نسبت سایش حجمی } \theta = \frac{\text{مقدار خوردگی ابزار}}{\text{حجم ماشینکاری شده}}$$

هر چه مقدار θ کمتر باشد، از لحاظ اقتصادی بهتر می‌باشد.

مثال ۱: کدامیک از جملات زیر در مورد ماشینکاری EDM صحیح نمی‌باشد؟

۱) این روش برای ماشینکاری تمامی فلزات هادی و غیرهادی الکتریسیته استفاده می‌شود.

۲) این روش بدون توجه به سختی ماده، آن را ماشینکاری می‌نماید.

۳) روش EDM جزء روش‌های ماشینکاری مخصوص حرارتی می‌باشد.

۴) در ابزارسازی و قالب‌سازی از EDM استفاده فراوانی می‌شود.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» ماشینکاری با تخلیه الکتریکی (EDM) محدود به ماشینکاری مواد هادی و نیمه هادی می‌باشد و توسط این روش نمی‌توان مواد غیرهادی را ماشینکاری نمود.

مثال ۲: کدامیک از روش‌های تولید مخصوص زیر به روش فرسایش جرقه‌ای موسوم است؟

۱) ECM ۲) EDM ۳) PAM ۴) EBM

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» چون باربرداری در این روش توسط جرقه‌های ایجاد شده توسط ماشین انجام می‌شود، گاهاً روش EDM، فرسایش جرقه‌ای یا بصورت عامیانه اسپارک نیز گفته می‌شود.

مثال ۳: با استفاده از روش ماشینکاری با تخلیه الکتریکی، کدام دسته از مواد و قطعات قابل ماشینکاری هستند؟

۱) مواد هادی ۲) مواد نیمه هادی ۳) مواد غیرهادی ۴) موارد ۱ و ۲

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» توسط روش EDM می‌توان مواد هادی و یا نیمه هادی را ماشینکاری نمود.

مثال ۴: کدامیک از روابط زیر، نسبت سایش حجمی در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM) را نشان می‌دهد؟

۱) حجم قطعه‌کار برداشته شده به حجم الکترود مصرف شده ۲) حجم الکترود مصرف شده به حجم قطعه‌کاربرداشته شده

۳) عمق باربرداری به حجم قطعه‌کار برداشته شده ۴) حجم الکترود مصرف شده به عمق باربرداری

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» نسبت سایش حجمی برابر است با:

$$\theta = \text{نسبت سایش حجمی} = \frac{\text{مقدار خوردگی ابزار}}{\text{حجم ماشینکاری شده}}$$

پارامترهای مهم ماشینکاری EDM

EDM فرآیندی پیچیده است که بیش از سی پارامتر در آن دخیل‌اند. به طور کلی این پارامترها به دو دسته ورودی و خروجی تقسیم می‌شوند.

۱ـ پارامترهای ورودی

۱ـ۱ـ شدت جریان جرقه:

مقدار شدت جریان تنظیمی بین (۴۰۰ـ۱) آمپر و برحسب نوع ژنراتور انتخابی متغیر است. هنگام استفاده از ابزارهای چند تکه‌ای، ژنراتورهای قدرت با شدت جریان جرقه‌ای بین (۱۶۰۰ـ۱) آمپر را می‌توان به کارگرفت.

۱ـ۲ـ زمان روشنی پالس:

بسیاری از پارامترهای مهم خروجی از قبیل سرعت باربرداری، فرسایش ابزار، صافی سطح و نیز فاصله ابزار و قطعه‌کار به این پارامتر وابسته است. دامنه تغییرات آن برای ژنراتورهای مختلف (۲۰۰۰ـ۰/۱) میکروثانیه است.

۱ـ۳ـ ولتاژ مدار باز:

ولتاژ مدار باز که به ولتاژ بدون بار نیز معروف است در پایداری فرآیند مؤثر است. محدوده تغییرات ولتاژ مدار باز (۳۰۰ـ۶۰) ولت و برحسب نوع ژنراتور، متغیر است.

۱ـ۴ـ پلاریته ابزار:

در مدارهای آیزوفرکانس، پلاریته را منفی منظور می‌کنند (مانند استفاده از مدارهای RC).

۱ـ۵ـ زمان خاموشی پالس:

زمان خاموشی پالس، مقدار زمان لازم پس از قطع جرقه به منظور سرد شدن قطعه‌کار و شست و شوی بهتر آلودگی‌هاست. زمان خاموشی پالس را می‌توان بین (۱۵۰۰ـ۱) میکروثانیه تنظیم کرد که عموماً کمتر از زمان روشنی پالس است.

۱ـ۶ـ فاصله ابزار و قطعه‌کار:

بسیاری از پارامترهای مهم خروجی به فاصله ابزار و قطعه‌کار وابسته بوده و به حفظ این فاصله در طول فرآیند ماشینکاری بستگی دارند. اگر فاصله مذکور از حد معینی کمتر منظور شود، درصد جرقه‌های مطلوب و عادی به دلیل عدم شست و شوی کافی واکنش سریع سیستم کنترل این فاصله کم شده و درصد جرقه‌های اتصال کوتاه و پالس‌های مدار باز زیاد می‌شود. در نتیجه ضمن افزایش فرسایش ابزار، گشادی کناری و خرابی صافی سطح، بازده باربرداری کاهش می‌یابد.

۱ـ۷ـ انتخاب ابزار:

از آنجا که فلسفه ماشینکاری به روش EDM، ایجاد مکمل پیشانی ابزار در قطعه کار است، دقت ابزار و حفظ آن در فرآیند ماشینکاری بسیارمهم بوده و تقریباً تمامی پارامترهای مهم خروجی بدان وابستهاند. در EDM از انواع الکترودهای هادی از قبیل مس، فولاد، نقره، برنج، گرافیت، تنگستن، مس ـ گرافیت، مس ـ تنگستن و ..... استفاده می‌شود.

۱ـ۸ـ دی الکتریک:

دی‌الکتریک سیالی است که مقاومت زیادی در مقابل یونیزاسیون از خود نشان می‌دهد. مقاومت در مقابل یونیزاسیون و کوچک و محدود نگه داشتن کانال پلاسما و متعاقب آن« تمرکز انرژی در کانال فوق، دی یونیزه شدن سریع و تقلیل زمان خاموشی پالس، سرد نگه داشتن محیط، شست و شوی آلودگی‌های حاصل از ماشینکاری و جلوگیری از ایجاد ناپایداری، ایجاد فاصله کوچک و نزدیک بین دو الکترود و انتقال بهتر جزئیات به قطعه کار و نیز ایجاد سختی سطحی بویژه در ماشینکاری فولاد»، نقش عمده دی الکتریک است. این سیال معمولاً از هیدروکربورهای زنجیری (نه حلقوی) و خطی مانند نفت سفید و روغن ترانس انتخاب می‌شود. همچنین آب دی یونیزه در اسپارک سیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اسپارک معمولی از نفت سفید با افزودن ۱۰تا ۲۰درصد روغن ترانس به منظور افزایش سرعت باربرداری استفاده می‌شود.

۱ـ۹ـ شست و شو:

روش شست و شو در پایداری فرآیند ماشینکاری و به تبع آن اخذ پارامترهای خروجی به نحو مطلوب اهمیت دارد. مقدار آن توسط شیرهای شست و شو، به روش‌های مختلف از قبیل غوطه‌وری، جت، فشاری، مکشی، پریودیک، نوسانی، اولتراسونیک و ترکیبی انجام می‌شود.

۲ـ پارامترهای خروجی

۲ـ۱ـ زمان تأخیر جرقه:

زمان تأخیر جرقه از پارامترهای خروجی است که بسیاری از خصوصیات و رفتار پالس‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آن مدت زمان لازم از لحظه برقراری ولتاژ تا ایجاد جرقه است و مقدار آن از صفر (اتصال کوتاه یا جرقه Arc) تا طول زمان روشنی پالس (پالس مدار باز) متغیر است.

۲ـ۲ـ ولتاژ جرقه:

پس از ایجاد پل کانال بخار و پلاسما بین دو الکترود، ولتاژ بین دو الکترود از مقدار اولیه (ولتاژ مدار باز) به سرعت افت کرده و به سطح ولتاژ جرقه می‌رسد و در طول زمان جرقه به آرامی تنزل می‌کند تا اینکه جرقه قطع شود.

۲ـ۳ـ شدت جریان جرقه:

کلیه پارامترهایی که در شکل و مقدار ولتاژ جرقه مؤثرند، در شدت جریان جرقه نیز اثر دارند.

۲ـ۴ـ سرعت باربرداری:

سرعت باربرداری به عواملی از قبیل مقدار و شکل جریان جرقه، زمان روشنی و خاموشی پالس بستگی دارد.

۲ـ۵ـ فرسایش نسبی ابزار:

نسبت حجم کنده شده از ابزار به حجم برداشته شده از قطعه کار، **فرسایش نسبی ابزار** نام دارد که معمولاً بر حسب درصد بیان می‌شود. تغییرات فرسایش نسبی ابزار و سرعت بار برداری عموماً عکس یکدیگرند، به طوری که در فرآیند پایدار که سرعت باربرداری زیاد باشد فرسایش نسبی ابزار کم است.

۲ـ۶ـ صافی سطح:

صافی سطح ماشینکاری شده به مقدار انرژی جرقه که خود تابع پارامترهای مهمی از قبیل شدت جریان جرقه، ولتاژ و زمان جرقه است، بستگی دارد. بعلاوه ناپایداری فرآیند و ارتعاشات ابزار نیز در صافی سطح اثر دارند. در مورد صافی سطح هر چه پراکندگی حول خط مرکزی کمتر باشد، صافی سطح بیشتر است.

توجه: رابطه تقریبی زیر بین R_a و R_{max} وجود دارد:

$$R_{max} = ۴R_a$$

مثال۵: کدامیک از پارامترهای زیر جزء متغیرهای ورودی فرآیند EDM نمی‌باشد؟

۱) زمان روشنی پالس ۲) دی‌الکتریک ۳) شدت جریان جرقه ۴) سرعت باربرداری

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» سرعت باربرداری به پارامترهای ورودی از قبیل مقدار و شکل جریان جرقه، زمان روشنی و خاموشی پالس بستگی داشته و جزء پارامترهای خروجی فرآیند EDM می‌باشد.

مثال ۶: کدامیک از جملات زیر در مورد فرآیند EDM صحیح می‌باشد؟

۱) تغییرات فرسایش نسبی ابزار و سرعت باربرداری نسبت مستقیم با هم دارند.

۲) زمان تأخیر جرقه از پارامترهای ورودی است که بسیاری از خصوصیات پالس را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۳) تمرکز انرژی در کانال پلاسما، دی‌یونیزه شده سریع و تقلیل زمان خاموشی پالس از وظایف دی‌الکتریک می‌باشد.

۴) سرعت باربرداری به ارتعاشات ابزار و زمان روشنی و خاموشی پالس بستگی دارد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» تغییرات فرسایش نسبی ابزار و سرعت باربرداری، نسبت عکس با هم دارند نه مستقیم، پس گزینه اول صحیح نمی‌باشد. زمان تأخیر جرقه از پارامترهای خروجی است، پس گزینه دوم نیز صحیح نمی‌باشد. ارتعاشات جانبی الکترود باعث کاهش دقت ماشینکاری و کاهش صافی سطح ماشینکاری شده می‌گردد و ربطی به سرعت باربرداری ندارد. پس گزینه چهارم نیز نادرست است.

مثال ۷: کدامیک از روابط زیر نشان دهنده نسبت سایش حجمی در روش EDM می‌باشد و در کدام حالت فرآیند اقتصادی می‌باشد؟

۱) $\lambda = \frac{\text{حجم ماشینکاری قطعه}}{\text{حجم ماشینکاری ابزار}}$ ـ نسبت سایش حجمی کمتر

۲) $\lambda = \frac{\text{حجم ماشینکاری قطعه}}{\text{عمق برش}}$ ـ نسبت سایش حجمی بیشتر

۳) $\theta = \frac{\text{حجم خوردگی الکترود}}{\text{حجم ماشینکاری قطعه}}$ ـ نسبت سایش حجمی کمتر

۴) $\theta = \frac{\text{حجم خوردگی الکترود}}{\text{عمق ماشینکاری}}$ ـ نسبت سایش حجمی بیشتر

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در ماشینکاری تخلیه الکتریکی به حجم الکترود مصرفی به حجم قطعه کار برداشته شده، نسبت سایش حجمی گفته می‌شود که هر چه مقدار θ کمتر باشد، از لحاظ اقتصادی بهتر می‌باشد.

انواع پالس‌ها در EDM

در میان انواع مختلف پالس‌های موجود در EDM چهار نوع آن مهمتر و کاملاً متمایز هستند.

۱ـ جرقه عادی:

همان جرقه مطلوب در اسپارک است. در اسپارک فرکانس صدا در محدوده ۲ تا ۲۰ کیلو هرتز بوده و زیر و قابل شنیدن است.

۲ـ جرقه ARC:

در جرقه آرک عمدتاً زمان تأخیر جرقه صفر است. فرکانس صدا در آرک در محدوده $(۰/۰۱-۳)\text{kHz}$ بوده و نسبت به اسپارک بم‌تر است.

۳ـ پالس اتصال کوتاه:

در پالس اتصال کوتاه شدت جریان حداکثر بوده و ولتاژ تقریباً صفر است. در این نوع جرقه هیچ صدایی شنیده نمی‌شود.

۴ـ پالس مدار باز:

در پالس مدار باز شدت جریان صفر بوده و ولتاژ بیشترین مقدار یعنی همان ولتاژ مدار باز است. در این نوع پالس نیز هیچ صدایی وجود ندارد.

مثال ۸: بطور معمول، درصد خوردگی ابزار در کدام حالت زیر کمتر است؟

۱) خشن‌کاری
۲) پرداخت‌کاری
۳) بستگی به زمان روشنی و خاموشی پالس دارد.
۴) بستگی به نوع الکترود و دی‌الکتریک دارد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در حالت کلی، درصد خوردگی ابزار در حالت پرداخت‌کاری کمتر از خشن‌کاری است.

مثال ۹: از بین پالس‌های موجود در EDM، به ترتیب در کدامیک «ولتاژ» و «زمان تأخیر جرقه» صفر است؟

۱) پالس اتصال کوتاه ـ پالس مدار باز
۲) جرقه آرک ـ پالس اتصال کوتاه
۳) پالس اتصال کوتاه ـ جرقه آرک
۴) پالس مدار باز ـ پالس اتصال کوتاه

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در جرقه آرک عمدتاً زمان تأخیر جرقه صفر است. همچنین در پالس اتصال کوتاه ولتاژ تقریباً برابر صفر می‌باشد.

اجزای مختلف ماشین EDM

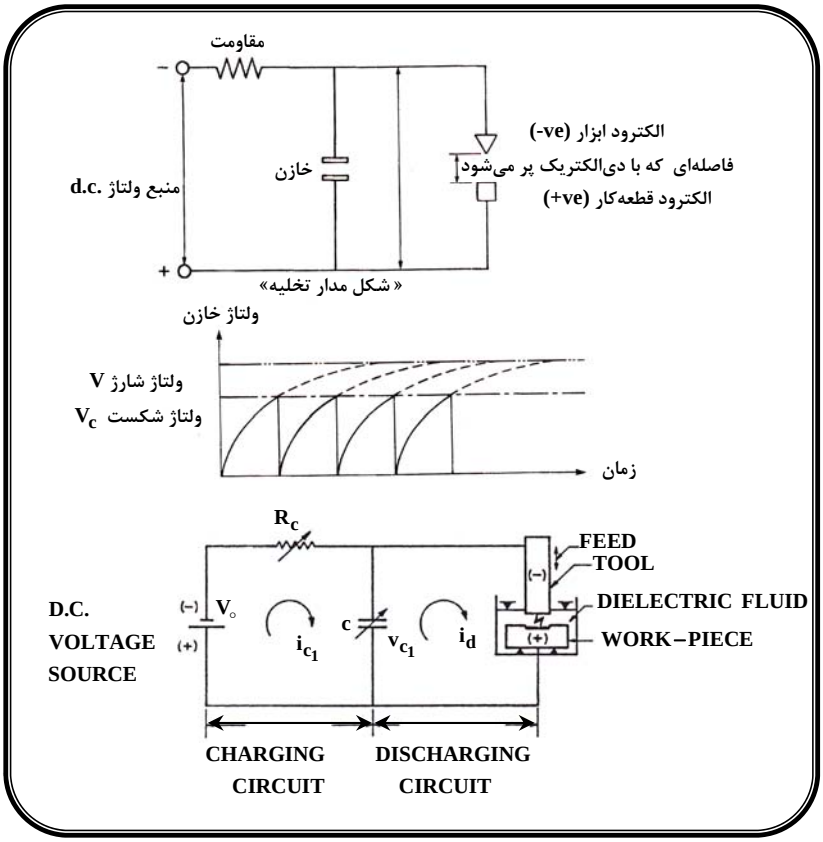
یک ماشین EDM از چهار قسمت کلی سیستم مولد قدرت الکتریکی، سیستم کنترل فاصله بین ابزار و قطعه کار، سیستم دی الکتریک و اجزای مکانیکی تشکیل شده است.

منابع قدرت در EDM

سه نوع منبع قدرت (Power Supply System) در مدارهای EDM بکار می‌رود که عبارتند از: ژنراتورهای RC، ایزوفرکانس و ایزوپالس.

۱ـ ژنراتورهای قدرت RC (لازارنکو) :

مدارهای RC، ارزان قیمت بوده و در برابر تغییرات مدار (مثلاً Arc زدن) مقاوم‌اند. اما بازده این مدارها کم است و کل عملیات بدون دقت و پرداخت سطحی مناسب انجام می‌شود. همچنین جزئیات سطح روی قطعه تولید نمی‌شود و بیشتر انرژی با پخش شدن به هدر می‌رود. شکل زیر نشان دهنده یک مدار RC می‌باشد.

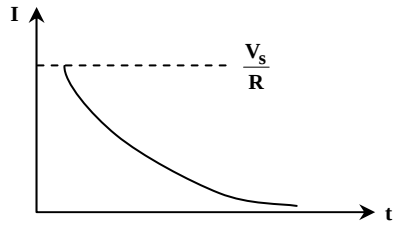


* روابط زیر در مدارهای RC صادق است:

$$I = \frac{V_s}{R}\exp[-\frac{t}{RC}] \qquad k = \frac{t}{RC}$$

$$V_c = V_s - V_R - RI \Rightarrow V_c = V_s\left[1 - \exp(-\frac{t}{RC})\right] \qquad W = \frac{1}{2}CV_b^2$$

$$V_b = V_s\left[1 - (\frac{t}{RC})\right] \qquad P = \frac{w}{t} = \frac{V_s^2}{2KR}(1 - e^{-k})^2$$



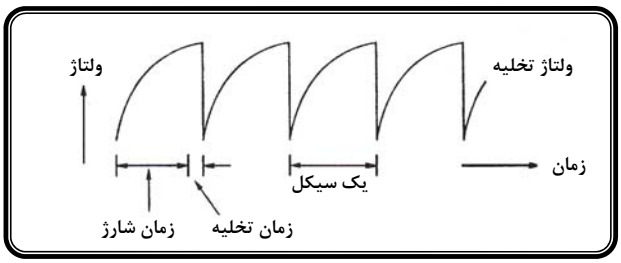
V_s : ولتاژ منبع — C: ظرفین خازن — R : مقاومت مدار

V_c : ولتاژ دو سر خازن — V_b :ولتاژ شکست (Breakdown Voltage)

k : ثابت زمانی مدار — W:انرژی خازن — P : توان مصرفی

پس از ایجاد جرقه، ولتاژ خازن افت می‌کند زیرا این عمل موجب تخلیه خازن می‌شود و بعید است در نقطه دیگری امکان ایجاد جرقه وجود داشته باشد. از این‌رو اسپارک همیشه در نقطه بسیار کوچکی درحد میکرون جرقه زده می‌شود و انرژی خازن در آن نقطه تخلیه می‌گردد.

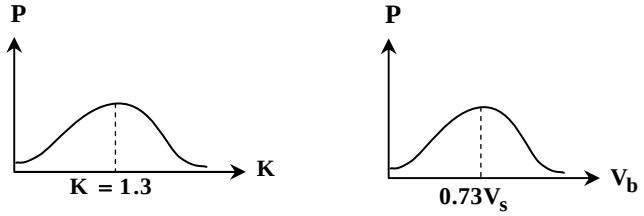
زمان تخلیه خازن (زمان جرقه) در مقایسه با زمان شارژ آن بسیار کوتاه است، به طوریکه حدود $\frac{1}{200}$ زمان یک پریود را زمان تخلیه و $\frac{199}{200}$ آن را زمان شارژ خازن تشکیل می‌دهد.



$$\frac{dp}{dk} = 0 \Rightarrow \quad k = 1/3 \quad , \quad V_b = 0/73V_s$$

شکل‌های زیر به ترتیب تغییرات انرژی یک جرقه را برحسب ولتاژ شکست و ثابت زمانی مدار نشان می‌دهند.

$$P = 0/21\frac{V_s^2}{R}$$



ولتاژ شکست و ثابت زمانی (k, V_b) هم جهت هستند، به طوریکه هر عاملی‌که ولتاژ شکست را زیاد کند، ثابت زمانی را نیز افزایش می‌دهد و برعکس. در مدار RC صافی سطح به مقدار انرژی W بستگی دارد که خود تابعی از ظرفیت خازن و ولتاژ شکست است و تابع ولتاژ مدار باز و مقاومت خارجی R نیست. هرقدر مقدار انرژی در هر پالس بیشتر باشد، چاله‌های برداشته شده عمیق‌تر و زبری سطح بیشتر خواهد بود و با توجه به رابطه انرژی، هر چه ظرفیت خازن و ولتاژ شکست بیشتر باشد، زبری سطح ماشینکاری نیز بیشتر است.

سرعت باربرداری به مقدار انرژی مصرفی در واحد زمان بستگی دارد و به علت تناسب این سرعت با توان مصرفی می‌توان گفت:

۱ـ هر چه ولتاژ مدار باز V_s بیشتر باشد، سرعت باربرداری افزایش می‌یابد. از این‌رو برای ساختن مدار RC باید V_s زیادی را برای آن در نظر گرفت.

۲ـ ظرفیت خازن تأثیری بر سرعت باربرداری ندارد.

۳ـ به ازاء $(k = ۱/۳)$ مقدار سرعت باربرداری ماکزیمم است و با منظور کردن این مقدار در رابطه $(V_b = ۰/۷۳V_s, V_b)$ نشان دهنده آن است که به ازای ولتاژ شکست تا این حد، سرعت باربرداری زیاد می‌شود.

۴ـ سرعت باربرداری با کاهش مقاومت مدار R افزایش می‌یابد.

مثال ۱۰: کدامیک از گزینه‌های زیر از انواع منابع قدرت در روش ماشینکاری با تخلیه الکتریکی نمی‌باشد؟

۱) ایزوالکتریک ۲) ایزوپالس ۳) ایزوفرکانس ۴) لازارنکو

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» سه نوع منبع قدرت معروف در مدارهای EDM، ژنراتور قدرت RC یا لازارنکو، مدار ایزوپالس و مدار ایزوفرکانس می‌باشد.

مثال ۱۱: در یک ژنراتور قدرت RC استفاده شده در ماشین EDM ، مقدار R مساوی ۱۵ اهم و مقدار C برابر ۲ میکروفاراد است. اگر ولتاژ منبع ۲۲۰ ولت باشد، ماکزیمم توان جرقه چند وات خواهد بود؟

۱) ۸۷۶ ۲) ۶۷۸ ۳) ۷۸۶ ۴) ۶۸۷

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» توان ماکزیمم جرقه در مدارهای RC از رابطه روبرو محاسبه می‌گردد: $P_{max} = ۰/۲۱\frac{V_s^۲}{R} = ۰/۲۱ \times \frac{(۲۲۰)^۲}{۱۵} = ۶۷۷/۶\,W$

مثال ۱۲: اگر مدار جرقه ماشین EDM از نوع RC باشد، مقدار ولتاژ شکست گپ ماشینکاری بین ابزار و قطعه‌کار برای حصول ماکزیمم قدرت باربرداری چه مقدار باید باشد؟

۱) ولتاژ منبع قدرت $\times ۱/۳$ ۲) ولتاژ منبع قدرت $\times ۰/۷۳$ ۳) ولتاژ متوسط گپ $\times ۰/۷۳$ ۴) به سادگی قابل تخمین نمی‌باشد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» همانگونه که ذکر شد در مدارهای RC روابط روبرو صادق است: $k = ۱/۳ \;,\; V_b = ۰/۷۳V_s$

ـ خصوصیات مدار RC :

۱ـ در این مدار سرعت باربرداری کم است.

۲ـ قسمت اعظم زمان روشنی پالس صرف شارژ شدن خازن شده و جزء زمان مرده است.

۳ـ در مدار RC تمامی پارامترها به اندازه گپ بستگی دارند، از این‌رو این مدار را مدار وابسته به گپ نیز می‌نامند.

۴ـ چون پارامترها وابسته به گپ بوده و کنترل گپ نیز مشکل است، پارامترها را نمی‌توان به خوبی کنترل نمود.

۵ـ در این مدار به علت اینکه شدت جریان زیاد و زمان روشنی پالس کم است، به منظور جلوگیری از فرسایش ابزار، ابزار به قطب منفی وصل می‌شود.

۲ـ مدار ایزوفرکانس Isofrequency Circuit :

در مدار RC حدود ۹۹% زمان یک پریود مرده است، از این رو سرعت باربرداری کم است. به علاوه این مدار تابع اندازه و خصوصیات گپ (Gap) بوده و در نتیجه کنترل زیادی بر نتیجه فرآیند نیست. به همین دلیل از مدارهای وابسته مانند ایزوفرکانس و ایزوپالس استفاده می‌شود.

اسیلاتور یک موج ساز است که موج‌های مربعی ضعیف تولید می‌کند. بعد از اسیلاتور، اشمیت تریگر قرار دارد که مانند یک چرخ لنگر عمل می‌کند، به طوری که ضربه‌های ورودی و خروجی را گرفته و پالس‌های خروجی از اسیلاتور را تمیز و تعدیل می‌کند. در قسمت تقویت کننده، ابتدا ولتاژ و سپس شدت جریان افزایش می‌یابند به طوری که ولتاژ (۳۰۰ـ۶۰) ولت و شدت جریان (۴۰۰ـ۱) آمپر تقویت می‌شوند.

مدارها به دو صورت سری و موازی هستند. شکل ولتاژ در مدار موازی به صورت پله‌ای بوده و از این‌رو زمان تأخیر جرقه در مقایسه با مدارهای سری بیشتر است و گپ بزرگتری را می‌توان در آن‌ها انتظار داشت. در مدار ایزوفرکانس زمان روشنی و خاموشی پالس ثابت و زمان تأخیر جرقه و به تبع آن زمان جرقه متغیر است.