

مدلسازی الکترو- حرارتی برقگیر

علی گودرزی ، حسین محسنی
آزمایشگاه فشارقوی دانشگاه تهران

واژه های کلیدی : برقگیر، مدل IEEE، مدل الکترو- حرارتی، اضافه ولتاژ، گریز حرارتی

چکیده :

برقگیرها با جذب انرژی اضافه ولتاژهای گذرا و تبدیل آن به گرما، موجب محدود شدن سطح اضافه ولتاژها می گردند. گرما و دمای قرصهای برقگیر از عوامل اصلی در کیفیت کارکرد برقگیرها بوده و نقش اصلی در تنش های حرارتی- مکانیکی، افزایش جریان ناشی و گریز حرارتی دارا می باشد. مدل الکتریکی جهت شبیه سازی دقیق رفتار برقگیر در قبال اضافه ولتاژها، لحاظ نمودن اثر دما بر روی جریان ناشی و مدل حرارتی انتقال گرمای برقگیر همگی در یک مجموعه منسجم، مدل الکترو-حرارتی برقگیر را ارائه می دهند. مقاله پیش رو مسایل فوق را بررسی نموده، در ضمن مدل الکتروحرارتی را بر روی یک برقگیر اکسید روی از نوع مدل پست (Station class surge arrester) از رده انتقال، پیاده سازی می نماید همچنین از مدل مطروحه در شبیه سازی یکی از آزمونهای استاندارد استفاده می گردد.

مقدمه :

افزون بر سه دهه از بکارگیری برقگیرهای اکسیدروی در صنعت برق می گذرد. افزایش قابلیت جذب انرژی اضافه ولتاژها به همراه انتقال سریع آن به محیط اطراف از مسایل مهم در توسعه روز افزون بهبود عملکرد برقگیرها می باشد. ستون قرصهای برقگیر، در حالت عادی شبکه به مثابه ستونی از عایق عمل نموده و تنها جریان ناشی ناچیزی از آن عبور می نماید، که ضریب دمایی آن منفی می باشد، به این معنا که افزایش دمای قرصها منجر به افزایش دامنه جریان ناشی می گردد، و این خود گرمایش بیشتر قرصها را در پی دارد. دمای قرصهای برقگیر از عوامل اصلی در کیفیت کارکرد برقگیرها بوده و نقش اصلی در تنش های حرارتی- مکانیکی، افزایش جریان ناشی و گریز حرارتی دارد لذا محاسبه دقیق انرژی الکتریکی ورودی ناشی از تنشهای الکتریکی به منزله توان حرارتی ورودی و چگونگی انتقال حرارت به خارج محفظه در نقش توان خروجی حائز اهمیت

در ادامه به جزئیات بیشتر هر بخش ساختار فوق می پردازیم.

مدل الکتریکی پویای (دینامیکی) IEEE برقیگیر :

از ویژگی مهم برقیگیرهای ZnO، مشخصه به شدت غیرخطی ولتاژ-جریان بوده، به نحوی که برقیگیر در ولتاژ نامی جریانی در حد چند ده میکروآمپراز خود عبور داده اما در ولتاژ عملکرد برقیگیر که معمولاً ۳ تا ۲ برابر ولتاژ نامی است، جریانی در حد چندین کیلو آمپر عبور می دهد.

ویژگی دیگر آن عملکرد پویا (دینامیکی) مشخصه ولتاژ-جریان است. در نتایج آزمون های عملی مشاهده گردیده است که اولاً در زمان عبور ضربه جریان، قله ولتاژ دو سر برقیگیر جلوتر از قله ولتاژ موج ضربه جریان است. به این معنا که ولتاژ سریعتر از جریان به حد بیشینه (ماکزیمم) خود میرسد، ثانیاً با کاهش پیشانی موج ضربه جریان، دامنه ولتاژ قله افزایش می یابد، توضیح بیشتر اینکه اگر بازاء دامنه ثابت ضربه جریان، پیشانی موج را کاهش دهیم یا موجهای ضربه جریان سریعتری اعمال کنیم، دامنه قله ولتاژ افزایش بیشتری پیدا می کند. [۴] تحقیقات نشان داده است بازاء یک جریان با دامنه ثابت، تغییر زمان پیشانی موج از $8\mu s$ به $1,3\mu s$ منجر به افزایش تقریبی ۶٪ ولتاژ در دو سر برقیگیر می شود. گروه تحقیقاتی ۱۱-۴-۳ از کمیته بررسی حفاظت در برابر اضافه ولتاژ IEEE مدلی را ارائه نموده است که بتواند اثر پویایی (دینامیکی) و غیرخطی برقیگیر را بخوبی مدلسازی نماید که این مدل در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این مدل بخش غیرخطی با دو قسمت مقاومت غیرخطی A_0 و A_1 نشان داده شده است که با یک فیلتر پایین گذر R-L از هم جدا شده اند. این فیلتر در موقع جریانهای با پیشانی تیزتر با اعمال امپدانس بزرگ جریان بیشتری را به سمت A_0 هدایت نموده و چون A_0 مشخصه ولتاژ-جریان بزرگتری دارد در نهایت منجر به افزایش بیشتر ولتاژ دو سر برقیگیر می شود. توضیحات بیشتر و نحوه تعیین پارامترهای مدار در مرجع [۵] آورده شده است.

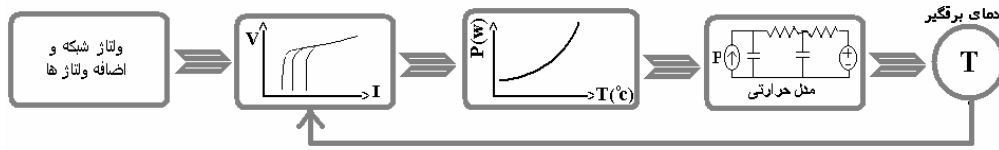
می باشد، در این میان تفاوت توان ورودی و توان خروجی برقیگیر عامل گرمایش قرصهای برقیگیر است.

از حاصل ضرب جریان عبوری لحظه ای و ولتاژ دو سر برقیگیر، توان لحظه ای ورودی به برقیگیر حاصل می شود. در حالت عملکرد برقیگیر، تمامی این توان بطور تقریبی معادل توان تلف شونده در برقیگیر است اما در حالت عادی کارکرد سیستم، از آنجا که جریان دارای مولفه اهمی و خازنی است توان ورودی شامل توان حقیقی و توان راکتیو است. حرارت ایجاد شده در قرصها از طریق انتقال حرارت از بدنه برقیگیر گذشته و به محیط اطراف منتقل می گردد. رسانایی حرارتی بدنه برقیگیر نقش بسزایی در کاهش دمای داخلی برقیگیرها دارد.

تلاشهای بسیاری در زمینه مدلسازی الکتریکی-حرارتی برقیگیر انجام شده است، تا بتوانند بعضی از عیب ها و بروز حوادث در برقیگیرها را توجیه نمایند. عمده این تلاشها در دو روش مدلسازی اجزاء محدود F.E.M و مدلسازی انتقال حرارت خلاصه می شود. اولی برای مطالعه توزیع دما و میدان الکتریکی جهت تعیین اثر نقطه سوز شدن و سوراخ شدگی برقیگیر و محاسبه تنش حرارتی-مکانیکی و روش دوم برای مطالعه رفتار گریز حرارتی مناسب می باشند. [۱-۳]

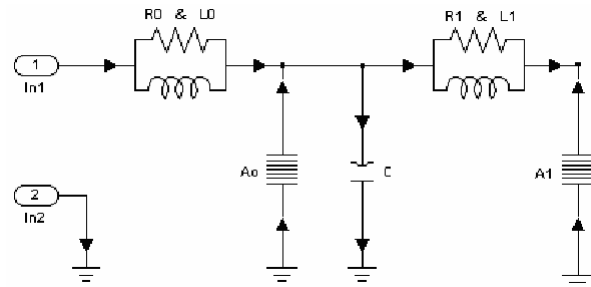
در این مقاله از روش انتقال حرارت جهت شبیه سازی یکی از آزمونهای پایداری حرارتی برقیگیر مطابق استاندارد IEC99-4 استفاده می شود.

در شکل (۱) اصول این روش بصورت نموداری ترسیم شده است. ورودی اولیه همان تنشهای ناشی از ولتاژ شبکه و اضافه ولتاژهای حادث بوده که در مرحله بعد در دو بخش مجزا، توان تلفاتی ناشی از جریان نشستی و گرمایش قرصها به کمک مدل ریاضی و توان تلفاتی ناشی از اضافه ولتاژها توسط مدل پویا محاسبه می شود. با اعمال توان کل تلفاتی به مدل حرارتی و با توجه به دمای محیط، دمای قرصهای برقیگیر بدست می آید، که از این دما جهت تعیین میزان جریان نشستی و تعیین امکان ایجاد گریز حرارتی استفاده می شود.

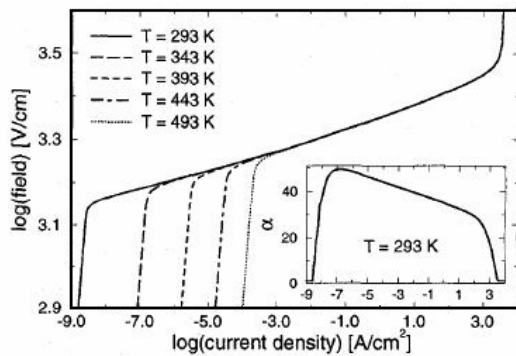


شکل (۱): نمودار مدل الکتریکی-حرارتی برقیگیر

شکست و مقاومت ویژه در ناحیه عملکرد (مقاومت دان#ها) $\rho_{up} = 1\Omega cm$ می#باشد. ضریب غیرخطی بودن $\alpha = d(\log J) / d(\log F)$ بیشترین مقدار $\alpha_m \approx 50$ را دارد. مشخصه الکتریکی با کمک رابطه فوق در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل IEEE برقیگیر



شکل (۳): مشخصه جریان-ولتاژ بازا دماهای مختلف

مدل حرارتی برقیگیر:

شباهت زیادی بین روابط ومعادلات حاکم بر انتقال حرارت و معادلات الکتریکی وجود دارد، جهت سهولت در درک مساله انتقال حرارت از مدار معادل الکتریکی می توان سود جست. مرجع [۷] اولین بار این روش را در مورد برقیگیرها استفاده نموده است. جهت توضیحات بیشتر می توان به آن مراجعه نمود. برای مروری مختصر رابطه انتقال حرارت به طریق رسانش در زیر ذکر گردیده است:

$$P = \frac{T_2 - T_1}{R_{Thermal}} \quad (2)$$

P توان حرارتی انتقالی بین دو محیط مختلف با دمای T_2 و T_1 با مقاومت حرارتی $R_{Thermal}$ می#باشد. ملاحظه می#گردد که این رابطه شباهت زیادی با قانون اهم به صورت زیردارا است:

مدلسازی جریان نشتی برقیگیر

همانطور که پیشتر بیان گردید، جریان نشتی برقیگیر در ولتاژ نامی تابعی از دما و شدت میدان اعمالی است و واضح است که مدل IEEE نمی#تواند این جریان را مدلسازی نماید و مدل فوق تنها برای حالت عملکرد برقیگیر در مواجه با موج ضربه جریان کارایی دارد.

ارتباط میان جریان نشتی با دما و شدت میدان توسط جداول و نمودارها ویا روابط ریاضی مشخص می#شود. در مرجع [۶] رابطه (۱) مندرج در زیر را بکار برده است که در این مقاله نیز از آن استفاده می#گردد:

$$J(F) = 2F \left\{ 2A_1 + A_2 \exp\left(\frac{a_1}{T}\right) \times \left[1 - \tanh\left(a_2 + \frac{a_3}{T} - \frac{a_4}{F}\right) \right] \right\}^{-1} \quad (1)$$

بطوری که J چگالی جریان برحسب A/cm^2 و F گرادین

ولتاژ(شدت میدان) بر حسب V/cm است و:

$$A_1=1 \quad A_2=0.7 \quad a_1=8000 \\ a_2=13 \quad a_3=4004 \quad a_4=38235$$

رابطه فوق بهمراه ثابت های داده شده مشخصه ولتاژ-جریان قرص#ها را بر حسب دما و شدت میدان برآورد می#نماید. در دمای $T=293K$ شدت میدان شکست(بعنوان مثال شدت میدان متناظرا عبور جریان $1mA/cm^2$) برابر $F_b=1870$ V/cm، مقاومت ویژه $\rho_{pb} = 5 \times 10^{11} \Omega cm$ پیش از

افزایش جریان ناشی از گرمایش قرصها که از طریق رابطه (۱) که مدل آن در بلوک ۴ پیاده سازی شده با یکدیگر جمع شده و در ولتاژ لحظه ای دو سر برقگیر ضرب می شوند تا توان لحظه ای اعمالی به برقگیر حاصل شود. البته لازم است تا توان حقیقی خالص درنقش توان اتلافی به برقگیر داده شود و توان لحظه ای شامل توان حقیقی و راکتیو است. در بلوک ۶ از توان لحظه ای در یک پرپود انتگرال گرفته می شود تا توان متوسط حقیقی حاصل و به برقگیر اعمال گردد. این توان در نقش یک منبع تزریق جریان به مدل حرارتی واقع در بلوک ۷ اعمال گردیده تا میزان درجه حرارت قرصها بدست آید که از این دمای بدست آمده به عنوان سیگنال فیدبکی در جهت محاسبه جریان نشتی حرارتی نیز استفاده می گردد.

شبیه سازی آزمون پایداری حرارتی تحت اعمال ضربه جریان طولانی مدت :

پایداری حرارتی تحت شرایط اعمال ضربه طولانی مدت، کلاس حرارتی برقگیر در بخش انتقال توان را تعیین می نماید و توسط آزمونی مطابق با بند ۲-۴-۷ استاندارد IEC99 [۹]۴ انجام می پذیرد. بطور خلاصه روند انجام آزمون در جدول (۱) و شکل (۵) نشان داده شده است.

در این آزمون دوضربه پر قدرت (با انرژی تقریباً $250J/cm^3$) با فاصله زمانی یک دقیقه اعمال گردیده و سپس به دنبال آن اضافه ولتاژ AC به مدت ۱۰ ثانیه برابر با U_T اعمال می گردد. در نهایت به مدت ۳۰ دقیقه ولتاژ نامی دائمی اعمال می گردد. هدف از این آزمون قراردادن برقگیر در وضعیتی است که دمای قرصهای آن افزایش داده شده و سپس مشاهده شود که با اعمال اضافه ولتاژ AC به همراه ولتاژ نامی، آیا برقگیر پایدار حرارتی می ماند یا خیر؟ برای این منظور لازم است که در مرحله پایانی، دمای قرصها و جریان نشتی با اعمال ولتاژ نامی به صورت افزایشی نبوده، زیرا این حالت مبین آغاز فرایند گریز حرارتی می باشد، همچنین طبق دستورالعمل استاندارد، با انجام آزمون اندازه گیری ولتاژ پسماند در جریان نامی بررسی می گردد که ولتاژ پسماند قبل و بعد از آزمون مقدار زیادی تفاوت نکرده باشد که متناظر با

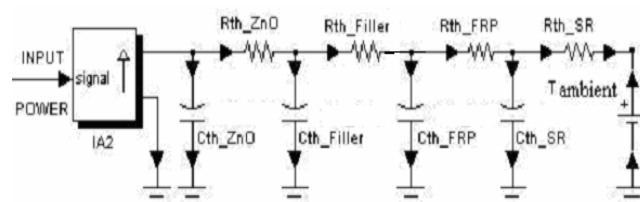
$$I = \frac{V_2 - V_1}{R} \quad (۳)$$

به نحوی که ولتاژ، دوگان دما و جریان دوگان توان است، همچنین با نوشتن روابط انتگرالی مربوط به دما با میزان جذب انرژی و ظرفیت حرارتی شباهت آن را با روابط حاکم بر ولتاژ-جریان خازن مشاهده می نماییم:

$$T = \int \frac{P(t)}{C_{Thermal}} dt + T_0 \quad (۴)$$

$$V = \int \frac{I(t)}{C} dt + V_0 \quad (۵)$$

لذا می توان معادل حرارتی را با مدار الکتریکی مدلسازی نمود. در شکل (۴) مدار معادل الکتریکی مدل حرارتی برقگیر پلیمری نشان داده شده است.



شکل (۴): مدار معادل انتقال حرارت برقگیر پلیمری

مدل نهایی الکترو-حرارتی :

در شکل (۹) مدل نهایی مورد نظر که در محیط SIMULINK/SimPowerSystem پیاده سازی شده ترسیم گردیده است. این مدل در برگزیده منبع ولتاژ AC به عنوان اعمال تنش ولتاژ شبکه و منبع تزریق جریان جهت اعمال اضافه ولتاژها و مدل الکتریکی و حرارتی به منظور بررسی رفتار ولتاژ و جریان بر حسب دمای محیط می باشد. مطابق شکل (۹) در بلوک خاکستری رنگ ۱ جریان ضربه دلخواه توسط تابع ریاضی F_{cn} و با دامنه I_{peak} تولید شده و در بلوک ۲ منبع ولتاژ سینوسی معادل حداکثر ولتاژ اعمالی از طرف شبکه (Maximum Continues MCOV Operating Voltage) قرار دارد که هر دو این منابع الکتریکی از طریق دو کلید Breaker 1,2 با کمک بلوک تولید سیگنال کنترل کلیدها، Signal Builder، که در بلوک ۳ قرار دارند می توانند به مدل الکتریکی برقگیر که در بلوک ۵ قرار دارد اعمال گردند. جریان مدل الکتریکی و

در شکل (۸) نحوه تغییرات دمایی قسمت های مختلف برقی در طول انجام آزمون نشان داده شده است. در کنار هر منحنی نام قسمت مربوطه نیز درج گردیده است.

دمای میانگین قرصهای ZnO پس از جریان ضربه اول دفعتاً از 60°C به $87,6^{\circ}\text{C}$ می رسد و پس از ۶۰ ثانیه به دمای $82,8^{\circ}\text{C}$ می رسد. در این بین دمای ماده پرکننده Filler نیز با کمی تاخیر به دمای قرصها نزدیک می شود. سایر بخشهای بیرونی نیز با تاخیر زیادی شروع به گرم شدن می نمایند. پس از اعمال دومین ضربه جریان دما به حدود $112,5^{\circ}\text{C}$ رسیده و با اعمال ولتاژ U_T در مدت ۱۰ ثانیه به 149°C می رسد، که با اعمال ولتاژ نامی دما رو به کاهش می گذارد، به نحوی که در ثانیه ۱۰۰ دما در حدود 143°C بوده و شیب منفی آن نشان دهنده ادامه کاهش دما است که این به مفهوم پایدار بودن برقی پس از اعمال تنشهای مختلف است. در صورتی که دما دارای شیب افزایشنده باشد نشان از وارد شدن برقی به قسمت ناپایداری حرارتی بوده که منجر به گریز حرارتی و در نهایت انفجار برقی می باشد. رفتار سایر قسمتها نیز به خوبی قابل ملاحظه می باشد. لایه بیرونی به دلیل مجاورت با دمای محیط از تغییرات دمایی کمتری برخوردار است.

نتیجه گیری :

ملاحظه گردید که در موقع برخورد اضافه ولتاژهای گذرا، دمای قرصها به شدت افزایش می یابد که این افزایش ناگهانی دما و اختلاف آن با دمای قسمت های مجاور منجر به تنش مکانیکی - حرارتی می گردد، به همین دلیل است که در بسیاری از موارد قرصها از سمت لبه و کناره ها دچار شکستگی و خوردشدگی می گردند.

همچنین اضافه ولتاژهای موقت می توانند با گرم کردن تدریجی قرصها شرایط را برای بروز ناپایداری حرارتی و بدنبال آن گریز حرارتی آماده نمایند.

به همین دلیل است که در شبکه هایی که دارای زمین نوسانی و یا احتمال وقوع اضافه ولتاژهای موقت نظیر فرورزناس دارد، متخصصین از برقیهای با فاصله هوایی

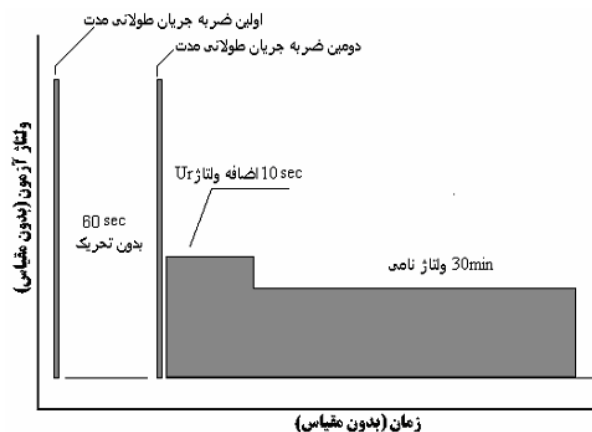
شکستگی و یا سوراخ شدگی در برقی باشد. از دیگر شرایط آزمون گرمایش برقی در دمای $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$ است.

مشخصات الکتریکی و فیزیکی برقی در پیوست ذکر گردیده است. لازم به ذکر است که جریانهای ضربه ای اعمالی هر یک دامنه ای برابر 500A و دوره زمانی 2ms دارا می باشند. در شکل (۶) تغییرات جریان و ولتاژ برقی برای ۱۰۰ ثانیه ترسیم گردیده است. جریانهای ضربه و ولتاژهای متناظرشان نیز بخوبی دیده می شود. ملاحظه می شود که در زمان بین ۶۰ تا ۷۰ ثانیه که اضافه ولتاژی برابر U_T به برقی اعمال گردیده است به علت افزایش دما و بالا بودن تنش الکتریکی دامنه جریان قابل ملاحظه می باشد.

در شکل (۷) نیز در زمان حدود ۶۰ ثانیه اعمال ضربه دوم و بدنبال آن اعمال اضافه ولتاژ ۱۰ ثانیه ای و جریان ناشی از آن ترسیم شده است.

جدول (۱): زمان بندی آزمون پایداری حرارتی

عملیات آزمون	زمان
اولین ضربه جریان 2ms	0 ~ 2ms
۶۰S بدون تحریک	2ms ~ 60s
دومین ضربه جریان 2ms	60s ~ 60.002s
۰,۱S بدون تحریک	60.002s ~ 60.102s
۱۰S اعمال اضافه ولتاژ	60.102s ~ 70.102s
۳۰Min اعمال ولتاژ نامی (عادی)	70.102s ~ 1870s

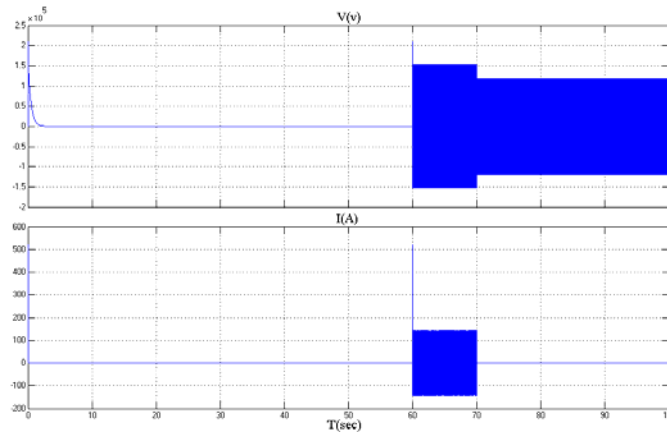


شکل (۵): نمودار زمان-ولتاژ آزمون پایداری حرارتی

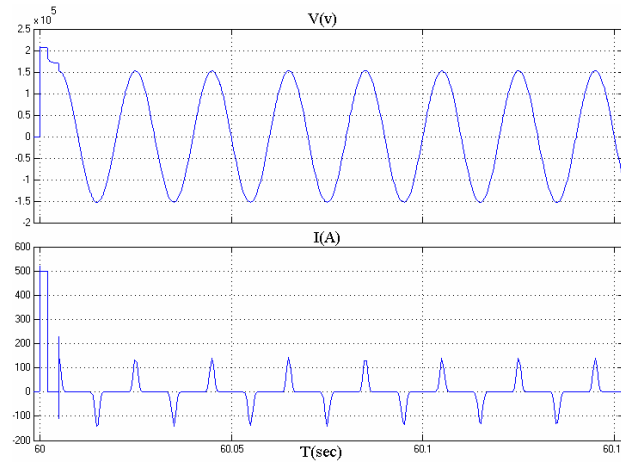
صرفنظر ویا تقریب هایی انجام شده است. بعنوان مثال از تغییر ظرفیت حرارتی قرصها با دما ویا مدل نمودن اثر اتصالات فلزی در بالا و پایین برقیگیر و غیره خودداری شده است، و هدف بررسی ابعاد مختلف مدل الکترو-حرارتی و کاربردهای آن بوده است.

استفاده مینمایند که در اصل جریان نشتی ناچیزی تا قبل از عمل نمودن از خود عبور می دهند.

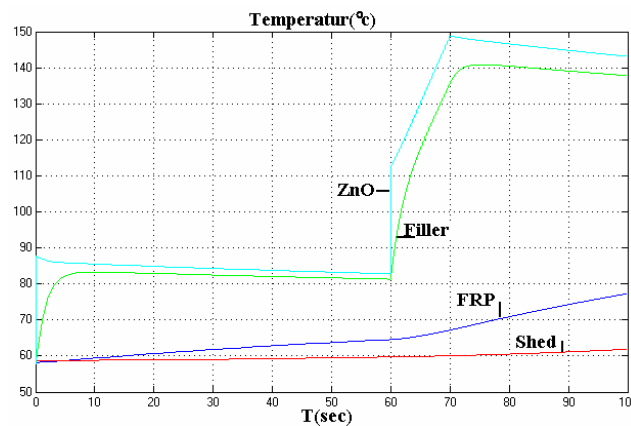
مدل الکترو-حرارتی طرح شده در این بخش در واقع برای انجام کارهای مطالعاتی و پژوهشی و بررسی رفتار کیفی حرارتی برقیگیر مفید می باشد که البته در اینجا به جهت اجتناب از تفصیل و خارج از حوصله شدن از موارد مختلفی



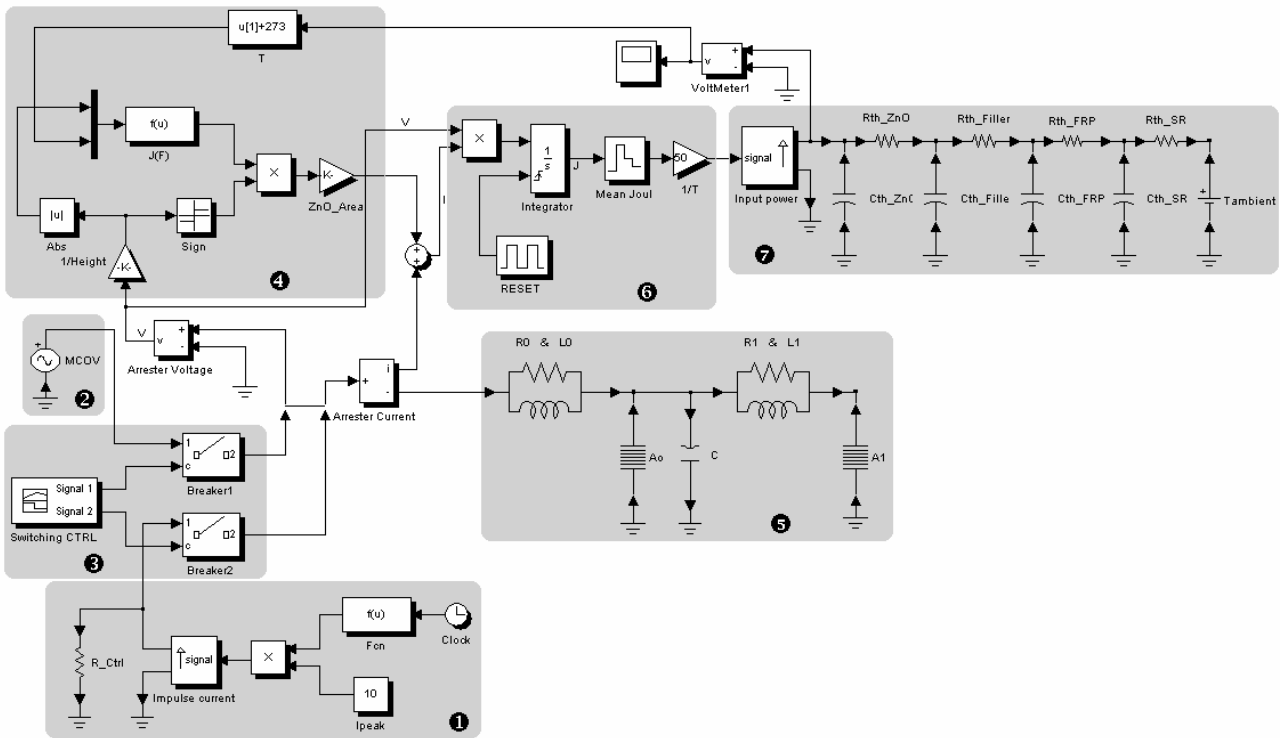
شکل (۶): مشخصات ولتاژ-جریان برقیگیر در طول آزمون



شکل (۷): ولتاژ و جریان برقیگیر پس از ضربه دوم و اعمال اضافه ولتاژ موقت



شکل (۸): تغییرات دمایی بخشهای مختلف برقیگیر



شکل (۹): مدل الکترو-حرارتی برقگیر

MO-Surge-Arrester Blocks to Fast Transient", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.:4, No.1, pp.292-300, January, 1989

[5]- IEEE WG 3.4.11, "Modelling of metal oxide surge arresters," IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 7, pp. 302-309, Jan. 1992

[6]-Bartkowiak,M.; Comber, M.G.; Mahan, G.D.; "Failure modes and energy absorption capability of ZnO varistors "; Trans. on Power Delivery, IEEE, Vol.:14 Issue:1, Jan.1999 Pages:152 -162

[8]- M. V. Lat, "Thermal properties of metal oxide surge arresters," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, pp. 2194-2202, July 1983.

[9]- IEC 60099-4, "Surge arresters-Part4", 1991.

مراجع :

- [1]-Boggs,S.;Jinbo Kuang; Andoh,H.; Nishiwaki,S. ; "Electro-thermal-mechanical computations in ZnO arrester elements"; IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.:15 Issue:1, Jan.2000 Pages:128-134
- [2]-Guedes da Costa,E.;Guedes da Lima,A.;Naidu ,S.R. ;"An electrothermal model for complete metal oxide surge arresters"; Eleventh International Symposium on High Voltage Eng.,Vol:2, Aug.1999;Pages:242-245
- [3]-Petit,A.;Do,X.D.;St.-Jean,G.;"An experimental method to determine the electro-thermal model parameters of metal oxide surge arresters";IEEE Trans on Power Delivery, Vol.: 6 Issue: 2, April 1991;Page(s): 715 -721
- [4]- W.Schmidt, J.Meppelink, B.Richter, K.Feser, L.Kehl, D.Qui, "Behavior of

پیوست

مشخصات ابعادی (فیزیکی) و الکتریکی برقی ۱۱۰ kV

جدول (۲): مشخصات فیزیکی برقی

ارتفاع برقی	mm ۱۱۲۰
تعداد قرص ها	۳۲
ضخامت هر قرص	۲۰,۵ mm
قطر هر قرص	۷۱ mm
قطر داخلی سیلندر FRP	۷۳ mm
قطر خارجی سیلندر FRP	۸۶ mm
قطر سیلندر سیلیکون رابر	۹۴ mm
بیشترین قطر خارجی سیلیکون رابر	۲۰۲ mm

جدول (۳)- مشخصات الکتریکی برقی

Rated Voltage kVrms	MCOV kVrms	0.5 μsec 10 kA Max IR-kVcrest	500A Switching Surge Maximum IR-kVcrest	8/20 Maximum Discharge Voltage (kV Crest)					
				1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
108	84.0	288.9	205.6	221.8	233.2	244.0	262.6	290.7	330.1

جدول (۴)

Material	Thermal Conductivity W/(m°C)	Heat Capacity J/(kg.°C)	Density Kg/m ³	Height (m)	Area m ²	Volume m ³	Mass Kg	C _{Th} J/°C	G _{Th} W/°C
ZnO	26	490	5500	0.656	3.957*10 ⁻³	2.596*10 ⁻³	14.278	6996	214.22
Filler (Silicon Ruber)	0.25	880	1500	0.7	0.1583	3.165*10 ⁻³	0.4748	417.824	19.787
FRP Cylinder	0.84	620	2160	0.8	0.1997	2.596*10 ⁻³	5.607	3476.7	12.90
Silicon Ruber Outer Shed	0.25	880	1500	0.8	0.226	1.81*10 ⁻³	2.713	2387.4	7.0625