



مدل قوس الکتریکی در کلیدهای فشار قوی

جواد مهدوی

دانشگاه صنعتی شریف

حامد جوادی

دانشگاه صنعتی شریف

خلاصه:

این مقاله به بررسی پدیده قوس الکتریکی در کلیدهای فشارقوی و بررسی رفتار آن در حوالی صفر جریان می پردازد. اساس مدلی که برای قوس الکتریکی در نظر گرفته شد، مدل Mayr می باشد. با توجه به اینکه برخی از پارامترها در این مدل ثابت در نظر گرفته شده اند، در حالیکه در عمل مقادیر متغیری می باشند، پیشنهادی برای اصلاح این مدل به نحوی که این امر را نیز دربربگیرد ارائه می شود. براین اساس و با انتخاب یک شبکه ساده یک شبیه سازی جهت انجام پاره ای مطالعات بر زوی کلید صورت گرفت و نتایج بدست آمده تا حد مناسبی با نتایج آزمایشات عملی مطابقت دارد.

مقدمه:

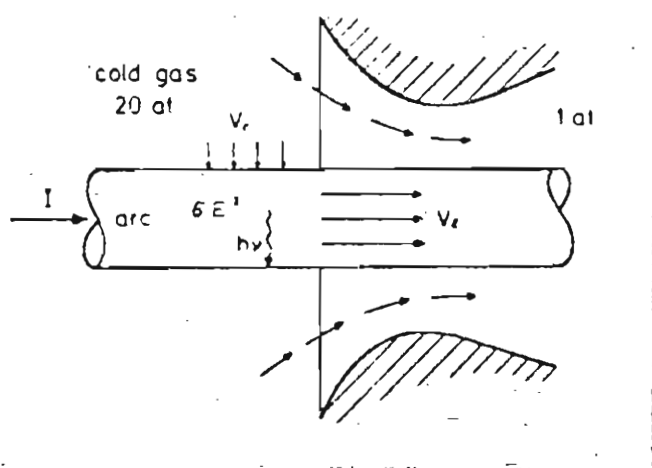
عمل قطع جریان، بخصوص جریان احتمال کوتاه در شبکه های قدرت از وظائف اساسی یک کلید قدرت می باشد. این عمل همواره با بروز قوس الکتریکی در داخل کلید همراه خواهد بود. توانایی کلید در خاموش کردن این قوس بسیار مهم بوده و موفقیت عمل قطع را باعث می شود. کلید باید به گونه ای عمل نماید که جریان را به سرعت قطع کرده و اجازه برقراری مجدد آن را ندهد. در عین حال باید این امکان را نیز فراهم آورد که جریان قوس بدون جهش به صفر برسد. یعنی اجازه دهد که جریان به طور طبیعی کاهش یافته و زمانی که به صفر می رسد آن را کنترل و کاملاً خاموش نماید. در غیر اینصورت و چنانچه قوس قبل از این موعد مقرر به اجبار خاموش گردد، انرژی باقی مانده در تلفهای شبکه در خازنها سزریق شده و باعث افزایش سطح ولتاژ خواهد شد.

براین اساس کلیدهای مختلفی ساخته شده که در آنها از مکانیزم و فرآیندهای متفاوتی جهت کنترل قوس سود برده شده است. کلیدهای روغنی، گاز فشرده و خلا؛

نمونه‌هایی از این کلیدها هستند که در این سیار کلیدهای گاز فشرده و به‌جای SF₆ به علت قابلیت کارکرد مطلوب خود، در شبکه‌های قدرت به میزان زیادی به کار برده می‌شوند.

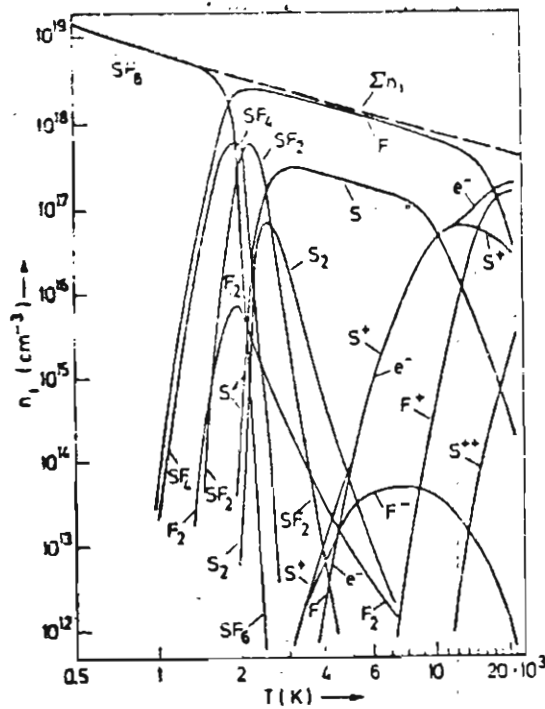
کلید گاز فشرده

در یک کلید گاز فشرده قوس الکتریکی تحت تأثیر جریان گاز پرفشار فرار می‌کند. شکل ۱ نمایش محفظه قطع در یک کلید گاز فشرده می‌باشد.



شکل ۱ : محفظه قطع [۴]

در این کلید قوس الکتریکی در مجاورت جریان گاز وارد نازل شده و به سمت منطقه دارای فشار کمتر و الکتروود متحرک ادامه می‌یابد. وجود نازل باعث شکل دادن به مسیر حرکت قوس و کمک به مفید ساختن آن می‌شود. گاز تحت تأثیر اختلاف فشار در دو طرف نازل به سرعت وارد نازل شده و در مجاورت با قوس به سادل انرژی با آن می‌پردازد و بدین ترتیب حرارت قوس ناشی از اثر زول توسط گاز به خارج از مسیر قوس انتقال می‌یابد. در کنار این امر سعی می‌شود از گازهایی با خواص مناسب استفاده شود که در این رابطه گاز SF₆ دارای خاصیت عایقی بسیار خوب و نیز خاصیت چسبندگی و انتشار مطلوبی می‌باشد. منشور از چسبندگی قابلیت ترکیب مجدد یونهای آن می‌باشد. شکل ۲ منحنی تجزیه SF₆ به یونها بر حسب درجه حرارت گاز را نمایش می‌دهد.



شکل ۲: چگالی ذرات در SF6 [۲]

با کاهش جریان قوس و رسیدن به لحظه عبور از صفر، محیط بین دو کنتاکت کنید شروع به بازیابی انتظامات دی الکتریک خود می نماید. از طرفی بعثت هدایت باقیمانده در مسیر، بر اثر قرار گرفتن ولتاژ در دو سر کنید، قوس امکان برقراری مجدد را می یابد. در این لحظات رهایی بین انرژی تولید شده توسط قوس و مسیران انرژی انتقال یافته توسط گاز اطراف آن، وجود دارد. چنانچه میزان انرژی انتقال یافته از انرژی تولید شده کمتر باشد، گشت حرارتی محیط رخ می دهد و قوس دوباره برقرار می شود. در عین حال پس از خاموش شدن کامل قوس، چنانچه سرعت افزایش ولتاژ در دو سر کنید از سرعت بازیابی انتظامات دی الکتریک مسیر بیشتر باشد امکان شکست دی الکتریک محیط و برقراری قوس بوجود خواهد آمد. به عبارت دیگر در این لحظات است که تصمیم گیری در باره موفقیت عمل قطع و یا عدم آن صورت می گیرد و بدین لحاظ مطالعه رفتار قوس در این محدوده زمانی یعنی در اطراف صفر جریان حائز اهمیت می باشد.

تبادل انرژی بین قوس و گاز اطراف آن را می توان به شکل زیر بیان کرد. [۳]

$$\text{انرژی انتقال یافته} + \text{انرژی ذخیره شده} = \text{انرژی تولیدی توسط قوس}$$

انتقال انرژی در این محیط توسط فرآیندهای متفاوتی از قبیل تشعشع، هدایت و هسرفنی محوری، هدایت و هسرفنی شعاعی و آشفتنی مسیر یونما و مولکولهای صورت می گیرد. مطالعات مختلف نشان داده است که به هنگام بالا بودن شدت جریان قوس، بعثت دمای زیاد محیط و نیز مسیر حرکت تقریباً یکنواخت آن هسرفنی محوری فرآیند حاکم بر روند تبادل انرژی می باشد. ولی با کاهش جریان و رسیدن آن به صفر، شعاع مین قوس کاهش یافته و دقت سنجش جریان گاز در نقاط مسیر قوس دچار آشفتگی می شود. فرآیند غالب انتقال انرژی در این لحظات هدایت شعاعی و آشفتنی در مسیر ذرات باردار می باشد. [۴]

به منظور بیان فرآیند تولید قوس الکتریکی و همچنین حایس بدن آن در بحث کلید گاز فشرده حثوریهای ارائه شده است که بر اساس آسما مدلهای ریاضی متفاوتی برای قوس الکتریکی بدست می آید. [۵]. یکی از این مدلهای، مدلی است که توسط Cassie ارائه شده است و در آن فرض شده دمای قوس ثابت و شعاع آن منضمیر با زمان می باشد. این فرض معادل این است که در فرآیند تبادل انرژی فقط همرفتی محوری در نظر گرفته شود و بنابراین در جریانهای بالا صادق است. در مدل دیگری که توسط Mayr ارائه شده است شعاع قوس ثابت و دمای آن منضمیر با زمان می باشد که بیان کننده رفتار قوس در جریانهای پائین و حوالی صفر جریان می باشد. به عبارت دیگر به نظر می رسد چنانچه نیاز به بیان عدلی برای قوس در تمام لحظات باشد، ترکیبی از دو مدل فوق پاسخگو خواهد بود. مطالعات نشان داده است که می توان فرآیندهای حاکم بر رفتار قوس در حوالی صفر جریان را تقریباً مستقل از اتفاقاتی که در جریانهای بالا رخ می دهد، در نظر گرفت. [۴] و در نتیجه رفتار قوس در جریانهای بالا را می توان به صورت شرایط اولیه ای برای رفتار آن در حوالی صفر جریان منظور کرد. بنابراین با توجه به اهمیت رفتار قوس در حوالی صفر جریان، مدل Mayr به عنوان اساس مدل مورد نظر انتخاب شد.

مدل Mayr

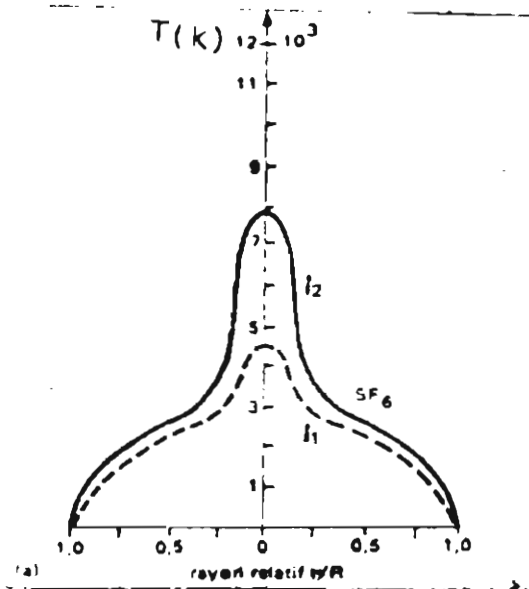
اگر فرض شود که جریان گاز باعث تحلیل سطح مقطع قوس به اندازه ای که بتوان از انتقال انرژی توسط همرفتی محوری صرف نظر کرد، بشود، آنگاه خنک شدن قوس در وهله اول ناشی از انتشار مولکولی و آشفتگی خواهد بود. به علاوه اگر دمای قوس در حوالی صفر جریان به اندازه کافی بالا باشد آنگاه انرژی انتقالی توسط تشعشع نیز قابل ملاحظه خواهد بود. تحت چنین شرایطی معادله انرژی در محیط را می توان به صورت زیر نوشت. [۶]

انرژی	انتشار	آشفتگی	تشمشع	انرژی
	مولکولی			
	ذخیره شده			

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \nabla^2 S + \nabla \cdot (\beta \nabla S) - W + \sigma E^2 \quad (1)$$

که در آن F چگالی انرژی، S پتانسیل فلوی حرارتی، W تشعشع در واحد حجم، σ هدایت الکتریکی و β ضریب آشفتگی می باشد. تحت چنین شرایطی بیرونی دمای قوس را مطابق شکل ۳ می توان در نظر گرفت. در این شکل دمای قوس بر حسب شعاع قوس رسم شده و جریان بصورت پارامتر در نظر گرفته شده است. همانگونه که دیدیم می

بود در مرکز سون قوس ۳۵۰ دما حداکثر است و با دور شدن از مرکز، دمای قوس حالت یک شکلی دمای را پیدا می کند. با کاهش جریان و رسیدن آن به مقدار I_1 دمای مرکز همه دهنش فاش ملاحظه ای دارد ولی دمای خود تغییر اندکی خواهد کرد.



مگر ۳: پروفیل دمای قوس در کار SF6 برای دو جریان

$$I_2 < I_1 \quad [V]$$

چگالی انرژی را می توان به صورت زیر نوشت :

$$F = \frac{\partial F}{\partial S} S \quad (۳)$$

و در نتیجه :

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial S} \Delta S \quad (۳)$$

که در آن $\frac{\partial F}{\partial S}$ نسبت تغییر خطی و ΔS میزان تغییر S به ازای F می باشد.

با استفاده از یک تعریف مناسب هدایت الکتریکی برابر خواهد بود با

$$\sigma = \sigma^* \exp \left[\frac{S - S^*}{\Delta S} \right] \quad (۴)$$

که در آن σ^* و S^* به ترتیب مقادیر مینا برای σ و S می باشد. با استوکیتری برابر با ۱ (۴) نسبت به شعاع قوس و زمان و جایگزینی در رابطه (۳) داریم:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \alpha(1+\beta) \left[\nabla^2 \sigma - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{\alpha \sigma^2 I^2(t)}{4\pi^2 \Delta S \left[\int_0^R r \sigma dr \right]^2} \quad (۵)$$

یادآوری کردن عبارت $\sigma^2(r, t)$ و با توجه به اینکه مقادیر $\frac{1}{\sigma}$ و $\frac{\partial \sigma}{\partial r}$ کوچک هستند [۶] داریم:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \alpha(1 + \bar{\beta}) \nabla^2 \sigma + \frac{\alpha \sigma(0, t) \sigma(r, t) I^2(t)}{4\pi^2 \Delta S \left[\int_0^R r \sigma dr \right]^2} \quad (۶)$$

که در آن α ضریب انتشار حرارتی می باشد. شرایط مرزی معادله (۶) عبارتند از:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r}(0, t) = 0 \quad (۷)$$

$$\sigma(R, t) = 0 \quad (۸)$$

و شرط اولیه در لحظه صفر جریان نیز به صورت زیر فرض می شود:

$$\sigma(r, 0) = \sigma^* J_0(\lambda r) \quad (۹)$$

که در آن ضریب λ قابل محاسبه خواهد بود. از حل این معادله دیفرانسیل نسبی خواهیم داشت:

$$\sigma = J_0(\delta_1 r / R) \left[\sigma^* e^{-\frac{t}{\theta}} + C^* \int_0^t e^{-\frac{(t-\tau)}{\theta}} I^2(\tau) d\tau \right] \quad (۱۰)$$

که در آن ثابت زمانی θ از رابطه زیر بدست می آید:

$$\theta = \frac{R^2}{\alpha(1 + \bar{\beta}) \delta_1^2} \quad (۱۱)$$

پارامتر C^* نیز تابعی از $\Delta S, R, \alpha$ می باشد. هدایت قوس در واحد طول نیز توسط رابطه زیر بیان می شود.

$$G = \int_0^R 2\pi \sigma r dr = R a^{-1} \quad (۱۲)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۱۰) از $r=0$ تا $r=R$ و با استفاده از رابطه (۱۲) خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R a} \right) + \frac{1}{\theta} \left(\frac{1}{R a} \right) = \frac{I^2(t)}{N} \quad (۱۳)$$

که در آن N توان شک شوئدگی فوس است . رابطه (۱۳) که به صورت یک معادله دیفرانسیل برای مقاومت فوس است ، رابطه Mayr میباشد .

مدل پیشنهادی

Mayr در مدل خود فرض کرد که ثابت زمانی و توان شک شوئدگی هر دو مفادیر ثابتی بوده در حالیکه مطالعات و اندازه گیریهایی که بر روی رفتار فوس در حوالی صفر جریان صورت گرفته ، بیانگر این مطلب است که در این محدوده زمانی هر دو آنها متغیر میباشد [۵ ، ۷ ، ۸ ، ۹ ، ۱۰] .
 بر اساس نتوریهایی موجود و جمع بندی مطالعات صورت گرفته در این زمینه ، به نظر میرسد که ایندو پارامتر متناسب با جریان فوس میباشد . بدین لحاظ مدل Mayr بصورت اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفت . همچنین ثابت زمانی و توان شک شوئدگی فوس ، صرف نظر از جریان ، با فشار گاز داخل محفظه ، شیب کاهش جریان و نیز شکل هندسی نازل متناسب در نظر گرفته شد و روابطی تجربی برای بیان این امر ارائه گردیده است که در آنها ثابت زمانی و توان شک شوئدگی بصورتی متناسب با جریان بوده و پارامترهای دیگر بصورت مرادبی سرمایه در نظر گرفته شده اند . با توجه به شامیروپدایری رفتار فوس از خواص مایلی و ترمودینامیکی گاز داخل کلید ، روابط مورد نظر برای دو گاز SF6 و هوا به ترتیب زیر بدست می آیند .

نوع گاز : SF6

$$\theta_o = (0.02566 I + 0.73104) (di/dt)^{1.5} (P_g/P_a) / \sqrt{PU} (\mu s) \quad I > 0 \quad (13)$$

$$\theta_i = (0.0624 I + 0.73104) (di/dt)^{1.5} (P_g/P_a) / \sqrt{PU} (\mu s) \quad I < 0 \quad (14)$$

$$N_o = (0.8707 I + 5.5) PU / [(di/dt) (P_g/P_a)] (KW) \quad I > 0 \quad (15)$$

$$N_i = (0.1741 I + 5.5) PU / [(di/dt) (P_g/P_a)] (KW) \quad I < 0 \quad (16)$$

نوع گاز : هوا

$$\theta_o = (0.5566 I + 2.73104) (di/dt)^{1.5} (P_g/P_a) / \sqrt{PU} (\mu s) \quad I > 0 \quad (17)$$

$$\theta_i = (0.0824 I + 2.73104) (di/dt)^{1.5} (P_g/P_a) / \sqrt{PU} (\mu s) \quad I < 0 \quad (18)$$

$$N_o = (0.8707 I + 50.5) PU / [(di/dt) (P_g/P_a)] (KW) \quad I > 0 \quad (19)$$

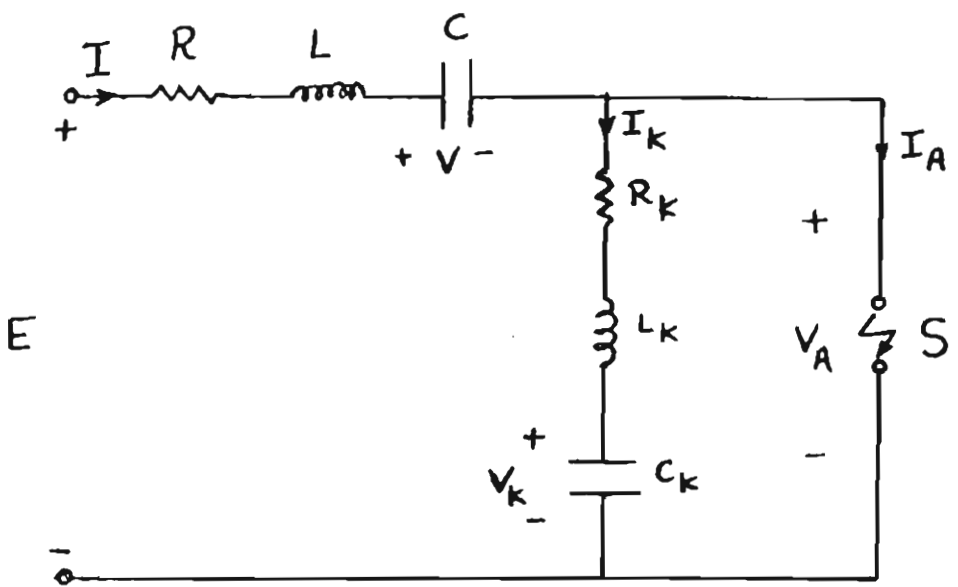
$$N_i = (0.1741 I + 50.5) PU / [(di/dt) (P_g/P_a)] (KW) \quad I < 0 \quad (20)$$

که در آنها I قدر مطلق جریان فوس ، di/dt شیب کاهش جریان ، pu فشار در دو طرف نازل و pu فشار گاز داخل محفظه میباشد . همچنین اددیس صفر

مربوطه معادله فعل از معر جریان و اندس تک مربوطه معادله - پس از معر
 حرار و به هضم جاری مدار جریان س فوسر مساد . پس از خاموس و سایدید
 ندن فوسر سر علس السله حد خار . تمام السله را عامل مکرردادخل و السله
 ساد رمانی فوسر انزایس فالن ملاحظه ای خواهد ساد [۷] . بر سله این روال س
 السله سله ای ساد . تک سله سازی حسب السله ساره ای مطالعه ساد و ساد
 آوردن سله ای از سرایید وضع جریان صورت گرفته است .

سکه مورد مطالعه

شکل ۴ شبکه ای را نشان میدهد که برای این مطالعه انتخاب شده است .



شکل ۴ : شبکه تحت مطالعه

که در آن

S کلید ، F ولتاژ سکه

L، C، R مفادیر مربوط به پارامترهای خط

Lk، Ck، Rk مفادیر مربوط به عناصری که موازی با کلید نصب میشوند

IA، VA جریان و ولتاژ فوسر

میشاند . معادلات جریان و ولتاژ این شبکه به صورت زیر میباشد .

$$E = RI + L \frac{dI}{dt} + V + V_A \quad (۲۲)$$

$$V = R_k I + L_k \frac{dI_k}{dt} + V_k \quad (۲۳)$$

$$V_A = R_A I_A \quad (۲۴)$$

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (25)$$

$$I = C_K \frac{dV_K}{dt} \quad (26)$$

$$I = I_A + I_K \quad (27)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_A} \right) + \frac{1}{\theta} \left(\frac{1}{R_A} \right) = \frac{I_A^2}{N} \quad (28)$$

معادله (28) عدل Mayr میباشد که در آن معادیر θ ، N از روابط (14) ایی

(31) محاسبه میگردند. با انتگرال گیری از روابط (22) ایی (27) از زمان t تا

$t + \tau$ که در آن τ کام محاسبه است. معادلات شبکه به شکل زیر خواهد شد.

$$\left(R + \frac{2L}{\tau} \right) I_2 + V_2 + V_{A2} = E_1 + E_2 - V_1 - V_{A1} - \left(R - \frac{2L}{\tau} \right) I_1 \quad (29)$$

$$\frac{1}{C} \cdot \frac{\tau}{2} I_2 - V_2 = -V_1 - \frac{1}{C} \cdot \frac{\tau}{2} I_1 \quad (30)$$

$$\left(R_K + \frac{2L_K}{\tau} \right) I_{K2} + V_{K2} - V_{A2} = V_{A1} - V_{K1} - \left(R_K - \frac{2L_K}{\tau} \right) I_{K1} \quad (31)$$

$$\frac{1}{C_K} \cdot \frac{\tau}{2} I_{K2} - V_{K2} = -V_{K1} - \frac{1}{C_K} \cdot \frac{\tau}{2} I_{K1} \quad (32)$$

$$R_{A2} I_{A2} = V_{A2} \quad (33)$$

$$I_2 = I_{K2} + I_{A2} \quad (34)$$

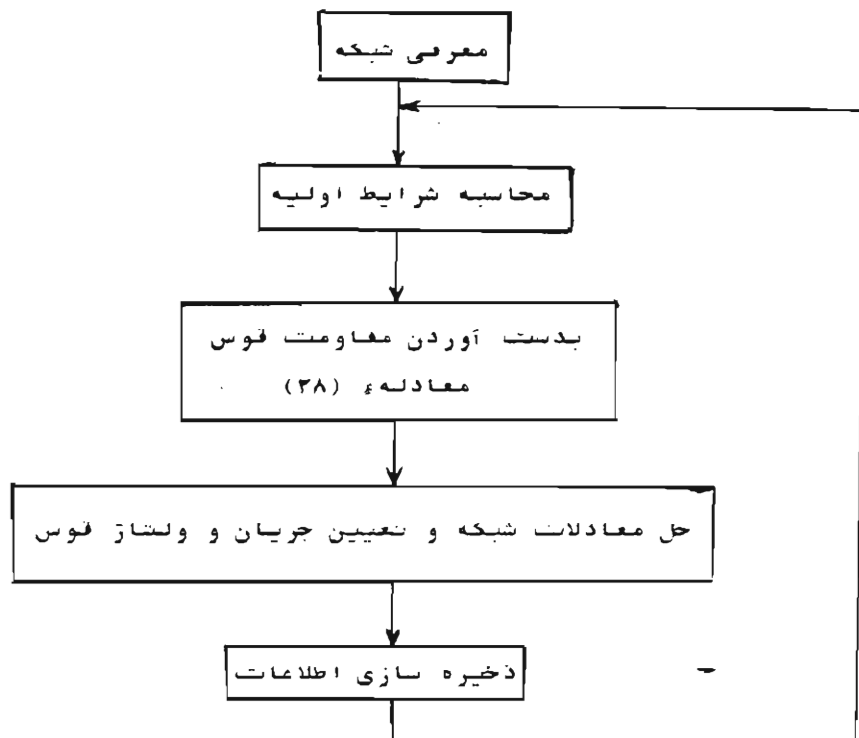
که در آنها اندیس 1 مربوط به معادیر در لحظه t و اندیس 2 مربوط به معادیر

در لحظه $t + \tau$ میباشد. معادلات (29) ایی (34) همراه با معادله (28) برای حل

شبکه و بدست آوردن حالتیهای آن کاربرده میشوند و با انتخاب شرایط اولیه

مناسب میتوان جریان و ولتاژ فوس را برای زمانهای بعد بدست آورد. شکل 5

نمودار کردنی این شبیه سازی را نمایش میدهد.



شکل 5 : نمودار کردنی شبیه سازی

بر اساس این نمودار خردتی چند آزمایش بر روی شبکه شکل ۴ انجام شد . پارامترهای شبکه به صورت زیر انتخاب شد .

$$R = 0.2 \quad , \quad L = 4.16 \text{ mH} \quad , \quad C = \infty$$

$$R_k = 0 \quad , \quad L_k = 0 \quad , \quad C_k = 1.1 \text{ nF}$$

دامنه ولتاژ شبکه برابر 8KV میباشد و در نتیجه دامنه جریان اتصال کوتاه 6KA خواهد بود . کلید از نوع SF6 بوده که فشار گاز داخل آن 1 at و نسبت فشار دو طرف سازل در آن برابر 0.3 در نظر گرفته شد . شکلیهای ۶-الف و ۶-ب نمودار جریان و ولتاژ فوس را نمایش میدهد که در آنها محدوده داخل دایره ، فاصله زمانی حوالی صفر جریان را نشان میدهد . در شکلیهای ۷-الف و ۷-ب نمودار جریان و ولتاژ در این محدوده و با دقت بیشتر رسم شده است . همانگونه که دیده میشود در اینحالت عمل قطع کلید سریع انجام شده است .

با افزایش دامنه ولتاژ شبکه 11.8 KV و در نتیجه افزایش دامنه جریان اتصال کوتاه به 8.85 KA رفتار فوس مطابق شکلیهای ۸-الف و ۸-ب خواهد شد که در آن جریان و ولتاژ فوس نمایش داده شده است و نمایانگر عدم موفقیت کلید در قطع جریان میباشد .

در یک آزمایش دیگر پارامترهای شبکه بصورت زیر تغییر کرد.

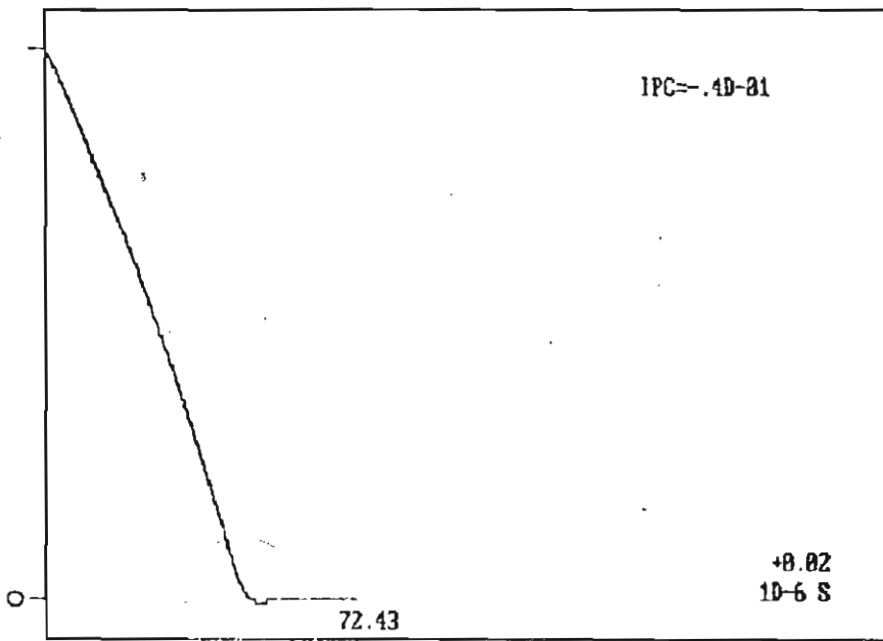
$$R = 0.02 \quad , \quad L = 1.25 \text{ mH} \quad , \quad C = \infty$$

$$R_k = 0 \quad , \quad L_k = 0 \quad , \quad C_k = 11 \text{ nF}$$

دامنه ولتاژ شبکه برابر 4 KV بوده که باعث جاری شدن جریان اتصال کوتاهی با دامنه 10 KA میشود . کلید نیز از نوع SF6 و با مشخصات آزمایش قبلی میباشد .

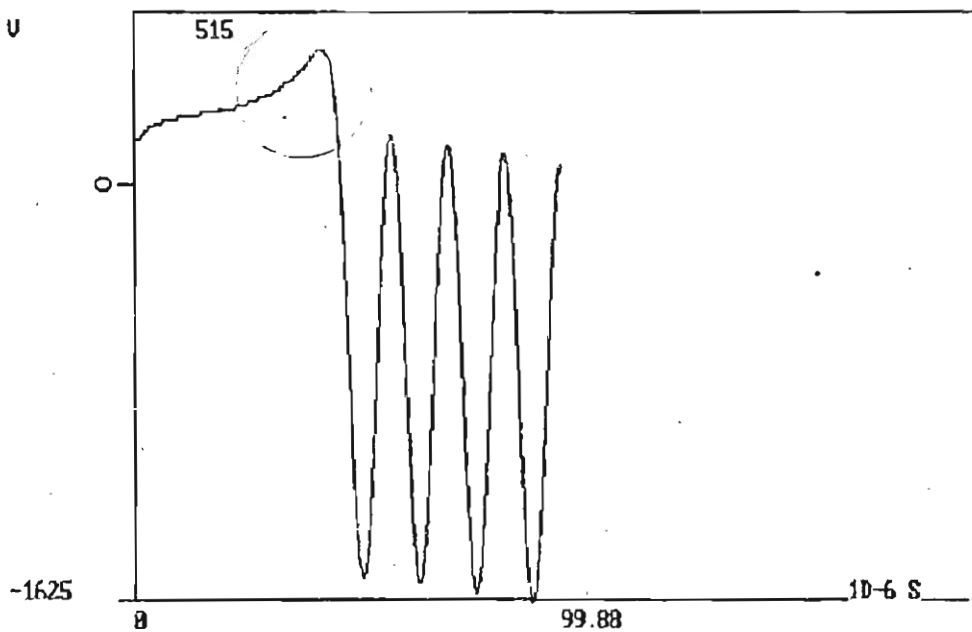
نص چنین شرایطی نمودار جریان و ولتاژ فوس در شکلیهای ۹-الف و ۹-ب دیده میشود که نمایانگر قطع موفقیت آمیز است . اینک با جایگزین کردن کلید SF6 با یک کلید هوای سرد و ثابت نگاه داشتن شرایط شبکه ، رفتار فوس مطابق شکلیهای ۱۰-الف و ۱۰-ب خواهد شد . افزایش جریان پس فوس و کاهش مقدار فله خاموشی ولتاژ در مقایسه با شکلیهای ۹-الف و ۹-ب نمایانگر تفاوت رفتار فوس در این دو گاز میباشد .

18

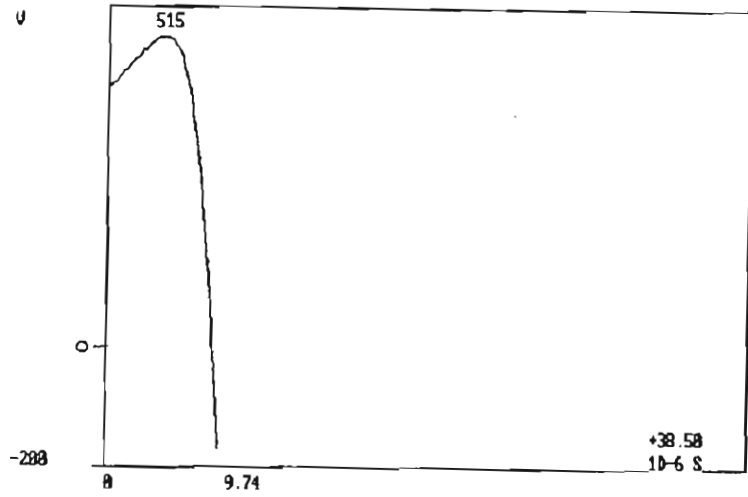


الف

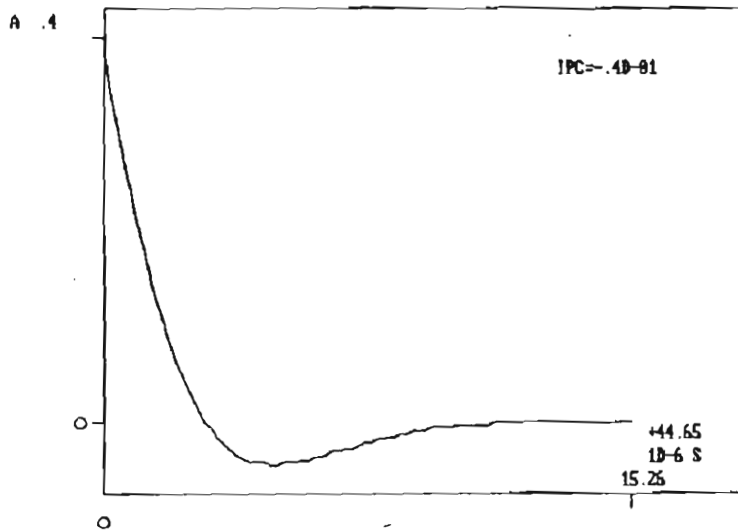
U



شکل ۶

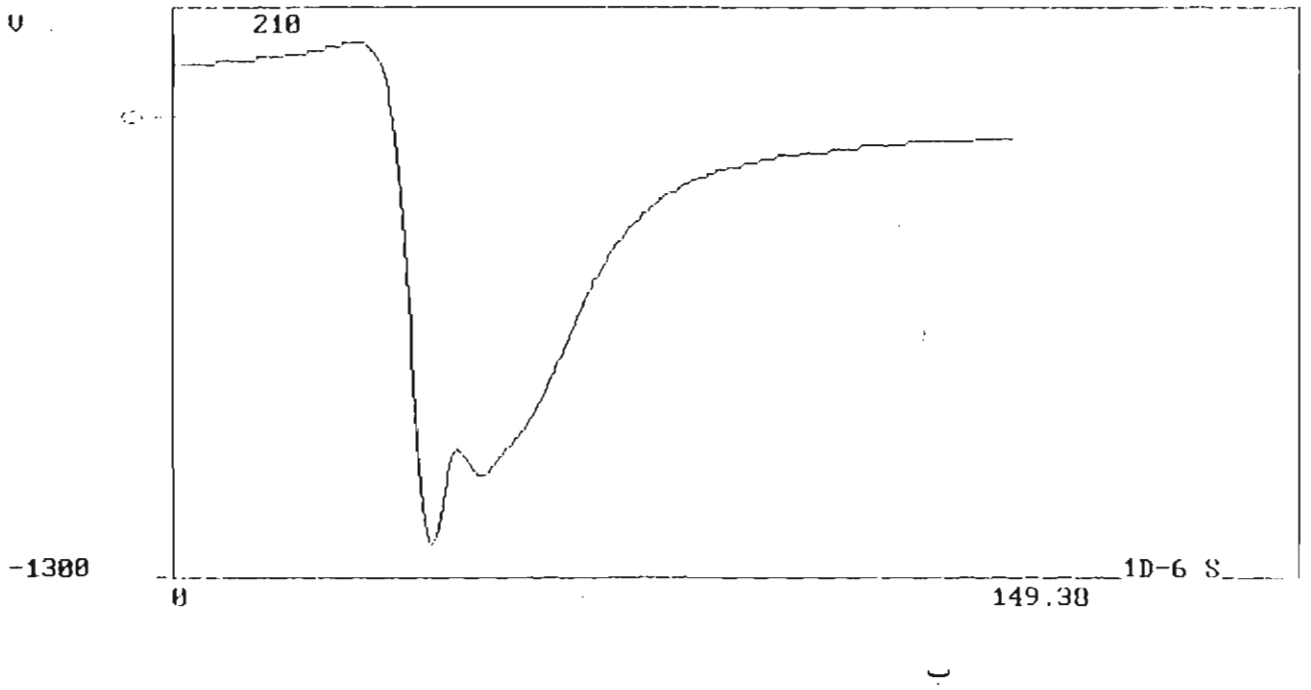
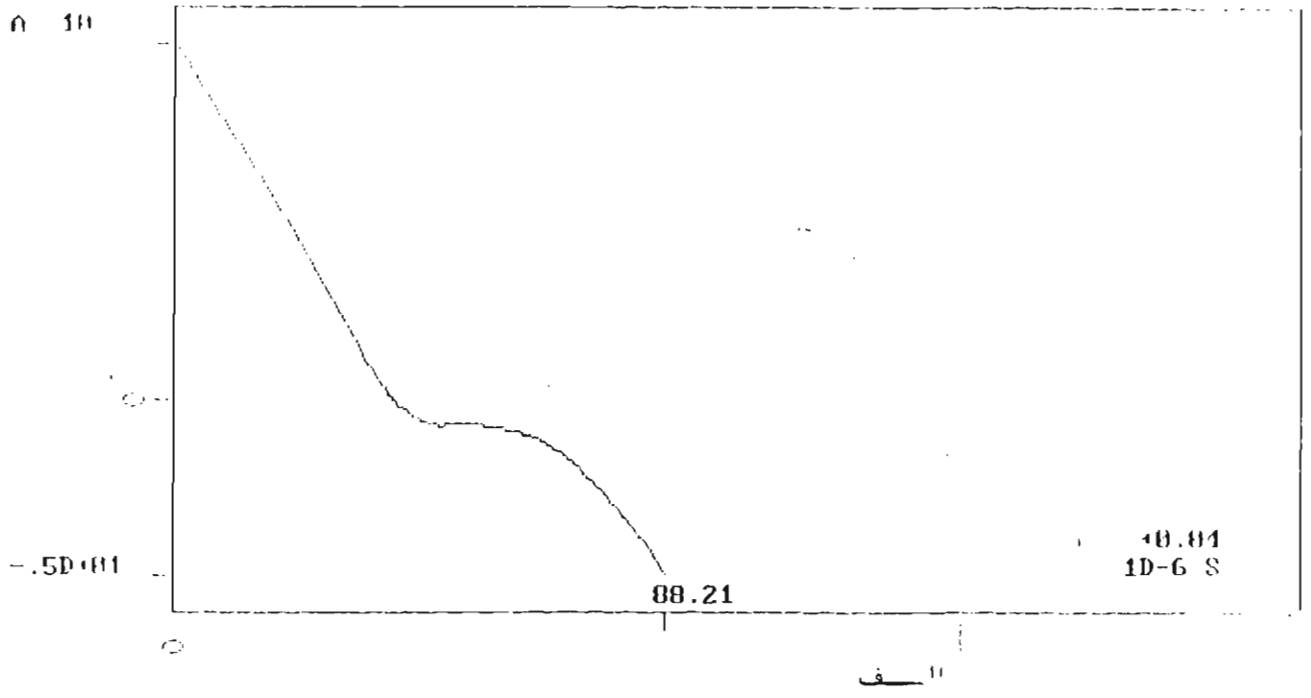


الف

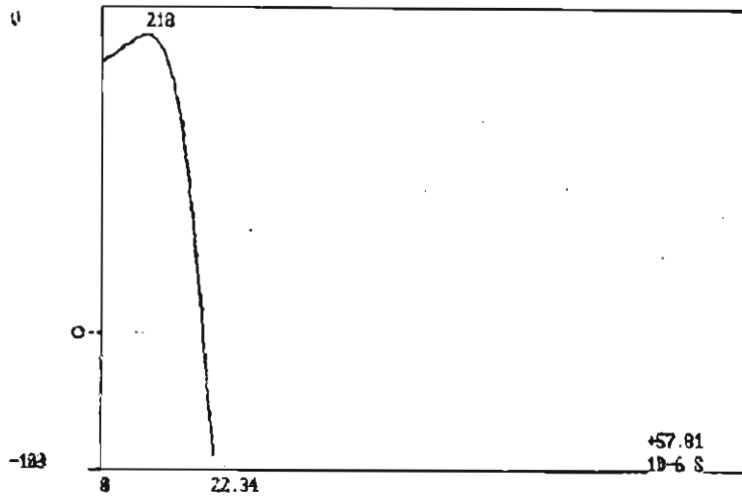


ب

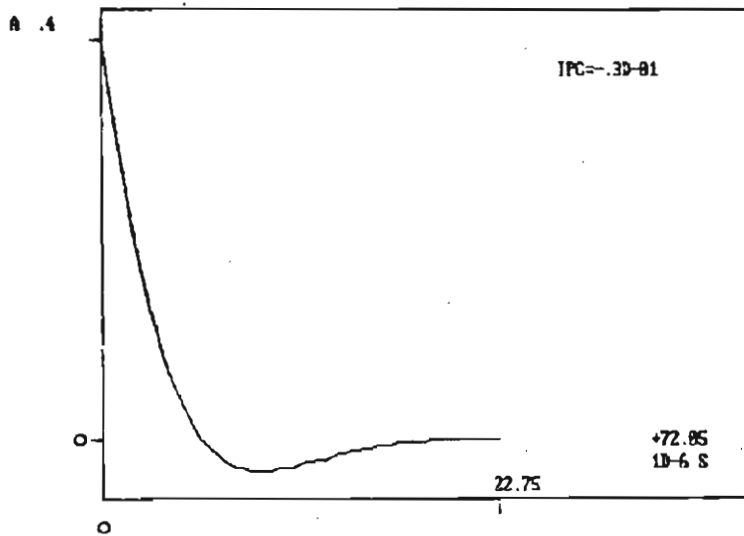
شكل ٧



شکل ۸

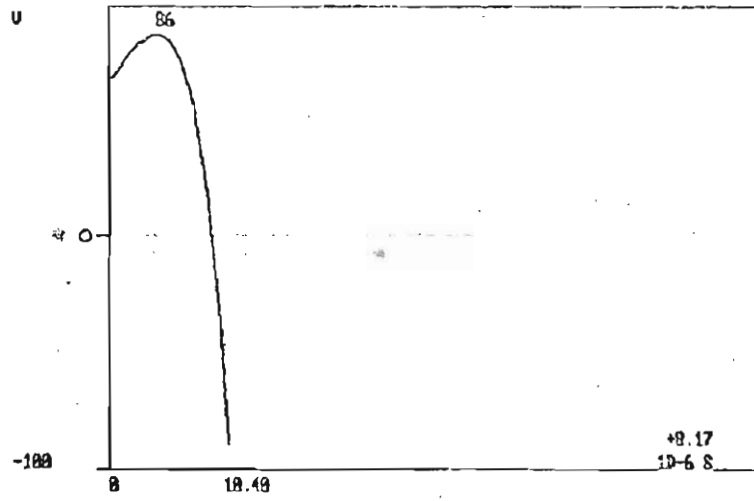


الف

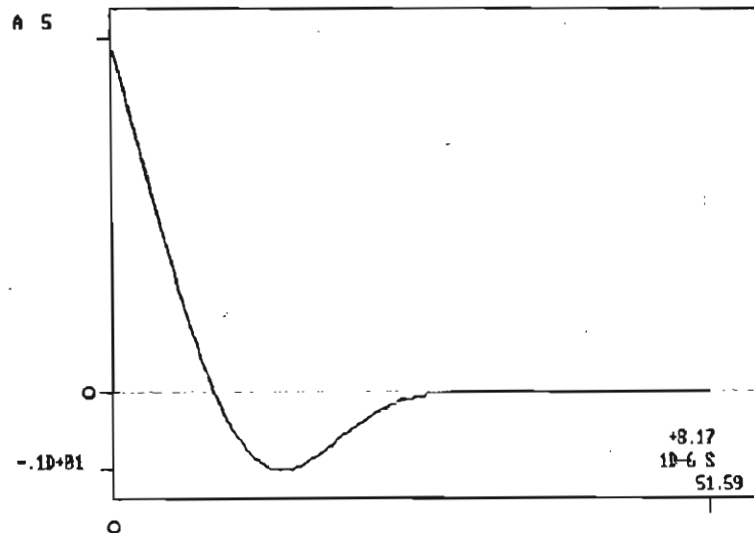


ب

شكل ٩



الف



ب

شكل ١٥

مطالعه رفتار فوس الکتریکی در حوالی صفر جریان در یک کلید گاز فشرده نشان میدهد که ثابت زمانی و توان خنک کنندگی فوس را نمیتوان بصورت مقادیر ثابتی در نظر گرفت. بر همین اساس میتوان ایندو پارامتر کلید را بصورت تابعی از جریان کلید و نیز متناسب با دیگر پارامترهای کلید از قبیل فشار گاز، شکل هندسی نازل و سرعت کاهش جریان در نظر گرفت و آنها را به شکلی اصلاح شده در مدل MaxT منظور داشت. تحت این شرایط مطالعاتی بر روی پدیده قطع جریان صورت گرفت. دیده شد که با افزایش جریان اتصال کوتاه، جریان پس قوسی افزایش و فله خاموشی ولتاژ کاهش می یابد و با افزایش بیشتر جریان اتصال کوتاه شرایط برای عمل قطع ناموفق فراهم میشود. دیده شد که دامنه جریان پس قوسی و فله خاموشی ولتاژ ارتباط تنکاتنگی با یکدیگر دارند و هر یک از ایندو میتواند به تنهایی معرف چگونگی شرایط برای عمل قطع جریان باشد. افزایش فشار گاز و نیز افزایش مقدار ظرفیت خازن موازی با کید تاثیر مطلوبی بر روی عملکرد کلید میگذارد. همچنین مطالعه تغییرات شیب جریان در قبل از لحظه صفر جریان بجویی نمایانگر بروز پدیده برش جریان میباشد. این نتایج تا حد مناسبی با نتایج عملی آزمایشات انجام شده بر روی کلید، مطابقت دارد. او، ۸ و ۷ و ۵ و ۴] و به نظر میرسد که مدل ارائه شده برای فوس الکتریکی میتواند بیانگر رفتار فوس در حوالی صفر جریان و تاثیر پارامترهای کلید و شبکه مانند فشار گاز داخل محفظه و عناصر موازی با کلید بر روی این رفتار باشد.

مدل فوس الکتریکی برای دو کلید SF6 و کلید هوای فشرده ارائه شده است. ولی با در دست داشتن اطلاعات کافی در مورد عملکرد انواع دیگر کلیدهای گاز فشرده و تفاوت بین آنها، میتوان صریحاً معادلات و مقدار پارامترها را متناسب با این تفاوت تنظیم کرد.

با وجود اینکه این مدل کاملاً به دقت فرآیند بروز فوس و رفتار آن را بررسی نمی کند ولی در عین حال میتواند یک دید کلی در این زمینه ارائه دهد و برای مهندسين و دانشجویانی که در زمینه مهندسی برق به نحوی با این مسئله سر و کار دارند میتواند بیانگر رفتار فوس در حوالی صفر جریان باشد.

- [1] J.F. perkins , L.S.Frost, " Dielectric Recovery and predicted Arc performance of blown SF6 Arcs " . IEEE paper No . 71 TP 539-PWR, Summer meeting , portland, 1971.
- [2] K.P. Brand, J.Kopaissky, " particle densities in a decaying SF6 plasma" . Applied phsics .16 , 425-432 (1978).
- [3] B.W. Swanson, R.M.Roidt, " Boundry layer analysis of an SF6 Circuit breaker arc, " IEEE paper No. 70 TP 584-PWR. Summer meeting , Ca.1970.
- [4] W. Hermann , U. Kogelschatz, L. Niemeyer , K. Ragaller, E. Schade, " Investigation on the physical phenomena around current Zero in H.V. gas blast breakers" , IEEE paper NO. F 76 061-2 , Winter power meeting N.Y.1976. .
- [5] B.W. Swanson, " Theoretical models for the arc in the current Zero regime" , Recent researches in gas blast breakers, 1978.
- [6] B.W. Swanson, R.M. Roidt, TE. Browne, " Arc cooling and short line fault interruption" , IEEE paper NO. 70 TP 585-PWR.
- [7] J.Mahdavi, " Disjoncteurs a' courant alternatif: leur compartement est-il meilleur avec un me'lange de SF6 et d'azote?" Revue Generale de l'Electricite', No . 5, Mai 1986, pp 21-26
- [8] D.T.Tuma, " A Comparision of the behaviour of SF6 and N2 blast arcs around current zero " , IEEE paper No. F 80 279-0 , Winter PES meeting N.Y. 1980.
- [9] A.J. Gonzalez, R.G. colclaser, " Current model capable of predicting are instability during low current interruption " , IEEE paper No. 82 SM 460-4 , Summer PES meeting Ca. 1982.
- [10] J.Mahdavi, A.Schaeffer, C. Velo, L. Bompa, J. Gatellet, " New Means of measuring current in the Vicinity of Zero in an AC circuit breaker . paper No. 4046A (S4.P7) . IEEE proceedings , Vol . 132 , Pt.A, No.5, SEP . 1985.