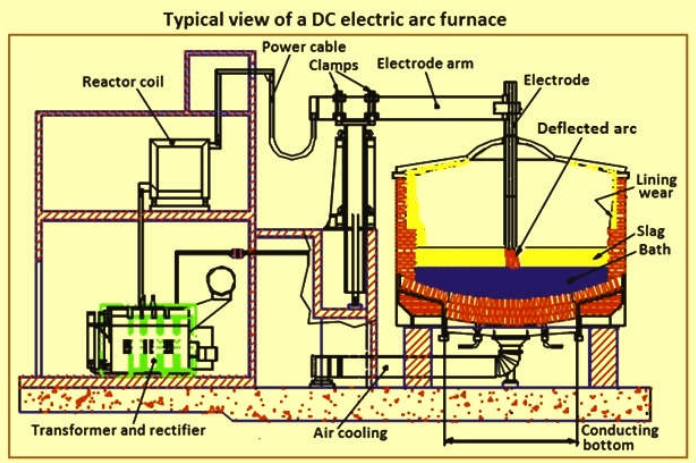
کوره قوس الکتریکی DC [1]

ترجمه: محمدحسین نشاطی

کوره قوس الکتریکی جریان مستقیم (DC-EAF) کوره‌ای برای ساخت فلز اولیه است که ایده متفاوتی در طراحی کوره‌های قوس الکتریکی را مطرح می‌سازد. DC-EAF تنها یک الکترود منفرد دارد [نوع دو الکترودی نیز ساخته شده است] که به عنوان کاتد عمل می‌کند و جریان از این الکترود گرافیتی به آند نصب شده در کف کوره به پائین جریان می‌یابد. انتقال حرارت بسیار کارآمد از قوس ایجاد شده بین الکترود گرافیتی بالائی و آند مورد استفاده شارژ کوره قرار می‌گیرد. نمای نمونه‌وار DC-EAF در **شکل 1** ارائه شده است.



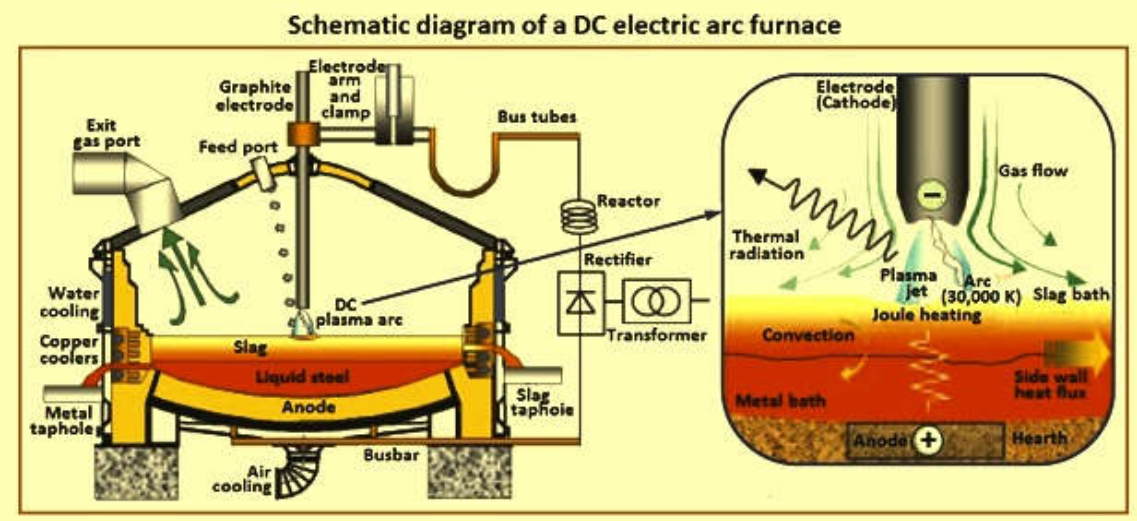
شکل 1– نمای نمونه‌وار کوره DC-EAF

کوره DC-EAF بطور معمول متشکل از یک پوسته استوانه‌ای با روکش نسوز، با یک [یا دو] الکترود گرافیتی مرکزی است که به صورت عمودی در یک سوراخ در مرکز سقف کوره قرار می‌گیرد [برای نوع دو الکترودی دو سوراخ با فاصله در سقف کوره]. اتصال آند در بستر کف کوره در تماس مستقیم با لایه‌ای از فولاد مذاب می‌باشد که با لایه‌ای از سرباره مذاب پوشانده شده است. انرژی با استفاده از قوس پلاسمای باز (**شکل2**) ایجاد شده بین نوک پایین کاتد و سطح بالایی سرباره مذاب تأمین می‌شود. حداقل قسمت مرکزی سطح سرباره باز است. از آنجا که کوره با برق تغذیه می‌شود، می‌توان به دمای بسیار بالایی (بالاتر از 1500°C) دست یافت.

DC-EAF جایگزینی برای کوره قوس الکتریکی جریان متناوب (AC-EAF) است. خروجی ترانسفورمر UHP (بسیار پر توان) با استفاده از یکسوکننده معمولاً تریستورهای متصل با پل، به DC تبدیل می‌شود. DC-EAF مجهز به سیستم‌های یکسوکننده پرتوان قابل کنترل، قوس پایدار تحت هر شرایطی، در حداکثر توان اسمی ممکن را تامین می‌کند. قوس در کوره DC-EAF یک جت پر سرعت پایدار است که با شتاب الکترومغناطیسی (اثر Maecker) در منطقه جمع شده در نزدیکی ریشه قوس روی سطح الکترود برقرار می‌شود. قوس توسط تعامل بین جریان سیال، میدان حرارتی و میدان‌های الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود. نیروهای الکترومغناطیسی خود جمع‌کننده، این جت پلاسمای فوق‌العاده گرم (شکل2) را به طور معقولی منسجم نگه می‌دارند. از یک راکتور DC برای پایدار کردن بیشتر قوس استفاده می‌شود. علاوه بر این، سطح حمام مذاب (یا حداقل بخشی از سطح در ناحیه اتصال قوس) باز است، یعنی اساساً با مواد تغذیه شده واکنش نکرده پوشیده نشده است. در شکل2 نمودار شماتیک یک کوره DC-EAF نشان داده شده است.

کوره DC-EAF علاوه بر تفاوت‌های آشکار در منبع تغذیه برق، چند لازمه منحصر به فرد نسبت به کوره AC دارد. ویژگی-های مهم DC-EAF عبارتند از: (i) طراحی مستحکم و قابل اعتماد، (ii) انعطاف‌پذیری بالا از نظر مواد شارژ (iii) چگالی جریان و استفاده از توان بالا، (iv) پایداری قوس بالا، (v) کیفیت خوب توان حتی در شرایط شبکه ضعیف، و (vi) کنترل ولتاژ و جریان مستقل. سایر ویژگی‌های DC-EAF در مقایسه با AC-EAF به شرح زیر است:

[1]- DC Electric Arc Furnace, Ispat Guru, May 15, 2013



شکل 2- نمودار شماتیک یک کوره DC EAF

- عملیات پایدارتر است. ذوب کردن یکنواخت است.
- به دلیل تنظیمات سیستم، مصرف الکترود را کاهش داده است. مصرف الکترود به حدود یک سوم کاهش می‌یابد. اما، ضرورت بهبود خرد شدن سطحی و ترک خوردن الکترودها وجود دارد. مصرف کم الکترود امکان تولید ذوب‌های کم کربن را فراهم می‌سازد.
- فرسایش لایه نسوز کمتری دارد. مصرف نسوز در دیواره‌های جانبی کمتر، اما در کف کوره بیشتر است. صرفه‌جویی کلی در مصرف نسوز در بازه 15 تا 25 درصد می‌باشد.
- همرنی جابجائی حمام وجود دارد.
- توزیع دمای حمام بهتر است. توزیع بهتر دما به توزیع بهتر حرارت منتج می‌شود. نقاط داغ (هات اسپات) روی دیواره کوره AC-EAF وجود ندارند.
- میزان سر و صدا بسیار کمتر است (از 105 dB به 85 dB کاهش می یابد).
- هزینه نصب بیشتر است (حدود 10 تا 35 درصد بیشتر).
- هزینه عملیاتی کمتر است (حدود 15 تا 20 درصد کمتر).
- اختلال در شبکه کمتر است. کاهش شدید در اثر فلیکر وجود دارد. سطح فلیکر و فرکانس فلیکر به نصف کاهش می‌یابد. نیاز به تجهیزات جبران Var بسیار کمتر است.
- مصرف انرژی کمتر است. 5 تا 10 درصد صرفه‌جویی در مصرف برق.
- الکترودهای پایینی منطقه کف کوره را پیچیده می‌کنند.
- میزان انتشار گازها و گردوغبار کمتر است.

توسعه تکنولوژی کوره قوس DC

به طور کلی این باور وجود دارد که کوره قوس DC یک تحول اخیر است. اما، قبلاً در سال 1881 در آلمان و در سال 1885 در سوئد، کوره‌های ذوبی تشریح شده بودند که از تکنولوژی DC استفاده می‌کردند. این کوره‌ها دو رویکرد برای ذوب کردن داشتند، یعنی (i) مفهوم قوس سوزان بین الکترود گرافیتی و بار فلزی، همانطورکه امروز استفاده می‌شود، و (ii) پیشنهاد سوزاندن با قوس بین دو الکترود با چیدمان افقی، در این مورد ذوب کردن شارژ فقط با تابش انجام می‌گیرد. از آنجا که در آن زمان نه یکسوکننده-

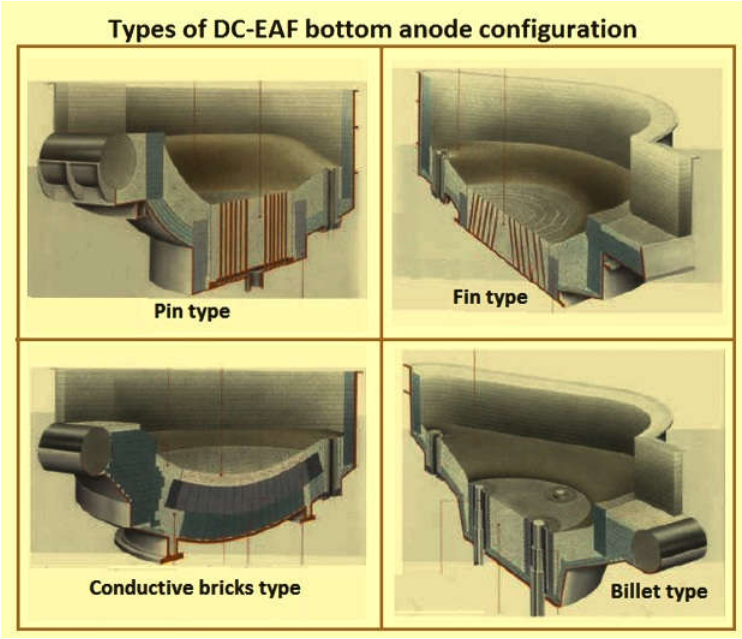
های قابل‌کنترل جریان زیاد و نه راه‌حلی برای مشکل تلفات زیاد حرارتی در دسترس بود، کوره قوس الکتریکی DC نتوانست به یک واحد قابل‌قبول برای تولید در شرایط صنعتی متداول در آن زمان توسعه یابد.

در اوایل دهه 1970، تکنولوژی DC به سطحی توسعه یافت که استفاده از آن برای کوره‌های قوس منطقی شد. با استفاده از این تکنولوژی، نسل جدیدی از کوره‌های قوس برای صنعت فولادسازی و همچنین بخش‌های فروآلیاژها و فلزات غیرآهنی به وجود آمد. در کوره DC تک الکترودی از انتقال حرارت بسیار کارآمد ایجاد شده از قوس بین الکترود گرافیتی بالا و آند پائین برای ذوب شارژ در کوره استفاده می‌شود. کاربردهای موفق در دهه‌های 1980 و 1990 مزایای ذوب کردن و ذوب تصفیه‌ای کوره DC را اثبات کردند.

ویژگی‌های طراحی پایه

در DC-EAF انرژی الکتریکی عمدتا توسط برقراری قوس بین نوک الکترود بالائی و حمام سرباره به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. الکترود بالا به عنوان کاتد و سیستم رسانای پایین کوره به عنوان آند متصل می‌شوند.

کوره‌های DC تک الکترودی تنها یک دکل بازوی الکترود و یک الکترود گرافیتی دارند. بنابراین پیچیدگی قسمت بالای کوره DC-EAF کمتر می‌باشد و اجزای کمتری برای تعمیرو-نگهداری (نت) در مقایسه با طرح‌های AC دارند. الکترود در حین تولید فولاد مصرف شده و با اتصال الکترودهای نو طول آن زیاد می‌شود. بازوی الکترود برای تنظیم الکترود مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که یک الکترود منفرد وجود دارد، اتلاف گرافیت به دلیل اکسید شدن در مقایسه با کوره قوس الکتریکی AC کمتر است.



شکل 3- انواع مختلف چیدمان آند پایین.

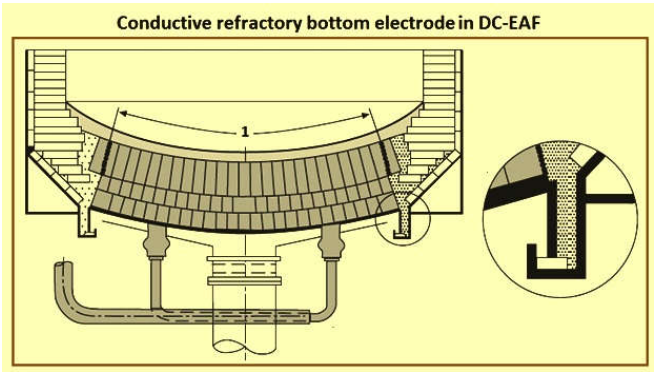
برای الکترودهای بالا الزامات ویژه‌ای برای گرافیت وجود دارد و به کیفیت (گرید) ویژه‌ای از گرافیت نیاز دارد. این الزامات ویژه در مقایسه با گرافیت برای الکترود AC-EAF عبارتند از: (i) داشتن ضریب انبساط حرارتی کمتر، (ii) داشتن مقاومت ویژه الکترود کمتر، (iii) داشتن هدایت حرارتی عرضی بیشتر، (iv) داشتن ضریب انبساط حرارتی کمتر، و (v) داشتن همگنی و درشت‌دانگی بهبود یافته. DC-EAF برای مقابله با تأثیر سرباره مذاب گرم بر تماس مستقیم با مواد نسوز و افزایش تابش حرارتی، نیاز به چیدمان مؤثر خنک کنندگی در سقف و دیواره جانبی دارد.

DC-EAF برای تکمیل مدار الکتریکی، نیاز به یک الکترود برگشتی، آند، دارد. این آند به طور معمول الکترود پایینی نامیده می‌شود زیرا در پایین پوسته کوره قرار دارد. کوره برای اطمینان از برقراری مسیر الکتریکی به آند برگشتی با پاشنه مذاب (هات هیل) کار می‌کند. چند طراحی مختلف برای الکترود برگشتی پایین در دسترس است از جمله الکترودهای برگشتی پین فلزی با مواد نسوز غیر رسانا، بیلت الکترود، الکترودهای فین فلزی و نسوز پایین رسانا. این موارد در **شکل 3** نشان داده شده‌اند.

در مورد تماس نسوز رسانای جریان، آستر نسوز در مرکز پائین کوره به عنوان آند عمل می کند. قسمت پایین دارای یک فلنج مدور است که درون یک کانال دایره‌ای قرار دارد که به پوسته کوره جوش داده شده است. در داخل کانال، فلنج توسط بلوک‌های

سرامیکی تقویت شده با الیاف حمایت می‌شود. فضای بین کانال، بلوک‌های حائل و فلنج با یک ترکیب نسوز کوبیدنی (رمینگ) پر می‌شود. انجام این کار کف کوره را همانطورکه در **شکل4** نشان داده از لحاظ الکتریکی از بقیه پوسته کوره مجزا (ایزوله) می‌کند.

کف کروی کوره از فولاد دما بالا ساخته شده است. یک صفحه مسی دایره‌ای مستقیماً به قسمت پایین کوره پیچ شده است. چهار ترمینال مسی از پایین کوره از صفحه مسی به پایین امتداد می‌یابند و به کابل‌های انعطاف‌پذیری متصل می‌شوند که به نوبه خود به لوله‌های جریان (باس تیوب) وصل شده‌اند. آجرهای نسوز رسانا در بالای صفحه مسی نصب گردیده‌اند. جریان حرارت از کف کوره (معمولاً حدود 15 kW/sq m) با هوای خنک‌کننده اجباری برطرف می شود. به دلیل مساحت بزرگ الکترود پایین، چگالی جریان تمایل دارد بسیار کم، به طور معمول حدود 5 kA/sq m باشد. اما، در بعضی از کوره‌ها از مواد وصله‌کاری غیر رسانا در مرکز کوره به منظور اجبار جریان به توزیع یکنواخت‌تر در کل کف کوره استفاده می‌شود. در صورت عدم دستیابی به توزیع مناسب جریان، آنگاه به نقاط داغ در مرکز کوره منجر می‌شود.



شکل 4– الکترود نسوز رسانای کف کوره.

پیکربندی بیلت الکترود برگشتی از 1 تا 4 بیلت بزرگ فولادی به قطر حدود 100 mm تا 150 mm استفاده می‌کند اما بسته به اندازه EAF می‌تواند به بزرگی قطر 250 mm هم باشد. به طور معمول، هدف طراحی برای جریان الکترود 40 تا 50 kA می‌باشد. بیلت‌ها در سطح بالا در تماس با حمام بوده و از این رو، ذوب می‌شوند. درجه‌ای که در آن بیلت‌ها ذوب می‌شوند توسط خنک‌کاری با آب کنترل می‌شود. بیلت در یک محفظه مسی که از طریق آن آب خنک‌کاری گردش می‌کند وارد شده است. با تامین خنک‌کاری کافی می‌توان اطمینان حاصل کرد که بیلت به طور کامل ذوب نمی‌شود. ترموکوپل‌ها دمای بیلت پائین کوره و دمای آب خنک‌کننده را پایش می‌کنند.

یک غلاف عایق‌کننده، محفظه مسی را از بیلت جدا می‌کند. بیلت به یک پایه مسی متصل شده است. پایه مسی اتصال به کابل برق را فراهم می‌کند. چیدمان معمولی یک آند بیلت در **شکل5** نشان داده شده است.

نوع پین الکترود برگشتی از پین‌های چند فلزی به قطر 25 تا 50 mm برای تامین مسیر برگشت جریان الکتریکی استفاده می‌کند. این پین‌ها به صورت عمودی پیکربندی شده و در واقع در داخل نسوز رسوخ می‌کنند. پین‌ها تا پایین کوره جایی که توسط دو صفحه فلزی تثبیت شده‌اند امتداد دارند. انتهای پایینی پین‌ها به صفحه رسانای برق پایین تر محکم شده‌اند. صفحه تماس پایین با هوا خنک شده و در مرکز پائین کوره قرار دارد. قسمت‌های بالای پین‌ها با لایه نسوز کاری موجود در کوره همسطح می‌شوند. پین‌ها در تماس مستقیم با حمام هستند و چنانچه لایه نسوز کاری فرسوده و از بین بروند، ذوب می‌شوند. یک کابل برق برگشت به صفحه هادی پایین وصل شده است.

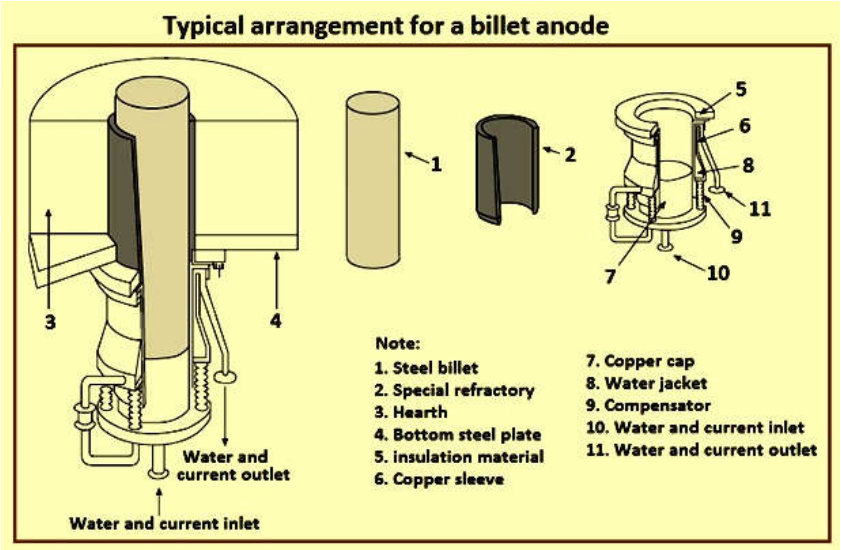
برای ردیابی فرسودگی آستر نسوز و عمر الکترود پایین، یک سیستم گسترده پایش دما تامین می‌شود. این سیستم امکان تعویض برنامه‌ریزی شده الکترود پایین را فراهم می‌کند. طراحی کشوئی (کارتریج) یکپارچه که تکامل یافته است امکان تعویض سریع الکترود پایین را در طی توقف 8 ساعته برنامه‌ریزی شده تعمیرونگهداری فراهم می‌آورد.

الکترود برگشتی فین فولادی از فین‌های فولادی چیده شده در یک حلقه در قسمت پایین کوره برای تشکیل چند بخش استفاده می‌کند. هر بخش متشکل از یک صفحه پایه افقی و چند فین فولادی جوش داده شده بر روی آن است که از نسوز به سمت بالا بیرون می‌زند. فینها به ضخامت حدود 1.6 mm و در فاصله تقریبا 90 mm از هم قرار دارند. بخش‌ها روی پوسته پائین خنک‌شونده با هوا که از لحاظ الکتریکی از زمین عایق‌بندی شده و به 4 عدد رسانای مس وصل می‌شوند، پیچ می‌گردند.

بیشتر DC-EAF ها با قوس‌های بلند کار می‌کنند، معمولاً 2 تا 3 برابر مواردی که در عملیات کوره UHP معمولی برخورد می‌شود. در نتیجه، DC-EAF سرعت جریان آب بیشتری برای پانل‌های خنک‌کننده با آب دارد.

پوشش نسوز برای DC-EAF

طراحی نسوز کوره DC باید با توجه به شرایط سخت‌تری که در آن کار می‌کنند انجام شود. کوره‌های قوس الکتریکی DC به دلیل اینکه آند در پائین کوره نصب شده، دارای نسوزهای ویژه‌ای در قسمت پایین هستند. علاوه بر مواد نسوز پائین کوره، سایر نقاط مهمی که باید برای طراحی پوشش نسوز در نظر گرفته شود عبارتند از: الگوی منطقه‌بندی نسوز، بستر مذاب کوره، محل خط سرباره، اندازه مجرای تخلیه کوره، زاویه و موقعیت، جهت سقف، اضافه مجاز انبساط، محل قرارگیری درگاه مشعل، ساخت و ساز دریچه سرباره و اجزای همزنی با گاز از کف کوره.



شکل 5- چیدمان معمول یک آند بیلتی.

DC-EAF از آنجا که الکترود برگشتی معمولاً در کف کوره نصب می‌شود از الزامات نسوز ویژه‌ای برخوردار است (برخی از DC-EAF ها از چیدمان جایگزین با دو الکترود گرافیتی استفاده می‌کنند). در مورد کف کوره رسانای جریان، پوشش نسوز در مرکز پایین کوره به عنوان آند عمل می‌کند. یک صفحه مسی معمولاً زیر نسوز رسانا وصل می‌شود و میله جریان (باس بار) مس برگشتی به صفحه متصل می‌گردد. در این حالت الزامات ویژه برای نسوز مقاومت الکتریکی کم (ترجیحاً کمتر از 0.5 میلی اهم در متر)، هدایت حرارتی کم و مقاومت در برابر سایش زیاد می‌باشند.

در یک پیکربندی معمول از یک پوشش کاری به ضخامت 150 mm متشکل از مخلوط‌های منیزیا با اتصال کربنی حاوی 5 تا 10 درصد کربن استفاده می‌شود. این مواد می‌توانند به صورت گرم یا سرد نصب شوند. در زیر پوشش کاری سه لایه آجر منیزیا کربنی نصب می‌شود. مقدار کربن باقیمانده آجرها در بازه‌ای از 10 تا 14 درصد می‌باشد. با تعمیرونگهداری منظم، این پیکربندی الکترود پایینی به عمر کف کوره تا 4000 ذوب رسیده است.

در پیکربندی بیلت الکترود برگشتی بسته به اندازه کوره از 1 تا 4 بیلت بزرگ فولادی (قطر حدود 250 mm) استفاده می‌شود. بیلتها در نسوز کف تعبیه می‌گردند. بیلت‌ها با آجر نسوز بازی احاطه شده‌اند. باقیمانده بستر کوره با مخلوط منیزیای کوبیدنی مخصوص کوبیده می‌شود. برای حفظ ناحیه آجری اطراف الکترود از مخلوط منیزیای کوبیدنی استفاده می‌شود. این پیکربندی الکترود برگشتی به عمر بیش از 1500 ذوب در کف کوره رسیده است.

نوع پین الکترود برگشتی از پین‌های چندفلزی به قطر 25 تا 50 mm استفاده می‌کند تا مسیر برگشت جریان الکتریکی را فراهم کند. این پینها در واقع تا پایین کوره در نسوز نفوذ می‌کنند که در آنجا به یک صفحه فلزی متصل می‌شوند. مخلوط منیزیای کوبیدنی خشک برای کل پوشش بستر کوره استفاده می‌شود. این مخلوط بین پین‌های فلزی کوبیده می‌شود. به صورت متناوب می‌توان از آجر منیزیا کربنی در ناحیه اطراف آند استفاده کرد. این کار به بهبود عمر پایین کوره کمک می‌کند اما گرانتر است. در این مورد دامنه طول عمر معمول پایین کوره از 2000 تا 4000 ذوب بسته به مواد نسوز مورد استفاده شده است.

الکترود برگشتی فین فولادی از فین‌های فولادی چیده شده در یک حلقه در قسمت پایین کوره برای تشکیل چند بخش مختلفی استفاده می‌کند. هر بخش متشکل از یک صفحه پایه افقی و چند فین فولادی جوش داده شده است که از بین مواد نسوز به سمت بالا بیرون می‌زند. از مخلوط منیزیای کوبیدنی خشک بین فینها استفاده می‌شود. بستر کوره نیز با این مواد پوشش می-گردد.

ملاحظات الکتریکی برای DC-EAF

برای دستیابی به حداکثر بازدهی کوره، باید کنترل توان کوره بهینه‌سازی شود تا از حداکثر توان ورودی در تمام مراحل فرآیند ذوب کردن و در طی تغییرات در مواد شارژ اطمینان حاصل کرد. در عین حال، باید همیشه حداقل اختلال در شبکه تضمین شود. یوتیلیتی باید خیالش از کیفیت برق آسوده باشد.

منبع تغذیه DC– برق زیاد مورد نیاز از یک شبکه AC سه فاز ولتاژ بالا تأمین می‌شود. این برق AC توسط یکسوکردن خروجی ترانسفورمر کوره به DC تبدیل می‌گردد. یکسوکردن توسط تریستورهای متصل به پل حاصل می‌شود. به طور معمول از منابع تغذیه 12، 18 یا 24 پالس در کوره‌های قوس الکتریکی استفاده می‌شود که توسط ترانسفورمرهای چندگانه موازی که به صورت الکتریکی یکی جایگزین دیگری می‌شود به طوری که پالس‌های فردی آنها به طور یکنواخت با هم همپوشانی می‌کنند. این جایگزینی الکتریکی، 15 درجه، 10 درجه یا 7.5 درجه، مطابق با سیستم‌های 12، 18 یا 24 پالسی، توسط اتصالات مختلف سیم پیچ درون ترانسفورمر ایجاد می‌شود. به همین دلیل ترانسفورمرهای مورد استفاده برای DC-EAF با ترانسفورمرهای AC-EAF کاملاً متفاوت می‌باشند و به طور کلی برای عملیات کوره AC نامناسب هستند.

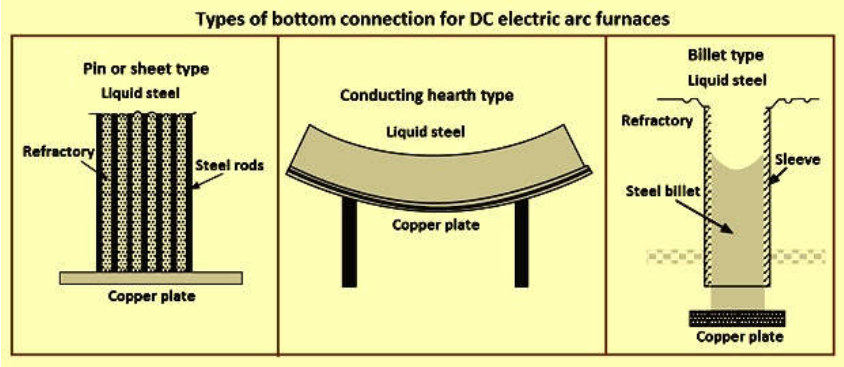
مشخصه ولت/آمپر منبع تغذیه DC متشکل از افت ضعیف کاهش ولتاژ DC با افزایش جریان DC است. شیب این خط در حد 1 ولت بر kA است و توسط راکتانس جابجاکنندگی ترانسفورمر/یکسوکننده، و نه توسط کوره قوس تعیین می‌شود. بنابراین برای محدود کردن انحرافات (excursions) گسترده جریان به دلیل ولتاژهای بسیار متفاوت قوس، ترجیحا از تریستورها نسبت به دیودها استفاده می‌شوند. رسانایی فوری پس از جریان صفر (تاخیر زاویه آتش) تحت کنترل گیت ترمینال است. اصولاً هر تریستور می‌تواند در عرض نیم سیکل خاموش شود. حتی در این صورت، در چند میلی ثانیه تاخیر بین تغییر ولتاژ قوس (برای مثال اتصال کوتاه) و کنترل تریستورها، جریان‌ها می‌توانند به طور قابل‌توجهی افزایش یابند. برای کاهش سرعت بالا رفتن جریان افزودن یک راکتور در حلقه جریان DC عادی است، راکتانس عادی حلقه DC جریان بالا ناکافی است.

این راکتورها اندازه‌ای دارند تا از اندوکتانس در محدوده 100 تا 400 میکرو–هنری برخوردار باشند. از آنجا که آنها جریان DC کامل را به خود اختصاص می‌دهند، تلفات اهمی قابل‌توجه هستند و فقط با استفاده از یک بخش مناسب از مس یا آلومینیوم که کویل‌ها را تشکیل می‌دهد، می‌توانند در محدوده قابل‌قبولی حفظ شوند. تریستورها هر کدام توانایی کنترل چند kA اندک و چند kV اندک قطبیت معکوس را دارند. چیدمان تریستورهای متصل شده سری و موازی، هر پایه را تشکیل می‌دهند. فیوزها و مقاومت‌های متعادل‌کننده ولتاژ به عنوان اقدامات محافظتی استفاده می‌شوند. خنک‌کاری تحت تأثیر آب یونیزه شده است.

مشخصات الکتریکی DC-EAF – کنترل تریستورها معمولاً برای ثابت نگه داشتن جریان انتخاب می‌شود. بنابراین جریان AC قبل از یکسوکننده نیز مانند جریان اولیه ثابت است. با توجه به قدرت در AC اولیه، مشاهده می‌شود که جریان ثابت به معنی MVA ثابت است. از این رو مشخصه MW به صورت تابعی از MVAR یک ربع دایره است که برای آن (مربع MW) + (مربع MVAR) = (مربع MVA) = ثابت. به طور معمول شیب خط ولت/آمپر خطی است و به طور معمول 100 V در 100 kA کاهش می‌یابد. بنابراین در 10 kV، برای مثال، کنترل تریستورها می‌تواند جریان را در کل محدوده ولتاژ قوس از حدود 900 V به پایین تا اتصال کوتاه با تغییر زاویه آتش ثابت نگه دارد.

اتصالات پایین- برای کار با یک قوس DC تنها لازم است یک اتصال الکتریکی (آند مثبت) با شارژ فولادی برقرار شود. راه‌حل-های مختلفی برای این مسئله ارائه شده‌اند. چند نوع اندک اتصال پایین برای DC-EAF در **شکل 6** نشان داده شده‌اند.

در یک نوع، جریان آند در میان تعداد زیادی میله فولادی جاسازی شده در یک بلوک نسوز کوبیده شده تقسیم می‌شود. میله‌ها با قطر حدود 25mm می‌توانند یک متر طول داشته باشند و توسط یک صفحه مسی در زیر پوسته کوره به هم متصل می‌شوند. کل بلوک آند می‌تواند اندازه قطر 1 تا 2 m را داشته باشد. یک تغییر در نوع پین استفاده از ورق‌های فولادی نازک است که مجددا در نسوز تعبیه می‌شوند. یکی دیگر از تغییرات، استفاده از بیلت فولادی به قطر 250mm است که از یک غلاف عایق شده عبور می‌کند و منتج به اتصال مسی سرد شده در زیر پوسته کوره می‌شود. در هر سه این طرحها (پین، ورق یا بیلت) قسمت بالای رسانای فولادی در طی مسیر ذوب، ذوب می‌شود. در هنگام خاموش شدن (پاور-آف) و پس از شارژ قراضه دوباره منجمد می‌شود.



شکل 6- انواع اتصالات پایین.

یک جایگزین برای طرح‌های جریان از فولاد به فولاد، موردی است که در آن جریان از طریق نسوزهای رسانا به قطر بزرگ، صفحه مسی پائین کوره گرفته می‌شود. در تمام انواع اتصال پایین عایق بین اتصال آند و پوسته کوره وجود دارد. این امر به منظور کاهش احتمال عبور جریان از طریق پوسته به طور مستقیم به میله‌های باس آند است.

کیفیت برق نگرانی اصلی سیستم منبع تغذیه در یک واحد EAF است. رعایت فلیکر، ضریب توان و محدودیت‌های هارمونیک ضروری است. یک الگوریتم کنترل الکترود موثر باعث کاهش سوئیچینگ ترانسفورمر و تعیین اندازه صحیح راکتور DC و فیلترهای هارمونیک برای پاسخگویی به الزامات یوتیلیتی شد. علاوه بر این، کاهش اختیاری فلیکر فعال و تصحیح ضریب توان مداوم از طریق یک جبران‌کننده استاتیک Var (SVC) برای تضمین سازگاری با سخت‌ترین تقاضا های یوتیلیتی و/یا امکان کار در مناطق دورافتاده با شرایط شبکه ضعیف مورد نیاز است.

فلیکر عمدتا ناشی از نوسانات توان راکتیو است. از این رو، یک پیوند سریع به جلو که اطلاعات را از کنترل یکسوکننده به کنترل SVC ارسال کند، امکان محاسبه میزان مصرف واقعی توان راکتیو کوره را می‌دهد. از این اطلاعات برای بهبود عملکرد کاهش دهنده فلیکر استفاده می‌شود. نتیجه استفاده از سیستم SVC عبارتند از: (i) متوسط ورودی توان بیشتر در مقایسه با جبران Var معمولی، (ii) تصحیح پیوسته ضریب توان نزدیک به یک، (iii) کنترل ولتاژ باس کوره، (iv) بدون بار نامتعادل در شبکه، و (v) میزان فلیکر و هارمونیک پایین حتی در شبکه‌های ضعیف.

تثبیت‌کننده قوس برای بهره‌وری بالاتر ضروری است. یک فرآیند پایدار برای عملیات بهره‌ور ضروری است. استفاده از یک طرح راکتور بهینه DC (تلفات کم) برای هموار کردن جریان الکترود به یک قوس پایدار کمک می‌کند تا در همه زمان‌ها حفظ شود. نتیجه این است: (i) فشار کمتر بر سیستم هیدرولیک الکترود، (ii) لرزش کمتر، (iii) مصرف الکترود کمتر، (iv) بهره‌وری بالاتر، (v) کاهش فلیکر حتی بیشتر، و (vi) اتلاف تابش کمتر.

در مورد DC-EAF، تریستورها دو ترمینال مسی دارند که یکی از آنها به کابل برق EAF و دیگری به الکترود پایین کوره متصل شده‌اند. الکترود پایین کوره معمولاً صلب است، زیرا هنگام کار با کوره نیازی به حرکت ندارد. در اصل، ترمینال در تریستورها

مشابه بستن دلتا است، هرچند از نظر فیزیکی، تفاوت‌های چشمگیری دارد. اما، از لحاظ مسائل تعمیرونگهداری برای بستن دلتا، می‌توان همان مفاهیم را برای عملکرد DC به کار برد.

عملیات DC-EAF

پیشرفت در تکنولوژی سوئیچینگ نیمه هادی قدرت بالا، منبع تغذیه DC کارآمد کم هزینه موجود را به ارمغان آورده است. به دلیل این پیشرفت‌ها، عملیات کوره DC با توان بالا امکان‌پذیر شد. DC-EAF با یکسوکننده سه فاز ولتاژ ترانسفورمر کوره توسط یکسوکننده های کنترل شده با تریستورها مشخص می‌شود. این دستگاه‌ها قادر به تنظیم و کنترل پیوسته میزان جریان قوس DC برای دستیابی به عملیات پایدار هستند. کوره‌های DC تنها از یک الکترود گرافیتی با الکترود برگشتی بکار رفته در کف کوره استفاده می‌کنند. انواع مختلفی از الکترودهای رسانا کف کوره، پین رسانای کف، یک یا چند بیلت و فین‌های رسانا در بستر منیزیتی یکپارچه کوره وجود دارد.

تمام این طرح‌های الکترود برگشتی پایین اثبات شده‌اند. مواردی که به نظر می‌رسد بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، پین رسانای کف است که در آن تعدادی پین به یک صفحه وصل شده و مسیر برگشت را تشکیل می‌دهند و طرح بیلت پایین. الکترود پایین در صورت نوع پین با هوا خنک می‌شود و در صورت طراحی بیلت با آب خنک می‌شود. ناحیه بین پین‌ها با جرم کوبیدنی پر می‌شود و نوک پین‌ها هم سطح پوشش [نسوز] داخلی کوره است. با فرسایش نسوز، پینها نیز ذوب می‌شوند.

DC-EAF ها برای اطمینان از مسیر الکتریکی به الکترود برگشتی با پاشنه مذاب (هات هیل) کار می‌کنند. در هنگام راه‌اندازی از شرایط سرد، مخلوطی از قراضه و سرباره برای تامین مسیر الکتریکی اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از ذوب شدن آن، می‌توان کوره را با قراضه شارژ کرد.

برخی از مزایای اولیه حاصل از کار با DC عبارت بودند از: کاهش مصرف الکترود (20 درصد کمتر از کوره AC ولتاژ بالا، 50 درصد کمتر از AC معمولی)، کاهش فلیکر ولتاژ (50 تا 60 درصد نسبت به عملیات AC معمولی) و کاهش مصرف برق (5 تا 10 درصد کمتر از AC). نتایج فوق عمدتا در کوره‌های کوچکتر که از عملیات AC به DC بهسازی شده‌اند حاصل گردیده‌اند. اما، برخی از تاسیسات بزرگتر کوره DC بلافاصله به مزایای ادعا شده دست نیافتند. به خصوص، دو زمینه بروز کردند یعنی: (i) مصرف الکترود، و (ii) مصرف نسوز.

در چند عملیات کوره DC مشخص شد که تحت عملیات DC کاهش مورد انتظار در مصرف الکترود رخ نداد. تجزیه و تحلیل زیاد تولیدکنندگان الکترود نشان داد که شرایط فیزیکی درون الکترودها برای عملیات AC و DC متفاوت است. در نتیجه، برای الکترودهای بزرگ DC که جریان بسیار بزرگی را منتقل می‌کنند، مقادیر بیشتری ترک خوردن و خرد شدن سطحی نسبت به عملیات AC مشاهده شده است. از این رو، لزوم توسعه الکترودهایی با خواص فیزیکی مناسبتر برای عملیات DC به وجود آمده است.

بیشترین اندازه اقتصادی کوره‌های DC به دلیل اندازه الکترود و ظرفیت انتقال جریان، تابعی از محدودیت‌ها است. در حال حاضر حداکثر اندازه اقتصادی برای یک کوره DC تک الکترود گرافیکی حدود 165 تن به نظر می‌رسد. اندازه‌های بزرگتر کوره را می‌توان با استفاده از بیش از یک الکترود گرافیتی تطبیق داد.

چندین مورد از عملیات اولیه DC با مشکل فرسایش نسوز و عمر الکترود پایین روبرو شده‌اند. این مشکلات به طور مستقیم با وزش قوس در داخل کوره مرتبط هستند. طرح آند بیشترین تأثیر را در وزش قوس دارد. در تمام کوره‌های DC، قوس الکتریکی به دلیل عدم تقارن در میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده توسط مدار DC، در جهت خلاف منبع تغذیه منحرف می‌شود. بنابراین قوس تمایل دارد تا در یک منطقه درون کوره متمرکز شود و یک نقطه داغ (هات اسپات) ایجاد کند که به فرسایش اضافی نسوز منجر

می‌شود. چند راه‌حل برای کنترل یا حذف وزش قوس ایجاد شده است. در حال حاضر کلیه طرح‌های الکترود پایینی برای راندن قوس به مرکز کوره چیده شده‌اند.

در مورد نسوز رسانای پایین و نوع پین پایین، لازم است خطوط تغذیه تقسیم شده به آند پایین یا سیم پیچ (کویل) پایین تهیه شوند که به اصلاح میدان مغناطیسی خالص ایجاد شده کمک می‌کنند. در طرح بیلت پایین مقدار جریان هر بیلت در امتداد جهت آند تغذیه کنترل می‌شود تا بتوان قوس را کنترل کرد. طرح فین‌های پایین از این واقعیت استفاده می‌کند که تغذیه برقی در چند نقطه برای کنترل انحراف قوس انجام می‌شود. ربع‌های واقع در مکان‌های دورتر از یکسوکننده با جریان بالاتر از موارد نزدیکتر به یکسوکننده تغذیه می‌شوند.

برخی احساس می‌کنند که امکان افزایش اتوماسیون فعالیت‌های EAF برای کوره DC بیشتر است. دلیلش این است که تنها با یک الکترود، فضا هم در بالا و هم داخل کوره افزایش یافته است. انتظار می‌رود کوره DC از 10 تا 35 درصد گرانتر از کوره AC قابل‌مقایسه باشد. اما، محاسبات مربوط به برگشت سرمایه نشان می‌دهد که این هزینه اضافی به دلیل کاهش هزینه‌های عملیاتی طی یک یا دو سال قابل‌بازیابی است.

مطالعه‌ای انجام شده که عملیات کوره‌های AC و DC را با یکدیگر مقایسه کرده و مشخص شده است که تلفات الکتریکی در عملیات AC حدود 4 درصد و در عملیات DC حدود 5.5 درصد با تفاوت در شرایط مطلق نسبتاً ناچیز است. احتمالاً اختلاف مصرف کل انرژی بین کوره‌های AC و DC کمتر از 9 kWh/ton به نفع کوره DC است. اما، بسیاری از متغیرهای دیگر بر مصرف انرژی تأثیر می‌گذارند و تهیه رقم‌های دقیق دشوار است.

کوره‌های DC تقریباً 25 درصد کمتر از الکترود مصرفی نسبت به کوره‌های متناوب را نشان می‌دهند که به طور معمول با 0.4 kg/ton همبستگی دارد. به نظر می‌رسد که این تفاوت برای کوره‌های کوچکتر AC بیشتر است. فلیکر برای عملیات DC حدود 60 درصد کمتر است، اما، پیشرفت در پیکربندی‌های سیستم برق AC (راکتانس اضافی) این تفاوت را به 40 درصد کاهش داده است.

برخی از نتایج معمول که برای عملیات DC-EAF بزرگ ارائه شده‌اند عبارتند از: مصرف الکترود از 1 تا 2 kg/ton فولاد مذاب، مصرف برق در محدوده 350 تا 500 kWh/ton فولاد مذاب، زمان ذوب تا ذوب در محدوده از 45 تا 120 دقیقه و عمر کف کوره 1500 تا 4000 ذوب. اما، یادآوری این نکته حائز اهمیت است که مصرف برق بسیار وابسته به روش‌های عملیاتی، دمای تخلیه، استفاده از سوخت‌های کمکی، نوع قراضه شارژ شده و غیره است.