

بررسی اتصالات الکتریکی در سیستم‌های قدرت

ترجمه و تألیف :

فرهاد یزدی

سید محمد هاشمی

مرتضی بهادری

بررسی اتصالات الکتریکی در سیستم‌های قدرت
یزدی، فرهاد، ۱۳۵۴، مولف و مترجم
بررسی اتصالات الکتریکی در سیستم‌های قدرت / تالیف فرهاد یزدی، سید محمد هاشمی، مرتضی بهادری
تهران، فرهنگ دانشجو، ۱۳۹۰
۲۵۶ ص: تصویر، جدول
شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۴۷۹-۵۹-۱
موضوع: اتصالات برقی
شماره کتاب شناسی ملی: ۲۴۰۷۷۳۲

انتشارات فرهنگ دانشجو

عنوان: بررسی اتصالات الکتریکی در سیستم‌های قدرت
مؤلفین: فرهاد یزدی، سید محمد هاشمی، مرتضی بهادری
ویراستار: محمد یزدی
ناشر: فرهنگ دانشجو
طرح جلد: فرزاد
صفحه آرابی: فرهنگ دانشجو
چاپ و صحافی: سپهر (وابسته به انتشارات امیرکبیر)
نوبت چاپ: اول / ۱۳۹۰
شمارگان: ۲۰۰۰ جلد
بها: ۸۰۰۰۰ تومان

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

انتشارات فرهنگ دانشجو: خیابان انقلاب، خیابان بهار جنوبی، برج بهار، طبقه ۵، واحد ۵۹۹

تلفن: ۷۷۶۱۶۳۵۱ فاکس: ۷۷۶۱۶۴۸۲

ISBN: 978-964-8479-59-1

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۴۷۹-۵۹-۱

فهرست مندرجات

پیشگفتار	۱۱
فصل اول : مقدمه‌ای بر اتصالات الکتریکی	۱۳
۱-۱- مقدمه	۱۳
۲-۱- بررسی برخی ویژگی‌های مهم اتصالات الکتریکی	۱۷
۳-۱- روابط حاکم بر مقاومت سطح اتصال	۱۸
فصل دوم : فلزات (عناصر و آلیاژهای) مورد استفاده در ساخت اتصالات الکتریکی	۲۴
۱-۲- خواص مواد مورد استفاده در ساخت اتصالات الکتریکی	۲۳
۱-۱-۲- مس	۲۴
آلیاژ مس - نقره (Cu-Ag)	۳۰
آلیاژ مس - بریلیوم (Cu-Be)	۳۰
آلیاژ مس - کادمیوم (Cu-Cd)	۳۱
آلیاژ مس - کادمیوم - قلع (Cu-Cd-Sn)	۳۱
آلیاژ مس - کروم (Cu-Cr)	۳۱
آلیاژ مس - تلوریوم (Cu-Te)	۳۱
آلیاژ مس - زیرکونیوم (Cu-Zr)	۳۲
آلیاژ برنز (Cu-Sn)	۳۲
آلیاژ برنج (Cu-Zn)	۳۳
۲-۱-۲- آلومینیوم	۳۳
۳-۱-۲- نقره	۳۶
آلیاژ نقره - پالادیوم (Ag-Pd)	۳۸
آلیاژ نقره - مس (Ag-Cu)	۳۸
آلیاژ نقره - نیکل (Ag-Ni)	۳۹

..... ٤٠	آلیاژ نقره - کادمیوم (Ag-Cd)
..... ٤٠	آلیاژ نقره - لیتیوم - لانتانوم (Ag-Li-La)
..... ٤٠	آلیاژ نقره - پلاتین (Ag-Pt)
..... ٤١	٢-١-٤ - پلاتین
..... ٤٢	آلیاژ پلاتین-ایریدیوم (Pt-Ir)
..... ٤٢	آلیاژ پلاتین-روتینیوم (Pt-Ru)
..... ٤٢	آلیاژ پلاتین-نیکل (Pt-Ni)
..... ٤٣	آلیاژ پلاتین-تنگستن (Pt-W) و پلاتین-مولیبدن (Pt-Mo)
..... ٤٣	٢-١-٥ - پالادیوم
..... ٤٤	آلیاژ پالادیوم-ایریدیوم (Pd-Ir)
..... ٤٤	آلیاژ پالادیوم-مس (Pd-Cu)
..... ٤٤	٢-١-٦ - طلا
..... ٤٥	آلیاژ طلا-نقره (Au-Ag)
..... ٤٥	آلیاژ طلا-پلاتین-نیکل (Au-Ag)
..... ٤٦	٢-١-٧ - رودیوم
..... ٤٦	٢-١-٨ - تنگستن یا ولفرام
..... ٤٦	٢-١-٩ - نیکل
..... ٤٨	آلیاژ اینوار یا آهن-نیکل (Fe-Ni)
..... ٤٨	٢-١-١٠ - آلیاژهای حافظه‌دار
..... ٥٠	٢-٢ - پوشش کردن اتصالات الکتریکی
..... ٥١	٢-٢-١ - پوشش نمودن اتصالات مورد استفاده در سیستم‌های قدرت
..... ٥٤	٢-٢-٢ - پوشش نمودن اتصالات مورد استفاده در صنایع الکترونیک
..... ٥٥	٣ - آینده اتصالات الکتریکی
..... ٥٧	فصل سوم : بررسی قابلیت اطمینان در اتصالات الکتریکی
..... ٥٧	٣-١ - مقدمه
..... ٦٠	٣-٢ - بهبود قابلیت اطمینان در اتصالات الکتریکی
..... ٦٣	٣-٣ - مکانیزمهای کاهش کیفیت اتصال

۶۵	..... اکسیداسیون ۱-۳-۳
۷۰	..... خوردگی ۲-۳-۳
۷۴	..... پدیده فرتینگ ۳-۳-۳
۸۲	..... پدیده اینترمتالیک ۴-۳-۳
۸۴	..... خزش ۵-۳-۳
۸۶	..... انبساط حرارتی ۶-۳-۳
۸۷	..... بررسی جنبه‌های مختلف اتصالات الکتریکی ۴-۳-۳
۸۸	..... قابلیت اطمینان ۱-۴-۳
۹۰	..... تلفات انرژی ۲-۴-۳
۹۳	..... تلفات انرژی ۳-۴-۳
۹۷	فصل چهارم : بررسی اتصالات الکتریکی مورد استفاده در سیستم‌های قدرت
۹۷	..... مقدمه ۱-۴
۹۹	..... بررسی ویژگی‌های تکنولوژیکی و عوامل کاهش کیفیت در اتصالات الکتریکی ۲-۴
۹۹	..... اتصالات پیچ و مهره‌ای ۱-۲-۴
۱۰۶	..... پدیده فرتینگ در اتصالات پیچ و مهره‌ای ۱-۲-۴
۱۰۹	..... بررسی ویژه پدیده فرتینگ در اتصالات پیچ و مهره‌ای آلومینیومی ۲-۱-۲-۴
۱۱۲	..... پدیده اینترمتالیک در اتصالات پیچ و مهره‌ای ۳-۱-۲-۴
۱۱۵	..... پدیده خزش در اتصالات پیچ و مهره‌ای ۴-۱-۲-۴
۱۱۶	..... اتصالات کاردی (چاقویی) ۲-۲-۴
۱۱۹	..... اتصالات پرسی ۳-۲-۴
۱۲۲	..... بررسی عوامل کاهش کیفیت در اتصالات پرسی ۱-۳-۲-۴
۱۲۴	..... خوردگی ۱-۱-۳-۲-۴
۱۲۷	..... پدیده فرتینگ ۲-۱-۳-۲-۴
۱۲۷	..... اتصالات مکانیکی ۴-۲-۴
۱۲۸	..... اتصالات ترمینالی ۱-۴-۲-۴
۱۲۹	..... اتصالات گوه‌ای ۲-۴-۲-۴
۱۳۰	..... اتصالات انشعاب‌گیری از کابل خودنگهدار (و هادیهای روکش دار) ۳-۴-۲-۴

۱۳۲	۲-۴-۵-اتصالات جوشی
۱۳۲	۲-۴-۵-۱- جوش ترمیک (اگزوترمیک)
۱۳۵	۲-۴-۵-۲- جوش اصطکاکی
۱۳۶	۴-۳-بررسی ملاحظات طراحی، ابزارها و روشهای مؤثر بر بهبود شرایط اتصال
۱۳۶	۴-۳-۱- طراحی سطح اتصال
۱۴۱	۴-۳-۲- طراحی فشار اتصال
۱۴۲	۴-۳-۳- طراحی سطح اتصال
۱۴۴	۴-۳-۴- نقش آرایش اتصال در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۰	۴-۳-۵- نقش سفت کردن دوره ای اتصال در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۰	۴-۳-۶- نقش صفحات میانی بی‌متال در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۱	۴-۳-۷- نقش ترانزیشن و اشرها در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۲	۴-۳-۸- نقش و اشرها کرکره‌ای در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۳	۴-۳-۹- نقش آلیاژهای حافظه‌دار در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۴	۴-۳-۱۰- نقش اتصالات خود تعمیر در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۴	۴-۳-۱۱- نقش کنتاکت شورها و روغن‌های اتصال در بهبود کیفیت اتصال
۱۵۸	۴-۴- نصب اتصالات الکتریکی
۱۶۱	فصل پنجم : روغن‌کاری اتصالات الکتریکی
۱۶۱	۵-۱- مقدمه
۱۶۴	۵-۲- بررسی اثرات روغن‌کاری اتصالات الکتریکی
۱۶۵	۵-۳- انواع روغن‌های اتصال
۱۶۶	۵-۳- ویژگی‌های روغن‌های اتصال
۱۶۸	۵-۳-۱- تأثیر نیروی اتصال بر مقاومت اتصالات روغن‌کاری شده
۱۶۸	۵-۳-۲- تأثیر ضخامت لایه روغن بر میزان اصطکاک و هدایت الکتریکی اتصال
۱۷۱	۵-۳-۳- نقش ولتاژ اعمال شده به اتصال در کاهش مقاومت اتصال
۱۷۲	۵-۳-۴- تأثیر دما بر عمر روغن اتصال
۱۷۵	۵-۴- عمر و دوره روغن‌کاری اتصالات الکتریکی
۱۷۷	۵-۵- تغییرات مقاومت الکتریکی روغن با افزایش تعداد عملکردهای اتصالات

۱۷۸	۶-۵-طبقه‌بندی روغن‌کاری بر اساس نوع ارتباط با محیط بیرونی.....
۱۸۰	۷-۵-اثر چگالی جریان بر ضریب اصطکاک اتصال
۱۸۱	۸-۵-انتخاب روغن اتصال مناسب
۱۸۳	۱-۸-۵-انتخاب بین روغن و گریس.....
۱۸۴	۲-۸-۵-انتخاب بین روغن‌های ترکیبی (مصنوعی) روغن‌های طبیعی (مشتقات نفتی)
۱۸۶	۳-۸-۵-انتخاب مواد افزودنی روغن‌ها
۱۸۸	۴-۸-۵-انتخاب روغن در کنتاکت‌های متحرک در معرض قوس الکتریکی
۱۸۹	۵-۸-۵-انتخاب روغن در سوئیچ‌گیرهای انتقال و توزیع برق.....
۱۹۶	۹-۵-ایندکس ماتریال روغن‌های مورد استفاده در سیستم‌های قدرت.....
۱۹۹	فصل ششم : مونیتورینگ (نظارت بر) اتصالات الکتریکی.....
۱۹۹	۱-۶- مقدمه.....
۲۰۱	۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ حرارتی
۲۰۳	۱-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ حرارتی تصویری مبتنی بر مادون قرمز.....
۲۰۵	۱-۱-۲-۶- مشخصات و ساختمان دوربینهای ترموویژن.....
۲۰۹	۲-۱-۲-۶- اصول عملکرد دوربینهای ترموویژن
۲۱۲	۲-۲- سیستم‌های مونیتورینگ حرارتی نقطه ای
۲۱۴	۳-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ حرارتی مبتنی بر آلیاژهای حافظه‌دار
۲۱۶	۴-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ حرارتی از نوع برجسبهای حرارتی
۲۱۷	۵-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ حرارتی مبتنی بر رنگ‌های پلیمری
۲۲۰	۶-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ حرارتی مبتنی بر سنسورها و سیستم‌های مخابراتی
۲۲۱	۷-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ اتصال مبتنی بر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی
۲۲۶	۷-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ مبتنی بر اندازه‌گیری فشار اتصال
۲۲۷	۸-۲-۶- سیستم‌های مونیتورینگ مبتنی بر اندازه‌گیری شدت امواج آلتراسونیک
۲۲۸	۳-۶- مجتمع سازی سیستم‌های مونیتورینگ اتصالات در سیستم تله‌متری پستها

انسان پیشرفته توانایی آن را دارد که برای جلوگیری از درهم پاشیده شدن و به منظور تطبیق با شرایط موجود، جهان بینی‌اش را مداوماً بهبود بخشد.

Myron Weiner

"اتصالات الکتریکی" بحرانی‌ترین و آسیب‌پذیرترین جزء مدارهای الکتریکی محسوب می‌شوند. عدم بهره‌برداری صحیح از اتصالات الکتریکی، جنبه‌های مختلفی از سیستم قدرت از جمله قابلیت اطمینان، کیفیت برق، تلفات انرژی (بهره‌وری)، هزینه‌های بهره‌برداری و ایمنی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با این حال، ویژگی‌های خاص اتصالات الکتریکی، از جمله پیچیدگی و تنوع دانش‌های مورد نیاز برای مطالعه آنها، سبب شده است تا میزان تحقیقات علمی و نشریات منتشر شده در این زمینه محدود باشد.

Ragnar Holm که پیشگام تحقیقات در زمینه اتصالات الکتریکی محسوب می‌شود، در سال ۱۹۵۸ با انتشار کتابی تحت عنوان "اتصالات الکتریکی"^۱، علم نوینی را بنیان نهاد که مورد استفاده متخصصان حوزه‌های مختلف از قبیل طراحان اتومبیل و ماهواره‌ها، بهره‌برداران سیستم‌های قدرت و تولید کنندگان مدارهای الکترونیک قرار گرفته است.

اهمیت روز افزون اتصالات الکتریکی منجر به پیشنهاد برگزاری دو کنفرانس مهم بین‌المللی در این خصوص گردیده است که عبارتند از: ۱- کنفرانس *Holm* (جهت بزرگداشت Ragnar Holm) که به صورت سالانه در یکی از دو کشور ایالات متحده آمریکا یا کانادا برگزار می‌شود و ۲- کنفرانس *ICEC* که هر دو سال یکبار در یکی از کشورهای جهان برگزار می‌شود.

به رغم پیشرفت زایدالوصف علم اتصالات الکتریکی در طول نیم قرن گذشته، متأسفانه هنوز در کشور ما در حدی که در خور جایگاه و اهمیت آن باشد، مورد

¹ -Electrical Contacts

توجه قرار نگرفته است. هر چند در دستور کار قرار گرفتن «کاهش تلفات انرژی» در وزارت نیرو موجب شد تا «اتصالات سست»^۲ به عنوان یکی از عوامل بروز تلفات، کم و بیش مورد توجه قرار گیرند؛ لیکن فقدان ابزارها و دانش مورد نیاز، امکان بررسی‌های علمی و پیشرفت بیشتر را فراهم نیاورد. نهایتاً، پیچیدگی و تنوع علوم مختلف توصیف کننده اتصالات الکتریکی اعم از علوم متالوژی، الکتریسیته، شیمی، فیزیک حرارت و ... سبب شد تا بحث اتصالات الکتریکی به عنوان پدیده‌ای مبهم و غیر قابل توصیف، صرفاً از دیدگاه آماری مورد توجه قرار گیرد. از سوی دیگر، به دلیل آن که علم اتصالات الکتریکی در زمره فن‌آوریهای پیشرفته محسوب شده و دارای کاربردهای دوگانه در علوم نظامی است، امکان بهره‌گیری از دانش موجود در شرکتها و سازمان‌های صاحب عنوان بین‌المللی نیز به سهولت میسر نخواهد شد.

در سال ۲۰۰۷، انتشار کتاب جدیدی توسط انتشارات معتبر *CRC*، تحت عنوان «اتصالات الکتریکی، اصول، کاربردها و تکنولوژی»، سرآغاز جدیدی را در گسترش دانش فنی این حوزه موجب شد.

بدین ترتیب، هر چند انتشار کتاب فوق منبع ارزشمندی را در دسترس قرار داده است، لیکن هنوز جای پژوهش‌های کاربردی بومی در این زمینه کاملاً خالی است. تجربه نویسندگان نشان می‌دهد که بهره‌اندک مهندسين برق از دانش‌های وابسته (به خصوص علم متالوژی) به علت وجود نقص در ساختار آموزش آکادمیک و عدم رفع این نقیصه در آموزش‌های حین خدمت آنها، یکی از دلایل اصلی کاهش بازدهی صنعت برق کشور محسوب می‌شود. در این کتاب سعی شده است تا در حد توان، این نقطه ضعف اصلاح و رفع شود.

امید است که این کتاب مورد استفاده جامعه علمی کشور قرار گرفته و موجبات رضایت حق تعالی را فراهم آورد.

فرهاد یزدی - سید محمد هاشمی - مرتضی بهادری

بهار ۱۳۹۰

²-Loose connections

فصل اول : مقدمه‌ای بر اتصالات الکتریکی

۱-۱- مقدمه :

اتصالات الکتریکی فصل مشترک عناصر حامل جریان در تجهیزات مختلف محسوب می‌شوند. مهم‌ترین ویژگی اتصالات الکتریکی آن است که اطمینان لازم را در پیوستگی مدارات الکتریکی به وجود آورند. اجزای حامل جریان در اتصالات الکتریکی معمولاً از مواد جامد ساخته شده و در اصطلاح متداول «کنتاکت»^۳ نامیده می‌شوند. معمولاً کنتاکتها در مدارات *DC*، بسته به اتصالشان به قطب مثبت یا منفی، به ترتیب آند و کاتد نیز نامیده می‌شوند.

علیرغم آن که هدف اصلی اتصالات الکتریکی ایجاد مسیری مطمئن برای عبور جریان است، لیکن وظایف دیگری نیز بر عهده دارند. از طرفی، برآورده شدن مهم‌ترین وظیفه اتصالات الکتریکی (ایجاد مسیر مطمئن) نیازمند برقراری یک اتصال فلز به فلز مناسب و کارآمد است. اتصالات الکتریکی به رغم آن که در ظاهر ساده به نظر می‌رسند لیکن بسیار پیچیده بوده و درک آنها مستلزم تسلط بر حوزه‌های مختلف و متعددی از علوم، نظیر مکانیک جامدات، انتقال حرارت، متالورژی، شیمی، الکترودینامیک و ... است. چنین اجزا (یا پدیده‌ها)یی به اجزا (یا پدیده‌ها)ی چند حوزه‌ای^۴ یا چند قانونی^۵ مشهور می‌باشند. پیچیدگی اتصالات

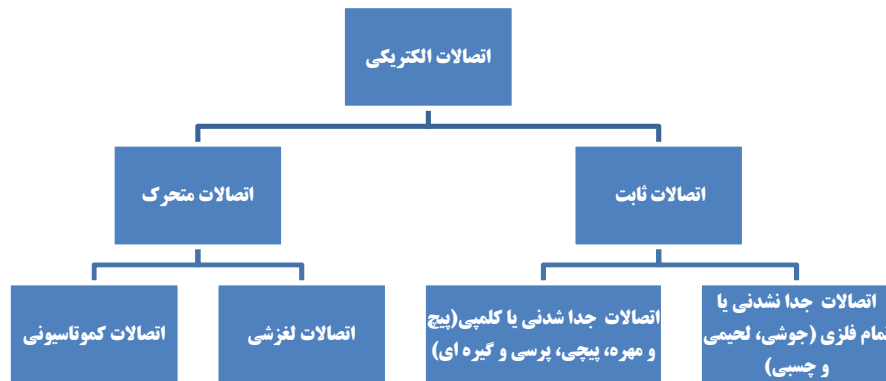
³ -Contact

⁴ - Multidomain

⁵ - Multidisciplinary

الکتریکی تا بدان حد است که جزو علوم «به طور کامل توصیف نشده» طبقه‌بندی شده‌اند و تلاشهای بی‌وقفه‌ای جهت درک کامل روابط حاکم بر آنها در جریان است. باید توجه داشت که حفظ شرایط مناسب اتصال و جلوگیری از کاهش کیفیت^۶ آن نیازمند درک نحوه تأثیر عوامل مختلفی چون جریان بار، رطوبت، دما و سایر عوامل محیطی بر مقاومت الکتریکی این اتصالات است.

اتصالات الکتریکی را می‌توان بر اساس مشخصه‌های مختلفی چون هندسه اتصال، تکنولوژی حاکم بر آنها، میزان جریان بار، نحوه طراحی، ثابت یا متحرک بودن، کاربرد آنها و ... به دسته‌های مختلف تقسیم بندی نمود. یکی از مهمترین تقسیم‌بندیهای صورت گرفته در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱- تقسیم بندی اتصالات الکتریکی

در اتصالات ثابت، کنتاکتها به صورت دائمی به هم متصل می‌شوند. هر چند اتصالات جدا نشدنی (در زیر شاخه اتصالات ثابت) کاملاً غیر قابل تعمیر (تعویض) محسوب می‌شوند، لیکن اتصالات جدا شدنی (کلمپی) را می‌توان تعمیر نمود. از همین روی، تعمیر و نگهداری اتصالات جدا شدنی، که کاربرد بیشتری نیز در

⁶ -Degradation

سیستم‌های قدرت دارند، نیازمند تأمین امکانات و تدوین فرآیندهای تعمیر و نگهداری خاصی می‌باشد که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در مقایسه با اتصالات ثابت، که به لحاظ مکانیکی بسیار پایدارتر بوده و مقاومت الکتریکی اتصال آنها پایین‌تر است، اتصالات لغزشی در معرض پدیده‌های مخرب‌تری چون قوس الکتریکی و فرسایش قرار دارند.

اتصالات متحرک خود به دو دسته اتصالات لغزشی و اتصالات کموتاسیونی تقسیم می‌شوند. اتصالات کموتاسیونی اتصالاتی هستند که برای کنترل سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند و به طور متناوب قطع و وصل می‌شوند. برای مثال، اتصالات الکتریکی در کلیدهای قدرت، سکسیونرها، رله‌ها، کنتاکتورها، جاروبک ماشین‌های الکتریکی و اتصالات نر و مادگی اتصالات کموتاسیونی هستند. در اتصالات لغزشی، اتصال هیچ‌گاه قطع نمی‌شود. در عوض، لغزش اتصال، موجب تغییر سطح اتصال (مقاومت اتصال) را می‌شود. برای مثال، در اتصالات لغزشی مورد استفاده در واریاکهای پیوسته، رؤس‌تاهای پتانسیومترهای آزمایشگاهی و ... مقاومت اتصال توسط لغزش کنتاکت متحرک تغییر داده می‌شود.

اتصالات لغزشی معمولاً بر حسب جریان و ولتاژ نامی‌شان، به سه گروه قدرت بالا، قدرت متوسط و قدرت پایین تقسیم بندی می‌شوند.

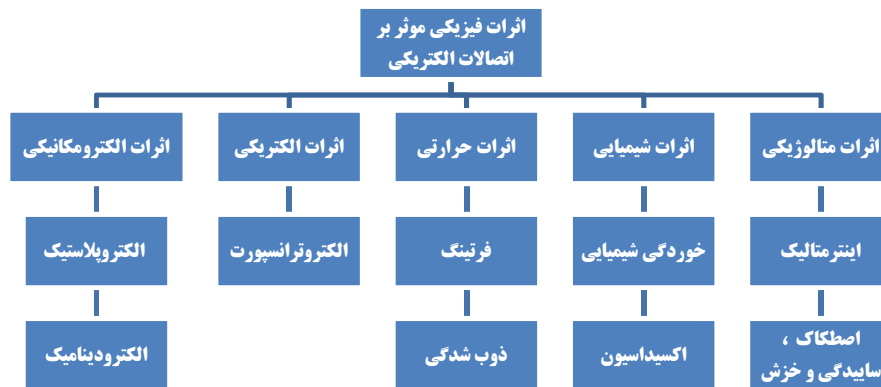
اتصالات الکتریکی جدا شدنی یا کلمپها، در مقایسه با اتصالات جدا نشدنی یا تمام فلزی، از ساختار پیچیده‌تری برخوردارند؛ زیرا اتصال به عنوان یک سیستم واسطه مجزاً طراحی و ساخته می‌شود تا هم به لحاظ الکتریکی و هم به لحاظ مکانیکی مطمئن و کارآمد باشد. این در حالی است که در اتصالات تمام فلزی، اتصال توسط لحیم کاری، جوشکاری و یا استفاده از چسب‌های هادی ایجاد می‌شود و لذا از پیچیدگی کمتری برخوردار است. برای مثال، در اتصالات جدا شدنی، استفاده از فلزات نرم منجر به کاهش مقاومت الکتریکی اتصال و افزایش میزان فرسایش آن می‌شود، در حالی که استفاده از فلزات سخت، هر چند کاهش فرسودگی اتصال را در پی دارد، لیکن مقاومت الکتریکی اتصال را افزایش می‌دهد.

به طور کلی، علم اتصالات الکتریکی دارای چهار ویژگی است که کمتر علمی هر چهار ویژگی را به صورت یکجا داراست. این ویژگیها عبارتند از :

- ۱- چند حوزه‌ای یا چند قانونی هستند (این اصطلاح پیش‌تر توضیح داده شد). در نمودار شکل ۱-۲ پدیده‌های فیزیکی مؤثر بر اتصالات الکتریکی نشان داده شده است (این پدیده‌ها در فصول آتی همین کتاب تشریح خواهند شد).
- ۲- چند کاربردی هستند^۷. به عبارت دیگر، اتصالات الکتریکی دارای کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف اعم از اتومبیل‌سازی (اتصالات الکتریکی مورد استفاده در این صنعت در معرض لرزش‌های بالا هستند)، صنایع الکتریکی، صنایع مخابرات، صنایع هواپیما سازی، صنایع نظامی (سیستم‌های تحریک انفجار یا چاشنی انواع بمب‌ها و موشک‌ها) و ... می‌باشد.
- ۳- چند سائیزی هستند^۸. این اصطلاح به مفهوم وجود اتصالات الکتریکی در ابعاد کاملاً متنوع از نانو اتصالات در داخل مدارهای مجتمع گرفته تا اتصالات بسیار بزرگ در سیستم‌های قدرت می‌باشد.
- ۴- بسیار پیچیده بوده و هنوز مدل ریاضی یا فیزیکی جامعی از آن ارائه نشده است.

⁷-Multi application

⁸-Multi size



شکل ۱-۲- پدیده‌های فیزیکی مؤثر بر اتصالات الکتریکی

۲-۱- بررسی برخی ویژگی‌های مهم اتصالات الکتریکی:

بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده بر روی سطوح اتصالات الکتریکی نشان می‌دهند که سطوح تماس واقعی اتصالات نه تنها صاف نیستند، بلکه از برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های متعددی نیز تشکیل می‌شوند. شکل ۱-۳ الف نمایی دو بعدی از یک سطح اتصال واقعی را نمایش می‌دهد. بر همین اساس، مسیر عبور جریان در اتصال بین دو کنتاکت، تنها محدود به نقاطی است که اصطلاحاً A-Spot نامیده می‌شوند. به طور کلی، سطح واقعی عبور جریان یا سطح کل A-spot ها، درصد بسیار اندکی از سطح تماس ظاهری اتصال است (شکل‌های ۱-۳-ب و ۱-۳-پ). حتی در نقاطی که برآمدگی‌های سطح اتصال با هم درگیر می‌شوند، به علت وجود یک لایه نازک اکسید بر روی یک یا هر دو سطح اتصال، ممکن است فرآیند هدایت الکتریکی اتفاق نیافتد. یکی از عوامل مؤثر بر تعداد A-Spot ها، نیروی وارده بر سطوح تماس کنتاکتهاست. افزایش این نیروی تماس علاوه بر

افزایش سطح تماس واقعی، منجر به شکستگی سطوح اکسید شده در مرزهای اتصال شده و تعداد A-Spot ها را افزایش می‌دهد.

با این حال، افزایش نیروی اتصال تا حدی مجاز است که منجر به تغییر شکل در سطح اتصال نشود؛ در غیر این صورت خود عواقبی چون کاهش ضریب الاستیسیته سطوح تماس، خزش و شل شدن پیش از موعد اتصالات را در پی خواهد داشت.

۱-۳- روابط حاکم بر مقاومت سطح اتصال :

توپوگرافی میکروسکوپی سطوح اتصال نشان داده است که با تقریب قابل قبولی می‌توان سطح A-spot ها را مدور فرض نمود [1]؛ هر چند که در برخی موارد و برای افزایش دقت محاسبات مقاومت اتصال، فرضیات دیگری چون در نظر گرفتن درصدی از سطح مقطع A-spot ها به صورت مستطیلی شکل و بیضی شکل نیز انجام شده است [1].

حل معادله لاپلاس در A-Spot ها نشان می‌دهد که مقاومت A-Spot در اتصال دو کنتاکت هم جنس، طبق رابطه زیر قابل محاسبه است :

$$R_C = \left(\frac{\rho}{2a}\right) \left[1 - 1.41581 \left(\frac{a}{R}\right) + 0.6322 \left(\frac{a}{R}\right)^2 + 0.15261 \left(\frac{a}{R}\right)^3 + 0.19998 \left(\frac{a}{R}\right)^4\right] \quad (1-1)$$

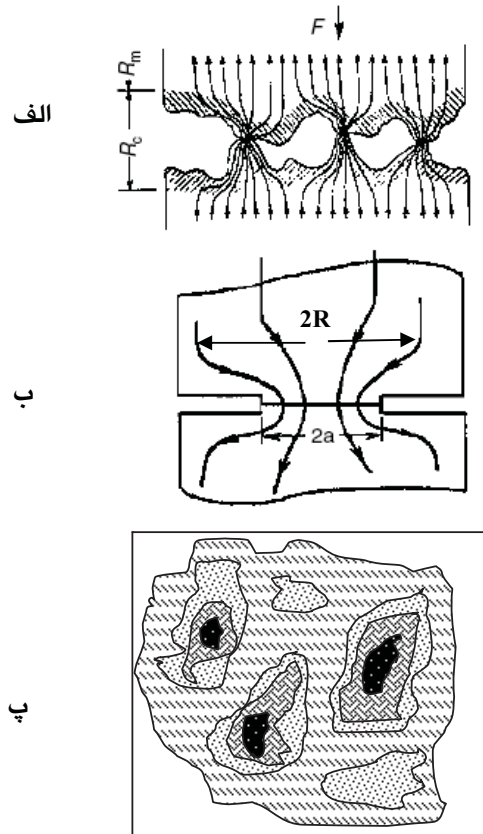
که در رابطه فوق :

R_C : مقاومت A-Spot

ρ : مقاومت ویژه فلز اتصال

a : شعاع A-Spot (شکل ۳-ب)

R : شعاع باریکه استوانه‌ای هادی در کنتاکت (شکل ۳-ب)




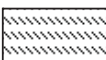



شکل ۱-۳:

الف: شماتیک میکروسکوپی سطح اتصال

ب: مشخصه هندسی A-Spot (مقاومت مسیر هدایت جریان در کنتاکت، R_m ؛ مقاومت R_a ؛ مقاومت A-spot ها (در باریکه محل اتصال)، a ؛ شعاع A-spot)

پ: تقسیم بندی سطوح اتصال

 سطح اتصال شبه فلزی (اکسید شده)	 سطح اتصال نامی (ظاهری)
 سطح هادی جریان (سطح A-spot)	 سطح اتصال واقعی
 سطح اتصال دارای بار (متحمل شوونده نیرو)	

اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی نشان می‌دهد که رابطه ریاضی (۱-۱) از دقت مناسبی جهت تعیین مقاومت اتصال برخوردار است. همچنین مشاهده می‌شود که در صورت کاهش تعداد A-spot ها، یا به عبارت دیگر هنگامی که $R \gg a$ باشد، مقاومت اتصال از رابطه شناخته شده $R_C = \left(\frac{\rho}{2a}\right)$ محاسبه خواهد شد. همچنین در صورت ناهمجنس بودن اتصالات، رابطه فوق به شکل رابطه زیر تغییر خواهد کرد:

$$R_C = \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{4a}\right) \quad (2-1)$$

که در رابطه فوق :

ρ_1 : مقاومت ویژه فلز اول اتصال

ρ_2 : مقاومت ویژه فلز دوم اتصال

جدول ۱-۱، نتایج حاصل از بکارگیری رابطه (۱-۱) را برای اتصال مس-مس و با فرض $R \gg a$ نشان می‌دهد [1]. نتایج آزمایشات صورت گرفته نشان می‌دهد که تقریب $R_C = \left(\frac{\rho}{2a}\right)$ برای تعیین مقاومت اتصال در A-spot ها از دقت کافی برخوردار است [1].

مقاومت A-spot (اهم)	شعاع A-spot (میکرومتر)
۰/۸۸	۰/۰۱
۰/۰۸۸	۰/۱
۰/۰۰۸۸	۱
۰/۰۰۰۸۸	۱۰

جدول ۱-۱ - نتایج محاسبه مقاومت A-spot به ازای شعاع‌های مختلف A-spot در اتصال

مس - مس

بررسی‌های صورت گرفته توسط "گرین‌وود"^۹ [7] نشان داد که با فرض یکسان بودن جنس هر دو کنتاکت، مقاومت برآیند اتصال طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

(۳-۱)

$$R_C = \rho \left(\frac{1}{2na} + \frac{1}{2\alpha} \right)$$

که در رابطه فوق:

a : متوسط حسابی شعاع A -spot ها یا $a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$

α : شعاع Holm که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha^{-1} = \left(\frac{3\pi}{16n^2} \right) \sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} \left(\frac{1}{S_{ij}} \right) \quad (۴-۱)$$

که S_{ij} فاصله میان A -spot ها است.

مطالعات صورت گرفته توسط "گرین‌وود" [7] و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته به روش اجزای محدود و مونت کارلو [6] نشان داده است که مقاومت اتصال، به شرط آن که A -spot ها در لبه‌های اتصال مجتمع نشده باشند، از نحوه توزیع و پراکندگی A -spot ها مستقل خواهد بود.

همچنین، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که افزایش نیرو در سطح تماس دو کنتاکت، مطابق رابطه زیر، موجب افزایش سطح تماس واقعی و در نتیجه افزایش سطح هدایت جریان می‌شود:

⁹ - Greenwood

$$F = \varepsilon A_r H \quad (5-1)$$

که در رابطه فوق :

F : نیروی عمود بر سطح

A_r : سطح تماس واقعی

H : ضریب سختی فلز

ε : ضریب فشار

البته به علت وجود لایه اکسید در برخی سطوح تماس واقعی، کاهش مقاومت اتصال متناسب با نیرو نخواهد بود. جدول (۲)، ارتباط بین افزایش سطح تماس واقعی با افزایش نیروی فشاری را برای چند نمونه آلیاژ نشان می‌دهد.

نسبت سطح واقعی به سطح ظاهری تماس $\% \left(\frac{A_r}{A_n} \right)$	نیرو (N)	آلیاژ
۰/۰۱	۱۰	Al (H-19)
۰/۰۵		Al (H-0)
۰/۰۰۸		Cu (H-0)
۰/۱	۱۰۰	Al (H-19)
۰/۵		Al (H-0)
۰/۰۸		Cu (H-0)
۱	۱۰۰۰	Al (H-19)
۵		Al (H-0)
۰/۸		Cu (H-0)

جدول ۱-۲- ارتباط افزایش سطح تماس واقعی با افزایش نیروی فشار بر سطح اتصال برای چند نمونه آلیاژ