

# طراحی، توسعه و ساخت مدار اتصال کوتاه سینتتیک دوپارامتره کلیدهای فشارمتوسط خلأ با مدار جریان متصل به شبکه

علی‌رضا امیدخدا، جعفر جعفری بهنام، سید محمدصادق میرغفوریان، عبدالله گرائیلی، حسین کاظمی کارگر و حمیدرضا صادق محمدی

شبکه، به طور جدی با مشکل اخذ مجوزهای قانونی همراه می‌باشد. ولی در روش سینتتیک توان مورد نیاز از روش مستقیم کمتر و طبیعتاً هزینه‌های آن نیز پایین‌تر است. در این روش برای تأمین جریان اتصال کوتاه و ولتاژ بازگشتی گذرا<sup>۳</sup> (TRV) از دو منبع مجزا استفاده می‌شود. منبع ولتاژ قادر است ولتاژهای حالت گذرا در هنگام قطع کلید را ایجاد کند و منبع جریان، جریان اتصال کوتاه لازم را برای آزمایش کلید فراهم می‌نماید. مدارهای سینتتیک باید شرایط واقعی عملکرد کلید در قطع جریان اتصال کوتاه را شبیه‌سازی نمایند و همچنین قابلیت تأمین انرژی کافی قطع‌کننده‌ها<sup>۴</sup> را دارا باشند. البته در این روش انرژی قوس ورودی به کلید کمتر از روش تست مستقیم متناظر می‌باشد [۳].

استفاده از مدارهای سینتتیک در آزمون‌های کلیدهای قدرت کاربرد وسیعی داشته و جهت انجام آزمون سکیونرها و سوئیچ‌های قابل قطع زیر بار<sup>۵</sup> (LBS) نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. مزایای استفاده از روش سینتتیک در [۵] ذکر شده است.

امروزه به دلیل قدرت قطع اتصال کوتاه بالای کلیدهای قدرت، سنجش عملکرد قطع این کلیدها در ولتاژ نامی کمتر امکان‌پذیر بوده و حتی مجهزترین آزمایشگاه‌های دنیا با قدرت‌های اتصال کوتاه ۶۰۰۰ مگاوات آمپری و بالاتر نیز ظرفیت تست مستقیم یک کلید ۱۴۵ کیلوولت تا جریان ۲۵ کیلوآمپر را ندارند [۶]. این آزمایشگاه‌ها عمدتاً جهت تست کلیدهای فشارمتوسط از روش مستقیم بهره برده و جهت تست کلیدهای با ولتاژهای بالاتر از روش سینتتیک استفاده می‌نمایند [۷] و [۸].

اما در سطح ولتاژ فشارمتوسط نیز هزینه‌های بالای تأمین ژنراتور اتصال کوتاه و مشکلات دستیابی به تکنولوژی ساخت آن موجب گردید تا در این مقاله ایده استفاده از روش سینتتیک در تست کلیدهای فشارمتوسط، مورد توجه قرار گیرد.

در حال حاضر کلیدهای قدرت فشارقوی در قالب دو نوع اصلی کلیدهای SF<sub>6</sub> و کلیدهای خلأ طبقه‌بندی می‌شوند [۹]. در سطح شبکه توزیع استفاده از کلیدهای خلأ فشارمتوسط به دلیل عملکرد عالی، ابعاد کوچک، عدم نیاز به سرویس‌های دوره‌ای پس از نصب و مسایل زیست‌محیطی کاربرد وسیعی پیدا کرده است [۱۰].

از منظر فیزیکی عمل قطع جریان در قطع‌کننده‌های خلأ و قطع‌کننده‌های SF<sub>6</sub> از نظریه‌های متفاوتی تبعیت می‌نمایند [۱۱]. از آنجا که ولتاژ قوس الکتریکی در قطع‌کننده‌های خلأ پایین‌تر از قطع‌کننده‌های SF<sub>6</sub> می‌باشد، لذا انرژی قوس الکتریکی در کلیدهای خلأ پایین‌تر بوده و به منبع جریانی با ولتاژ کمتری نیاز می‌باشد که این امر منجر به کاهش توان قابل ملاحظه‌ای در قدرت مورد نیاز منبع جریان می‌شود.

چکیده: یکی از آزمون‌های اصلی کلیدهای قدرت ارزیابی قدرت قطع آنها در جریان‌های اتصال کوتاه می‌باشد. انجام این آزمون به روش مستقیم نیازمند منبعی با توان بسیار بالا می‌باشد اما با استفاده از روش سینتتیک و تأمین جریان و ولتاژ از دو منبع مجزا، کاهش قابل ملاحظه‌ای در توان منبع صورت خواهد پذیرفت. در این مقاله طراحی، توسعه و ساخت یک مجموعه آزمایشگاهی قطع اتصال کوتاه کلیدهای خلأ فشارمتوسط به روش سینتتیک با اتصال به شبکه توزیع ارائه گردیده است. توسعه و ساخت این مجموعه امکان انجام آزمون‌های قطع اتصال کوتاه بر روی کلیدهای خلأ را مطابق با استانداردهای بین‌المللی در داخل کشور فراهم ساخته است. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد مجموعه ساخته‌شده از تطابق مناسبی با طراحی برخوردار بوده و می‌توان جهت انجام آزمون استاندارد قدرت قطع اتصال کوتاه روی کلیدهای خلأ از این مجموعه بهره‌برداری نمود.

کلیدواژه: روش سینتتیک، آزمون قطع اتصال کوتاه، کلیدهای قدرت خلأ، ولتاژهای گذرای بازگشتی.

## ۱- مقدمه

سنجش قدرت قطع اتصال کوتاه کلیدهای قدرت به دو روش مستقیم<sup>۱</sup> و سینتتیک<sup>۲</sup> امکان‌پذیر است [۱] و [۲]. در روش مستقیم، کلید تحت آزمون به یک منبع قدرت با قابلیت تأمین ولتاژ و جریان اتصال کوتاه نامی کلید متصل می‌شود. توان این منبع بسیار قابل ملاحظه بوده و توسط یک یا چند ژنراتور اتصال کوتاه موازی قابل تأمین می‌باشد که طبیعتاً فراهم‌نمودن آزمایشگاه با چنین امکاناتی هزینه‌های بسیار زیادی در بر خواهد داشت. روش دیگر اتصال آزمایشگاه به یک شبکه انتقال با قدرت قطع بالا می‌باشد. اما این روش نیز غالباً به دلیل امکان وقوع خاموشی‌های گسترده در شبکه و همچنین تأثیرات نامطلوب بر پارامترهای کیفیت توان

این مقاله در تاریخ ۱۲ آبان ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۲۱ اسفند ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد. این تحقیق توسط شرکت توانیر و جهاد دانشگاهی واحد علم و صنعت پشتیبانی مالی شده است.

علی‌رضا امیدخدا (نویسنده مسئول)، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران، (email: aomidkhoda@jdevs.com).

جعفر جعفری بهنام، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران، (email: jbehnam@jdevs.com).

سید محمدصادق میرغفوریان، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران.

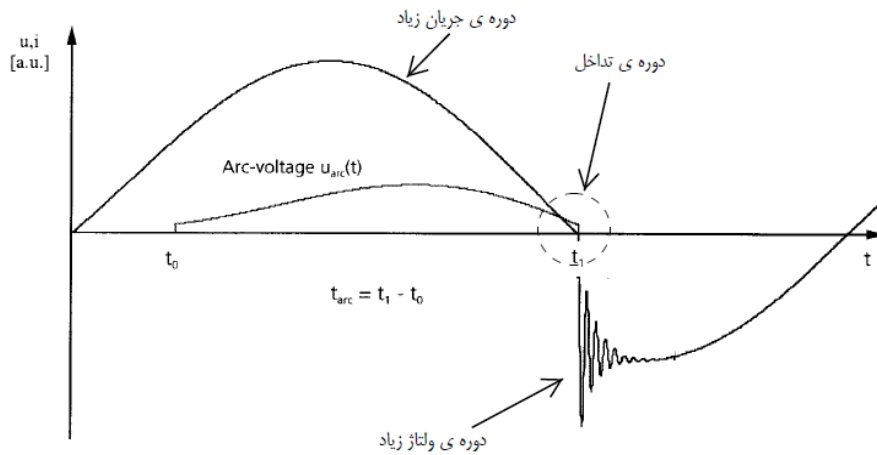
عبدالله گرائیلی، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران.

حسین کاظمی کارگر، دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: h\_kazemi@sbu.ac.ir).

حمیدرضا صادق محمدی، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، ایران، (email: mohammadis@acecr.ac.ir).

3. Transient Recovery Voltage
4. Interrupters
5. Load Break Switch

1. Direct
2. Synthetic



$t$ : لحظه جداسدن کنتاکت‌های کلید

$t_1$ : نقطه صفر جریان

شکل ۱: مراحل عمل قطع کلید در حالت اتصال کوتاه در شرایط واقعی شبکه.

توسط فاصله عایقی کنتاکت‌های کلید تحمل گردد.

### ۳- بخش‌های مدار قطع اتصال کوتاه به روش سینتیک

بر اساس [۱۲] شکل موج‌های ولتاژ بازگشتی گذرای دوپارامتری و چهارپارامتری جهت سطوح مختلف ولتاژی مورد نیاز است. جهت تست کلیدهای تا محدوده ولتاژ ۷۲٫۵ کیلوولت شکل موج دوپارامتره به کار می‌رود و برای سطوح بالاتر از شکل موج چهارپارامتره استفاده می‌گردد. همان‌طور که اشاره گردید در روش سینتیک دوره جریان زیاد توسط مدار جریان و دوره ولتاژ زیاد توسط مدار ولتاژ تأمین می‌گردد. ارتباط و زمان‌بندی‌های دقیق عملکرد این دو مدار نیز توسط یک مدار کنترلی تنظیم و کنترل می‌گردد.

در شکل ۲ طرح کلی مدار قطع اتصال کوتاه سینتیک دوپارامتره متشکل از مدار Weil-Dobke مبتنی بر تزریق جریان موازی آمده است. بخش‌های مختلف این مدار در ادامه معرفی شده است.

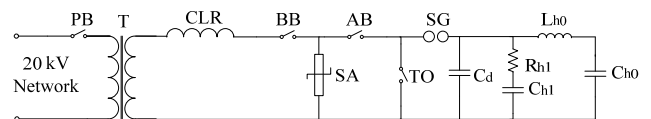
#### ۳-۱ مدار جریان

در [۱۳] تا [۱۵] برای سطح کلیدهای فشارمتوسط از بانک خازنی به عنوان مدار جریان استفاده شده است. در این روش امکان اعمال جریان نامتقارن وجود ندارد [۱۴]. همچنین به دلیل مقاومت اهمی مدار، جریان قطع کلید با افت دامنه و دوره مواجه بوده و معمولاً محدود به یک نیم‌سیکل خواهد بود.

در طراحی انجام‌گرفته جهت رفع این محدودیت‌ها از شبکه فشارمتوسط برای تأمین جریان اتصال کوتاه استفاده شده است.

مطابق شکل ۲ مدار جریان از پنج جزء اصلی تشکیل یافته است که عبارتند از ترانسفورماتور اتصال کوتاه، راکتور محدودکننده جریان، کلید پشتیبان، سیستم حفاظت ولتاژی برق‌گیر و کلید کمکی.

ترانسفورماتور اتصال کوتاه از نوع ترانسفورماتورهای با کلاس عایقی F انتخاب شده و در طراحی آن قابلیت تحمل جریان‌های اتصال کوتاه پیش‌بینی شده است. وظیفه این ترانسفورماتور تأمین جریان اتصال کوتاه در دوره جریان زیاد قوس الکتریکی از طریق اتصال به شبکه ۲۰ کیلوولت می‌باشد. استفاده از کلید کمکی AB در مدارهای سینتیک موجب افزوده‌شدن یک ولتاژ قوس الکتریکی اضافی در مدار تست می‌گردد. ولتاژ قوس الکتریکی کلید کمکی AB و کلید تحت تست موجب کاهش پیک جریان و کاهش زمان دوره تناوب خواهد شد که نتیجه آن کاهش انرژی



PB: کلید حفاظتی ۲۰ کیلوولت

T<sub>۱</sub>: ترانسفورماتور جریان

BB: کلید پشتیبان

CLR: راکتور محدودکننده جریان

SA: برق‌گیر

AB: کلید کمکی

TO: کلید تحت تست

C<sub>d</sub>: خازن ایجاد تأخیر

L<sub>h۰</sub>: اندوکتانس مدار ولتاژ

C<sub>h۰</sub>: خازن شارژ مدار ولتاژ

C<sub>h۱</sub>: خازن تنظیم TRV

R<sub>h۱</sub>: مقاومت تنظیم TRV

SG: گوی فاصله هوایی تریگرشونده

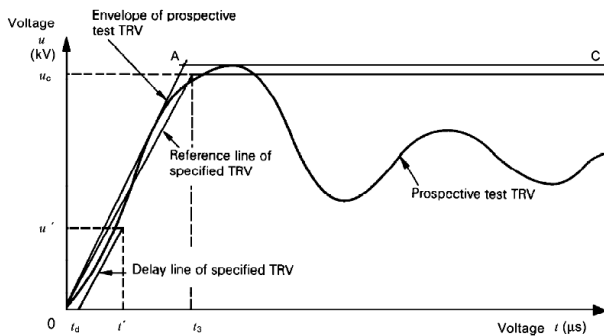
شکل ۲: طرح کلی مدار قطع اتصال کوتاه سینتیک دوپارامتره.

در این مقاله طراحی، توسعه و ساخت مدار آزمایشگاه قطع اتصال کوتاه سینتیک دوپارامتره کلیدهای فشارمتوسط خلا ارائه شده است. همچنین نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی انجام‌شده پس از ساخت و راه‌اندازی مجموعه مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- اصول قطع اتصال کوتاه کلیدهای قدرت به روش سینتیک

در دوره جریان زیاد، جریان اتصال کوتاه کلید توسط یک منبع جریان از کلید عبور می‌نماید. بر اساس استاندارد، کاهش دامنه و دوره تناوب جریان عبوری از کلید در مدت زمان وقوع قوس الکتریکی نباید بیشتر از ۱۰٪ دامنه جریان و دوره تناوب نامی کلید باشد [۱۲]. مقدار این کاهش با زمان از هم‌جداشدن کنتاکت‌های کلید و میزان ولتاژ قوس الکتریکی رابطه مستقیم دارد. بدین معنا که با افزایش دامنه و زمان ولتاژ قوس، کاهش بیشتری در دامنه و دوره قطع جریان رخ می‌دهد.

در طول دوره تداخل، تنش جریان اتصال کوتاه با تنش ولتاژ جایگزین می‌شود و خصوصیات کلید می‌تواند به صورت واضح و معنی‌داری بر روی ولتاژ و جریان مدار تأثیر گذارد. همچنین در لحظه گذر از صفر جریان و هم‌زمان با خاموش‌شدن جریان قوس، ولتاژ TRV بر روی کلید ظاهر می‌گردد که در این حالت کنتاکت‌های کلید کاملاً باز شده و باید این ولتاژ



شکل ۴: شکل موج ولتاژ بازگشتی گذرای دوبارمتره [۱].

گزینه جهت تزریق جریان  $i_h$  می‌باشد. جهت افزایش دقت و تأمین سرعت عمل بالا از سیستم تحریک نوری در این گوی فاصله متغیر استفاده شده که با تحریک یک الکتروود در فاصله هوایی و یونیزه کردن هوای بین دو الکتروود عمل تحریک و آتش نمودن مدار صورت می‌گیرد. طراحی و ساخت این سیستم به گونه‌ای است که قابلیت آتش نمودن گوی فاصله متغیر با تأخیر کمتر از چند میکروثانیه را فراهم می‌سازد.

جریان تزریقی  $i_h$  به صورت یک نیم‌سیکل به همراه جریان اصلی اتصال کوتاه از کلید TO عبور می‌کند و موجب می‌شود که تغییری در شکل موج جریان کلید TO در لحظه صفر جریان پدید آید (شکل ۳). طبق استاندارد مدت زمان عبور جریان  $i_h$  پس از لحظه صفرشدن جریان اصلی نباید از ربع دوره تناوب این جریان بیشتر باشد. نهایتاً با صفرشدن جریان  $i_h$ ، ولتاژ TRV از طریق مقاومت  $R_h$  و خازن‌های  $Ch$  و  $Cd$  شکل می‌گیرد.

در شکل ۴ موج ولتاژ بازگشتی گذرای دوبارمتره نشان داده شده است. پارامترهای این شکل موج مطابق [۱] عبارتند از:

$$u_c [\text{kV}] = u_c [\text{kV}] \text{ (معادل پیک ولتاژ مرجع (معادل پیک ولتاژ بازگشتی گذرا))}$$

$$t_r [\mu\text{s}] = t_r \text{ (زمان رسیدن به ولتاژ مرجع)}$$

$$U_{rated} = \text{ولتاژ نامی کلید تحت تست}$$

$$u_c = 1.4 \times 1.5 \sqrt{2/3} U_{rated} = 1.715 U_{rated}$$

$$u' = (\sqrt{3})uc$$

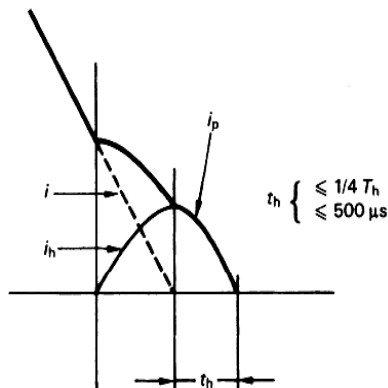
$$t_r = \text{متغیر}$$

$$U_{rated} < 72.5 \text{ kV} \text{ برای } t_d = 0.15 t_r$$

$$t' = t_d + (\sqrt{2})t_r$$

### ۳-۳ مدار کنترل

در طراحی مدار کنترل چهار بخش اندازه‌گیری، تطبیق، پردازش و ثبت سیگنال در نظر گرفته شده است. جهت کاهش دامنه و اندازه‌گیری ولتاژهای فشارقوی از مقسم‌های ولتاژی فشارقوی، و برای سنجش جریان‌های چند ده کیلوآمپری نیز از شنت‌های جریانی استفاده شده است. جهت تطبیق و تضعیف سیگنال‌ها به تجهیزات واسطی بین مدار قدرت با جریان‌ها و ولتاژهای بالا و سیستم کنترل نیاز است. این تجهیزات واسطی مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده از مدار آزمون را جهت ورود به A/D سیستم کنترل آماده ساخته و همچنین در طراحی آنها تدابیر حفاظتی در برابر اضافه ولتاژهای احتمالی پیش‌بینی شده است. بدین منظور یک مدار تطبیق سیگنال وظیفه تضعیف و آماده‌سازی مقادیر اندازه‌گیری شده از مدار آزمون جهت ورود به A/D سیستم کنترل را انجام می‌دهد. دامنه سیگنال‌های ورودی به مدار کنترل حداکثر ۲٫۵ ولت در نظر



شکل ۳: شرایط زمانی جریان تزریقی  $i_h$  [۱۲].

قوس الکتریکی در کلید تحت تست می‌باشد. به همین جهت در مدارهای سینتیکی، ولتاژ منبع جریان باید حداقل حدود ۱۲ برابر مجموع ولتاژ قوس کلیدهای کمکی و اصلی در نظر گرفته شود [۱۶].

در طراحی این ترانسفورماتور از نظر سطح ولتاژ و توان، توانایی غلبه بر ولتاژ قوس الکتریکی کلیدهای فشارمتوسط خلأ و محدودیت‌های کاهش مقدار دامنه و دوره جریان قطع، منظور گردیده و در همین راستا ولتاژ ثانویه ترانس ۷۶۰ ولت و توان اتصال کوتاه آن ۵۲٫۵ مگاوات‌آمپر در نظر گرفته شده است. همچنین جهت محدودساختن جریان و امکان ایجاد حالت‌های  $T_{100}-T_{30}-T_{60}-T_{10}$  بر روی انواع کلیدها با سطوح جریان‌های اتصال کوتاه تا ۳۱٫۵ کیلوآمپر، راکتورهای محدودکننده جریان از نوع هسته هوا و با تپ‌های متعدد طراحی و ساخته شده است.

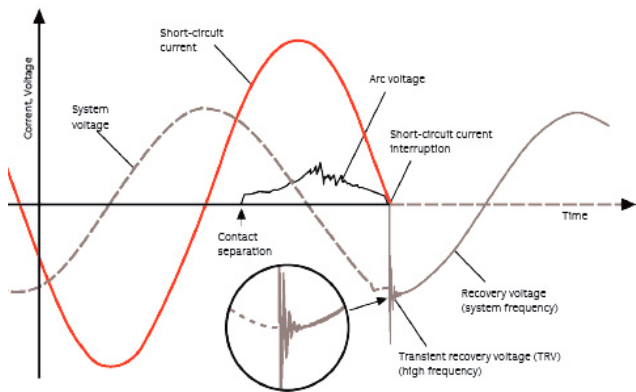
### ۲-۳ مدار ولتاژ

جهت ایجاد امکان انجام آزمون بر روی انواع کلیدها در محدوده‌های متفاوت ولتاژی و جریانی، مدار ولتاژ در سه طبقه و با امکان تنظیم و تغییر المان‌های خازنی، سلفی و مقاومتی طراحی و ساخته شده تا امکان ایجاد شکل موج‌های TRV و جریان‌های [۱] فراهم گردد.

مطابق شکل ۲، مدار ولتاژ مبتنی بر روش تزریق جریان طراحی شده است. در ابتدا کلیدهای AB و TO در حالت بسته قرار گرفته و جریان اتصال کوتاه توسط مدار جریان از آنها عبور داده می‌شود. با صدور فرمان قطع، کنتاکت‌های این دو کلید شروع به بازشدن می‌کنند اما همچنان جریان از طریق قوس الکتریکی ایجادشده در کلیدها برقرار خواهد بود. در نقطه صفر جریان، اگر فاصله کنتاکت‌ها به حدی رسیده باشد که پس از عبور از صفر جریان، ولتاژ دو سر کلید بر این فاصله غلبه نداشته باشد و ضمناً از نظر حرارتی نیز قوس به اندازه کافی خنک‌سازی شده باشد، جریان قطع خواهد گردید، اما در غیر این صورت جریان از طریق قوس الکتریکی دوباره برقرار و قطع آن به صفر بعدی جریان موکول می‌شود. در چنین شرایطی در زمان مناسب (نزدیک به صفر جریان)، گوی فاصله متغیر تحریک‌شونده<sup>۱</sup> SG آتش شده و جریان دشارژ خازن  $C_h$  طبق (۱) از طریق سلف  $L_h$  و کلید TO در مدار برقرار می‌گردد

$$i_h = V \sqrt{\frac{C_{ho}}{L_{ho}}} \sin \frac{1}{\sqrt{C_{ho} \times L_{ho}}} \quad (1)$$

فرکانس جریان  $i_h$  باید در محدوده ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ هرتز قرار گیرد [۲]. به دلیل وجود ولتاژهای بالای شارژ خازنی و امواج برگشتی ناشی از ایجاد TRV، استفاده از گوی فاصله متغیر تحریک‌شونده مناسب‌ترین



شکل ۶: نمودار ولتاژ و جریان کلید خلاً در هنگام قطع جریان اتصال کوتاه [۱۷].

مدل‌های قوس مختلف Cassie و Mayr و بلوک‌های شبیه‌سازی آنها در [۱۸] آمده است. همچنین مدل قوس KEMA از دقت بالایی در اجرای شبیه‌سازی‌ها برخوردار است [۱۹].

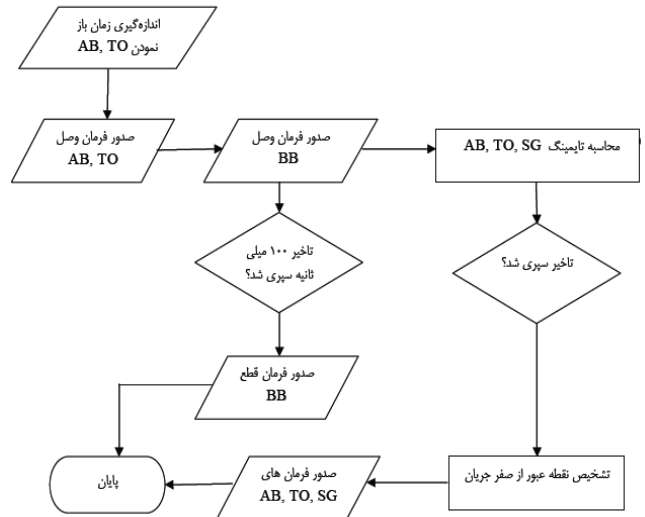
این شبیه‌سازی برای یک کلید خلاً ۲۵ کیلوآمپر ۲۴ کیلوولت انجام شده است. از آنجایی که رفتار قوس الکتریکی در دوره جریان زیاد مد نظر است و مدل مناسب برای بررسی این دوره مدل Cassie می‌باشد [۱۶]، بنابراین در این شبیه‌سازی از مدل Cassie استفاده گردید [۳] و [۱۸]. در مدل Cassie مقدار ولتاژ قوس الکتریکی عدد ثابتی فرض می‌گردد اما از آنجا که در عمل ولتاژ قوس الکتریکی عدد ثابتی نمی‌باشد، مقدار میانگین ولتاژ قوس به عنوان ولتاژ مدل Cassie در نظر گرفته شد.

در [۲۰] ولتاژ میانگین قوس الکتریکی برای یک کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر در حالت قطع جریان ۶ کیلوآمپری اندازه‌گیری شده و با توجه به روابط ارائه‌شده در [۲۱] ولتاژ قوس الکتریکی در جریان ۲۵ کیلوآمپر عدد ۵۰ ولت محاسبه شده است. در [۲۲] نیز ولتاژ قوس الکتریکی برای کلیدهای خلاً حدود ۵۰ ولت اعلام شده است. بنابراین در این شبیه‌سازی ولتاژ قوس الکتریکی در قطع جریان ۲۵ کیلوآمپر برای هر دو کلید خلاً تحت آزمون و کمکی، عدد ۵۰ ولت فرض شده است.

مدار این شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB با در نظر گرفتن پارامترهای شبکه قدرت و مدار سینتیکی در شکل ۷ آمده است. در این شکل شبکه ۶۳/۲۰ کیلوولت واقع در پست کردان با سطح اتصال کوتاه ۵۹۶ مگاوات‌آمپر و  $X/R = 4$  می‌باشد. سه ترانس فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلوولت با توان نامی ۳۰ مگاوات‌آمپر و درصد امپدانس ۱۳/۵ در این پست وجود دارد که در حالت عادی فیدر آزمایشگاه از یکی از این ترانس‌ها تغذیه می‌شود. این فیدر از نوع هوایی تک‌مداره با سیم آلومینیومی Hyena و با مقطع می‌باشد.

جهت عبور جریان اتصال کوتاه ۲۵ کیلوآمپر از یک راکتور محدودکننده جریان با مقدار ۱۲ میکروهنری و  $X/R = 10$  استفاده شده است. امپدانس باس‌بارها و اتصالات نیز بر اساس مقادیر واقعی آنها در این شبیه‌سازی لحاظ شده و مقاومت اهمی باس‌بارها ۰/۳ میلی‌اهم و اندوکتانس آنها ۵/۵ میکروهنری در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، لحظه شروع قوس الکتریکی در کلیدهای AB و TO در مقدار کاهش دامنه و دوره جریان مؤثر می‌باشد. از طرف دیگر اگر لحظه شروع قوس الکتریکی با فاصله کمی از نقطه صفر جریان انتخاب گردد، امکان برش جریان و قطع ناگهانی آن به علت کوچک‌بودن اندازه جریان وجود دارد. بر همین اساس در شبیه‌سازی انجام‌شده زمان شروع قوس الکتریکی در کلید AB و TO به ترتیب ۲ و ۴ میلی‌ثانیه پس از لحظه صفر نیم‌سیکل آخر جریان در نظر گرفته شده



شکل ۵: روندنمای عملکرد کنترل‌کننده مبتنی بر DSP.

گرفته شده است.

جهت انجام پردازش سیگنال‌ها و ایجاد امکان هم‌زمانی<sup>۱</sup> مدار جریان و ولتاژ در محدوده دقت میکروثانیه، از سیستم کنترل مبتنی بر پردازنده‌های سیگنال دیجیتال<sup>۲</sup> (DSP) استفاده شده است. در شکل ۵ روندنمای ساده عملکرد سیستم کنترل آمده است.

#### ۴- شبیه‌سازی‌ها

در این بخش رفتار کلید خلاً در قطع جریان اتصال کوتاه در دوره‌های مختلف جریان زیاد، تداخل و ولتاژ زیاد شبیه‌سازی شده است. مجموعاً ۷۲ حالت برای انواع مختلف کلیدهای ۱۲، ۲۴ و ۳۶ کیلوولت با جریان‌های نامی از ۱۰ تا ۳۱/۵ کیلوآمپر و همچنین حالت‌های T۱۰ تا T۱۰۰ در نظر گرفته شد. در شکل ۶ نمودار ولتاژ و جریان یک کلید خلاً در هنگام قطع جریان اتصال کوتاه نمایش داده شده است.

#### ۴-۱- شبیه‌سازی دوره جریان زیاد

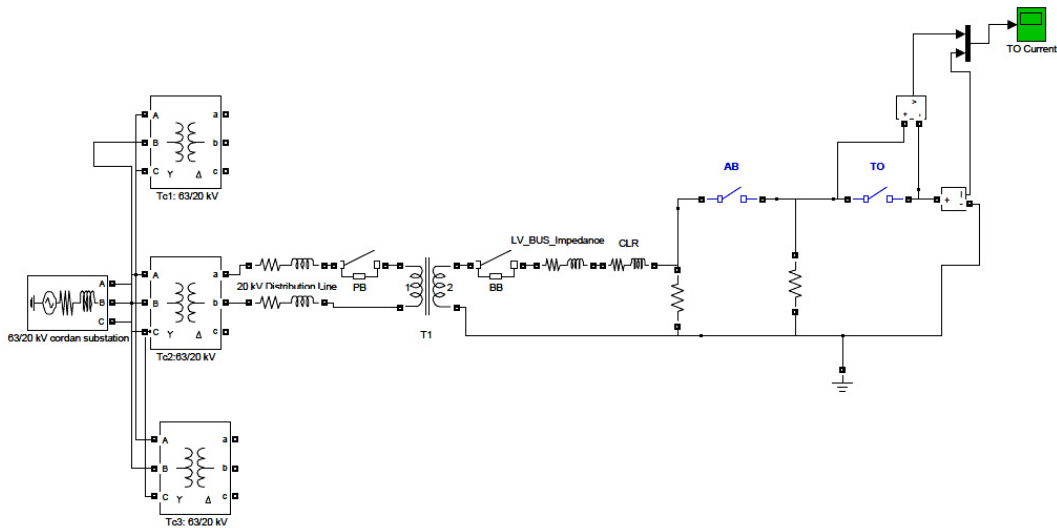
اعوجاج جریان فاکتور شناخته‌شده‌ای در شبیه‌سازی فرایند قطع جریان اتصال کوتاه در کلیدها می‌باشد. در [۱۲] اثرات ولتاژ قوس بر ایجاد اعوجاج جریان و معادلات ریاضی حاکم بر مدار قطع اتصال کوتاه کلیدهای قدرت بررسی شده است.

جهت شبیه‌سازی مدل فیزیکی قوس الکتریکی باید دو مورد ذیل با هم در نظر گرفته شوند [۱۶]:

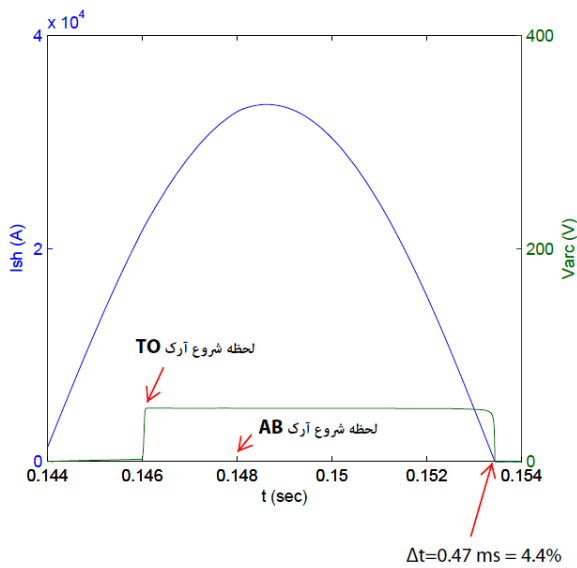
(الف) رفتار ترمودینامیکی و بررسی تأثیر تلفات اهمی ناشی از عبور جریان (معادله انرژی)

(ب) رفتار الکترومغناطیسی و حل معادلات ماکسول  
به دلیل وجود رفتار غیر خطی و زمان بسیار کوتاه، محاسبات عددی صحیح مدل قوس الکتریکی حایز اهمیت می‌باشد. از محیط نرم‌افزاری MATLAB که جهت محاسبات حالت‌های گذرا مناسب می‌باشد، بلوک مدل قوس الکتریکی<sup>۳</sup> (AMB) در محیط Simulink این نرم‌افزار ارائه شده است که می‌توان این بلوک را در<sup>۴</sup> PSB جهت شبیه‌سازی رفتار کلیدهای قدرت در هنگام قطع جریان استفاده نمود [۹].

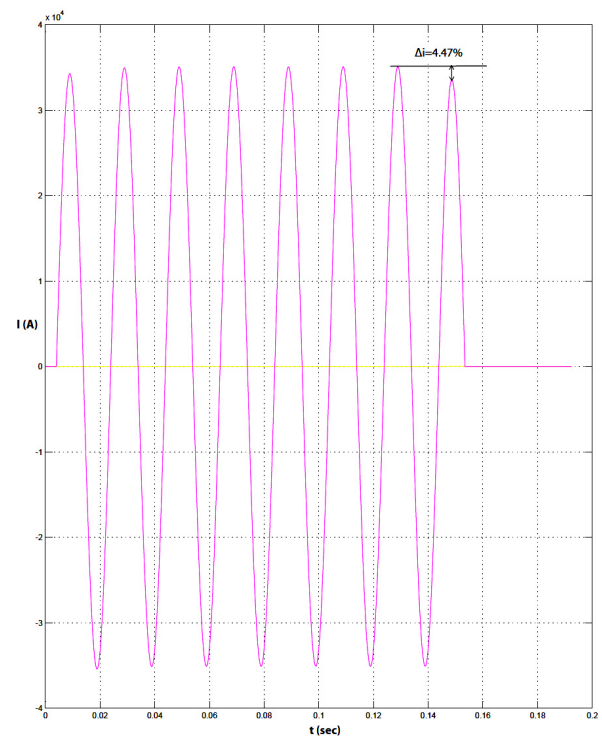
1. Synchronous
2. Digital Signal Processor
3. Arc Model Blockset
4. Power System Blockset



شکل ۷: شبیه‌سازی آزمون قطع کلید خلأ در شبکه قدرت آزمایشگاه محل نصب مدار سینتیک.



شکل ۹: شبیه‌سازی قطع جریان ۲۵ کیلوآمپر در کلید خلأ (نیم‌سیکل آخر).



شکل ۸: شبیه‌سازی قطع جریان ۲۵ کیلوآمپر در کلید خلأ.

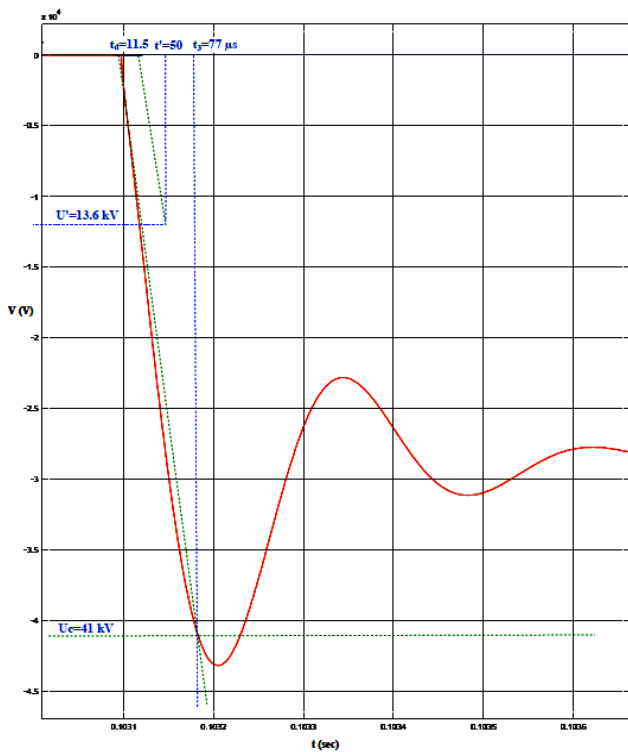
جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی دوره جریان زیاد کلید خلأ در شبکه قدرت محل نصب مدار سینتیک.

| مقدار جریان (کیلوآمپر) | لحظه شروع قوس الکتریکی کلید TO از ابتدای نیم‌سیکل آخر جریان (میلی‌ثانیه) | لحظه شروع قوس الکتریکی کلید AB از ابتدای نیم‌سیکل آخر جریان (میلی‌ثانیه) | کاهش دامنه جریان TO در نیم‌سیکل آخر جریان $\Delta i$ (%) | کاهش دوره جریان TO در نیم‌سیکل آخر جریان $\Delta t$ (%) |
|------------------------|--|--|--|---|
| ۲۵                     | ۲  | ۴  | ۴٫۴۷   | ۴٫۴   |

### ۴-۲ شبیه‌سازی دوره تداخل و ولتاژ گذرای برگشتی

جهت به دست آوردن مقادیر اجزای مدار ولتاژ و برآورده‌سازی الزامات پارامترهای ولتاژ TRV، شبیه‌سازی عملکرد مدار ولتاژ در تمامی حالت‌های انواع کلیدها با سطوح ولتاژ و جریان نامی مختلف و همچنین حالت‌های T10 تا T100 صورت پذیرفته است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مربوط به حالت T100 کلید خلأ ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر آمده است.

است. در طراحی مدار آزمون نیز امکان تنظیم لحظه شروع قوس الکتریکی از طریق مدار کنترل وجود دارد. نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است. در شکل ۸ جریان عبوری از کلید نمایش داده شده است. در شکل ۹ نیز نیم‌سیکل آخر جریان مشاهده می‌گردد. با توجه به دو شکل فوق مقادیر کاهش دامنه و دوره جریان در نیم‌سیکل آخر قطع ۴٫۴۷ و ۴٫۴ درصد محاسبه می‌گردد که این مقادیر با الزامات ذکر شده در [۱۲] مطابقت دارد.



شکل ۱۲: TRV در شبیه‌سازی حالت T100 کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای موج استاندارد TRV برای کلید ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر.

| $U_r$<br>kV | Test duty | $I_r$<br>kA | $U_c$<br>kV<br>+%/۱۰ | $t_r$<br>$\mu$ s | $t_d$<br>$\mu$ s<br>$\pm$ %/۲۰ | $U'$<br>kV | $t'$<br>$\mu$ s | $U_c/t_r$<br>kV/ $\mu$ s<br>+%/۱۵ |
|-------------|-----------|-------------|----------------------|------------------|--------------------------------|------------|-----------------|-----------------------------------|
| ۲۴          | T100      | ۲۵          | ۴۱                   | ۸۷               | ۱۳                             | ۱۴         | ۴۳              | ۰.۴۷                              |
| ۲۴          | T60       | ۱۵          | ۴۴                   | ۳۸               | ۶                              | ۱۵         | ۱۸              | ۱.۱۶                              |
| ۲۴          | T30       | ۷.۵         | ۴۴                   | ۱۹               | ۳                              | ۱۵         | ۹               | ۲.۳۲                              |
| ۲۴          | T10       | ۲.۵         | ۴۴                   | ۱۹               | ۳                              | ۱۵         | ۹               | ۲.۳۲                              |

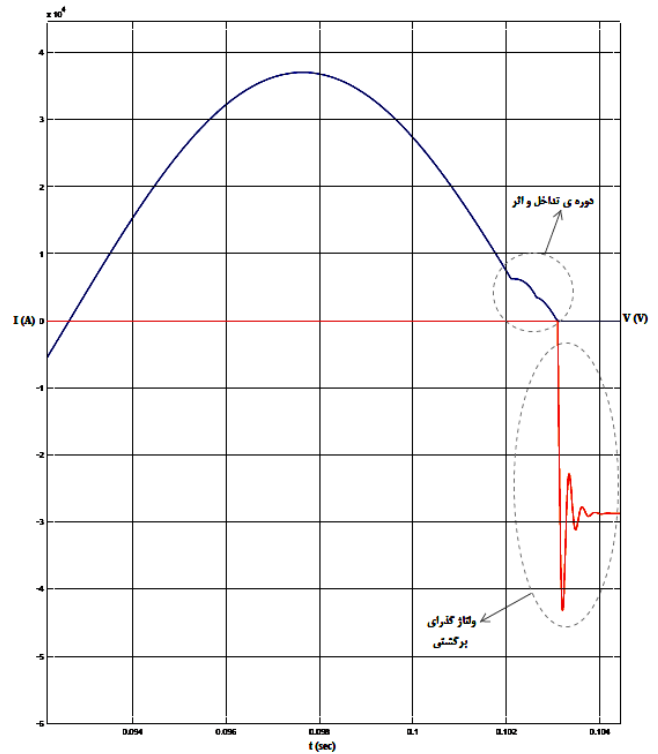
جدول ۳: مقادیر المان‌های مدار شبیه‌سازی قطع اتصال کوتاه کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر در حالت T100.

| Test duty | Uh.<br>kv | Ch.<br>$\mu$ F | Lh.<br>mH | Rh <sub>1</sub><br>$\Omega$ | Ch <sub>1</sub><br>$\mu$ F | Cd<br>nF |
|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|----------|
| T100      | ۲۹.۴      | ۳۸.۳           | ۲.۶       | ۴۲                          | ۰.۶۶                       | ۷۳       |

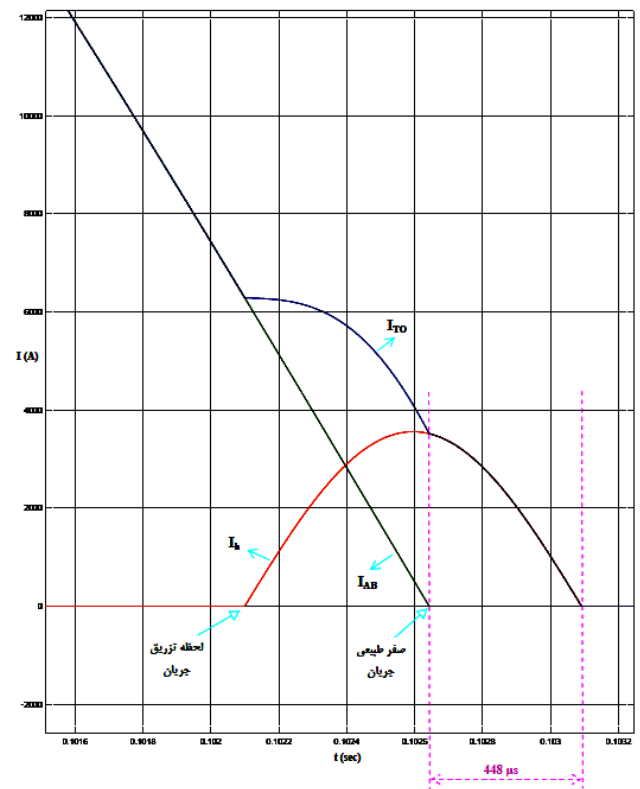
جدول ۴: مقادیر پارامترهای ولتاژ TRV در شبیه‌سازی حالت T100 کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر.

| $U_r$<br>kV | Test duty | $I_r$<br>kA | $U_c$<br>kV<br>+%/۱۰ | $t_r$<br>$\mu$ s | $t_d$<br>$\mu$ s<br>$\pm$ %/۲۰ | $U'$<br>kV | $t'$<br>$\mu$ s | $U_c/t_r$<br>kV/ $\mu$ s<br>+%/۱۵ |
|-------------|-----------|-------------|----------------------|------------------|--------------------------------|------------|-----------------|-----------------------------------|
| ۲۴          | T100      | ۲۵          | ۴۳                   | ۷۷               | ۱۱.۵                           | ۱۳.۶       | ۵۰              | ۰.۵۳                              |

TRV پس از قطع جریان نشان داده شده است. در شکل ۱۱ نیز بزرگ‌نمایی دوره تداخل و همچنین جریان تزریق شده توسط مدار ولتاژ و جریان عبوری از کلید AB نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد جابه‌جایی لحظه صفر در جریان کلید TO به میزان ۴۴۸ میکروثانیه می‌باشد که در محدوده الزامات [۱۲] قرار دارد. جریان کلید AB در لحظه صفر طبیعی جریان (زودتر از کلید TO) قطع گردیده است، بنابراین از وقوع اضافه ولتاژ TRV روی مدار جریان جلوگیری خواهد شد. شکل ۱۲ بزرگ‌نمایی قسمت ولتاژ TRV شکل ۱۰ می‌باشد.



شکل ۱۱: جریان نیم‌سیکل آخر و ولتاژ TRV در شبیه‌سازی حالت T100 کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر.

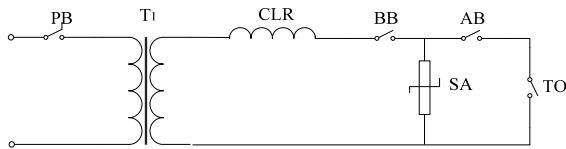


شکل ۱۱: بزرگ‌نمایی دوره تداخل و اثر در شبیه‌سازی حالت T100 کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر.

در جدول ۲ مقادیر پارامترهای موج استاندارد TRV برای کلید ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر ذکر شده است [۱].

مقادیر المان‌های مدار شبیه‌سازی در حالت T100 کلید ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر بر اساس [۲۳] تعیین شد و در جدول ۳ آمده است.

در شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی نیم‌سیکل آخر جریان به همراه ولتاژ



PB: کلید حفاظتی ۲۰ کیلوولت

T<sub>1</sub>: ترانسفورماتور جریان

BB: کلید پشتیبان

CLR: راکتور محدودکننده جریان اتصال کوتاه

SA: برق گیر حفاظتی

AB: کلید کمکی

TO: کلید تحت تست

شکل ۱۴: مدار آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری دوره جریان زیاد.



شکل ۱۳: نمایی از مدار آزمایشگاه سینتتیک طراحی و ساخته شده، سمت راست ترانسفورماتور و راکتورهای محدودکننده جریان و سمت چپ مدار ولتاژ.

جدول ۵: نتایج آزمایشگاهی قطع جریان اتصال کوتاه در کلید خلاً (دوره جریان زیاد).

|                             | جریان اتصال کوتاه<br>kA | کاهش دامنه جریان در نیم‌سیکل آخر قطع جریان<br>$\Delta i$ (%) | کاهش دوره تناوب جریان در نیم‌سیکل آخر قطع جریان<br>$\Delta t$ (%) |
|-----------------------------|-------------------------|--|---|
| اندازه‌گیری آزمایشگاهی      | ۲۵٫۱                    | ۴٫۴  | ۴٫۳   |
| اختلاف با شبیه‌سازی بند ۴-۱ | ۰٫۴                     | ۱٫۵  | ۲٫۳   |

کنترل صورت می‌پذیرد. لازم به ذکر است که آزمون انجام شده در فرکانس ۵۰ هرتز و بر روی یک پل کلید انجام شده است. در جدول ۵ نتایج به دست آمده در این آزمایش آمده است.

جهت اندازه‌گیری جریان از شانت ۰٫۰۴ میلی‌اهم (دقت ۰٫۰۰۰۱ میلی‌اهم و عدم قطعیت ۰٫۰۰۱۳ میلی‌اهم) به همراه اسیلوسکوپ حافظه‌دار دیجیتال Rigol مدل DS۱۰۵۲E استفاده شده است. با توجه به جدول ۵، میزان انحراف نتایج اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی (جدول ۱) کمتر از ۳٪ می‌باشد. بنابراین نتایج آزمایشگاهی با شبیه‌سازی دوره جریان زیاد مطابقت زیادی دارد.

## ۵-۲ آزمون قطع اتصال کوتاه در مدار سینتتیک

آزمون قطع اتصال کوتاه سینتتیک برای حالت T<sub>100</sub> کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر انجام گرفته است. مدار این آزمون مطابق شکل ۲ می‌باشد. در این آزمون کلید ذکر شده در بند ۵-۱ تحت اعمال جریان اتصال کوتاه قرار داده می‌شود و پس از جداسدن کنتاکت‌های کلید و شروع قوس الکتریکی، تزریق مدار ولتاژ توسط گوی فاصله متغیر تحریک‌شونده انجام می‌گیرد. پس از عبور از صفر و قطع جریان، ولتاژ TRV بر روی فاصله عایقی بین کنتاکت‌های کلید ظاهر می‌گردد. مطابق با استاندارد پس از میراشدن مؤلفه DC جریان، بازشدن کلید آغاز می‌گردد. الگوریتم طراحی شده در مدار کنترل DSP با محاسبه تأخیر زمانی کلیدهای تحت آزمون و کمکی و پردازش سیگنال جریان، لحظه صدور فرمان گوی فاصله متغیر تحریک‌شونده (تزریق مدار ولتاژ) را تعیین و اعمال می‌نماید. لحظه آتش گوی فاصله متغیر، تابعی از تأخیر زمانی سیستم کنترل و تأخیر زمانی ایجاد پدیده یونیزاسیون و وقوع شکست الکتریکی در گوی می‌باشد.

همچنین امکان تنظیم دلخواه مدت زمان قوس الکتریکی کلید تحت آزمون و کلید کمکی نیز در سیستم کنترل پیش‌بینی شده است. از این امکان می‌توان جهت کاهش میزان اعوجاج جریان استفاده نمود.

مقادیر المان‌های مدار سینتتیک مطابق شبیه‌سازی بند ۴-۲ (جدول ۳) تعیین شده‌اند.

پارامترهای TRV بر روی این شکل ترسیم شده‌اند و مقادیر محاسبه شده در جدول ۴ آمده است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی و جدول‌های ۲ و ۴، پارامترهای ولتاژ TRV در محدوده [۱] می‌باشد و مقادیر المان‌های انتخابی در شبیه‌سازی تصدیق می‌شود.

به صورت مشابه برای تمامی انواع مختلف کلیدها در سطوح ولتاژ و جریان مختلف این شبیه‌سازی‌ها در حالت‌های T<sub>10</sub> تا T<sub>100</sub> انجام شده و بر اساس نتایج حاصل، طراحی مدار ولتاژ صورت پذیرفته است.

## ۵-۵ انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پس از ساخت و راه‌اندازی مجموعه

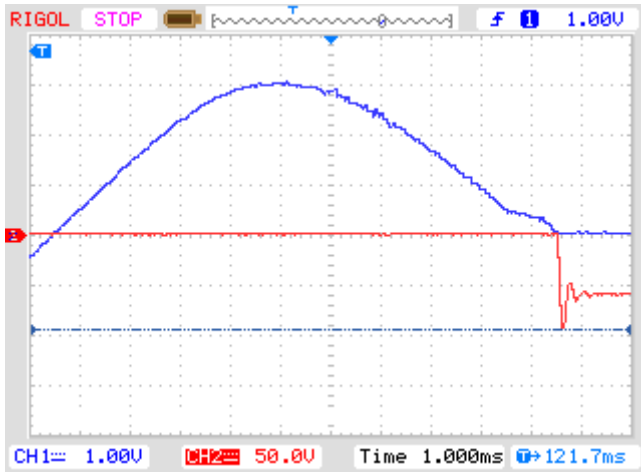
پس از ساخت مجموعه سینتتیک در جهاد دانشگاهی علم و صنعت، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی روی یک نمونه کلید خلاً انجام گرفت. در شکل ۱۳ نمایی از این آزمایشگاه اتصال کوتاه به روش سینتتیک آمده است. این اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دو مرحله دوره جریان زیاد و سپس مدار کامل قطع اتصال کوتاه سینتتیک که مشتمل بر آتش مدار ولتاژ از طریق گوی فاصله هوایی تحریک‌شونده (دوره تداخل و اعمال ولتاژ برگشتی گذرا) می‌باشد، انجام گرفته است.

## ۵-۱ اندازه‌گیری آزمایشگاهی دوره جریان زیاد

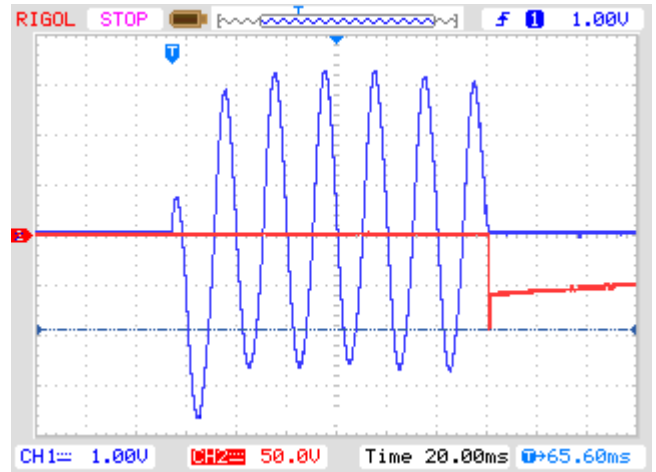
مشابه شبیه‌سازی دوره جریان زیاد (بند ۴-۱)، اندازه‌گیری آزمایشگاهی میزان کاهش دامنه و دوره تناوب در نیم‌سیکل آخر قطع جریان، بر روی یک کلید خلاً ۲۵ کیلوآمپر ۲۴ کیلوولت مدل VD۴ انجام گرفت.

جهت انجام این آزمون فقط به مدار جریان نیاز می‌باشد. در شکل ۱۴ طرح کلی مدار استفاده شده در این آزمون آمده است. در این مدار، ترانسفورماتور جریان با مشخصات ۲۰ کیلوولت به ۷۶۰ ولت و توان اتصال کوتاه ۵۲٫۵ مگاوات آمپر استفاده شده و راکتور محدودکننده CLR، روی ۱۶ میکروهانری قرار داده شده است.

مشابه شبیه‌سازی بند ۴-۱، زمان شروع قوس الکتریکی در کلید TO و AB به ترتیب ۲ و ۴ میلی‌ثانیه پس از لحظه صفر نیم‌سیکل آخر جریان در نظر گرفته شد. تنظیم لحظه شروع قوس الکتریکی از طریق مدار



شکل ۱۶: شکل موج‌های جریان و ولتاژ در آزمون قطع جریان اتصال کوتاه برای حالت T100 کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر، (بزرگ‌نمایی نیم‌سیکل آخر جریان).



شکل ۱۵: شکل موج‌های جریان و ولتاژ در آزمون قطع جریان اتصال کوتاه برای حالت T100 کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر.

اختلاف شبیه‌سازی با پارامترهای اندازه‌گیری شده برای تمامی پارامترهای موج TRV کمتر از ۵٪ می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسب شبیه‌سازی‌ها با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در محدوده مجاز تعیین شده است.

بنابراین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الزامات استاندارد به خوبی برآورده شده و می‌توان از این مجموعه جهت انجام آزمون قطع اتصال کوتاه کلیدهای خلاً به روش سینتتیک استفاده نمود.

## ۷- سپاس‌گزاری

طراحی و ساخت این مجموعه به سفارش شرکت توانیر و حمایت مدیران محترم آن شرکت از انجام پژوهش در کشور و در جهت بومی‌سازی دانش فنی این مجموعه انجام شده است. ساخت این مجموعه آزمایشگاهی که در نوع خود برای اولین بار در کشور صورت گرفته است متضمن کار مهندسی قابل توجهی بوده است که حاصل تلاش شبانه‌روزی همکاران مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت می‌باشد. همچنین از حمایت‌های مدیران محترم شرکت توانیر و ریاست محترم جهاد دانشگاهی سپاس‌گزاری به عمل می‌آید.

## مراجع

- [1] IEC62271, High-Voltage Switchgear and Controlgear-Part 100: Alternating-Current Circuit-Breakers, Edition 2.1, 2012.
- [۲] ح. کاظمی کارگر و گروه تحقیقات پارس سویچ، اصول کلیدهای فشارقوی، چاپ اول، ۱۳۸۸.
- [3] L. Van der Sluis and B. L. Sheng, "The influence of the arc voltage in synthetic test circuits," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 1, pp. 274-279, Jan. 1995.
- [4] A. Islam, D. Birtwhistle, T. K. Saha, and B. Diverall, "Two-part synthetic test procedures for the testing of medium-voltage load break switches," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1645-1654, Aug. 2016.
- [5] V. K. Gaur and H. R. Jariwala, "Approach to solve synthetic test circuit for testing of high voltage circuit breaker," in *Proc. IEEE 15th Int. Conf. on, Environment and Electrical Engineering, EEEIC'15*, pp. 1187-1192, Rome, Italy, 10-13 Jun. 2015.
- [6] D. Dufournet and G. Montillet, "Three-phase short circuit testing of high-voltage circuit breakers using synthetic circuits," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 142-147, Jan. 2000.
- [7] Fan Xing-Xing, Zhang Xin, and Zou Ji-yan, "A Fast Making Switch Based on Triggered Vacuum Switch and Fast Vacuum Circuit Breaker," in *Proc. 23rd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, 5 pp., Bucharest, Romania, 15-19 Sept. 2008.

جدول ۶: پارامترهای اندازه‌گیری شده از شکل موج‌های آزمون T100 کلید خلاً ۲۴ کیلوولت ۲۵ کیلوآمپر.

|                         | $I_r$<br>kA | $U_c$<br>kV | $t_r$<br>$\mu$ s | $t_d$<br>$\mu$ s | $U'$<br>kV | $t'$<br>$\mu$ s | $U_c/t_r$<br>kV/ $\mu$ s |
|-------------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|------------|-----------------|--------------------------|
| اندازه‌گیری آزمایشگاهی  | ۲۵٫۱        | ۴۳٫۶        | ۸۰               | ۱۲               | ۱۳٫۷       | ۵۲              | ۰٫۵۴                     |
| اختلاف با شبیه‌سازی (%) | ۰٫۴         | ۱٫۴         | ۳٫۸              | ۴٫۳              | ۰٫۷        | ۴               | ۱٫۸                      |

اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه مشابه بند ۵-۱ انجام شده و جهت اندازه‌گیری ولتاژ TRV از یک مقسم ولتاژ خازنی ۱۰۰ کیلوولت ۱۰۰ پیکوفاراد استفاده شده است. تضعیف ولتاژ توسط یک واحد کاهنده ولتاژ و تطبیق امپدانس صورت پذیرفته و توسط یک کابل کوآکسیال ۷۵ اهمی جهت ثبت در اسیلوسکوپ حافظه‌دار دیجیتالی مدل DS۱۰۵۲E انتقال داده می‌شود. عدم قطعیت اندازه‌گیری این مقسم ولتاژ خازنی و واحد تطبیق امپدانس آن کوچک‌تر از ۱٪ می‌باشد.

در شکل ۱۵ اندازه‌گیری هم‌زمان شکل موج‌های جریان و ولتاژ TRV در این آزمون نمایش داده شده است. در شکل ۱۶ نیز بزرگ‌نمایی نیم‌سیکل آخر جریان و ولتاژ TRV آمده است. با توجه به این شکل مقدار جابه‌جایی نقطه صفر جریان کلید TO کوچک‌تر از ۵۰۰ میکروتانیه اندازه‌گیری می‌گردد، بنابراین لحظه تزریق جریان به درستی و مطابق با الزامات [۱۲] انجام گرفته است. پارامترهای اندازه‌گیری شده از شکل موج TRV و محاسبه درصد اختلاف با حالت شبیه‌سازی (بند ۴-۲) در جدول ۶ آمده است. این اختلاف برای تمامی پارامترهای موج TRV کمتر از ۵٪ می‌باشد که در محدوده مجاز تعیین شده در استاندارد قرار دارد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و ساخت مدار قطع اتصال کوتاه سینتتیک دوپارامتره متصل به شبکه کلیدهای قدرت فشارمتوسط خلاً ارائه گردید. شبیه‌سازی رفتار کلید خلاً و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دو دوره جریان زیاد و مدار قطع اتصال کوتاه سینتتیک انجام شد.

نتایج به دست آمده نشان داد که در دوره جریان زیاد میزان انحراف نتایج اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی کمتر از ۳٪ می‌باشد. همچنین در دوره تداخل لحظه تزریق جریان به درستی انجام گرفته و جابه‌جایی لحظه صفر در جریان کلید TO در محدوده مجاز قرار دارد. در دوره ولتاژ زیاد نیز



**جعفر جعفری بهنام** متولد ۱۳۵۰ در همدان بوده و تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۸۱ در دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۹۵ به پایان رسانده است. ایشان همکاری خود را از سال ۱۳۷۶ در مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت آغاز نموده و در حال حاضر مدیر آزمایشگاه و مرکز می‌باشد.

**سید محمدصادق میرغفوریان** متولد ۱۳۳۵ تهران بوده مدرک کارشناسی مهندسی برق قدرت را در سال ۱۳۵۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ کرد و تحصیلات مقاطع M-Phil و دکتری خود را در رشته مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳ میلادی از دانشگاه منچستر انگلستان به پایان رساند. نام‌برده از سال ۱۳۵۹ به عنوان عضو هیأت علمی جهاد دانشگاهی علم و صنعت مشغول به فعالیت اشتغال داشت. علاوه بر فعالیت‌های گسترده پژوهشی و صنعتی، تدریس دروس طرح خطوط هوایی انتقال و ماشین‌های الکتریکی از جمله فعالیت‌های آموزشی ایشان در دانشگاه‌های مختلف به شمار می‌آید. دکتر سیدمحمدصادق میرغفوریان در چهارم تیر ماه ۱۳۹۵ بر اثر عارضه قلبی دار فانی را وداع گفت.

**عبدالله گرایلی** متولد گرگان بوده و تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق قدرت در دانشگاه علم و صنعت و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع مدیریت سیستم و بهره‌وری در دانشگاه مازندران به پایان رسانده است. ایشان از سال ۱۳۵۹ عضو جهاد دانشگاهی علم و صنعت بوده و هم‌اکنون نیز به عنوان عضو هیأت علمی به صورت پاره وقت با مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت همکاری دارد.

**حسین کاظمی کارگر** تحصیلات خود را به ترتیب در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در سال‌های ۱۳۷۲ در دانشگاه شریف، ۱۳۷۵ در دانشگاه علم و صنعت و ۱۳۸۰ در دانشگاه امیرکبیر در زمینه سیستم‌های قدرت به اتمام رسانید و به مدت یکسال در دانشگاه موناش استرالیا به صورت فرصت مطالعاتی در زمینه حفاظت و انرژی‌های نو به تحقیق پرداخت. از سال ۱۳۸۱ به دانشگاه زنجان و سپس از سال ۱۳۸۵ به دانشگاه شهید بهشتی پیوست و به عنوان مشاور و محقق در مرکز فشار قوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت برای مدت بیش از ۱۰ سال مشغول به کار است. زمینه فعالیت ایشان آزمایشگاه‌های فشار قوی و اتصال کوتاه، حفاظت سیستم‌های قدرت و انرژی‌های نو می‌باشد.

**حمیدرضا صادق محمدی** متولد ۱۳۳۸ در تهران بوده و تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق با گرایش مخابرات و کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۶۶ از دانشگاه علم و صنعت ایران و در مقطع دکتری در رشته مهندسی برق با گرایش مخابرات را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه نیو ساوت ولز استرالیا پایان رساند. وی در سال ۱۳۶۰ به جهاد دانشگاهی پیوست و تاکنون مسئولیت‌های مختلفی را در این جهاد بر عهده داشته است و در حال حاضر به عنوان عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار پژوهش و معاون پژوهشی - آموزشی پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی به فعالیت اشتغال دارد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال، پردازش صحبت، شناسایی گوینده و الگوریتم‌های بهینه‌سازی. از دکتر صادق محمدی تاکنون بیش از ۷۰ مقاله در مجلات و همایش‌های معتبر داخلی و خارجی انتشار یافته است. ایشان از بدو تأسیس نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران از انتشارات پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی در سال ۱۳۸۲، مسئولیت سردبیری این نشریه را عهده‌دار بوده است.

- [8] Z. Zhou, M. Liao, and X. Fan, "Design of a control device for synthetic making test based on pre-arcing current detection and phase control," *Journal of Electromagnetic Analysis & Applications*, vol. 1, no. 4, Article ID, Dec. 2009.
- [9] M. Liao, X. Cheng, X. Duan, and J. Zou, "Study on dynamic arc model for high voltage hybrid circuit breaker using vacuum interrupter and SF6 interrupter in series," in *Proc. 24th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV'10*, pp. 174-178, Braunschweig, Germany, 30 Aug.-3 Sept. 2010.
- [10] X. Yao, et al., "Development and type test of a single-break 126-kV/40-kA-2500-A vacuum circuit breaker," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31, no. 1, pp. 182-190, Feb. 2016.
- [11] R. P. P. Smeets, V. Kertesz, D. Dufournet, D. Penache, and M. Schlaug, "Interaction of a vacuum arc with an SF6 arc in a hybrid circuit breaker during high-current interruption," *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 35, no. 4, pp. 933-938, Aug. 2007.
- [12] IEC62271, High-voltage switchgear and controlgear -Part 101: Synthetic Testing, 2012.
- [13] A. Karimi, K. Niayesh, and M. A. Bahmani, "An accurate evaluation method of the thermal interruption limit of power circuit breakers," in *Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition*, 4 pp., Chicago, IL, USA, 21-24 Apr. 2008.
- [14] B. Kim, S. Kim, K. Ahn, and Y. Kim, "A study on electrical lifespan of VI by means of calculation of arc energy during arcing time in synthetic tests," in *Proc. 3rd In. Conf. on Electric Power Equipment-Switching Technology, ICEPE-ST'15*, pp. 81-84, Busan, South Korea, 25-28 Oct. 2015.
- [15] N. Nikpour and K. Niayesh, "An innovative simple test circuit for single-phase short circuit making test of high-voltage switching devices," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 7, no. 2, pp. 23-25, Fall/Winter 2010.
- [16] L. van der Sluis, *Transients in Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [17] ABB: Distribution Solutions: VM1 Medium Voltage Vacuum Circuit Breakers with Magnetic Drive, 12...24 kV - 630...4000 A - 16...50 kA, [https://library.e.abb.com/public/bf168419d98544ac873fcb9077e4f387/Cat\\_VM1\(EN\)M\\_IVCP000157.pdf](https://library.e.abb.com/public/bf168419d98544ac873fcb9077e4f387/Cat_VM1(EN)M_IVCP000157.pdf).
- [18] P. H. Schavemaker and L. Van der Sluis, "The arc model blockset," in *Proc. of the 2nd IASTED Int. Conf. Power and Energy Systems, EuroPES'02*, pp. 644-648, Crete, Greece, 22-25 Jun. 2002.
- [19] L. Van der Sluis and W. R. Rutgers, "The comparison of test circuits with arc models," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 1, pp. 280-285, Jan. 1995.

[۲۰] ع. ر. امیدخدا، تأمین انرژی قوس الکتریکی در تست قطع کلیدهای فشارمتوسط SF6 در مدار تست سینتتیک توسط حلقه جداگانه، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، شهریور ۱۳۹۶.

- [21] M. B. J. Leusenkamp, "Vacuum interrupter model based on breaking tests," *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 27, no. 4, pp. 969-976, Aug. 1999.
- [22] <http://electrical-engineering-portal.com/comparison-between-vacuum-and-sf6-circuit-breaker>.
- [23] J. G. Jamnani and S. A. Kaniatkar, "Design and simulation of 2-parameters TRV synthetic testing circuit for medium voltage circuit breakers," in *Proc. Int. Conf. on Electrical and Computer Engineering*, 4 pp., Dhaka, Bangladesh, 19-21 Dec. 2006.

**علی‌رضا امیدخدا** متولد ۱۳۶۲ در تهران بوده و در سال ۱۳۸۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید عباسپور و در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید بهشتی دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۸۷ با مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت در حال همکاری است. زمینه‌های علمی و تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل موضوعات مربوط به مهندسی فشارقوی از جمله برقگیرها، کلیدهای قدرت و آزمونهای اتصال کوتاه می‌باشد.