شرکت برق منطقه‌ای فارس

سومین کنفرانس سراسری شبکه‌های توزیع برق

شیراز - اردیبهشت ۱۳۷۲

اندازه‌گیری افزایش مقاومت الکتریکی ناشی از تنشهای مکانیکی و حرارتی در دو نمونه سیمهای شبکه برقرسانی

بهروز صالح پور

دانشگاه تبریز

چکیده :

مطالعه بر روی تغییر مقاومت الکتریکی سیمهای شبکه برقرسانی در اثر عوامل خارجی و بمنظور کاهش اتلاف انرژی در شبکه‌های توزیع از اهمیت خاصی برخوردار است . در این کار نتایج سنجش مربوط به افزایش مقاومت ویژه رشته‌هائی از دو نوع سیم برقرسانی متداول ، آلومینیومی و مسی ، در اثر تنشهای مکانیکی و حرارتی وارد به آنها گزارش شده است . همچنین میزان کاهش مقاومت نمونه‌های تنش دیده با روش تابکاری (Annealing) نیز از جنبه‌های عملی و تئوری مورد مطالعه قرار گرفته است . نتایج بدست آمده نشان میدهد که سیمهای آلومینیومی بیش از نمونه‌های مسی در ازاء تنشهای وارده تغییر مقاومت میدهند و روش تابکاری بطوربسیار مؤثر برای ترمیم رسانائی سیمها قابل استفاده است .

شرح مقاله :

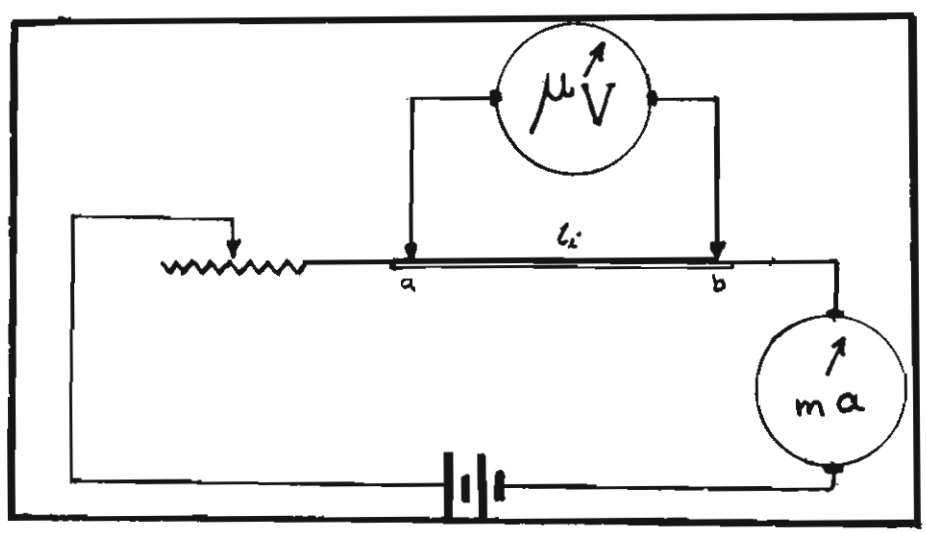
در جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز روزافزون در جهان ، بصورت ارزان ، تمیز ، مطمئن و با بهره بیشتر هر روز روشهای جدیدی با استفاده از سیستمهای گوناگون تبدیل انرژی مورد آزمایش قرار گرفته و در نهایت به مرحله بهره‌وری میرسد . ساخت و ایجاد نیروگاههای بزرگ و پیشرفته متداول

(Conventional) آبی و حرارتی با سوختهای متنوع از مواد فسیلی و هسته‌ای از یک طرف و در دو دهه اخیر ارائه طرحهای پیشرفته برای استفاده از منابع انرژی غیر متداول (Non-Conventional) از قبیل : زمین ، گرما ، جذر و مد ، باد و استفاده مستقیم و غیر مستقیم از تابش خورشید برای تولید انرژی الکتریکی ، نمونه‌ای از سخت کوشی اندیشمندان جهت رسیدن به هدف فوق‌الذکر است. بموازات تلاش برای یافتن روشهای مناسب تأمین انرژی الکتریکی و بالابردن بهره در سیستمهای تبدیل انرژی ، روشهای صرفه‌جوئی در مصرف و کاهش میزان اتلاف انرژی در مسیر مصرف آن شدیدا" مورد توجه بوده و هست . امروزه میزان صرفه‌جوئی و یا کاهش اتلاف در مصرف انرژی معادل بخشی از منبع تولید آن بحساب می‌آید . یکی از عوامل مهم اتلاف انرژی الکتریکی مصرف ناخواسته آن در خطوط شبکه‌های برقرسانی است . در جهت کاهش مصرف ناخواسته در مسیرهای برقرسانی ، مطالعه همه جانبه برای شناخت عوامل مؤثر روی این قبیل مصرف ضروریست . یکی از این عوامل بسیار مهم مقاومت الکتریکی خطوط برقرسانی است که هر مقدار افزایش آن بهمان میزان اتلاف انرژی بصورت حرارتی در شبکه‌ها را بالا میبرد . بررسیهای تئوری و تجربی نشان میدهد که مقاومت ویژه فلزات که ارتباط مستقیم با تحرک و سرعت الکترونهای آزاد در این مواد دارد با تعداد برخورد الکترونها با موانع میکروسکپی در ساختار شبکه بلوری کنترل میشود . هر گونه افزایش در تعداد موانع ناخواسته در شبکه بلوری فلز از قبیل عیوب نقطه‌ای (Point Defects) و خطی (Dislocations) و یا برخی اتمهای ناخالصی میتواند مقاومت فلز را افزایش دهد (۱ و۲ و۳) . تولید و یا افزایش انواع عیوب در ساختار بلوری فلزات از راههای مختلف ، از جمله اعمال تنشهای مکانیکی و حرارتی به فلز امکان‌پذیر است و در نتیجه تنشها مقاومت الکتریکی افزایش مییابد . در این کار سعی شده است میزان اثر تنشهای مزبور روی مقاومت ویژه الکتریکی رشته‌های دو نوع سیم برقرسانی مورد سنجش و بررسی قرار گیرد . بدین ترتیب که با ایجاد تنش مکانیکی بوسیله نیروی کششی روی رشته‌ای از سیمهای آلومینیومی و مسی ، درصد افزایش مقاومت آنها نسبت به حالت تنش ندیده اندازه‌گیری شده است . همچنین با سرد کردن خیلی سریع از دمای بالای نمونه‌های گرم شده که موجب تنشهای گرمائی در آنها میگردد ، نیز تغییر مقاومت آنها سنجیده شده است و در نهایت با انجام تنش‌زدائی از نمونه‌ها بوسیله تابکاری (annealing) مناسب ، و ترمیم و کاهش عیوب در ساختار بلوری آنها ، مقاومت الکتریکی شان به کمترین مقدار

ممکن رسیده است .

۱- مراحل آزمایش :

نمونه سیمهای مورد آزمایش آلومینیومی و مسی با مغزیهای فولادی و بدون مغزیهای فولادی و قطرهای متفاوت از انبار اسقاط برق منطقه‌ای آذربایجان دریافت شد . یک رشته از سیم مورد نظر را به طول حدود یک متر انتخاب و پس از شستشو بوسیله اسید رقیق و استون بصورت حلقه‌هائی فنری شکل آماده میشدند . برای ایجاد تنشهای مکانیکی ، نمونه‌ها بصورت سیخهای ۷۰ سانتیمتری به ماشین کشش بسته میشدند و تحت کشش کمتر از تنش تسلیم قرار میگرفتند . اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی رشته‌های حلقه‌ای شکل با عبور دادن جریان DC ضعیف و اندازه‌گیری افت ولتاژ بین دو سر نمونه انجام میپافت ، بعلت کوچکی مقاومت نمونه‌ها و خطای ناشی از مقاومت الکتریکی نقاط اتصال در نتایج کار ، سنجش مقاومت به روشهای متداول ، مانند پل وتستون یا چهار نقطه‌ای جوابگو نبود . لذا عمدتا" اندازه‌گیریها با استفاده از مداری مطابق شکل (۱) انجام میپافت ، میکرو ولتمتر حساس برای تعیین اختلاف ولتاژ دو سر نمونه از نوع (ADVANCE INST VM 79A) بود که بازاء عبور جریانهای معین و در هر حال کمتر از حدود ۲۰۰ میلی آمپر ولتاژها اندازه‌گیری میگردید.



شکل ۱- مدار اندازه‌گیری جریان بحرانی و افت ولتاژ بین دو سر مفتول فلزی ab

جهت تنش‌زدائی به روش تابکاری ، نمونه‌های مشابه تنش دیده و تنش ندیده بمدت ۲۴ تا ۳ ساعت در دمای کمی بیش از ۱/۳ دمای ذوب هر فلز در کوره‌ای که افزایش دمای آن به میزان ۱۰°C در دقیقه قابل تنظیم بود نگهداری شده و پس از مدت لازم با خاموش کردن کوره نمونه‌ها بتدریج سرد میشدند.

پس از تمیز کردن رویه و سنجش مجدد ابعاد آن ، مقاومت نمونه به روش فوق اندازه‌گیری می‌شد . در سری آزمایشهای دیگر ، برای بررسی اثر تغییر ناگهانی دما روی مقاومت الکتریکی ، دو نمونه کاملا" مشابه را با هم در دمای ۵۰۰°C به مدت حدود سه ساعت قرار می‌دادیم . سپس یکی از آنها را از کوره در آورده بصورت سریع و ناگهانی در مایع سرد آب و یخ و یا نیتروژن مایع رها میکردیم . نمونه دیگر هم در هوا و به آهستگی خنک میشد .

جهت رسیدن به حالت تعادل ، سنجش مقاومت نمونه‌ها پس از حدود ۱۵ ساعت انجام می‌یافت و مقادیر بدست آمده دو نمونه مشابه تابکاری شده و ناگهان سرد شده با هم مقایسه میشدند .

نوع رشته سیم	وضعیت نمونه	ρ (Ω - Cm) ×10^{8}	($\rho - \rho_0$) ×10^{8}	($\rho - \rho_0$)/ρ_0 %
مسی	تابکاری شده	۱/۶۳	۰/۰	۰/۰
	نو	۱/۶۸	۰/۰۵	۳/۰
	تنش دیده	۱/۷۴	۰/۱۱	۶/۳
آلومینیومی	تابکاری شده	۲/۴۰	۰/۰	۰/۰
	نو	۲/۴۵	۰/۰۵	۲/۰۴
	تنش دیده	۳/۰۳	۰/۶۳	۲۰/۸

جدول شماره ۱ : مقادیر اندازه‌گیری شده افزایش مقاومت ویژه رشته سیمهای مسی و آلومینیومی در شرایط مختلف

عملیات حرارتی روی نمونه	$\rho(\Omega - Cm) \times 10^{8}$	$(\rho - \rho_0) \times 10^{8}$	$(\rho - \rho_0)/\rho_0$ %
نو ، تابکاری شده	۲/۵۱۰	۰/۰	۰/۰
نو ، تابکاری نشده	۲/۷۱۵	۰/۲۰۰	۸/-
سرد شده از ۵۰۰°C به دمای ۲۵ °C آب	۲/۷۴۴	۰/۲۳۴	۹/۳
سرد شده از ۵۰۰°C به دمای آب و یخ	۲/۷۶۵	۰/۲۵۵	۱۰/۲
سرد شده از ۵۰۰°C به دمای ازت مایع	۲/۷۹۶	۰/۶۸۱	۱۱/۴

جدول شماره ۲ : مقایسه افزایش مقاومت ویژه در اثر سرد کردن ناگهانی رشته سیم آلومینیومی در دماهای مختلف نسبت به مقاومت نمونه تابکاری شده.

۲- بحث کلی :

تنشهای مکانیکی یکی از عوامل مهم ایجاد عیوب کریستالی در مواد بلوری از جمله فلزات است وجود نقایص شبکه‌ای در بلور موجب کندی حرکت بارهای آزاد و در نتیجه کاهش چگالی جریان الکتریکی J در فلز شده و متناسب با آن مقاومت ویژه یک هادی بطول l طبق رابطه زیر یا کاهش یا افزایش می‌یابد :

$$\rho = (V/l) \cdot (1/J)$$

که در آن V اختلاف پتانسیل بین دو سر هادی است . عموما" با عمل تابکاری در دمای ثابت تنش زدائی انجام یافته و مقاومت فلزات کاهش می‌یابد (۶) ، البته برخی محققین افزایش مقاومت الکتریکی در اثر تابکاری در دمای متغیر (isochronal) در برخی آلیاژها را گزارش داده‌اند (۷) . بررسی تغییر مقاومت فلزات در عمل سرد کردن سریع (quenching) اولین بار در ۱۹۵۷ گزارش شده است (۸) در یک دمای مطلق T تعداد نسبی تهی جاهای اتمی در یک کریستال طبق رابطه $n/N. = \exp(- Ed /T_q)$ داده میشود (K ضریب بولترمن و Ed انرژی جابجائی اتمی در کریستال است). اگر نمونه را سریعا" سرد کنیم (با سرعت حدود 10^{4} °C در ثانیه) اکثر اتمهای جابجا شده فرصت قرار گرفتن در محل خود در شبکه بلوری

را نخواهند یافت و تعداد نقایص اتمی باقیمانده در شبکه با دمای گرم T_q و دمای سرد T_c و سرعت سرد کردن بستگی دارد و از طرفی افزایش مقاومت ویژه، $\Delta\rho$ نیز با تعداد عیوب رابطه مستقیم دارد ، تجمع عیوب نقطه‌ای (جا خالی یا اتمهای بین نشین) و ایجاد حلقه‌های خطوط نابجائی نیز از آثار سرد کردن سریع است که مقاومت نمونه را افزایش میدهند . با مشاهدات میکروسکپی چگالی خطوط نابجائی در نمونه‌های آلومینیومی را که از دمای نزدیک ذوب با آب سرد شده‌اند بین 10^{15} تا 10^{11} در سانتیمتر مکعب تخمین زده‌اند (۳) ساده‌ترین رابطه افزایش مقاومت در سرد کردن سریع با رابطه $\Delta\rho = A \exp (- E_f / KT_o)$ داده شده است که E_f انرژی تشکیل یک جا خالی اتمی و T_o دمای سرد کردن است .

۳- بحث کاربردی :

گرچه افزایش مقاومت قابل توجهی در اثر تنشهای مکانیکی و حرارتی در سیمهای مورد آزمایش مشاهده گردید ولی باید دید آیا عملا" این قبیل تنشها حین کار روی نمونه‌ها اعمال میشود یا نه،درجداول استاندارد،تنش معادل $70\ N/mm^2$ روی سیمهای آلومینیومی بدون مغزی فولادی حد مجاز است که خیلی کمتر از تنشهای آزمایشی است ولی باید گفت در هر تنشی تعدادی عیوب کریستالی ایجادمیشود و متناسب با آنها افزایش در مقاومت نیز خواهد بود از طرف دیگر وارد آمدن فشارهای خیلی زیاد غیر قابل پیش‌بینی به سیمها بوسیله طوفانها در مناطق خشک و برف و یخ سنگین در مناطق سرد که گاه به پاره شدن سیم منتهی میگردد ، تنشهای نابهنجار میتواند در سیمها ایجاد کند . یکی دیگر از عوامل مؤثر روی مقاومت سیمهای کهنه میتوان خزش (Creep) را نام برد . البته بررسی همه جانبه اثر این پدیده مستلزم داشتن نمونه‌های مشخص و شناسنامه دار است . تنشهای حرارتی نیز ممکن است با داغ شدن ناگهانی سیمها در اتصال کوتاههای تصادفی در خطوط و سرد شدن سریع آنها پس از رفع اتصالی ایجاد شود . طبق آئین‌نامه‌های شبکه توزیع، گرم شدن سیمها تا $200\ ^{\circ}C$ برای یک یا چند ثانیه مجاز است (۵ و ۴) که گاهی ممکن است این دما بیشتر و بمدت طولانی‌تر نیز باشد و همانطور که گفته شد ایجاد تنش حرارتی مؤثر بستگی به سرعت سرد شدن و دمای سرد دارد . بهرحال مجموعه عوامل ایجاد کننده تنش ناخواسته و یا عواملی مانند خزش و خستگی (Fatigue) رسانائی سیمها را کاهش خواهند داد و همانطور که اشاره شد قضاوت کمی روی تغییرات مقاومت از عوامل مختلف مستلزم مطالعات دقیق روی

نمونه‌های شناسنامه‌دار است ولی بهرحال میتوان در جهت کاهش مقاومت سیمهای کهنه و بهبود رسانائی سیمهای نو قبل از بکارگیری عملیات حرارتی تابکاری را توصیه نمود و همانطور که نتایج نشان میدهد (جداول ۱ و۲) مقاومت مواد نو بیش از نمونه‌های تابکاری شده است . برای جلوگیری از زنگ زدگی نمونه‌های مسی انجام تابکاری در محیط خلاء نسبی بسیار مطلوب است . در نهایت عامل خوردگی نیز که با تقلیل مقطع مؤثر سیمها موجب کاهش رسانائی آنها میگردد قابل مطالعه و بررسی است گرچه در مورد عامل خوردگی روی سیمها بررسی شده (۸) ولی متأسفانه از نقطه نظر تغییر مقاومت ناشی از خوردگی سیمها مطلبی ارائه نگردیده است .

نتیجه :

مقاومت ویژه رشته سیمهای مورد نظر پس از تعیین قطر d و طول رشته l و اندازه‌گیری افت ولتاژ V_i در دو سر رشته بازاء جریان عبوری I_i از رابطه زیر محاسبه میگردید .

$$\rho_i = (\pi d^2/l).(V_i/I_i) \quad (\Omega - Cm)$$

و میانگین مقادیر چندین آزمایش بعنوان کمیت نهائی منظور میشد . نتایج بخش اول آزمایشها مربوط به اثر تنشهای مکانیکی روی کمیت برای نمونه‌های مختلف در جدول شماره (۱) آورده شده ، مقدار تغییر نسبی $\rho_0/(\rho - \rho_0)$ نسبت به مقاومت ρ_0 نمونه نو و تابکاری شده محاسبه شده است . نتایج بخش دوم آزمایشها ، مربوط به‌اثر تنشهای حرارتی روی مقاومت سیم آلومینیومی در جدول شماره (۲) نشان داده شده است .

قدرانی :

بدینوسیله از برادران عزیز،آقایان علی حسین زاده و جمال داوودی ، دانشجویان فیزیک که در انجام آزمایشات و بدست آوردن نتایج زحمت کشیده‌اند تشکر می‌نمایم.

منابع :

1- M.W. THOMPSON,DEFECTS AND RADIATION DAMAGES IN METALS,COMBRIDGE UNIV. PRESS , 1969

2- J. LETEURTRE AND Y. QUERE , IRRADIATION EFFECTS IN FISSILE MATERIALS , NORTH HOLAND PUB., 1972

3- R.E. SMALLMAN , MODERN PHYSICAL METALLURGY 3RD EDITION BUTTERWORTH PUB 1976

۴- طراحی خطوط انتقال نیرو ، جلد اول ، از انتشارات وزارت نیرو ۱۳۶۴

۵- تکنولوژی مهندسی برق ، جلد اول ، ترجمه سعید شعاری نژاد ۱۳۶۰ ، تهران

6- A. IWASE ETAL , RAD . EFFECTS , 124 (1992) 117

7- Y.A. BELOBROVYI , SCRIPTA METAL ET . MAT., 26 (1992) 877

۸- قدرت اله حیدری ، سخنرانیها و مقالات ارائه شده در دومین کنگره ملی خوردگی ، دانشکده فنی دانشگاه تهران ۱۳۶۹