

فشار پس ماند الکتریکی در عایقها^(۱)

نوشته‌ی

امیرمنصور میری

دانشیار دانشکده فنی

پدیده پس ماند الکتریکی در عایقها از مدت‌ها پیش توجه محققین را بخود جلب کرده است و با وجود تمام کاوشهای انجام یافته در این زمینه هنوز هم باید بررسی‌های زیادی در این باره بعمل آید. تفحصات انجام یافته تا کنون منحصرأ بر روی جریان الکتریکی پس ماند متمرکز بوده و در رساله‌های علمی نگاشته شده در این زمینه، اشاره‌ای به پدیده فشار الکتریکی پس ماند نشده است. مقاله زیر منعکس کننده مطالعات و آزمایشهایی است که در مورد فشار الکتریکی پس ماند توسط نویسنده در سال ۱۹۶۵ در انستیتوی فشار قوی دانشگاه صنعتی کارلسروهه^(۲) انجام گردیده است. این بررسی بر روی دو نظریه زیر استوار است:

۱. - تئوری غیر همگنی واگنر (تئوری چندلایه واگنر)^(۳).

۲. - استفاده از قانون انطباق^(۴).

۱- اهمیت پدیده پس ماند در موارد زیر بیشتر مشهود میگردد:

۱.۱ - آزمایش کابلها و خازنهای فشار قوی بوسیله جریان دائم.

۱.۲ - اندازه گیری ضریب تلفات ($\tan\delta$) خازنها و کابلهای فشار قوی با «نوسانات مستهلک

شونده» [۱]^(۵) بعلاوه پدیده پس ماند الکتریکی بیان کننده مفاهیم زیر نیز میباشد.

۱— Nachladespannung in Dielektrika (Residual Voltage in the Dielectric)

۲— Institut fuer Hochspannung Elektrische Anlagen und Elektrische Antriebe an der Technischen Hochschule Karlsruhe

۳— Wagnersche Mehrschichttheorie

۴— Superposition

۵— Verlustfaktormessung mit dem Verfahren der gedampften Schwingung (Using Damped Oscillation Method for Measuring Dielectric Loss Factor)

۱۳ - هرگاه دوجوشن خازن پر شده‌ای را اتصال کوتاه دهیم این خازن تخلیه شده و پس از گذشت زمان کوتاهی با قطع ارتباط بین دوجوشن بار پس ماندی در عایق واقع شده بین دوجوشن باقی میماند که فشار الکتریکی ای بهمراه دارد. با اتصال کوتاه مجدد جوشن ها میتوان خازن را دگر بار تخلیه کرد.

۱۴ - تلفات دی الکتریک یک خازن تحت فشار متناوب خیلی بیش از تلفات ناشی از هدایت اهمی بین دوجوشن خازن میباشد.

۱۵ - عدد دی الکتریک نسبی و کاپاسیته عایق تابعی از فرکانس فشار گذارده شده بوده و از طول زمانی که عایق تحت فشار الکتریکی دائم قرار میگیرد نیز تبعیت میکنند.

۱۶ - چنانچه یک خازن بارگیری ویا تخلیه گردد علاوه بر جریانهای اهمی و خازنی ، جریان دیگری از آن بنام جریان پس ماند، عبور خواهد کرد.

پدیده‌های گفته شده در بالا از یکدیگر مستقل نبوده بلکه حتی بین آنها ارتباط نزدیکی نیز وجود دارد [۲].

۲- توجه به پدیده پس ماند در عایقهای و تکیه به آزمایشها مختلف نتایج عملی زیر را بدست میدهد.

۲۱ - کم کردن تلفات دی الکتریک در کابلها و تهیه خازنهای با حداقل تلفات که برای اندازه گیری فشارهای بسیار زیاد مورد استفاده قرار میگیرند.

۲۲ - تشخیص ناخالصی در عایق [۳].

۲۳ - اندازه گیری مقاومت عایقی [۴].

برای بدست آوردن مقاومت عایقی ، فشار دائم معینی را بر روی یک عایق قرار داده و از نسبت بین فشار جریان گذشته در عایق مقاومت آن بدست میآید. جریان الکتریکی ای که از عایق عبور مینماید قابل تقسیم بسه مؤلفه است.

۲۳۱ - جریان اهمی.

۲۳۲ - جریان خازنی.

۲۳۳ - جریان پس ماند.

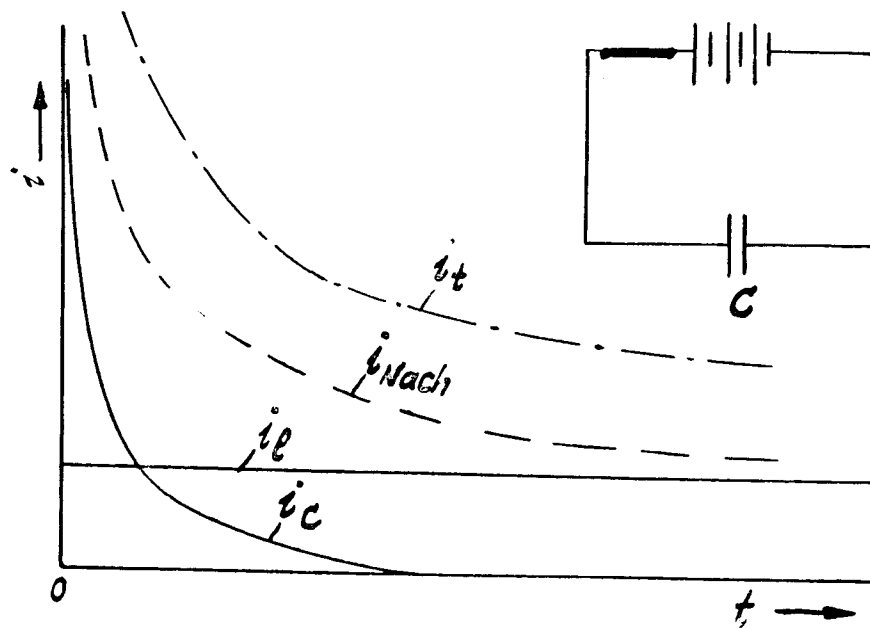
مقدار حقیقی مقاومت عایقی فقط تابعی از جریان اهمی عایق نیست بلکه در حین اندازه گیری تحت تأثیر دو عامل نامبره شده در ۲۳۲ و ۲۳۳ مقدار جریان حقیقی تغییر میکند. اثر جریان خازنی فوری مستهلک میشود لیکن عبور جریان پس ماند تا مدت زیادی ادامه دارد و در نتیجه مقاومت عایقی متناسب با زمان تحت فشار بودن عایق ، زیادتر میشود ، از اینرو مقاومت عایقی را بر حسب زمان معین استاندارد شده ای (یک دقیقه) تعیین مینمایند.

بدیهی است که پس از این زمان نیز جریان پس ماند وجود دارد که با توجه به آن مقاومت اصلی عایقی از مقدار اندازه گرفته شده ، بیشتر میگردد.

۳ - آنچه که در این زمینه انجام یافته است.

تا کنون تئوریهای مختلفی برای پدیده پس ماند وضع شده‌اند و آزمایشهایی نیز در این زمینه از اواخر قرن نوزدهم انجام گرفته است که بعلاوه دقیق نبودن وسائل اندازه‌گیری در آنزمان مقادیر اولیه بدست آمده حائز اهمیت نمیباشند. فهرست کاملی از کارهای انجام شده در آثار Schweidler [۲] موجود میباشد. در بین تئوریهای مختلفی که برای تفسیر این پدیده بیان شده‌اند دو تئوری اول که Maxwell [۵] و Wagner [۹-۶] آنرا بنیان گذاری کرده‌اند، پدیده پس ماند را در اثر نامتجانس بودن ماده فرض نموده و هیچگونه اشاره‌ای بساختمان اتمی ننمایند و طبق این تئوری وضع یک عایق در حوزة الکتریکی توسط دو ضریب دی‌الکتریک « ϵ » و هدایت « χ » معین میشود. یک عایق از تعدادی لایه با عدد دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی مختلف تشکیل گردیده است. هرچه غیر همگنی عایق کمتر شود اثر پدیده پس ماند الکتریکی در آن ضعیفتر میشود. مثلاً پس ماند الکتریکی در اثر ذوب کردن اجسام ناپدید میشود و در گازها بطور محسوسی کوچک میگردد.

در تئوری دوم که مربوط به Schweidler [۲] و Debye میباشد پدیده پس ماند الکتریکی را مربوط بوجود ملکولهای دو قطبی میدانند. کارهای تحقیقاتی انجام شده تماماً بر اساس جریان پس ماند می باشد و برای مجسم نمودن این جریان طبق شکل ۱ خازنی را تحت فشار جریان دائم قرار میدهم. با جمع نمودن جریان هادی i_1 و جریان خازنی i_c که بشکل یک منحنی توانی با پایه (e) میباشد جریانی بدست میآید که در هر لحظه کمتر از مقدار جریان قابل اندازه‌گیری میباشد و این خود بیان کننده آنستکه باید جریانی اضافی (I_{Nach}) بمجموع فوق افزود تا جریان اصلی i_t بدست آید (شکل ۱).



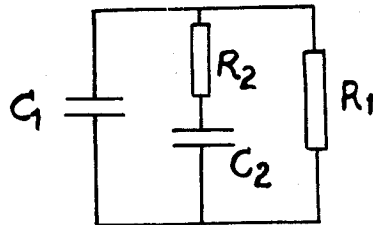
شکل ۱

برای جریان پس ماند i_{Nach} در رابطه زیر که هر دو تا حدود دقیقی مسیر جریان را رسم میکنند پیش بینی شده است.

$$(۱) \quad i_{Nach} = A \cdot e^{-kt}$$

$$(۲) \quad i_{Nach} = A \cdot t^{-m}$$

Dunsheath [۱۰] یک خازن را طبق مدار معادل الکتریکی شکل ۲ نشان میدهد که در آن ظرفیت خازن بر اثر ابعاد هندسی آن است و R_1 مقاومت اهمی عایق و C_2 و R_2 نشان دهنده پدیده پس ماند در عایق



شکل ۲

میباشد. مدار معادل الکتریکی شکل ۲ غالباً کفایت بیان حالت الکتریکی عایق حقیقی را نمیکند بلکه باید آنرا بصورت یک سری از ترکیب خازن و مقاومت اهمی نشان داد [۱۱].

۴- بررسی علمی مطالب گفته شده در بالا - چنانچه خازن حقیقی (چندلایه) را تحت فشار جریان دائمی قرار دهیم لحظه ای پس از اتصال، فشار الکتریکی موله به نسبت اعداد دی الکتریک لایه بر روی عایق تقسیم میشود. حالت فوق پایدار نبوده و در اثر موجود بودن و افزایش هدایت الکتریکی در لایه ها، پتانسیل به نسبت هدایت الکتریکی لایه ها تقسیم میشود.

$$(۳) \quad \frac{\epsilon_{r1}}{x_1} = \frac{\epsilon_{r2}}{x_2} = \dots = \frac{\epsilon_{rn}}{x_n}$$

حالت ویژه نشان داده شده در رابطه ۳ تساوی مؤلفه های عمودی چگالی شار الکتریکی لایه ها را بایکدیگر برقرار میسازد و رابطه :

$$(۴) \quad D_{n1} = D_{n2} = D_{n3} = \dots = D_{nn}$$

را بدست میدهد و در غیر اینصورت یعنی زمانی که :

$$(۵) \quad \frac{\epsilon_{rv}}{x_v} \neq \frac{\epsilon_{rv} + 1}{x_v + 1}$$

باشد برای مؤلفه های عمودی شار الکتریکی لایه ها نقاط منفرد (Discontinuons) بوجود می آیند و رابطه :

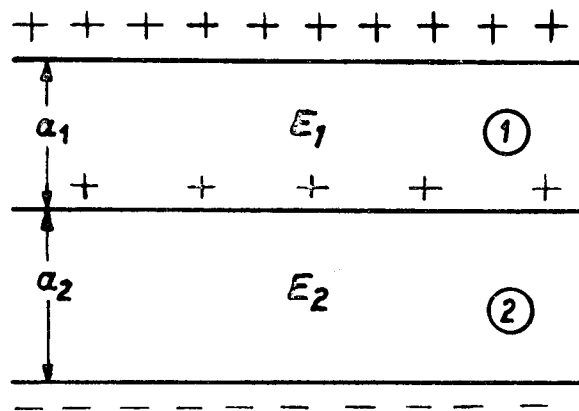
$$(۶) \quad \frac{D_{nv}}{D_{nv+1}} = \frac{\epsilon_{rv} \cdot x_v + 1}{\epsilon_{rv+1} \cdot x_v}$$

برقرار میشود. این رابطه نشان میدهد که بر روی فصل مشترک لایه ها بار الکتریکی ای باقی میماند. در صورت

اتصال جوشن های خازن حقیقی فوق بیکدیگر با توجه به این مسئله که سطح مشترک لایه ها فاقد بار الکتریکی باشند بار جوشنها از راه هادی تخلیه میشود و چنانچه بارهای مرزی در سطوح مشترک موجود باشند پس از عمل تخلیه و قطع ارتباط بین جوشن ها این بارهای باقیمانده ایجاد فشاری الکتریکی بین سطوح مشترک و جوشن ها مینماید که در صورت اتصال مجدد جوشن ها بایکدیگر جریانی در مدار ایجاد میشود که قابل اندازه گیری است. تبعیت فشار الکتریکی پس ماند از زمان « $U_{Nach} = f(t)$ » را بنا بر نظریه غیر همگنی (چند لایه) K. W. Wagner [۹-۶] و Maxwell [۵] نشان داده و علاوه بر این تابع فوق را نیز بر حسب فرضیات Hopkinson و Schweidler و Pellat [۱۲] تعیین مینمائیم.

۵- محاسبه فشار الکتریکی پس ماند بر حسب زمان طبق فرضیه Maxwell - ابتدا خازن دو لایه ای

را طبق شکل ۳ در نظر میگیریم و فشار الکتریکی پس ماند را در زمان t محاسبه میکنیم:



شکل ۳

که در آن :

$a =$	ضخامت لایه	$U_A = U_{Auf} =$	فشار کل (فشار بارگیری)
$E =$	شدت حوزه الکتریکی	$\epsilon_r =$	عدد دی الکتریک نسبی
$x =$	ضریب هدایت الکتریکی	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$	
$Q =$	بار الکتریکی	$t_A = t_{Auf} =$	زمان بارگیری
$F =$	سطح لایه	$t_E = t_{Ent} =$	زمان تخلیه
$j =$	چگالی جریان کل	$k_0, k_1, k_2 =$	ضرایب ثابت
$i =$	جریان در لایه		
$U =$	فشار لایه		

در زیر عکس العمل خازن را در سه مرحله بررسی مینمائیم.

۱- زمان بارگیری خازن t_A .

در حالت بارگیری خازن ضرایب هدایت x_1 و x_2 در لایه ها جریانهائی با چگالی $\frac{i_1}{F}$ و $\frac{i_2}{F}$ را

ایجاد مینمایند که روابط زیر نشان دهنده آنها میباشند :

$$(۷) \quad \frac{i_1}{F} = x_1 \cdot E_1$$

$$(۸) \quad \frac{i_2}{F} = x_2 \cdot E_2$$

چنانچه $\frac{\epsilon_1}{x_1} \neq \frac{\epsilon_2}{x_2}$ برقرار گردد بر روی فصل مشترك لایه‌ها بارهای الکتریکی جمع میشوند و در نتیجه رابطه زیر پدید میآید (بار مثبت بر روی فصل مشترك) :

$$(۹) \quad \frac{Q}{F} = D_2 - D_1$$

با توجه به اینکه اختلاف جریانها برابر با اختلاف تغییرات زمانی بارها است نتیجه میشود که :

$$(۱۰) \quad i_1 - i_2 = \frac{dQ_2}{dt} - \frac{dQ_1}{dt}$$

باتوجه به روابط زیر و در نظر گرفتن معادله‌های ۳ و ۴ :

$$(۱۱) \quad D_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} E_1$$

$$(۱۲) \quad D_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_2$$

معادله ۱ بصورت زیر در میآید :

$$(۱۳) \quad x_1 E_1 - x_2 E_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{dE_2}{dt} - \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{dE_1}{dt}$$

و یا :

$$(۱۴) \quad x_1 E_1 + \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{dE_1}{dt} = x_2 E_2 + \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{dE_2}{dt} = j$$

از رابطه فوق چنین استنباط میشود که جریان در هر لایه از دو مؤلفه تشکیل گردیده است یکی جریان اهمی $x \cdot E$ و دیگری جریان جابجائی $\epsilon_0 \epsilon_r \frac{dE}{dt}$ که جمع آنها مقدار ثابتی بوده و این مقدار در تمام لایه‌ها یکسان میباشد. از طرفی جمع فشار الکتریکی بین لایه‌ها برابر فشار کسل بارگیری است :

$$(۱۵) \quad U_A = U_1 + U_2 = a_1 E_1 + a_2 E_2$$

از روابط ۱۴ و ۱۵ معادله دیفرانسیلی زیر را بدست میآوریم :

$$(۱۶) \quad \frac{dE_1}{dt} + \frac{1}{T} E_1 = \frac{x_2 \cdot U_A}{\epsilon_0 (a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1})}$$

که در آن :

$$(۲۷) \quad T = \frac{\epsilon_0 (a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1})}{a_1 x_1 + a_2 x_2}$$

معادله دیفرانسیلی فوق دارای ریشه‌ای برابر :

$$(18) \quad E_1 = \frac{x_2 \cdot U_A}{a_1 x_2 + a_2 x_1} + k_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

است. ضریب ثابت k_0 را از مقادیر اولیه تعیین مینمائیم:
چگالی بار گرفته شده از مولد:

$$(19) \quad \frac{Q}{F} \int j dt = x_1 \int E_1 dt + \epsilon_0 \epsilon_{r1} E_1 = x_2 \int E_2 dt + \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_2$$

میشود و چون $\int E dt$ برای زمانهای کوچک dt قابل اغماض است لذا بازاء $t=0$ مقادیر لحظه‌ای شدت حوزه E_1 و F_0 از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$(20) \quad \frac{Q}{F} = \epsilon_0 \epsilon_{r1} E_{10} = \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_{20}$$

از ترکیب معادله فوق با رابطه:

$$U_A = a_1 E_{10} + a_2 E_{20}$$

چنین نتیجه میشود:

$$(21) \quad E_{10} = \frac{\epsilon_{r2} U_A}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}}$$

$$(22) \quad E_{20} = \frac{\epsilon_{r1} U_A}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}}$$

پس از قراردادن رابطه ۲۲ در ۱۸ برای ضریب k_0 چنین خواهیم داشت ($t=0$)

$$(23) \quad K_0 = U_A \left(\frac{\epsilon_{r2}}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}} - \frac{x_2}{a_1 x_2 + a_2 x_1} \right)$$

و در نتیجه معادله ۱۸ بصورت زیر درمی‌آید

$$(24) \quad E_1 = \frac{x_2 U_A}{a_1 x_2 + a_2 x_1} + U_A \left(\frac{\epsilon_{r2}}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}} - \frac{x_2}{a_1 x_2 + a_2 x_1} \right) e^{-\frac{t}{T}}$$

و بهمین طریق:

$$(25) \quad E_2 = \frac{x_1 U_A}{a_1 x_2 + a_2 x_1} + U_A \left(\frac{\epsilon_{r1}}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}} - \frac{x_1}{a_1 x_2 + a_2 x_1} \right) e^{-\frac{t}{T}}$$

از معادله‌های ۲۴ و ۲۵ استنباط میشود که در وهله اول شدت حوزه‌ها در لایه‌ها تابع اعداد دی‌الکتریک بوده لیکن پس از آن مقادیر آنها تابع هدایت لایه‌ها میگردند. پس از تمام شدن عمل بارگیری در زمان t_A بردار شدت حوزه‌ها مقادیر زیر را می‌پذیرند:

$$(26) \quad E_1(t_A) = \frac{x_2 \cdot U_A}{a_1 x_2 + a_2 x_1} + U_A \left(\frac{\epsilon_{r2}}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}} - \frac{x_2}{a_1 x_2 + a_2 x_1} \right) e^{-\frac{t_A}{T}}$$

$$(۲۷) \quad E_r(t_A) = \frac{x_1 \cdot U_A}{a_1 x_r + a_2 x_1} + U_A \left(\frac{\epsilon_{r1}}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}} - \frac{x_1}{a_1 x_r + a_2 x_1} \right) e^{-\frac{t_A}{T}}$$

۲۲ - زمان تخلیه خازن t_E .

اکنون دوجوشن خازن را کورسیر کوئی مینمائیم. در لحظه اول بار جوشن ها متعادل گردیده (پلاریزاسیون لحظه ای) بنابراین مقادیر شدت حوزه های لایه ها بمیزان معادلات ۲۱ و ۲۲ کمتر میشوند. شرایط اولیه این حالت بقرار زیرند:

$$(۲۸) \quad E_1^+(t_A + \Delta t) = E_1(t_A) - \frac{\epsilon_{r2} \cdot U_A}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}}$$

$$(۲۹) \quad E_r^+(t_A + \Delta t) = E_r(t_A) - \frac{\epsilon_{r1} \cdot U_A}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}}$$

در روابط فوق E_1^+ و E_r^+ شدت حوزه ها در لایه ها در حین تخلیه میباشند. معادله دیفرانسیلی مرحله تخلیه بصورت زیر است:

$$(۳۰) \quad \frac{dE_1^+}{dt} + \frac{1}{T} E_1^+ = 0$$

و ریشه آن عبارتست از:

$$(۳۱) \quad E_1^+ = K_1 e^{-\frac{t-t_A}{T}}$$

$$(۳۲) \quad K_1 = E_1^+(t_A + \Delta t)$$

بازاء $t = t_A + t_E$ از معادله ۳۱ با روابط ۲۸ و ۲۹ مقدار شدت حوزه E_1^+ را پس از زمان تخلیه

t_E بدست میآوریم:

$$(۳۳) \quad E_1^+(t_A + t_E) = U_A \left[\frac{x_r}{a_1 x_r + a_2 x_1} - \frac{\epsilon_{r1}}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}} \right] \left(1 - e^{-\frac{t_A}{T}} \right) e^{-\frac{t_E}{T}}$$

به همین ترتیب برای E_r^+ نتیجه زیر بدست میآید:

$$(۳۴) \quad E_r^+(t_A + t_E) = U_A \left[\frac{x_1}{a_1 x_r + a_2 x_1} - \frac{\epsilon_{r1}}{a_1 \epsilon_{r2} + a_2 \epsilon_{r1}} \right] \left(1 - e^{-\frac{t_A}{T}} \right) e^{-\frac{t_E}{T}}$$

۳۳ - زمان پس از قطع ارتباط جوشنها .

در این حالت جریانی در مدار هادی خارجی خازن وجود ندارد بنابراین رابطه زیر برقرار است:

$$(۳۵) \quad x_1 E_1^{++} + \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{dE_1^{++}}{dt} = 0$$

و یا:

$$(۳۶) \quad \frac{dE_1^{++}}{dt} + \frac{x_1}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}} E_1^{++} = 0$$

ریشه معادله دیفرانسیلی فوق عبارت زیر است

$$(۳۷) \quad E_{1^{++}} = K_r e^{-\frac{x_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1}} [t - (t_A + t_E)]}$$

که در آن :

$$(۳۸) \quad K_r = E_{1^+}(t_A + t_E) = E_{1^{++}}(t_A + t_E + \Delta t)$$

و یا منظور کردن مقدار ضریب K_r در معادله ۳۷ نتیجه میشود که

$$(۳۹) \quad E_{1^{++}} = U_A \left[\frac{x_r}{a_1 x_r + a_r x_1} - \frac{\varepsilon_{r2}}{a_1 \varepsilon_{r2} + a_r \varepsilon_{r1}} \right] \left(1 - e^{-\frac{t_E}{T}} \right) \cdot e^{-\frac{t_E}{T}} \cdot e^{-\frac{x_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1}} [t - (t_A + t_E)]}$$

و بهمین طریق :

$$(۴۰) \quad E_{r^{++}} = U_A \left[\frac{x_1}{a_1 x_r + a_r x_1} - \frac{\varepsilon_{r1}}{a_1 \varepsilon_{r2} + a_r \varepsilon_{r1}} \right] \left(1 - e^{-\frac{t_A}{T}} \right) \cdot e^{-\frac{t_E}{T}} \cdot e^{-\frac{x_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2}} [t - (t_A + t_E)]}$$

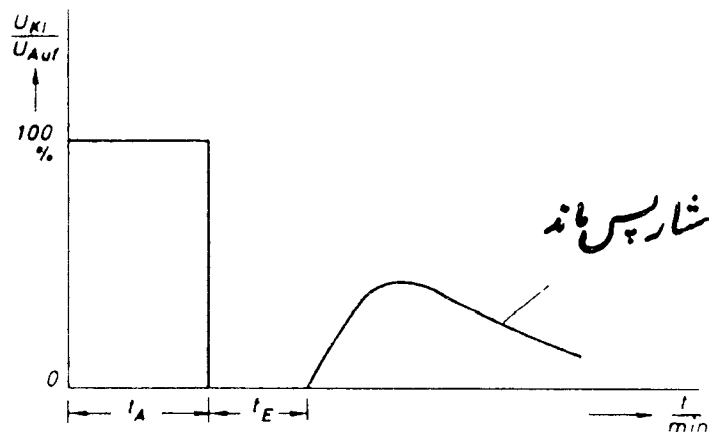
چون مقدار U_A همواره بنابر رابطه ۱۰ معلوم است بنابراین فشار پس ماند را از رابطه زیر بدست میآوریم

$$(۴۱) \quad U_{Nach} = a_1 E_{1^{++}} + a_r E_{r^{++}}$$

با قراردادن معادلات ۳۹ و ۴۰ در رابطه ۴۱ نتیجه زیر حاصل میشود

$$(۴۲) \quad U_{Nach} U_A \left(1 - e^{-\frac{t_A}{T}} \right) \cdot e^{-\frac{t_E}{T}} \left[a_1 \left(\frac{x_r}{a_1 x_r + a_r x_1} - \frac{\varepsilon_{r2}}{a_1 \varepsilon_{r2} + a_r \varepsilon_{r1}} \right) e^{-\frac{x_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1}} [t - (t_A + t_E)]} + a_r \left(\frac{x_1}{a_1 x_r + a_r x_1} - \frac{\varepsilon_{r1}}{a_1 \varepsilon_{r2} + a_r \varepsilon_{r1}} \right) e^{-\frac{x_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2}} [t - (t_A + t_E)]} \right]$$

منحنی زیر نمودار معادله فوق میباشد :



شکل ۴

از آنچه گفته شد نتایج زیر بدست میآید :

۱ - تابع زمانی فشار پس ماند یک خازن دولایه ای از ترکیب دو تابع توانی با پایه (e) تشکیل شده است و بطوریکه مشاهده میشود در هر یک از دو تابع نامبرده تخلیه بار الکتریکی هر لایه هدایت همان لایه را تحت تأثیر قرار میدهد.

۲ - بازای $t = t_A + t_E$ مقدار فشار پس ماند برابر صفر میشود.

۳ - برای زمانهای Relaxation برابر لایه ها $\left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}{x_1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}{x_2}\right)$ مقدار فشار پس ماند مساوی صفر میگردد (فشار پس ماند پدید نمیآید).

۴ - با زیاد نمودن زمان بارگیری t_A فشار پس ماند بزرگتر میشود.

۵ - با زیاد نمودن زمان تخلیه t_E فشار پس ماند کوچکتر میشود.

۶ - برای بررسی اثر میزان فشار بارگیری بر روی فشار پس ماند Evershed [۴] تابع بودن هدایت لایه ها از فشار بارگیری را یک رابطه Exponential فرض نموده بطوریکه با بالا رفتن فشار بارگیری هدایت لایه ها بیشتر میشود. چنانچه $a_1 = a_2$ و $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = \epsilon_r$ و $x_1 > x_2$ فرض شوند معادله ۲ بصورت ساده زیر درمیآید :

$$(43) \quad U_{Nach} = U_A \left(1 - e^{-\frac{t_A}{T}} \right) e^{-\frac{t_E}{T}} \left[\left(\frac{x_2}{x_1 + x_2} - \frac{1}{2} \right) e^{-\frac{x_1}{\epsilon_0 \epsilon_r} [t - (t_A + t_E)]} + \left(\frac{x_1}{x_1 + x_2} - \frac{1}{2} \right) e^{-\frac{x_2}{\epsilon_0 \epsilon_r} [t - (t_A + t_E)]} \right]$$

دو جمله

$$(44) \quad \left(\frac{x_2}{x_1 + x_2} - \frac{1}{2} \right) e^{-\frac{x_1}{\epsilon_0 \epsilon_r} [t - (t_A + t_E)]}$$

و

$$(45) \quad \left(\frac{x_1}{x_1 + x_2} - \frac{1}{2} \right) e^{-\frac{x_2}{\epsilon_0 \epsilon_r} [t - (t_A + t_E)]}$$

داخل کروشه فشارهای لایه ها را بیان میدارند. برای $x_1 > x_2$ فشار U_2 بیشتر از U_1 میشود و این موضوع طبق فرضیه Evershed نتیجه $\Delta x_2 > \Delta x_1$ را بدست میدهد بنابراین روابط زیر بدست میآیند :

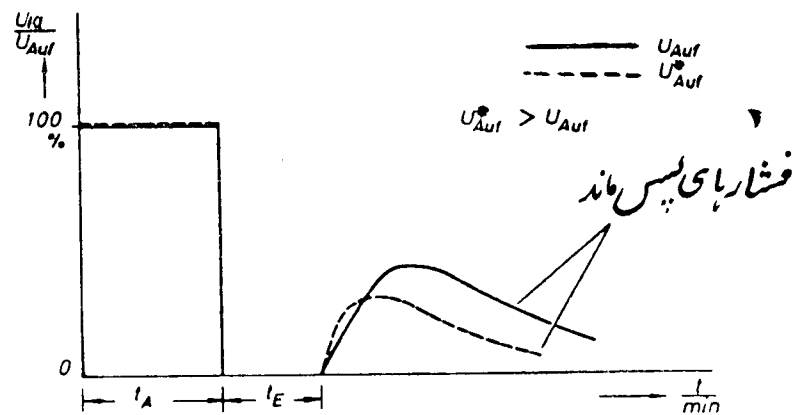
$$\frac{\Delta x_1}{x_1} < \frac{\Delta x_2}{x_2}$$

$$\frac{x_2}{x_1 + x_2} = \frac{1}{1 + \frac{x_1}{x_2}} < \frac{1}{2} \quad \text{و} \quad \frac{x_1}{x_1 + x_2} > \frac{1}{2}$$

$$\frac{x_2 + \Delta x_2}{x_1 + x_2 + \Delta x_1 + \Delta x_2} = \frac{1}{1 + \frac{x_1}{x_2} \left(\frac{1 + \frac{\Delta x_1}{x_1}}{1 + \frac{\Delta x_2}{x_2}} \right)} > \frac{x_2}{x_1 + x_2}$$

$$\frac{x_1 + \Delta x_1}{x_1 + x_2 + \Delta x_1 + \Delta x_2} < \frac{x_1}{x_1 + x_2}$$

از روابط فوق نتیجه میشود که مقادیر اولیه دوجمله توانی با پایه (e) (۳) و (۳) برای فشار بارگیری بزرگتر، کوچکتر میشوند و بعلاوه این جمله‌ها با میل تندتری نزولی میگردند. شکل ۵ نشان دهنده نمودار زمانی فشار پس ماند برای دوفشار بارگیری مختلف است.



شکل ۵

بطوریکه مشاهده میشود با زیاد شدن فشار بارگیری مقدار ماکزیمم نسبی فشار پس ماند الکتریکی کوچکتر شده بعلاوه این نقطه ماکزیمم زودتر فرا میرسد. مطالب فوق را میتوان با افزایش تعداد لایه عمومیت داد در اینصورت فشار پس ماند الکتریکی برابر جمع توابع توانی با پایه (e) تمام لایه‌ها میگردد مقدار آن متناسب با افزایش مقدار مطلق فشار بارگیری و زمان تأثیر آن بالا میرود.

۶- تعیین منحنی فشار پس ماند الکتریکی بکمک قانون Superposition بین پدیده پس ماند الکتریکی و فشار مکانیکی Boltzmann [۱۳] وجه تشابهی موجود میباشد. در این وجه تشابه نتایج زیر حاصل میشوند:

هرگاه عایقی تحت فشار دائم قرار گیرد در هر لحظه چگالی شار الکتریکی از دو مؤلفه تشکیل یافته است

(a) مؤلفه‌ای که متناسب با شدت حوزه الکتریکی موجود میباشد. ضریب تناسب عددی الکتریکی عایق مربوطه است.

(b) مؤلفه‌ای که تابع شدت حوزه‌های قبلی تا لحظه t میباشد.

بعلاوه فرض میشود که شدت حوزه E_ω در زمان ω تابعی است که نسبت معکوس با ازدیاد پارامتر ω دارد برای بدست آوردن فشار پس ماند الکتریکی محاسبات را بطریق زیر انجام میدهیم .
حروف بکار رفته زیر در روابطی که ذکر خواهند شد مبین کمیت های ذیل هستند :

$D_t =$ چگالی شار الکتریکی در زمان t

$E_t =$ شدت حوزه الکتریکی در زمان t

$\varphi(\omega) =$ تابعی از متغیر ω که نسبت معکوس با ازدیاد کمیت ω دارد

$t, \omega =$ زمان

$E, E', \dots =$ مشتقات شدت حوزه الکتریکی

$a, b, c, k, \dots =$ ضرایب ثابت

$\varepsilon =$ ضریب دی الکتریک

$t_A =$ زمان بارگیری خازن

$t_E =$ زمان تخلیه خازن

$U_A =$ فشار بارگیری خازن در زمان t_A

$E_A =$ شدت حوزه الکتریکی در زمان t_A

همانطور که قبلاً ذکر شد چگالی شار الکتریکی در زمان t برابر :

$$(45) \quad D_t = \varepsilon E_t + \int_{-\infty}^t \varepsilon E_\omega \frac{d}{d\omega} \varphi(t-\omega) d\omega$$

میباشد که در آن εE_t مؤلفه چگالی شار الکتریکی مربوط به شدت حوزه الکتریکی در لحظه t بوده و عبارت انتگرال جمع تمامی اثر حوزه های الکتریکی را تا لحظه t بیان میدارد . E_ω عبارتست از شدت حوزه الکتریکی در زمان ω و φ عبارت از تابعی است که نسبت معکوس با ازدیاد پارامتر ω دارد .

۶۱ - در این حالت خازنی را که کاملاً از بار الکتریکی خالی است (در مدت زمانی بی نهایت در حال اتصال کوتاه بوده است) تحت شدت حوزه E_A قرار میدهیم . چگالی شار الکتریکی پس از زمان بارگیری t_A عبارت خواهد بود :

$$(46) \quad D_{t_A} = \varepsilon E_A + \int_{-\infty}^0 \varepsilon \cdot 0 \cdot \frac{d}{d\omega} \varphi(t_A - \omega) d\omega + \int_0^{t_A} \varepsilon E_A \cdot \frac{d}{d\omega} \varphi(t_A - \omega) d\omega$$

$$= \varepsilon E_A + \varepsilon E_A \left[\varphi(t_A - \omega) \right]_0^{t_A} = \varepsilon E_A \left\{ 1 + \varphi(0) - \varphi(t_A) \right\}$$

۶۲ - در این حالت جوشن های خازن بارگیری شده فوق را برای مدت زمان t_E اتصال کوتاه میدهیم . طبق معادله ۴۵ چگالی شار الکتریکی پس از زمان t_E برابر :

$$D_{t_E} = \epsilon \cdot 0 + \int_{-\infty}^0 \epsilon \cdot 0 \cdot \frac{d}{d\omega} \varphi(t_A + t_E - \omega) d\omega + \int_0^{t_A} \epsilon E_A \frac{d}{d\omega} \varphi(t_A + t_E - \omega) d\omega + \int_{t_A}^{t_E} \epsilon \cdot 0 \cdot \frac{d}{d\omega} \varphi(t_A + t_E - \omega) d\omega$$

$$(47) \quad D_{t_E} = 0 + 0 + \epsilon E_A \int_0^{t_A} \frac{d}{d\omega} \varphi(t_A + t_E - \omega) = \epsilon \cdot E_A \left\{ \varphi(t_E) - \varphi(t_A + t_E) \right\}$$

است. معادله فوق را نیز میتوان بطریق زیر نوشت :

$$(48) \quad D_{t_E} = \epsilon E_A \left\{ 1 + \varphi(0) - \varphi(t_A + t_E) \right\} - \epsilon E_A \left\{ 1 + \varphi(0) - (t_E) \right\}$$

مقایسه معادله ϵ_A با رابطه ϵ نشان میدهد که میتوان همان نتیجه را با منطبق نمودن اثرهای دوفشار الکتریکی که مقدار آنها برابر و علامتشان مغایر هم بوده است بدست آورد و این حالت نتیجه تأثیرقانون Superposition میباشد :

$$+ E_A \quad \text{در زمان } (t_A + t_E)$$

و :

$$- E_A \quad \text{در زمان } t_E$$

نتایج زیرا از بررسی معادله ϵ_V حاصل میشوند.

۱ - فشار پس ماند الکتریکی با زیاد شدن زمان بارگیری بیشتر میشود.

۲ - فشار پس ماند الکتریکی با ازدیاد زمان تخلیه کم میشود.

۳ - مطالب فوق با نتایج بدست آمده توسط Gross [۱۴] مطابقت نمینماید. زیرا بنا بر گفته Gross

برای بدست آوردن فشار پس ماند الکتریکی پس از زمان بارگیری t_A و زمان تخلیه t_E میبایستی منحنیهای تخلیه خود بخود خازن را پس از زمانهای بارگیری t_A و t_E بدست آورده و از تفاضل این دو منحنی فشارپس ماند الکتریکی را بدست آورد.

عدم صحت مطالب فوق بدین نحو روشن میشود که چنانچه زمانهای t_A و t_E را مساوی قرار دهیم

فشار پس ماند الکتریکی با بد برابر صفر گردد که معادله ϵ_V چنین مقداری را تأیید نکرده و آزمایشهای متعدد نویسنده نیز چنین نتیجه ای را نشان نداد است.

۳۳ - قطع ارتباط جوشن ها .

چگالی شار الکتریکی D_t را در زمان t میتوان برآیند سه مؤلفه دانست :

$+E_A$ برای زمان $(t + t_A + t_E)$ و $-E_A$ برای زمان $(t + t_E)$ و E_t برای زمان $t > 0$ و در نتیجه

از رابطه ϵ_V معادله زیر بدست میآید :

$$(49) \quad D_t = \epsilon E_A \left\{ \varphi(t + t_E) - \varphi(t + t_A + t_E) \right\} + \epsilon E_t + \int_0^t \epsilon E_\omega \frac{d}{d\omega} \varphi(t - \omega) d\omega$$

و یا :

$$D_t = \varepsilon E_t + \varepsilon E_A \left\{ \varphi(t+t_E) - \varphi(t+t_A+t_E) \right\} + \varepsilon \left[E_{\omega} \varphi(t-\omega) \right]_0^t - \varepsilon \int_0^t E'_{\omega} \varphi(t-\omega) d\omega$$

و بالاخره :

$$(50) \quad D_t = \varepsilon E_t + \varepsilon E_A \left\{ \varphi(t+t_E) - \varphi(t+t_A+t_E) \right\} + \varepsilon E_t \varphi(0) - \varepsilon \int_0^t E'_{\omega} \varphi(t-\omega) d\omega$$

چون برای $t > 0$ ارتباط جوشنهای خازن را قطع میکنیم ، بنابراین جریان در مدار هادی برابر صفر میشود و این شرط رابطه زیر را بدست میدهد .

$$(51) \quad x E_t + \frac{dD_t}{dt} = 0$$

از ترکیب معادله های 50 و 51 و تغییر فرم در روابط موجود معادله زیر حاصل میشود :

$$(52) \quad \int_0^t E'_{\omega} \varphi'(t-\omega) d\omega = E'_t + E_A \left\{ \varphi'(t+t_E) - \varphi'(t+t_A+t_E) \right\} + \frac{x E_t}{\varepsilon}$$

همانطور که قبلاً ذکر شد φ تابعی است نزولی و چنانچه منحنی تغییر است این تابع را بصورت تابع توانی با پایه (e) فرض کنیم و جهت تطبیق دادن این فرض با نتایج عملی آنرا ترکیبی از مجموعه منحنی های توانی با پایه (e) فرض نمائیم .

$$(53) \quad \varphi(x) = a_1 e^{-\beta_1 x} + a_2 e^{-\beta_2 x} + \dots + a_{n-1} e^{-\beta_{n-1} x} + a_n e^{-\beta_n x}$$

میگردد که در آن a_1 و a_2 و \dots و a_n و β_1 و β_2 و \dots و β_n ضرایب مثبت میباشند .

از رابطه فوق پس از تغییر شکل معادله زیر :

$$(54) \quad \varphi(x)^{(n+1)} + k_1 \varphi(x)^{(n)} + k_2 \varphi(x)^{(n-1)} + \dots + k_{n-1} \varphi'' + k_n \varphi' = 0$$

بدست میآید . بکمک رابطه 50 میتوانیم جواب معادله 54 ، E_t در زمان t را پس از قطع ارتباط بین جوشنها بدست آوریم . پس از گرفتن مشتق از رابطه 52 بر حسب متغیر t نتیجه زیر حاصل میشود :

$$(55a) \quad E'_t \varphi(0) + \int_0^t E'_{\omega} \varphi''(t-\omega) d\omega = E''_t + E_A \left\{ \varphi''(t+t_E) - \varphi''(t+t_A+t_E) \right\} + \frac{x E'_t}{\varepsilon}$$

و یا :

$$(55b) \int_0^t E'_{\omega} \varphi''(t-\omega) d\omega = E_t'' + \left\{ \frac{x}{\varepsilon} - \varphi'(0) \right\} E_t' + E_A \left\{ \varphi''(t+t_E) - \varphi''(t+t_A+t_E) \right\}$$

به همین ترتیب پس از گرفتن مشتق های متوالی روابط زیر بدست می آید :

$$(55c) \int_0^t E'_{\omega} \varphi'''(t-\omega) d\omega = E_t''' + \left\{ \frac{x}{\varepsilon} - \varphi'(0) \right\} E_t'' - \varphi''(0) E_t' + E_A \left\{ \varphi'''(t+t_E) - \varphi'''(t+t_A+t_E) \right\}$$

.
.

$$(55) \int_0^t E'_{\omega} \varphi^{(n+1)}(t-\omega) d\omega = E_t^{(n+1)} \left\{ \frac{x}{\varepsilon} - \varphi'(0) \right\} E_t^{(n)} - \varphi''(0) E_t^{(n-1)} \dots - \dots - \varphi^{(n)}(0) E_t' + E_A \left\{ \varphi^{(n+1)}(t+t_E) - \varphi^{(n+1)}(t+t_A+t_E) \right\}$$

از گروه روابط بالا با در نظر گرفتن رابطه ε و تغییر شکل در آنها نتیجه میشود :

$$(56) E_t^{(n+1)} + b_1 E_t^{(n)} + b_2 E_t^{(n-1)} + \dots + b_n E_t' + b_{n+1} E_t = 0$$

$$b_1 = k_1 + \frac{x}{\varepsilon} - \varphi'(0) \quad \text{که در آن}$$

$$b_2 = k_2 + k_1 \left\{ \frac{x}{\varepsilon} - \varphi'(0) \right\} - \varphi''(0)$$

.
.

$$b_n = k_n + k_{n-1} \left\{ \frac{x}{\varepsilon} - \varphi'(0) \right\} - k_{n-2} \varphi''(0) - \dots - k_1 \varphi^{(n-1)}(0) - \varphi^{(n)}(0)$$

$$b_{n+1} = x k_n / \varepsilon \quad \text{میشوند. ریشه معادله دیفرانسیلی 56 عبارتست از :}$$

$$(57) E_t = C_1 e^{m_1 t} + C_2 e^{m_2 t} + \dots + C_n e^{m_n t} + C_{n+1} e^{m_{n+1} t}$$

بنابراین منحنی فشار پس مانند الکتریکی از مجموعه $n+1$ جمله توانی با پایه (e) تشکیل گردیده است.

۷- آزمایشهای مربوط به قسمت تئوری و نتایج حاصله از آن - براساس نتایج حاصله از بررسیهای

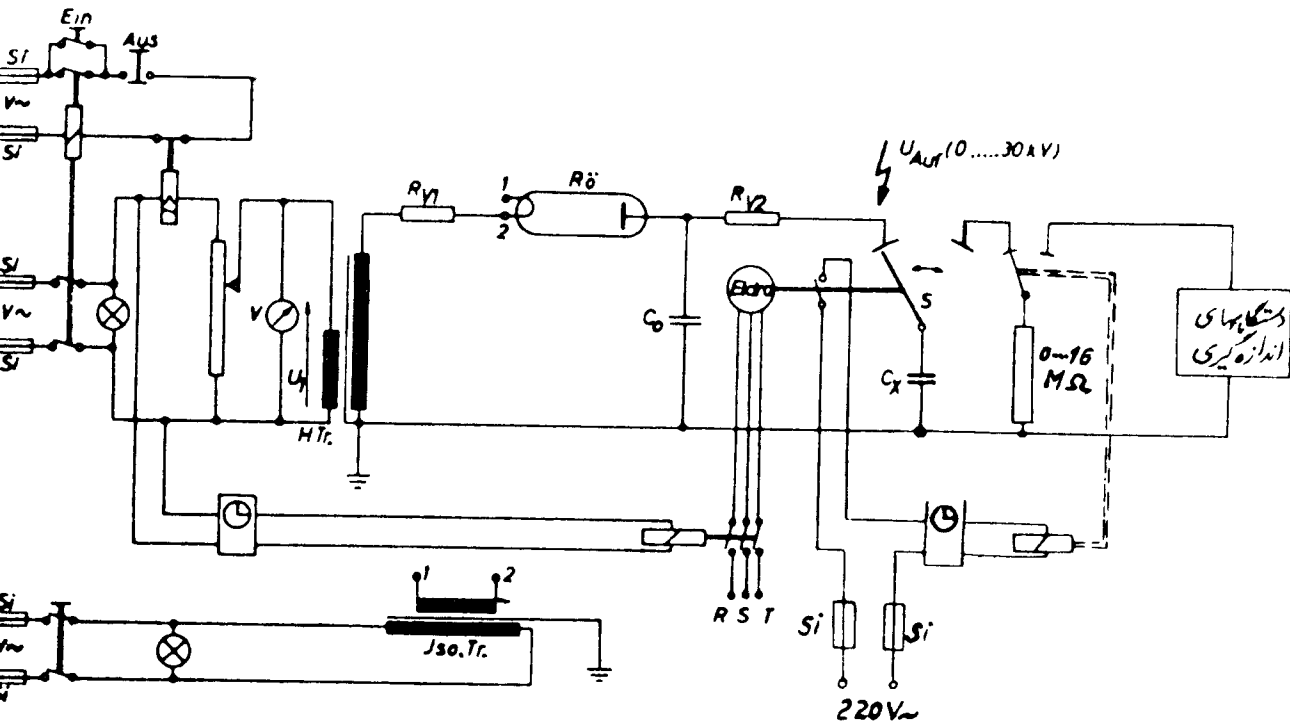
گفته شده در بالا آزمایشهای متعددی بر روی تعداد زیادی خازنها و کابلهای فشار قوی انجام گردیده است.

نوع عایق خازنهای بکار رفته از کاغذهای روغنی و کولفونی و گاز ازت تحت فشار تشکیل میگردد.

کابلهائی که مورد آزمایش قرار گرفتند از نوع کابلهای فشار قوی با عایق PVC* و کابلهای با

عایق کاغذ روغنی تشکیل میگرددند.

برای انجام آزمایشهای مورد لزوم مدارى طبق شکل ۶ طرح گردید .



شکل ۶ الکتریکی برای اندازه گیری فشار پس ماند الکتریکی

عوامل مختلف این مدار بترتیب زیرمیباشند :

H. Tr ترانسفورماتور فشار قوی

Rv_1 مقاومت سری در مدار بار گیری .

R_0 ردسور .

C_0 خازن فیلتراسیون .

Rv_2 مقاومت سری .

S کلید دوطرفه فشار قوی .

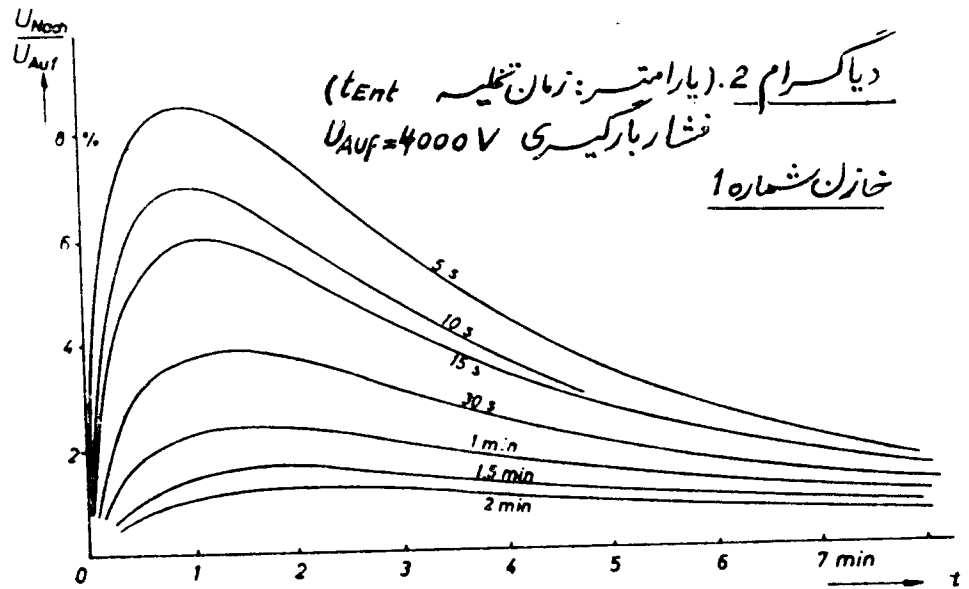
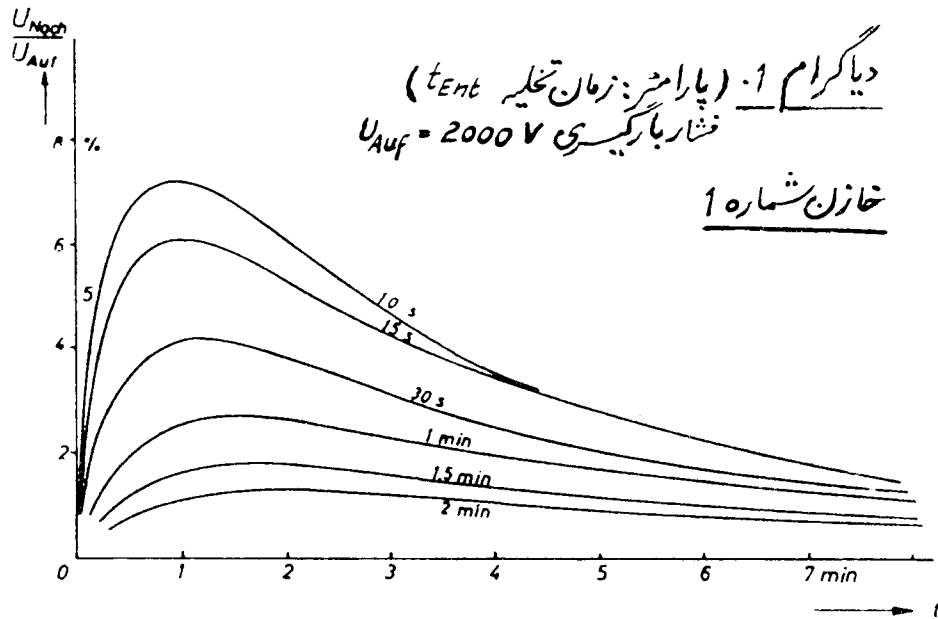
Eldro موتور فرمان کلید .

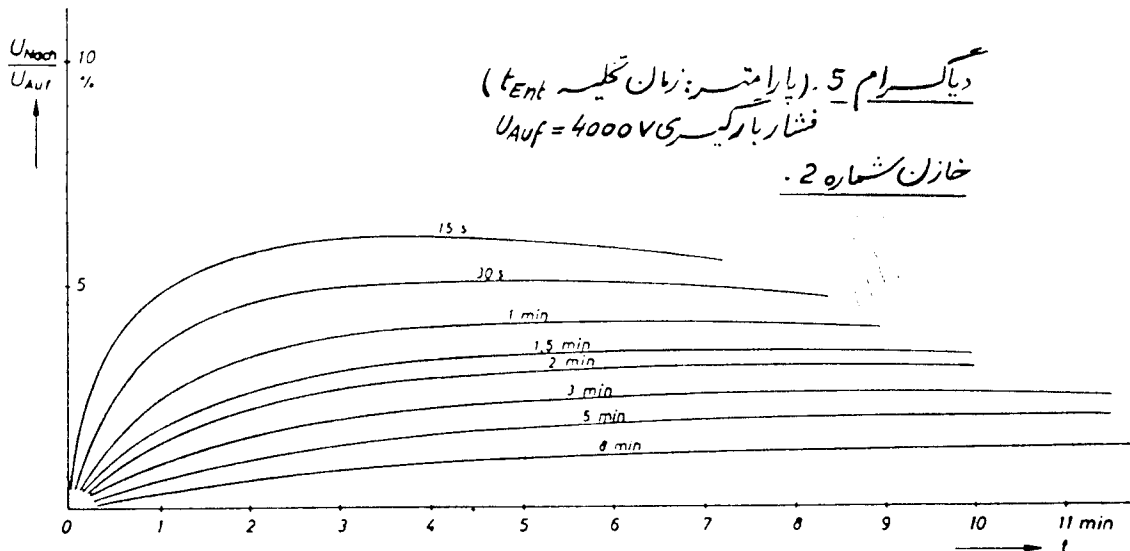
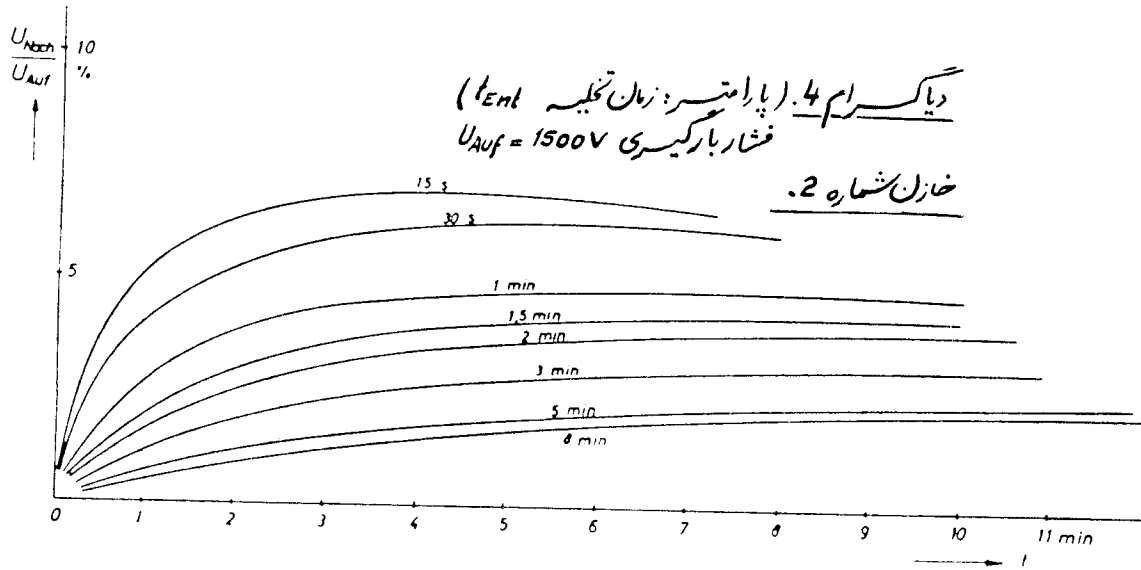
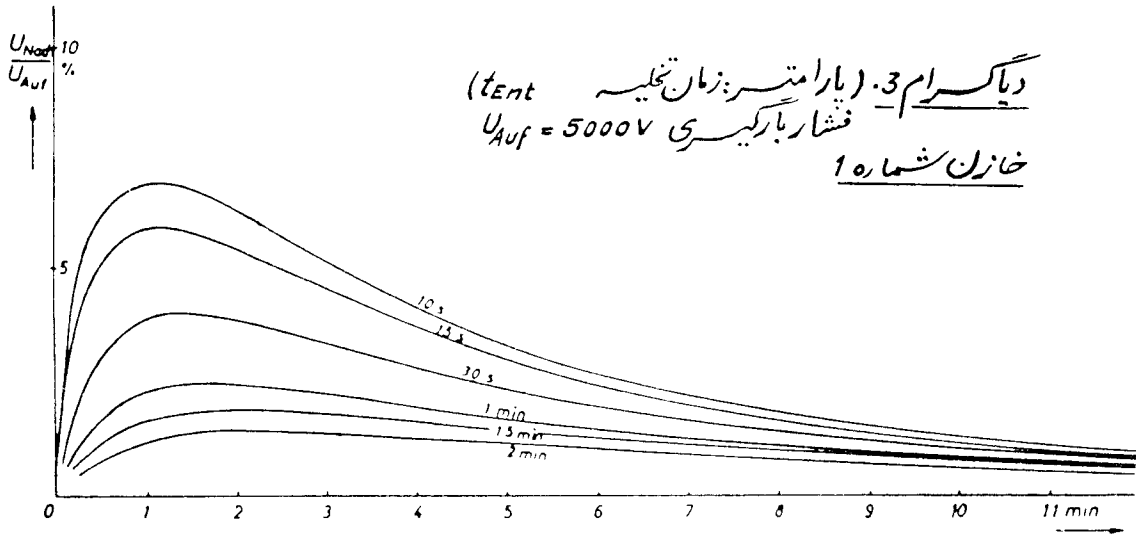
C_x خازن ویا کابل مورد آزمایش .

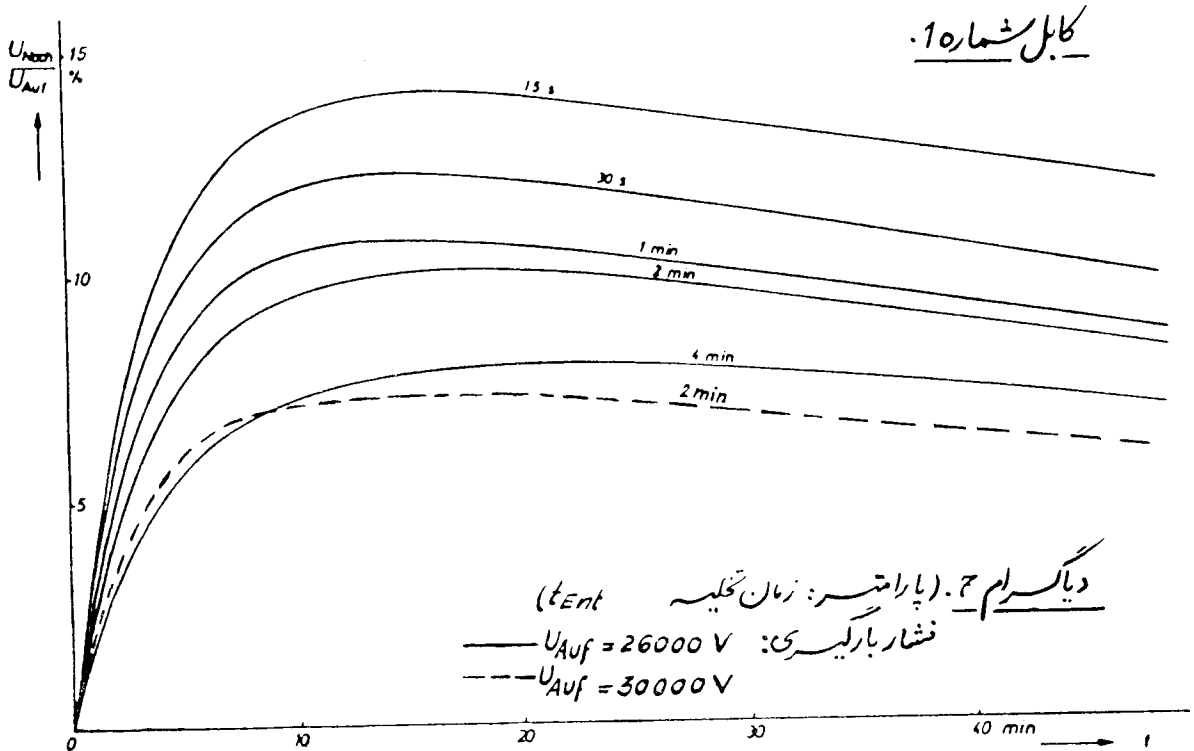
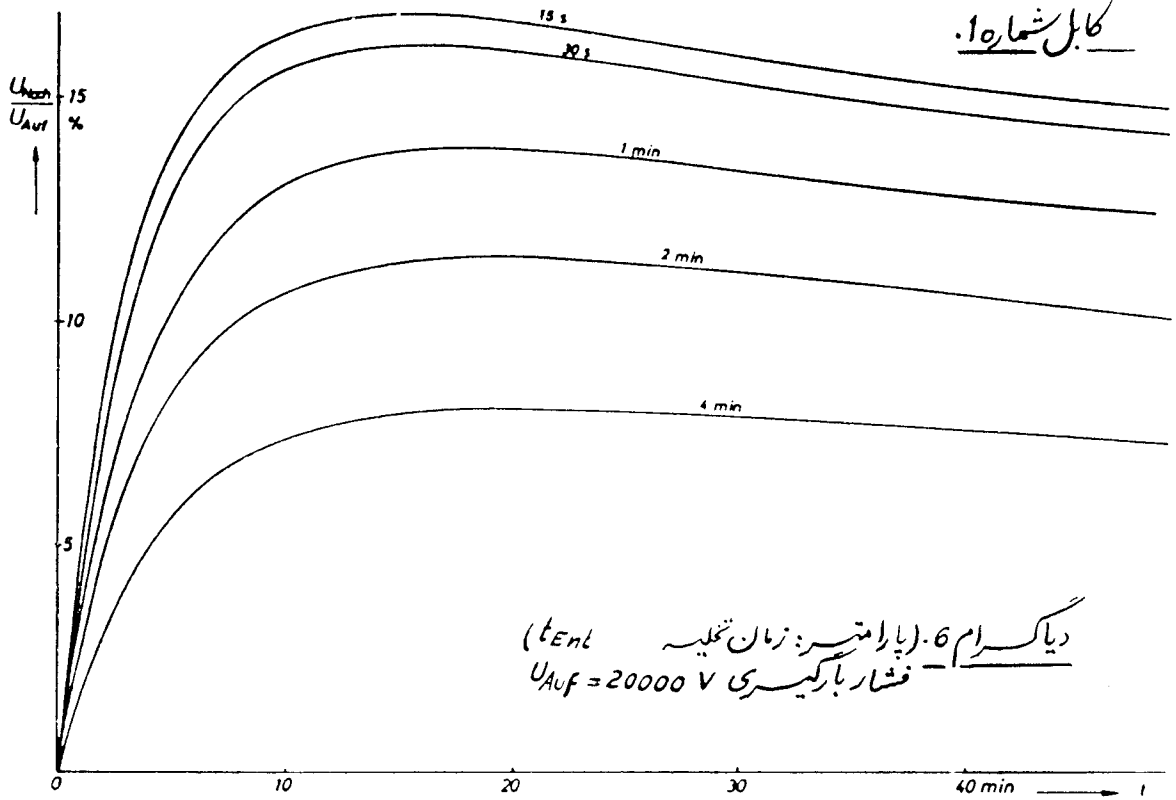
R_E مقاومت زمین کردن که میزان آن بین صفر تا $16 M\Omega$ تغییرمینمود .

هفت دیاگرام زیر نشان دهنده تغییرات فشار پس ماند الکتریکی برحسب زمان بوده و نتیجه تعداد

زیادی آزمایش است .







در دیاگرامهای فوق نمونه‌ها عبارتند از :

خازن شماره ۱ : تشکیل شده از کاغذ غوطه خورده در روغن با :

$$C = 4 \mu F \quad U_N = 400 V$$

خازن شماره ۲ : تشکیل شده از کاغذ غوطه خورده در روغن با :

$$C = 4 \mu F \quad U_N = 0.400 V$$

کابل شماره ۱ : کابل سه غلافه روغنی - $11.7/20 kV$ - $3 \times 90 mm^2$ - NEKBA - بطول ۱.۹ متر تمام منحنی‌های بدست آمده مابین این نکته میباشند که فشار پس ماند الکتریکی ابتدا با هستگی قوس صعودی طی نموده و پس از رسیدن بنقطه ماکزیمم مسیر آن نزولی میگردد و میل منحنی در قسمت اول بیش از مقدار مطلق آن در قسمت دوم میباشند .

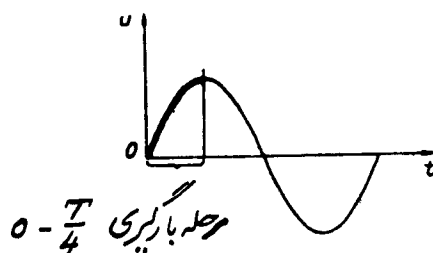
نقطه ماکزیمم و زمان لازم برای رسیدن به آن در نمونه‌های مختلفه متفاوت است و بزرگترین مقدار را خازنهای (کابل‌های) با عایق کاغذ روغنی دارا میباشند .

از دیاگرامها همچنین استنباط میشود که با زیاد شدن زمان تخلیه مقدار ماکزیمم فشار پس ماند الکتریکی کوچکتر شده و زمان رسیدن بان بزرگتر میشود .

با زیاد کردن زمان بارگیری (که در مورد تعداد زیادی خازنها و کابلها انجام گردیده و از نشان دادن دیاگرامهای مربوطه در اینجا صرف نظر شده است) مقدار فشار پس ماند الکتریکی بزرگتر شده و زمان رسیدن بنقطه ماکزیمم طولانی تر میگردد .

چون در عمل زمین کردن روی مقاومت‌های با اهم زیاد انجام میگردد لذا آزمایشهایی در این زمینه روی مقاومت‌های با اهم زیاد انجام گردید و چنین نتیجه شد که با زیاد شدن مقاومت زمین ($12 M\Omega$) مقدار فشار پس ماند در یک زمان تخلیه معین (یکدقیقه) بیشتر از مقدار آن در حالت زمین کردن مستقیم میباشند . در جهت نظریه Gross که قبلاً ذکر شد خازنهایی را بمدت پنج دقیقه بارگیری نموده و پس از آن هر یک در همین مدت تخلیه گردید، اندازه گیری روی خازن پس از گذشت این زمان وجود فشار الکتریکی پس ماند را نشان داد و بدین ترتیب عدم صحت نظریه Gross ثابت گردید .

تبعیت فشار الکتریکی پس ماند از میزان فشار بارگیری در تمام دیاگرامها مشهود است مخصوصاً در دیاگرام v مشاهده میشود که منحنی خط چین مربوط به فشار بارگیری ۳ ولت و زمان تخلیه دو



شکل ۷

دو دقیقه نسبت بمنحنی مربوط (زمان تخلیه دو دقیقه) به فشار بارگیری ۲۶۰۰۰ ولت پائین تر بوده و زمان رسیدن بنقطه ماکزیمم کوتاهتر میباشد (منحنی ها برای سهولت مقایسه برحسب مقدار درصد ترسیم گردیده اند). با در نظر گرفتن مطالب فوق در مواردیکه با کابلها و خازنهای فشار قوی تحت فشار دائم سروکار میباشد میبایستی حتی الامکان سعی گردد که زمان تخلیه را طولانی نمود زیرا بطوریکه مشاهده شد ماکزیمم فشار الکتریکی پس مساند در مورد کابلهای با کاغذ روغنی در حدود ۱۸ درصد فشار بارگیری میباشد و این مقدار خطر مستقیم جانی در بردارد (نظیر این حوادث مشاهده شده است) و در این مورد توصیه میشود که ارتباط با زمین در حین کار بهیچوجه قطع نشود.

همچنین در حالاتیکه خازنها را با جریان دائم پرنموده و از تخلیه آنها در مدارهای رزنانسی استفاده میشود برای تضعیف اثر پس ماند باید زمان بارگیری را حتی المقدور کم نمود و میزان ایده آل آن برابر $\frac{1}{\epsilon}$ پریود موج جریان متناوب میباشد (شکل ۷).

فهرست مراجع

- [۱] Miri, A. M. : Verlustfaktormessung mit dem Verfahren der gedampften Schwingung Karlsruhe 1965 Dissertation ETZ Mai (1966)
- [2] Schweidler : Studien ueber die Anomalien im Verhalten der Dielektrika : Annalen der Physik, Vol (329) (1907).
- [3] Ruffler, Hans : Dielektrische Nachwirkungen an Phosphoren : Annalen der Physik, Vol (431) (1941).
- [4] Evershed, S. : The characteristics of insulation resistance : Journal of the I. E. E. Vol (52) (1914)
- [5] Maxwell, J. C. : A treatise on Electricity and Magnetism : Vol (1) (1904)
- [6] Schering, H. : Die Isolierstoffe der Elektrotechnik Springer Verlag (1924) Berlin
- [7] Wagner, K. W. : Zur Theorie der unvollkommenen Dielektrika : Annalen der Physik, Vol (4) 40, (1913).
- [8] Wagner, K. W. : Theorie der dielektrischen Nachwirkung: ETZ Vol (34), (1913)
- [9] Wagner K. W. : Erklarung der dielektrischen Nachwirkungsvorgaenge aufgrund Maxwellscher Vorstellungen Archiv fuer Elektrotechnik 11, (2) (1914)
- [10] Dunsheath, P. : High Voltage Cables.
- [11] Golding, E. W. : Electrical Measurements and measuring Instruments 4 th Edition (1955)
- [12] Pellat, H. : Journal de Physik Vol (9)
- [13] Boltzmann : Theorie der elastischen Nachwirkung : Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaft zu Wien
- [14] Gross, B. : On after — effects in Solid dielectrics : Physical Review, Vol (57) (1940)