تامین برق مناطق روستائی وکم جمعیت قرارگرفته درمسیـــــر خطوط انتقال انـرژی الکتریکـی

محمد زینعلی

قسمت بـــرق بیـــرجند

چکیـــــده :

در این مقاله مسائل طراحی و ساختمان ، آزمایش و نصب سیستمی که به منظور تامین برق مناطق روستایی وکم جمعیت قرارگرفته در مسیر خطوط انتقال در نظر گرفته شده ، تشریح میگردد . این سیستم شامل یک مقسم ولتاژ خازنی ، یک سیم پیچ با هسته هوایی و تعدادی تجهیزات حفاظتی است کـــه شرح آن خواهد آمد . ضمناً سعی گردیده نتایج حاصل از آزمایشات نیز ذکر گردد .

۱ــ مقـــدمـــه :

تامین برق مناطق روستایی وکم جمعیت همواره از مباحثی بوده است که در کنفرانسهای متعددی که توسط سازمانهای مختلف ترتیب داده شده مورد بررسی قرار گرفته است گذشته از مسائل تکنیکی تامین برق این گونه مناطق ، یکی از موارد اصلی در برقدار نمودن مناطق نوین مسئله سرمایه گذاری است روشهای متداول در سیستمهای توزیع جهت تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز این مناطق ، عبارتست از ایجاد شبکه‌های شعاعی با ولتاژ ضعیف و یا متوسط که توسط نیروگاههای محلی ایجاد میگردد .

این روش نیاز به سرمایه گذاری زیادی جهت پخش بار دارد علاوه بر هزینه‌های نوین (ایجاد نیروگاه محلی) مسئله تلفات انرژی به علت طولانی بودن خطوط و نیز تنظیم بار باعث بالا رفتن هزینه تحویل یک کیلووات به مصرف کننده میگردد . لذا در مواردی که مصرف کنندگان با قدرتهای پایین دور از مراکز تولید و توزیع قرار دارند ، و در مجاورت خطوط انتقال واقعند بسیار اقتصادی است تا بطور مستقیم از طریق خطوط انتقال و بدون ساختن سیستمهای توزیع مرسوم تامین برق نمود .

مطالعات زیادی در زمینه استحصال انرژی الکتریکی از سیستمهای دارد خطوط انتقال انجام گرفته است ولی مهمترین مانع و اشکال در این طی اندک بودن انرژی قابل حصول میباشد (مثلا برای یک خط انتقال 72 kV با دو سیستم گارد تقط ۰.۱ کیلووات برای هر کیلومتر قابل استفاده میباشد) با توجه به بحثهایی که عنوان شده مقسمهای ولتاژ خازنی تا توان 25 KVA کاربرد بسیار مفیدی در تأمین برق مناطق روستایی وکم جمعیت دارند . این روش در مقایسه با روشهای متداول هزینه بسیار کمتری دارد . لازم به توضیح است مشکلات زیادی نظیر فرورزونانس و نوسانات دیگر گزارش شده کـــه اکثر آنها ناشی از اشباع القای مغناطیسی و ترانسفورماتورهای توزیعی که در مدار بکار میروند ، میباشد

به منظور برخورد و حل مشکلات اشاره شده در مؤسسه تحقیقات الکتریکی مکزیکو تحقیقاتی مفید انجام گردیده است • مهمترین نتیجه ای که از تحقیقات انجام یافته بدست آمده استفاده از یک سلف با هسته هوایی بین دو قسمت ترانسفورماتور توزیع میباشد • مشخصه سلف با هسته هوایی باعث جلوگیری از اشباع میگردد • ضمنا کاربرد آن به عنوان یک اندوکتانس جبران کننده باعث کاهش اضافه ولتاژ در شرایط خطا میگردد • هدف از این مقاله تقدیم نتایج حاصل از مراحل مختلف تحقیق میباشد • این مراحل عبارتند از :

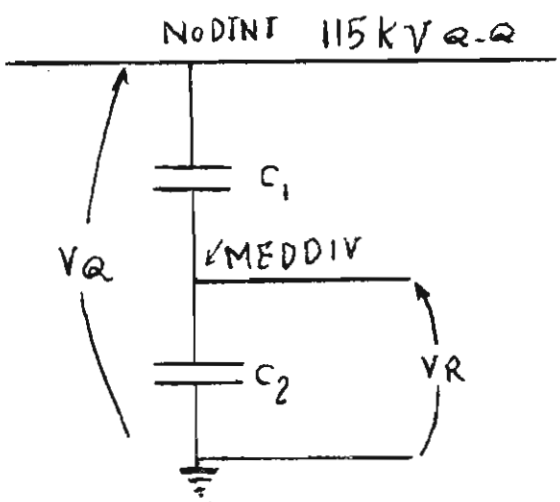
سیستم طراحی ، نقشه های اولیه ،آزمایشات مربوط و زمینه یابی نصب •

۲ــ سیستم طراحی :

طراحی یک مقسم ولتاژ مستلزم چند مرحله میباشد • این مراحل عبارتند از در نظر گرفتن حالات یا شرایط پایداری ، تجزیه و تحلیل حالتهای گذرا و نیز خطا ست سیستم که در ذیل تشریح میگردد •

الف • شرایط پایداری

هدف از کاربرد مقسم ولتاژ خازنی کاهش ولتاژ خط انتقال (115 KV بین دو فاز) و رسیدن به ولتاژ توزیع (13.2 KV فاز به فاز) میباشد و به همین خاطر است که اغلب از آن به عنوان یک ترانسفورماتور خازنی نیز یاد میشود • تصویر ذیل یک مقسم فاز به زمین را نشان میدهد فرض کنید VQ و VR بترتیب ولتاژهای خط انتقال و توزیع (کاهش یافته) باشند • با استفاده از معادله (۱) نسبت ولتاژها را می توان تابعی از تقسیم امپدانسهای Z_1 و Z_2 یا خازنهای C_1 و C_2 نشان داد •



(۱) تصویر مقسم ولتاژ خازنی با اتصال فاز به زمین

$$V_R = \frac{Z_2}{Z_1+Z_2} V_Q = \frac{C_1}{C_1+C_2} V_Q \quad (1)$$

ضریب $\frac{Z_2}{(Z_1+Z_2)}$ عبارتست از ضریب تبدیل سیستم مقدار امپدانس تونن مدار تصویر شماره (۱) خیلی بالاست

و نقط در باریهای زیاد تنظیم ولتاژ لازم می آید . به منظور اصلی این موضوع میتوان یک سلف را بصورت سری با بار اتصال داد تا قسمتی از امپدانس خازنی سری یا کل آنرا جبران نماید . انتخاب مجموعه خازنهای C_1 و C_2 میباید دو نیاز یا حالت را پاسخگو باشد . ابتدا اینکه ولتاژ C_2 بران - حالت بی بار برابر ولتاژ V_R باشد . این حالت را میتوان با استفاده از معادله (۱) بصورت:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{V_Q}{V_R} - 1 \qquad (2)$$

بیان نمود . دومین نیازی که میباید برآورده نردد این است که ماکزیمم ولتاژ حالت ماندن هر خازن میباید کمتر یا مساوی ولتاژ نامی (V_n) آن باشد . این واقعیت بایستی برای مجموعه خازن C_1 و بـــرای بحرانی ترین حالت (در باری که کاملا مقاومتی است) تعیین نردد .

این موضوع توسط نامعادله ذیل بیان میگردد .

$$V_{C_1}(max) = \sqrt{(I_L Z_L)^2 + (V_Q - V_R)^2} \leq V_n C_1 = \sqrt{P_n C_1 Z_1} \qquad (3)$$

در نامعادله فوق :

I_L = حد اکثر جریان بار

$P_n C_1$ = C_1 توان نامی مجموعه خازن

Z_L = امپدانس معادل سری با بار

از طرف دیگر بدترین حالت برای مجموعه خازن C_2 زمانی است که بار کاملا مقاومتی باشد فرض کنید کمترین ضریب توانی که با آن مواجهیم 0.8 باشد در این صورت نامساوی زیر بیان میگردد .

$$V_{C_2}(max) = \sqrt{(0.8 I_L Z_L)^2 + (V_R + 0.6 I_L Z_L)^2} \leq V_n C_2 = \sqrt{P_n C_2 Z_2} \qquad (4)$$

$P_n C_2$ = توان نامی مجموعه خازن (5)

با جایگزینی $Z_L = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$ دو نامساوی درجه دوم با متغیرهای Z_1 و Z_2 بصورت زیر بـــدست می آیـــد .

$$Z_1^2 \left\{\frac{I_L}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}}\right\}^2 - Z_1 P_n C_1 + (V_Q - V_R)^2 \leq 0 \qquad (6)$$

$$Z_2^2 \left\{\frac{I_L}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}}\right\}^2 - Z_2 \left(P_n C_2 - 1.2 \frac{I_L V_R}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}}\right) + V_R^2 \leq 0 \qquad (7)$$

با انتخاب توان نامی P_n هر مجموعه خازنی ، میتوان با استفاده از نامساویهای (6) و (7) محدودهٔ مقادیر C_1 و C_2 را مشخص نمود . محدوده تغییرات خازن C_2 را میتوان با ضرب ضریب $\frac{Z_1}{Z_2}$ در مقادیر محدوده (بازه) خازن C_1 بدست آورد . فعل منتزع (متقابل) این محدوده و محدوده مقادیری که با استفاده از انتخاب P_nC_1 بدست می آید ، مقدار C_1 را نتیجه میدهد و روش مشابه برای C_2 از توانهای P_nC_1 و P_nC_2 که قبلاً انتخاب شده اند به دست میآید . این روش را زمانی میتوان بکار برد که واحدهای خازنی مجموعه ها یکسان باشند . اگر کلاس ولتاژ یا توان واحدهای خازنی متفاوت باشند ، ولتاژ نامی (V_n) مجموعه خازنی را باید به طریق زیر بدست آورد . ابتدا جریان نامی هر واحد را (I_{nj}) می نامیم

$$I_{nj} = \frac{P_{nj}}{V_{nj}} \qquad (8)$$

آنگاه جریان می نیمم ($I_{n(min)}$) را تعیین و آنرا در مجموع امپدانسها ی واحدهای خازنی ضرب کمیکنیم با این عمل (9)

$$V_n = I_{n(min)} \left\{ \sum_j \frac{V_{nj}^2}{P_{nj}} \right\}$$

واحدهای خازنی که تشکیل دهنده مجموعه های C_1 و C_2 میباشند بصورت زیر حاصل میگردند

مجموعهٔ C_1 : چهار واحد ۵۰ کیلووار با ولتاژ 13.8 kV و دو واحد ۵۰ کیلووار با ولتاژ 14.4 kV .

مجموعهٔ C_2 : دو واحد ۱۰۰ کیلووار با ولتاژ نامی 12.47 kV

متدار امپدانس سلف انتخاب شده 7.27 اهم بدست می آید .

ب : بررسی حالات گذرا :

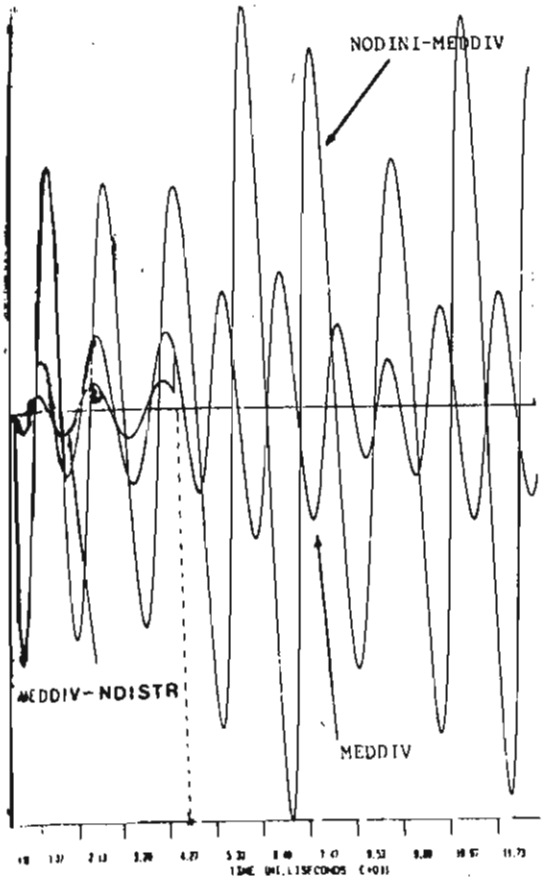
یکی از مهمترین مسائلی که قبل از هر چیز با آن روبرو با آن مواجهیم حالتهای گذرا در مقسم های ولتاژ است . اگرچه تجهیزات حفاظتی لازم در طراحی در نظر گرفته شده با این وجود بمنظور بررسی سیستم چند آزمایش انجام میدهیم .

۱ـ ایجاد یک اتصال کوتاه تحت ولتاژ 7.6 kV (تصویر الف را ملاحظه نمائید)

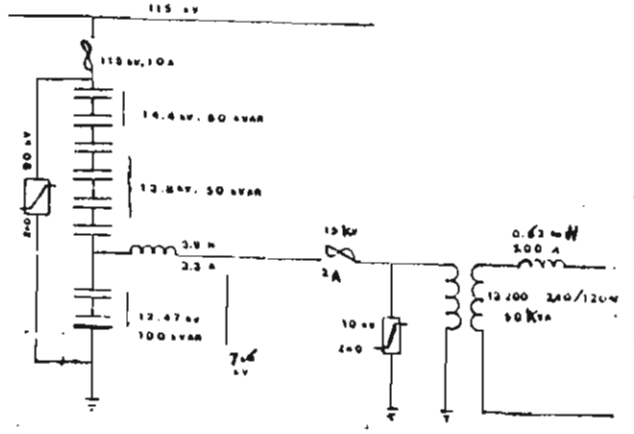
این آزمایش عبارتست از یک اتصال کوتاه در طرف فشار قوی ترانسفورماتور توزیع با یک راکتور که کاملا امپدانس خازنی را جبران میکند . اضافه ولتاژ هایی که در این حالت اعمال گردید محدود شده برابر بیشتر از آنی است که حفاظت سیستم در حالتهای عادی میبیند . لذا کوششهای زیادی انجام گردیده تا اینگونه خطاهای اضافه ولتاژ کاهش یابد راه حلی که بکار انجام انتخاب گردید این بود که یک سلف

جبران کننده با اندوکتانس 4 هانری در ورک اولیه ترانسفورماتور توزیع نصب گردد • پیش بینی شد چنانچه به جبران کننده بیشتری نیاز باشد در ثانویه ترانسفورماتور توزیع اندوکتانس مورد نیاز در نظر گرفته شود •

تصویر (ب) اسیلوگرام این حالت را نمایش میدهد



تصویر (ب)



تصویر (الف)

بیشترین اضافه ولتاژ روی مجموعه‌های خازنی C_1 و C_2 قرار میگیرد که در شرایط خطا بترتیب ۱/۲ و ۱/۲۸ پریونیت میباشد (با توجه به ولتاژ نامی شان) و نسبه به حالت نوسانی مستهلک شونده است •

۲ــ برقدار نمودن ترانسفورماتور توزیع •

هدف از انجام این محاسبات تعیین مجموعه خازنی مورد نیاز جهت برقدار نمودن ترانسفورماتور در حالت بدون بار بوده حالتهای ولتاژ و جریان گذرا نیز بمنظور بررسی احتمال وقوع پدیده فرورزونانس ناشی از اشباع هسته محاسبه شدند به عنوان نمونه چند حالتی که بررسی شدند عبارتند از :

حد اکثر اشباع مغناطیسی ٪ مثبت و منفی و ٪ ۵۰ اشباع مغناطیسی ،مثبت و منفی و زمانی که ولتاژ نامی پیك در C_2 از صفر عبور کند .

در هیچکدام از این حالتها پدیده فرو رزونانس مشاهده نگردید . تصویر ذیل اسیلو گرام بدترین حالت را نشان میدهد . حالت بی باری با توجه به عبور موج ولتاژ از صفر و حد اکثر پسماند مغناطیسی نشان داده شده. در این حالتها شکل موج جریان اشباع مشابه جریان هجومی میباشد خیلی وقتها در پیك منفی اشباع مشاهده شده است .

حد اکثر ولتاژ در C_2 (MEDDIV) 12.85KV است . هیچیك از این مقادیر در مدار تاثیری نمی گذارند (در تشکیل مدار) .

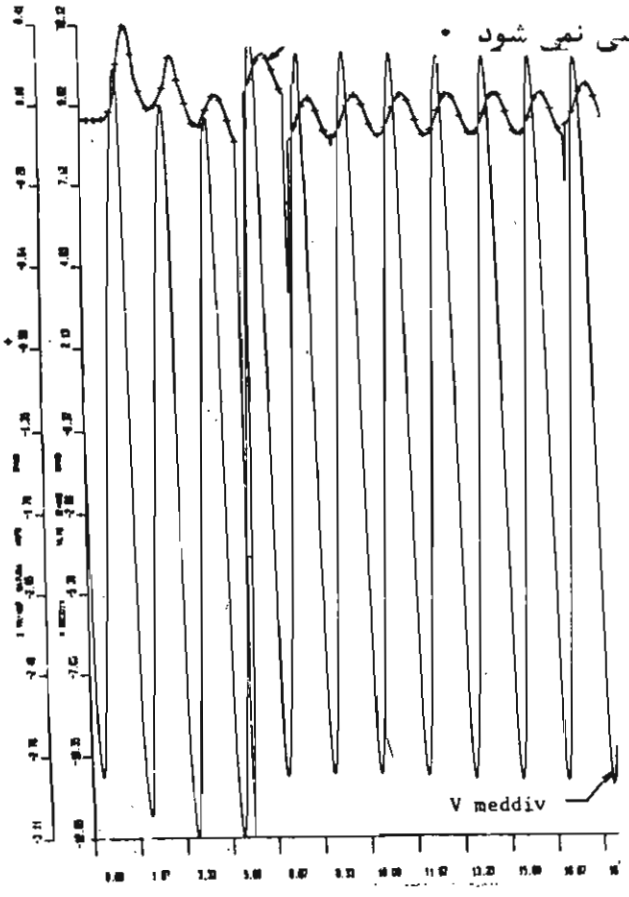
۳ـ اتصال (کلید زنی) مقسم ولتاژ خازنی، در شرایط مختلف سه حالت بررسی شد (به منظور تغییر حالات در زمان وصل مقسم ولتاژ)

ـ برقدار نمودن مقسم ولتاژ در لحظه ای که ولتاژ خط در حد اکثر مثبت و ترانسفورماتور توزیع در مدار نباشد .

ـ مشابه حالت فوق با این فرق که ترانسفورماتور به مدار وصل باشد

ـ وصل مجدد لحظه ای مقسم پس از جدا شدن آن از مدار تحت ولتاژ ماکزیمم و با پلا رتیه متقابل .

از سه حالت فوق بررسی شده فقط در حالت سوم اضافه ولتاژی که بتواند به C_1 آسیب برساند مشاهده شده است . لازم است به این نکته توجه شود که در این سیستم از مکانیزم وصل مجدد اتومات استفاده نمی گردد بنا بر این حالت آخر بررسی نمی شود .



- اسیلوگرام جریان و ولتاژ ترانسفورماتور توزیع در زمان برقدار نمودن آن و در حالت بی باری

ـ طراحی حفاظت سیستم

در طی طراحی این سیستم چندین مدل حفاظتی بررسی و محاسبات مختلفی جهت خازنها و راکتورها انجام گرفت • هدف از ارزیابی چندین مدل حفاظتی پایین آوردن جریان اتصال کوتاه و در نتیجه پایین آوردن اضافه ولتاژهای قرار گرفته بر روی C_1 و C_2 در این شرایط بود • در این حالت جهت حفاظت واحدهای خازنی از فواصل هوایی جرقه گیر (شاخک) استفاده شد نتایج نشان داد که اضافه ولتاژ قرار گرفته روی C_2 به حالت پایدار بر نمی گردد (عملکرد متوالی این حالت باعث این پدیده میگردد) لذا یک طرح حفاظتی بدون فاصله هوایی در نظر گرفته شد و راکتورهای تنظیم کننده بین اولیه و ثانویه ترانسفورماتور توزیع تقسیم گردید بطوری که جریانهای اتصال کوتاه روی اولیه کاهش یافتند به منظور جدا نمودن مقسم از خط انتقال یک فیوز قدرت قابل قطع در نظر گرفته شد (تک فاز) • این فیوز ناحیه بین اتصال به خط و مجموعه خازنی را حفاظت می نماید • فیوز مزبور به ازای خطاهای ایجاد شده در طرف فشار ضعیف و وجود جریانهای اینراش عملکردی نخواهد داشت • جهت حفاظت طرف اولیه ترانسفورماتور توزیع یک کات اوت فیوز در نظر گرفته شد • به منظور حفاظت این سیستم در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از رعد و برق از یک برقگیر (نوع اکسید روی) استفاده گردید تصویر ذیل شمای تک خطی مدار را که شامل کلیه تجهیزات میباشد نشان میدهد

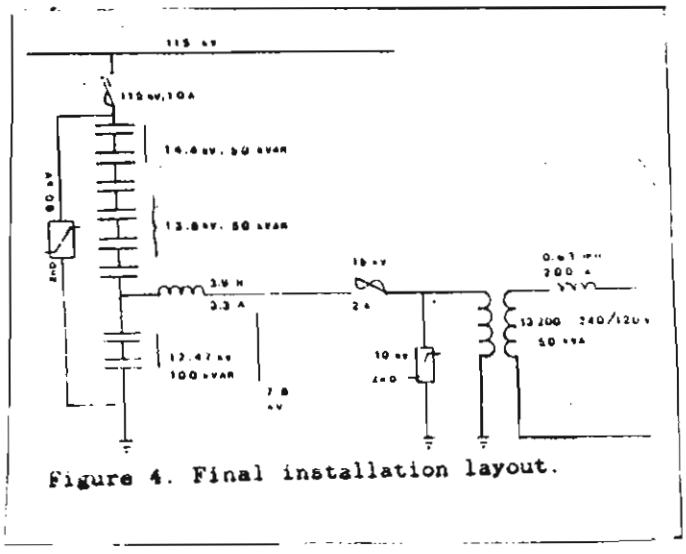


Figure 4. Final installation layout.

۳ـ تستهای آزمایشگاهی :

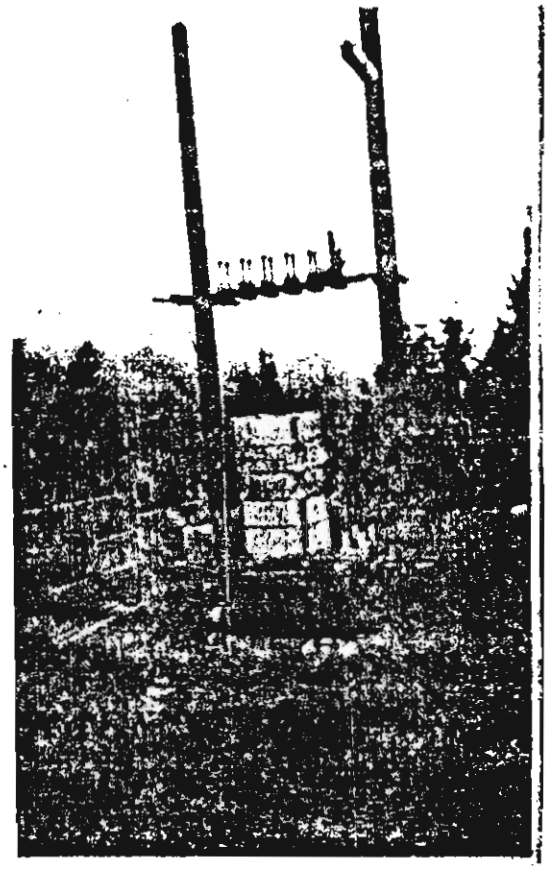
پس از اتمام ساخت و انجام بررسیهای لازم ، نمونه ساخته شده تحت تستهای آزمایشگاهی جامعی که در ذیل می آید ، قرار گرفت •

این آزمایشات مشخص کننده :

ـ کیفیت سرویس دهی (تنظیم ولتاژ) و تابلیت اطمینان

ـ کنترل عملکرد کل تجهیزات

ـ احتمال ایجاد آثار خطرناک بر روی خط انتقال و ارزیابی عملکرد تجربی آن می باشد



A ــ تستهای آزمایشگاهـــــی

بمنظور انجام آزمایشهای لازم ، سیستم مزبور بطور کامل در محوطه آزمایشگاه فشار قوی موسسه تحقیقات الکتریکی سالازار مکزیکو نصب گردید . جهت استقرار مجموعه‌های خازنی C_1 و C_2 و راکتور فشار قوی از دو پایه چوبی استفاده شد و ترانسفورماتور توزیع و راکتور ولتاژ پایین در کف آزمایشگاه مستقر گردید . (تصویر مقابل)

ــ

B ــ آزمایش اتصال کوتاه :

در این حالت سه وضعیت اتصال کوتاه مختلف بشرح زیر مورد بحث و آزمایش قرار گرفت .

۱ــ اتصال کوتاه در طرف ولتاژ پایین (7.6 KV) مقسم ولتاژ

سه نوع آزمایش در حالتی که ترمینالهای بار اتصال کوتاه و به زمین وصل شده انجام گردید

I ــ سیستم در حالتی که قبلا اتصال کوتاه شده برقدار گردید .

II ــ سیستم در حالت بی باری برقدار و سپس اتصال کوتاه گردید

III ــ یک مقاومت 7.7 اهم به مدار اضافه و نظیر حالات I و II عمل شد . جدول زیر نشاندهنده نتایج این آزمایشها میباشد .

نمونه	R_f**	KV (rms)*	Vc_2 (kv rms)	current (A)	Fault (s)**
۱	۰.۰	66.40	11.3	7.43	1.1
۲	۰.۰	65.03	9.4	7.55	0.9
۳	7.7	67.70	10.6	7.58	1.03

* ولتاژ فاز خط انتقال

** مقاومت اتصالی (اهم)

*** زمان خطا (ثانیه)

همانگونه که در جدول فوق نشان داده شده فیوز 2 آمپری خطا را پاک و ولتاژ خط بیش از 2٪ تغییر نمی کند .

۲ـ اتصال کوتاه در ثانویه ترانسفورماتور (120 V)

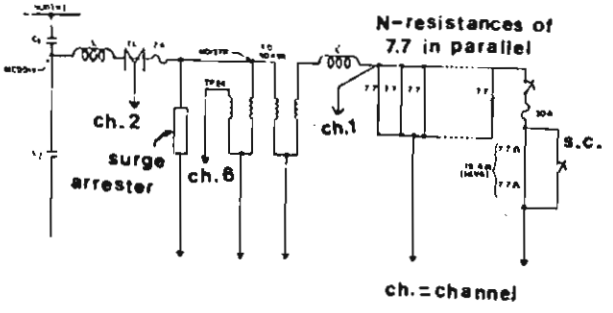
در این حالت با اتصال کوتاه فاز به زمین در طرف ترمینالهای بار و راکتور فشار ضعیف ایجاد و یک فیوز 200 آمپری بعنوان وسیله حفاظتی طرف ثانویه نصب گردید در این وضعیت کات اوت 2 آمپری طرف اولیه عمل ننمود و جریانهای اتصال کوتاه در ثانویه ترانسفورماتور توزیع به 1200 آمپر رسید . این جریان خطا توسط فیوز 2 آمپری در نیم ثانیه قطع گردید اما فیوز 200 آمپری عملکردی از خود نشان نداد .

ولتاژ اندازه گیری شده خط انتقال در طی این آزمایشات 73 کیلوولت و ولتاژ اولیه ترانسفورماتور توزیع توسط برقگیر به مقدار 16.5 کیلوولت محدود گردید با این وجود مقدار پیک موج سینوسی تا مقدار 30 کیلو ولت مشاهده شده است

۳ـ اتصال کوتاه در محل مصرف :

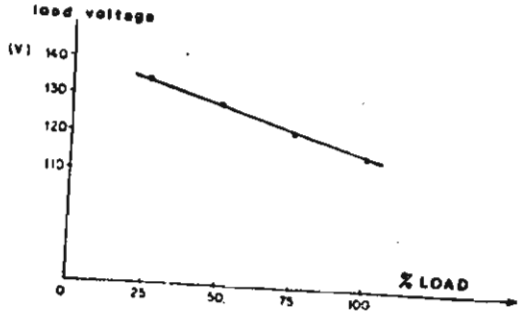
همانگونه که قبلا بحث شد سیستم مقسم ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور توزیع حفاظتی ندارد بنا بر این اتصالی ایجاد شده در قسمت ولتاژ پایین ترانسفورماتور توزیع می باید توسط فیوز 2 آمپر پاک شود . بخاطر عدم عملکرد فیوز مزبور در برابر خطاهای ایجاد شده در محل مصرف ، هر مصرف کننده می باید توسط فیوز مربوط به خود حفاظت گردد و خطای ایجاد شده به سیستم منتقل نگردد .

آزمایشاتی جهت روشن شدن موضوع انجام گردید بدین ترتیب که یک بار مقاومتی در فاصله ۵۰ متری در نظر گرفته شد (مدار آزمایش در زیر آمده است) . حرف N نشانگر تعداد مقاومت بکار رفته (مشترک موجود میباشد . این مقاومتها میتوانند نشانگر بارهای مختلفی در خطاهای خانگی باشند .



مدار آزمایش اتصال کوتاه

جریانهای اتصالی اندازه‌گیری شده حد اکثر بیش‌از 520 آمپر نبود و یک فیوز 30 آمپری در کمتر از سه سیکل و در همه آزمایشات عمل نموده و مناسب بنظر رسید • اضافه ولتاژهای اندازه‌گیری شده اولیه ترانسفورماتور به همان مقدار 16.5 کیلوولت حالت دوم رسید اما اضافه ولتاژی که در حالتهای قبل (ولتاژ پیک) مشاهده شد در این وضعیت با عملکرد برقگیر نوع اکسید روی (ZnO) بشدت کاهش یافت تصویر ذیل منحنی تنظیم ولتاژ را در طی این آزمایشات نشان میدهد •



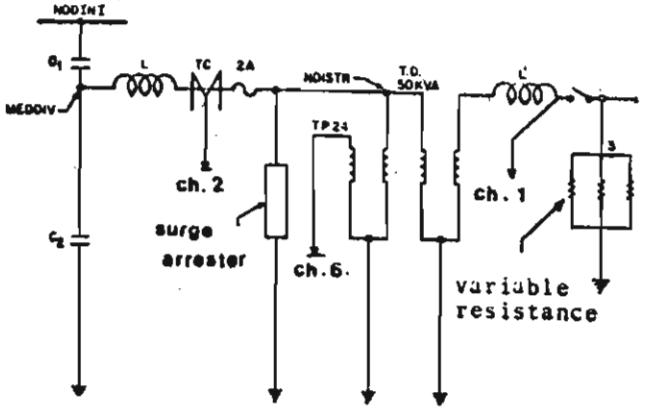
منحنی تنظیم ولتاژ

C — برقدار نمودن ترانسفورماتور توزیع

این آزمایشات جهت تعیین جریان اینراش ترانسفورماتور و تاثیر آن بر اضافه ولتاژ انجام گرفت سیستم در سه حالت بی باری ، ۲۵٪ بار و ۵۰٪ بار کامل برقدار گردید • پدیده فرو رزونانس یا رزونانس خطی در هیچ حالتی مشاهده نشد و ماکزیمم جریان اینراش 218 آمپر و ماکزیمم تغییر ایجاد شده در ولتاژ انتقال 6.2٪ مشاهده گردید

D — وصل بار :

چندین آزمایش با بارهای مختلف انجام گردید مدار آزمایش در شکل مقابل نشان داده شده است •

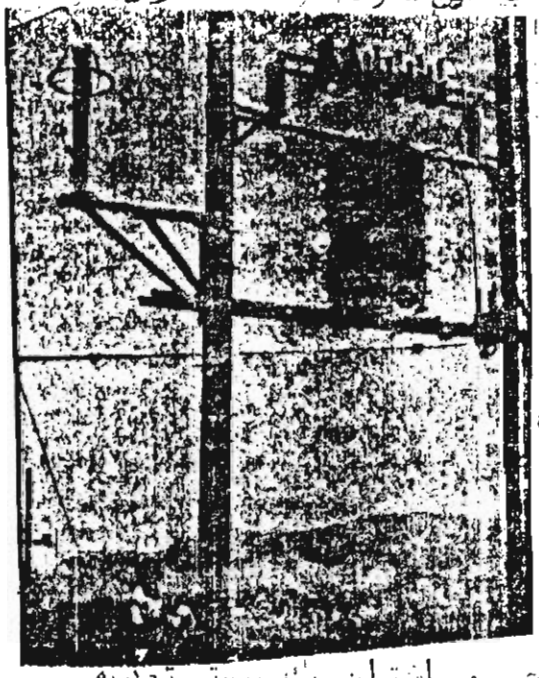


یکی از موضوعات قابل ملاحظه ، تلفات در بار کامل میباشد • زمانی که بار کامل قطع میگردد اضافه ولتاژی در اولیه ظاهر میگردد که توسط برقگیر نوع ZnO بمقدار 19.5 کیلوولت محدود میگردد

۴ــ محل نصب (محیط استقرار) •

به منظور آزمایش نمونه اصلی در محیط مورد نظر قریب چهل هیئت و انجمن بطور ریشه‌ای مطالعه کردند و سرانجام محل انجام آزمایش یک منطقه روستایی در حومه جیل پانسینگو ایالت گوئرو مکزیکو در نظر گرفته شد •

این محل از این دو دستگاه ترانسفورماتور سه فاز که بار در حدود 30 کیلوولت آمپر را تغذیه میکردند سرویس دهی میشد . پس از اتمام آزمایشات لازم و انتخاب مناسب ، تجهیزات حمل گردید . ابتدا یکی از ترانسفورماتور ها سه فاز نصب بار را تامین و بقیه بار توسط یک ترانسفورماتور تک فاز که به مقسم ولتاژ اتصال یافته بود تغذیه گردید . مقسم ولتاژ خازنی در 29 اکتبر 1987 برقدار گردید (تصویر ذیل) در همین نوبت اندازه گیری ولتاژ انجام گرفت . مقدار ولتاژ در مواقعی که فشار متوسط روشنایی عادی بود 135 ولت و زمانی که بار تنها سرویس دهی داشت 125 ولت بود . تا کنون نیز مشکلی در عملکرد سیستم گزارش نشده است .



۵ـ نتیجه : مناسب ترین طرحی که در تحقیقات مربوط به طراحی و ساختمان یک سیستم تغذیه مناطق روستایی مستقیماً اتصال یافته به خط انتقال معرفی شده است ارائه سیستم مقسم ولتاژ خازنی است . این مقسم توسط یکسری تستهای آزمایشگاهی کنترل میگردد . دارای دو ایلی حفاظتی نظیر فیوز HRC و برقگیر نوع اکسید روی (Zno) و ..... میباشد ایده استفاده از سلف جبران کننده بین دو لوله ترانسفورماتور توزیع به هماهنگی حفاظتی جریان خطا و تنظیم ولتاژ کمک میکند . استفاده از یک راکتور با هسته هوا امکان اتفاق پدیده فرورزونانس را به حد اقل کاهش میدهد با بررسی ساده مشخص گردیده است که استفاده از مقسم ولتاژ خازنی جهت تغذیه در مقایسه با احداث نیروگاههای محلی و ... به یارانه اقتصادی میباشد و همانگونه که قبلا نیز بیان گردید از 1987 که این سیستم بطور آزمایشی مورد بهره برداری قرار گرفته تا کنون مشکلی گزارش نگردیده است .