

## بررسی اثر مقاومت وصل بر روی امواج گذرای سریع ناشی از کلیدزنی در پست‌های فشارقوی با عایق گازی (GIS)

سعید سلمانی<sup>1</sup>، احمد غلامی<sup>2</sup> و سعید شهابی<sup>3</sup>

<sup>1</sup>دانشگاه علم و صنعت ایران، saeed.salmani.iust@gmail.com

<sup>2</sup>دانشگاه علم و صنعت ایران، Gholami@iust.ac.ir

<sup>3</sup>دانشگاه علم و صنعت ایران، shahabi\_saeed@iust.ac.ir

پست‌های گازی (GIS)، قوس الکتریکی (Restrike)، جریان گذرای سریع (VFTC)، اضافه‌ولتاژ گذرای سریع (VFTO)

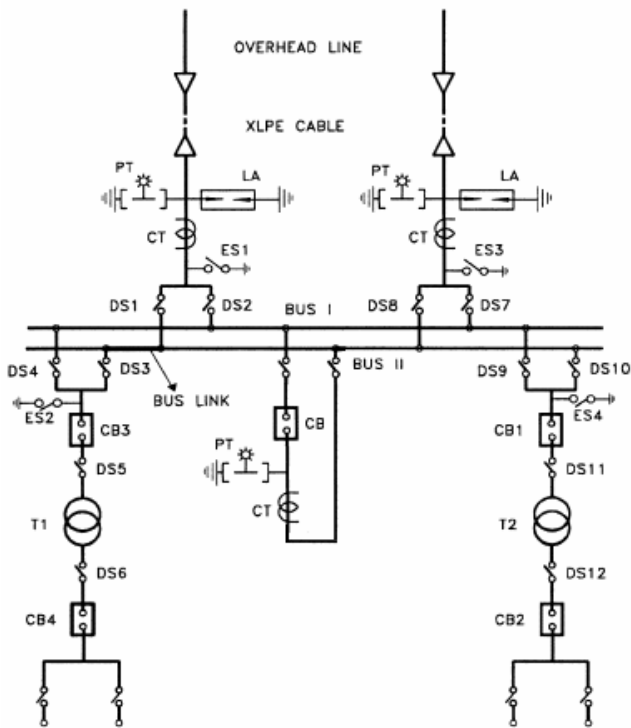
گازی با ولتاژ نامی 230 کیلوولت مورد بررسی قرار گرفته است.

### 1- مقدمه

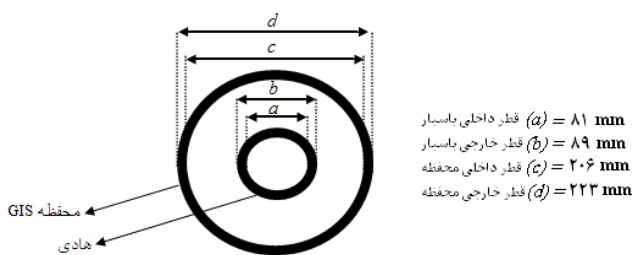
پست‌های گازی (GIS) در شبکه‌های انتقال و فوق توزیع به علت مصونیت از آلودگی، قابلیت اطمینان بالا، سهولت در توسعه پست و اشغال کم فضا به شدت مورد توجه بوده و رواج و گسترش فراوان یافته اند. با وجود این مزایا، پست‌های گازی دارای مشکلات اساسی هستند که ناشی از حالت‌های گذرای سریع (VFT) در اثر کلیدزنی می‌باشند. مقدار اضافه-ولتاژهای گذرای سریع (VFTOs) همراه با جریان‌های گذرای سریع (VFTCs) بستگی به مکان کلیدزنی، ولتاژ نامی پست و چیدمان تجهیزات پست دارد. این امواج گذرا به علت بازتاب در اتصالات مختلف، امپدانس موجی کم و کاهش طول هادی‌های پست‌های گازی نسبت به پست‌های معمولی تا چند

چکیده: امواج گذرای ناشی از قطع و وصل کلید در پست‌های گازی (GIS) دارای زمان پیشانی در حد چند نانو ثانیه می‌باشند. این امواج در طول هادی‌های فاز منتشر شده و باعث وقوع تنش در عایق‌ها و تجهیزات الکتریکی مانند ترانسفورماتورها می‌شوند. همچنین این امواج باعث ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی گذرای سریع شده بطوریکه این میدان‌ها از طریق منفذهای موجود بین محفظه‌های GIS به محیط بیرون نفوذ کرده و بر روی تجهیزات الکترونیکی و کابل‌های کنترل تاثیر می‌گذارند. طیف فرکانسی این اضافه-ولتاژها و اضافه‌جریان‌های گذرای سریع به چند صد مگاهرتز می‌رسد و دامنه آنها با توجه به نحوه چیدمان تجهیزات ممکن است به 5 پریونیت نیز برسد. در این مقاله، ابتدا به بررسی جریان‌های گذرا و اضافه‌ولتاژهای گذرای سریع ناشی از کلیدزنی پرداخته شده و سپس اثر مقاومت وصل در لحظه کلیدزنی جهت کاهش دامنه امواج گذرای سریع در یک پست

ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ (CVT) و جریان (CT)، برقیگر (SA)، کلید زمین‌کننده (ES)، سکیونر (DS)، بریکر (CB)، ترانسفورماتور قدرت (T) و دیگر تجهیزات مورد نیاز می‌باشد. با فرض اینکه هر فاز بطور جداگانه در یک محفظه استوانه‌ای پر شده از گاز SF6 قرار داشته باشد، ابعاد مربوط به محفظه و هادی داخل آن (لوله باسبار) در شکل 2 درج شده است [3].



شکل 1: دیاگرام تک‌خطی پست گازی 230 کیلوولت نمونه



شکل 2: ابعاد باسبار در محفظه پر شده از گاز SF6

جهت محاسبه جریان‌های گذرا، تعیین مدار معادل تجهیزات و مسیر ایجاد جرقه بین کنتاکت‌های بریکر ضروری می‌باشد. برای مدل کردن تجهیزات پست گازی می‌توان از عناصر مجتمع و همچنین پارامترهای خط‌های توزیع شده که به وسیله امیدانس موجی، سرعت موج و طول تعریف می‌شود استفاده کرد. برای بدست آوردن پارامترهای هادی لوله‌ای پست‌های گازی از روابط زیر استفاده می‌شود [1]. در این روابط

برابر افزایش می‌یابند. بنابراین توجه به امواج گذرا در پست‌های گازی نسبت به پست‌های معمولی از اهمیت بیشتری برخوردار است. باز و بسته نمودن کلیدها یا سکیونرها در داخل محفظه بسته با بروز قوس الکتریکی (Restrike) و اضافه‌ولتاژهای موجی از نوع اضافه‌ولتاژهای قطع و وصل همراه می‌باشد. در پی بروز قوس الکتریکی در فاصله بین کنتاکت‌های کلید، ولتاژهای موجی در طول هادی‌ها و شین‌های متصل به ترمینال‌های دوطرف کلید منتشر شده و با انتشار و انعکاس در طول هادی‌های فاز تقویت می‌شوند. به علت خاصیت خازنی قابل ملاحظه هادی‌ها، قوس الکتریکی تا فاصله زمانی 2 سیکل معادل 40 میلی‌ثانیه برقرار می‌باشد [1].

فرکانس این امواج در محدوده چند مگاهرتز تا چندصد مگاهرتز می‌باشد. زمان پیشانی جریان‌های گذرای سریع در پست‌های گازی، 4 تا 7 نانوثانیه بوده و دامنه آنها به چندین کیلوآمپر می‌رسد. میدان‌های الکترومغناطیسی گذرا ناشی از جریان‌های گذرای سریع ممکن است به محیط بیرون نفوذ کرده و بر روی مدارهای کنترل و حفاظت اثر گذاشته و باعث القاء جریان و ولتاژ در شیلد کابل و هادی آن شده و در نتیجه باعث عملکرد نامناسب یا تخریب تجهیزات حفاظتی و اندازه‌گیری شود. بررسی‌های انجام شده توسط کارگروه سیگره بر روی 73024 کلید در یک سال نشان داده است که 16% از مشکلات گزارش شده ناشی از عملکرد نادرست مدارهای کنترل در اثر قطع و وصل کلیدها یا سکیونرها بوده است [2]. بنابراین در این مقاله، جهت کاهش دامنه امواج گذرای ناشی از کلیدزنی از مقاومت وصل موازی با کلید استفاده شده است و اثرات ناشی از وصل مقاومت در زمان کلیدزنی در یک پست گازی 230 کیلوولت مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت انجام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار ATP/EMTP استفاده شده است.

## 2- نحوه مدل‌سازی تجهیزات

شکل 1 دیاگرام تک‌خطی پست گازی 230 کیلوولت را نشان می‌دهد. این دیاگرام تک‌خطی ترکیبی از خط انتقال هوایی، کابل XLPE 230 کیلوولت بطول تقریبی 3/75 متر،

نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی آلومینیوم معادل یک در نظر گرفته شده است.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln d/a} = 5.48 \times 10^{-11} F/m \quad (1)$$

$$L = \frac{\mu \ln d/a}{2\pi} = 2.025 \times 10^{-7} H/m \quad (2)$$

$$Z_s = \sqrt{L/C} \approx 60\Omega \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 300 \times 10^8 m/s \quad (4)$$

در این روابط، C و L بترتیب ظرفیت خازنی و اندوکتانس هادی حامل جریان بر واحد طول، a قطر داخلی هادی، d قطر خارجی محفظه گازی، Z<sub>s</sub> امپدانس موجی هادی و v سرعت عبور موج می‌باشند.

چون فرکانس موج گذرا بسیار بالا می‌باشد، ترانسفورماتور قدرت و اندازه گیری در این فرکانس ها خاصیت خازنی آنها غالب بوده و با یک خازن مدل می‌شوند. رنج این کاپاسیتانس بسته به نوع طراحی از 2 تا 10 نانوفاراد برای ترانسفورماتورهای قدرت تغییر می‌کند. مدار معادل گذرای تجهیزات مختلف GIS در جدول (1) ارائه شده است [4].

جدول (1) - مدار معادل گذرای الکتریکی تجهیزات GIS [1] و [4]

سکسیونر ارت/زمین (ES)		15 pF نسبت به زمین
سکسیونر (DS)	بسته	30 pF نسبت به زمین و امپدانس موجی 70 اهم
	باز	30 pF بین کنتاکتها
ترانسفورماتور اندازه گیری جریان (CT)		50 pF نسبت به زمین و امپدانس موجی 70 اهم
ترانسفورماتور اندازه گیری ولتاژ (CVT)		100 pF نسبت به زمین
برقگیر (SA)		200 pF نسبت به زمین
کلید (CB)	بسته	30 pF نسبت به زمین و امپدانس موجی 46 اهم
	باز	50 pF بین کنتاکتها
ترانسفورماتور قدرت (T1)		2 nF نسبت به زمین
کابل		امپدانس موجی 30 اهم و سرعت موج 150m/μs

در زمان کلیدزنی، کابل XLPE سمت منبع و ترانسفورماتور قدرت سمت بار می‌باشد. بدترین شرایط حین کلیدزنی مربوط به زمانی است که مقدار ولتاژ باقیمانده 2 پروینیت باشد (1 پروینیت سمت منبع و 1- پروینیت سمت بار) که در شبیه سازیها نیز همین مقدار لحاظ شده است. جهت شبیه سازی شکست عایقی گاز SF6 بین کنتاکت های کلید حین کلیدزنی از یک مقاومت متغیر با زمان بطور سری با یک اندوکتانس ثابت 5nH استفاده شده است. برای شبیه سازی مقاومت متغیر با زمان جهت نشان دادن مقاومت مسیر جرعه از قانون جرعه توپلر (Toepler's Spark Law) استفاده شده است. طبق قانون توپلر، مقاومت مسیر جرعه R(t) در لحظه t به میزان بار جابجا شده یا  $\int idt$  در مسیر جرعه بستگی دارد [1]. لذا:

$$R(t) = \frac{k.l}{q_0 + \int_0^{ts} i(t).dt} \quad (5)$$

که در آن k ثابت توپلر برحسب V-sec/m، l طول مسیر جرعه برحسب متر، q<sub>0</sub> شارژ اولیه و ts فاصله زمانی بروز جرعه قوس برحسب ثانیه می‌باشد. ضریب k برای گاز SF6 در فشار 1 تا 20 بار، به شرح زیر می‌باشد:

$$k = (0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-2} VS/m$$

با توجه به اینکه فشار گاز SF6 در محفظه بسته حدود 6 بار می‌باشد بنابراین مقدار ضریب k برابر با 0/005 VS/m در نظر گرفته شده است [5].

### 3- بررسی امواج گذرای سریع در پست گازی مورد مطالعه

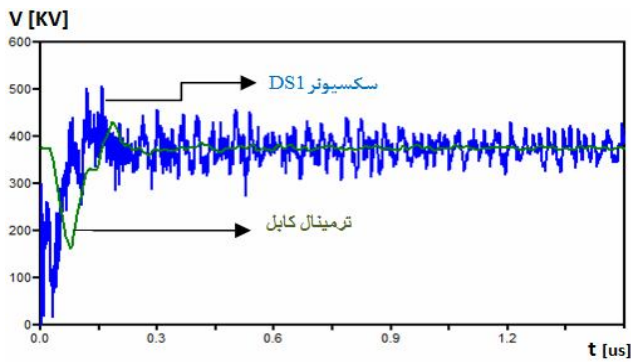
جهت بررسی جریانها و اضافه ولتاژهای گذرای سریع ناشی از کلیدزنی در پست گازی 230 کیلوولت مورد مطالعه چهار حالت زیر در نظر گرفته شده است:

الف- وصل کلید CB3 هنگامیکه سکسیونرها وصل هستند.

ب- وصل سکسیونر DS1 سمت منبع هنگامیکه سکسیونر DS3 و بریکر CB3 قطع می‌باشد.

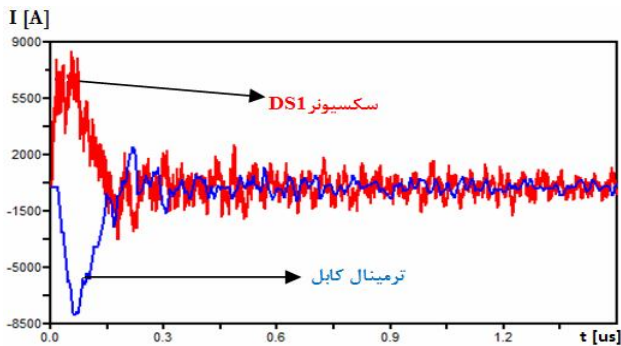
ج- وصل سکسیونر DS3 سمت بار هنگامیکه بقیه

اضافه ولتاژها در سکسیونر بیشتر از سایر نقاط است.



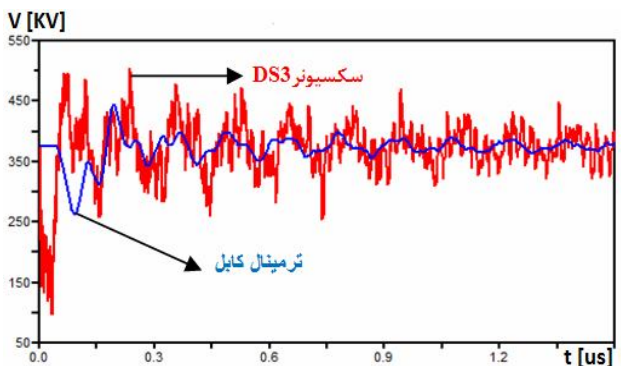
شکل 5: شکل موج VFTO در نزدیکی سکسیونر و ترمینال کابل ناشی از کلیدزنی حالت (ب)

شکل موج گذرای جریان‌ها نیز در شکل 6 ارائه شده است و نشان از بیشتر بودن دامنه جریان در نزدیکی سکسیونر DS1 نسبت به ترمینال کابل دارد.



شکل 6: شکل موج های VFTC در نزدیکی سکسیونر DS1 و ترمینال کابل ناشی از کلیدزنی حالت (ب)

برای کلیدزنی حالت (ج)، شکل موج ولتاژها و جریان‌های گذرا برترتیب در شکل های 7 و 8 نشان داده شده‌اند.



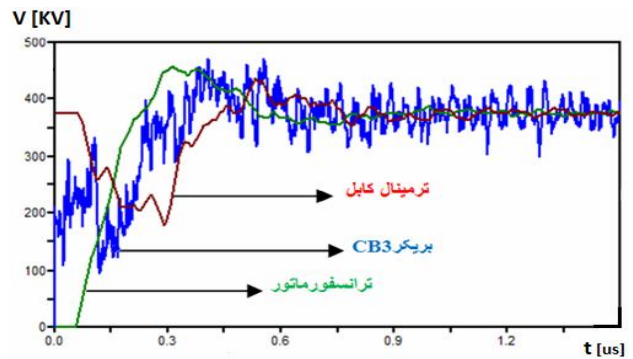
شکل 7: شکل موج های VFTO در نزدیکی سکسیونر DS3 و ترمینال کابل ناشی از کلیدزنی حالت (ج)

سکسیونرها وصل هستند اما بریکر CB3 قطع می باشند.

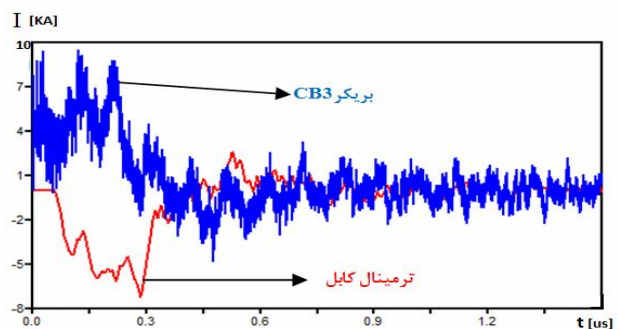
د- قطع سکسیونر DS3 هنگامیکه سایر سکسیونرها وصل اما بریکر CB3 قطع می باشد.

در تمامی حالت های فوق فرض شده است که یکی از ترانسفورماتورها بی برق و سکسیونر DS6 باز است.

شکل 3 و 4 برترتیب مربوط به شکل موج های گذرای ولتاژ و جریان برای حالت کلیدزنی (الف) می باشند. با توجه به آن، دامنه VFTO در بریکر به 470/9 کیلوولت، در ترانسفورماتور قدرت 455/92 کیلوولت و در ترمینال کابل به 435/8 می رسد. همچنین شکل موج ولتاژ گذرای ترانسفورماتور، نرخ صعود کمتری نسبت به شکل موج ولتاژ گذرا در محل بریکر دارد و نیز صاف تر از آن می باشد.



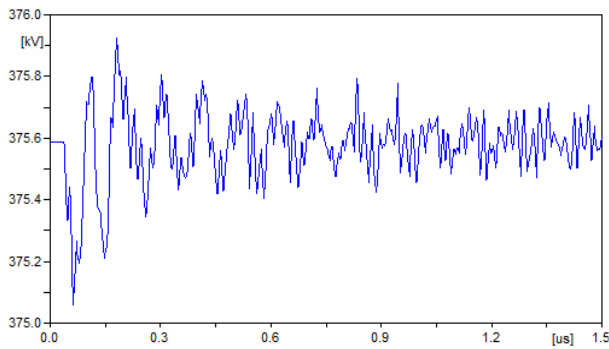
شکل 3: شکل موج VFTO در محل بریکر CB3، ترمینال کابل و ترانسفورماتور ناشی از کلیدزنی حالت (الف)



شکل 4: شکل موج VFTC در محل بریکر CB3 و ترمینال کابل ناشی از کلیدزنی حالت (الف)

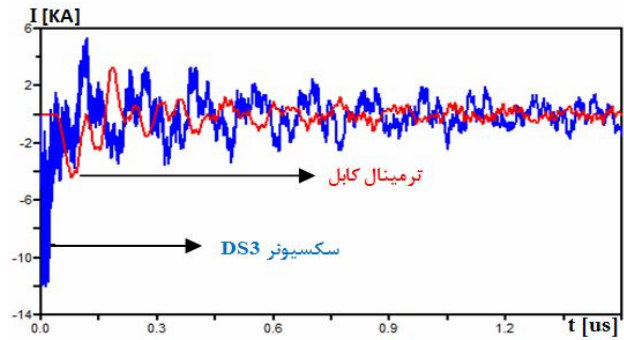
همانطور که در شکل 4 مشاهده می شود، دامنه این جریان‌ها در محل بریکر 9533 آمپر و در ترمینال کابل 7194 آمپر می باشد. همچنین جریان کابل صاف تر از جریان بریکر است.

در حالت (ب) اضافه ولتاژهای گذرا در دو نقطه مهم به صورت شکل 5 می باشند. همانطور که انتظار می رفت دامنه



شکل 9: شکل موج ولتاژ گذرا در ترمینال کابل حین قطع سکسیونر DS3

با توجه به نتایج جدول 2 در تمامی حالت های کلیدزنی، ماکزیمم دامنه VFTO و VFTC در نزدیکی کلید مربوطه رخ می دهد و با فاصله گرفتن از آن کاهش می یابد. همچنین این شکل موجها به سرعت تضعیف می شوند و در مدت زمانی کمتر از میکروثانیه به صفر می رسند. در واقع دامنه و باند گذر فرکانسی امواج گذرا تابعی از حالت کلید زنی و محل آن است، پس برای محدود سازی این امواج، فرکانس غالب و دامنه آن حتماً باید لحاظ شود. همچنین از مقایسه حالت (ج) و (د) درمی یابیم که اضافه ولتاژها در اکثر المانهای پست در حالت قطع اندکی متفاوت از حالت وصل می باشد، اما دامنه VFTC تغییر چندانی نمی کند.



شکل 8: شکل موج های جریان گذرا (VFTC) در نزدیکی سکسیونر DS3 و ترمینال کابل ناشی از کلیدزنی حالت (ج)

همانطور که در شکل های بالا برای حالت (ج) مشاهده می شود به علت فاصله بیشتر DS3 از کابل نسبت به DS1، کاهش بیشتری در دامنه ولتاژ و جریان گذرای ترمینال کابل در مقایسه با سکسیونر به چشم می آید. برای کلیدزنی حالت (د) سکسیونر DS3 را قطع می نمایم. در این حالت دامنه جریان گذرای سریع (VFTC) فقط در سکسیونر DS3 زیاد است و به حدود 5/3 کیلوآمپر در لحظه قطع می رسد. شکل موج گذرای ولتاژ (VFTO) مربوط به ترمینال کابل در شکل 9 نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر این حالت ها مقادیر پیک دامنه های VFTO و VFTC در حالت های کلیدزنی فوق در تجهیزات مختلف پست در جدول 2 ارائه شده اند.

جدول 2: پیک ولتاژ و جریان گذرا برای چهار حالت کلیدزنی در مکان های مختلف پست گازی 230 کیلوولت

کلیدزنی حالت (د)		کلید زنی حالت (ج)		کلیدزنی حالت (ب)		کلید زنی حالت (الف)		محل مورد بررسی	ردیف
VFTO [kV]	VFTC [A]	VFTO [kV]	VFTC [A]	VFTO [kV]	VFTC [A]	VFTO [kV]	VFTC [A]		
--	--	526/3	--	--	--	470/9	9533	بریکر CB3	1
--	--	--	--	--	--	514	11560	در فاصله 1/2 متری از بریکر CB3	2
441/5	4548	445/5	4548	430	8016	435/8	7194	ترمینال کابل	3
559/8	7749	495/3	7749	491/3	4766	482/8	8075	شین متصل کننده DS3 به DS1	4
495/7	4745	455/7	4745	490/5	8925	488	7268	ترانسفورماتور جریان	5
--	--	--	--	--	--	455/9	7124	ترانسفورماتور قدرت	6
498/3	4320	478/7	4320	507/3	8284	483/8	6924	سکسیونر DS1	7
551/1	8065	551/1	8064	507/8	13900	505/2	7235	سکسیونر DS3	8
--	--	--	--	--	--	489/7	9787	سکسیونر DS5	9

جدول 3: دامنه VFOT و VFTC مربوط به چند تجهیز GIS به ازای مقادیر مختلف مقاومت وصل در سکسیونر DS3

دامنه VFTC		دامنه VFOT			مقدار مقاومت (اهم)
DS3 (A)	CT (A)	Bus Link (p.u.)	ترمینال کابل (p.u.)	DS3 (p.u.)	
6910	4745	2/6377	2/3722	2/9346	R=0
5670	4291	2/3786	2/2711	2/532	R=10
4801	3924	2/2982	2/1949	2/409	R=20
4100	3350	2/278	2/0884	2/2892	R=40
3619	2924	2/2389	2/032	2/2364	R=60
3230	2594	2/2037	2/0101	2/2056	R=80
2912	2331	2/1779	2/008	2/1931	R=100
1939	1547	2/1773	2/002	2/1342	R=200
967	773	2/0447	2	2/0597	R=500

جدول 4: دامنه VFOT و VFTC مربوط به چند تجهیز GIS به ازای مقادیر مختلف مقاومت وصل در سکسیونر DS1

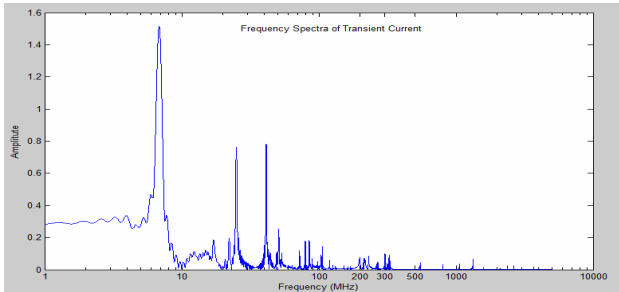
دامنه VFTC		دامنه VFOT			مقدار مقاومت (اهم)
DS3 (A)	CT (A)	Bus Link (p.u.)	ترمینال کابل (p.u.)	DS3 (p.u.)	
8295	8675	2/7052	2/3114	2/6083	R=0
7356	7563	2/459	2/1651	2/4443	R=10
6628	6713	2/3	2/069	2/3043	R=20
5452	5563	2/1901	2/0224	2/1369	R=40
4618	4774	2/1183	2/0145	2/0991	R=60
4006	4178	2/086	2/0103	2/0711	R=80
3540	3711	2/0855	2/0063	2/0478	R=100
2231	2375	2/048	2/0024	2/0383	R=200
1057	1153	2/0229	2/0004	2/0366	R=500

نصب شده در سکسیونرها دامنه‌های VFOT و VFTC کاهش می‌یابند. اما نکته جالب آن است که هرچند افزایش مقاومت تا حدود 100 اهم، دامنه امواج گذرا را به خوبی کاهش می‌دهد، اما به ازای مقادیر بزرگتر، کاهش چشم گیری در دامنه VFOT مشاهده نخواهد شد. با توجه به جداول 3 و 4 مشاهده می‌شود که با کاهش مقاومت وصل، مقدار اضافه‌ولتاژها افزایش یافته است. با افزایش مقاومت، مقدار انرژی جذب شده آن افزایش یافته و در نتیجه تلفات ناشی از آن نیز بیشتر شده که می‌تواند منجر به آسیب دیدن تجهیز شود. همچنین مقاومت های بزرگتر باید بتوانند اضافه ولتاژهای شدیدتری را تحمل کنند. از آنجایی که تکنولوژی

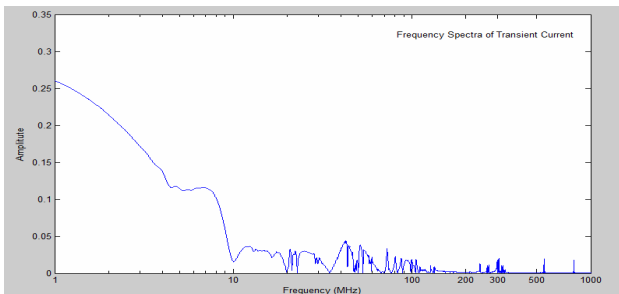
#### 4- تاثیر مقاومت وصل موازی با سکسیونر بر کاهش دامنه امواج گذرا

همانگونه که در بخش قبلی مشاهده شد اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در GIS مورد مطالعه، بسته به مکان و المان کلیدزنی حتی به 3 پریونیت نیز می‌رسد. برای بررسی تاثیر مقاومت وصل در کلیدزنی پست GIS مورد مطالعه، اضافه ولتاژها و اضافه جریان‌های گذرای ناشی از کلیدزنی DS3 و DS1 برای حالت کلیدزنی (ج) به ازای مقادیر مختلف مقاومت در جدول های 3 و 4 ارائه شده است. از اطلاعات مربوط به این جداول می‌توان دریافت که با افزایش مقاومت

است. با مقایسه مشخصه‌های فرکانسی، نتیجه می‌شود که بکارگیری مقاومت موازی با سکسیونر علاوه بر کاهش دامنه VFTC، باند فرکانسی گذر آن را نیز محدود کرده و مولفه‌های با دامنه بزرگ در فرکانس‌های بسیار بالا را از بین می‌برد.

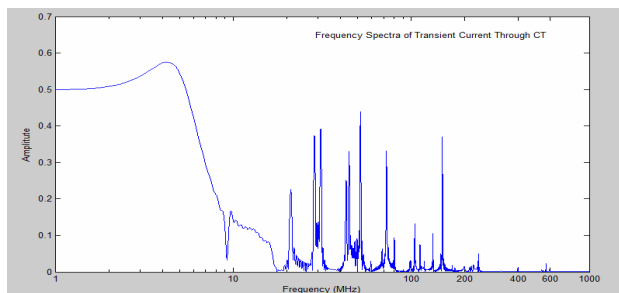


الف) بدون مقاومت وصل

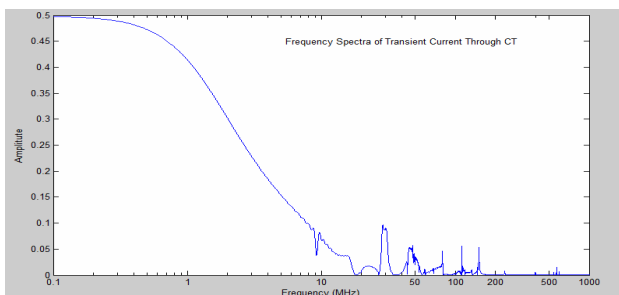


ب) با مقاومت وصل

شکل 11: مشخصه فرکانسی VFTC در سکسیونر DS3 در حالت بدون وجود مقاومت وصل (الف) و با مقاومت وصل 100 اهمی (ب)



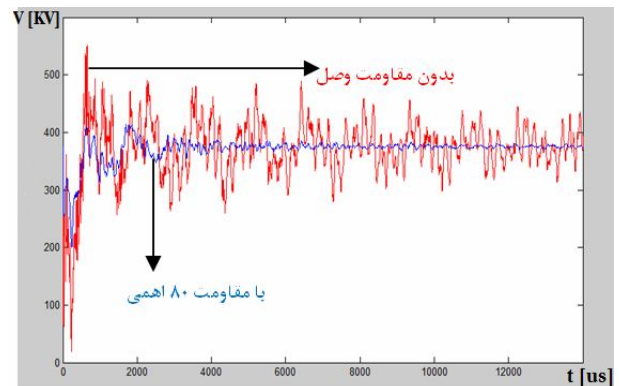
الف) بدون مقاومت وصل



ب) با مقاومت وصل

شکل 12: مشخصه فرکانسی VFTC مربوط به CT هنگام وصل سکسیونر DS1 در حالت بدون وجود مقاومت وصل (الف) و با مقاومت وصل 80 اهمی (ب)

ساخت این مقاومت‌ها بسیار پیچیده است، استفاده از مقاومت‌های بسیار بزرگ به منظور کاهش دامنه VFTO و VFTC روش مناسب و مقرون به صرفه ای نیست. بنابراین بدست آوردن یک مقاومت وصل بهینه جهت نصب در سکسیونرها توصیه می‌شود. در نتیجه دامنه VFTO در سکسیونر DS3 با لحاظ کردن مقاومت 100 اهمی از 2/93 پریونیت به 2/19 پریونیت کاهش می‌یابد و دامنه VFTC در CT به ازای کلید زنی این سکسیونر از 4745 آمپر به 2331 آمپر می‌رسد. همچنین با نصب مقاومت 80 اهمی در سکسیونر DS1 دامنه VFTO در اثر کلیدزنی این سکسیونر از 2/6083 به 2/0711 کاهش می‌یابد و مقدار پیک VFTC در CT ناشی از وصل این سکسیونر از 8675 آمپر به 4178 آمپر می‌رسد. در شکل 10 دامنه اضافه ولتاژ گذرای سکسیونر DS3 با بکارگیری مقاومت 80 اهمی شدیداً میرا شده است.



شکل 10: شکل موج VFTO در حین کلیدزنی سکسیونر DS3 به ازای وجود مقاومت وصل 80 اهم و عدم حضور آن

مشاهده می‌شود که با به کارگیری مقاومت موازی با سکسیونر دامنه VFTO و VFTC تا حد مطلوبی کاسته شده و این به معنی بهبود ایزولاسیون و ایمنی در ترانسفورماتورهای قدرت و جریان و کلیدها و سایر المان‌های حساس GIS می‌باشد.

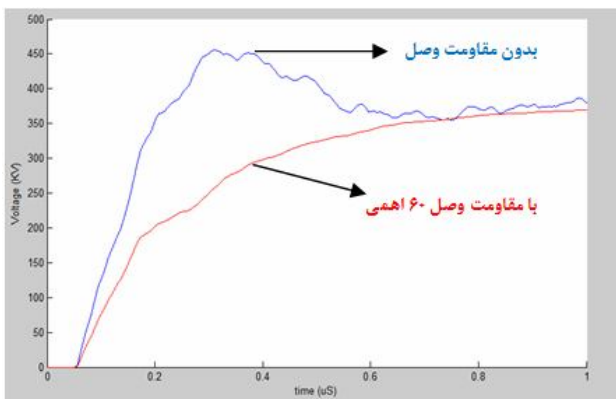
## 5- تاثیر مقاومت وصل موازی با سکسیونر بر مشخصه فرکانسی VFTC

جهت بررسی تاثیر مقاومت وصل بر طیف فرکانسی جریان گذرای سریع (VFTC)، مقدار دامنه آن برحسب پریونیت تا فرکانس 1000 مگاهرتز در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده

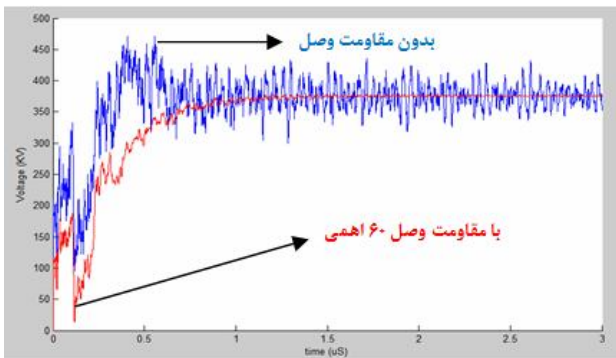


## 6- تاثیر مقاومت وصل موازی با کلید بر امواج گذرا

مشکلات نگهداری و حفاظت دربردارد، زیرا مقاومت بزرگتر انرژی بیشتری تولید می‌کند و ممکن است موجب ذوب شدن و از بین رفتن آن شود. در نتیجه برای بریکر CB3 در پست GIS مورد نظر مقاومت وصلی در حدود 60 اهم برای کاهش دامنه VFTO و بهبود شرایط حفاظتی المان‌های پست توصیه می‌شود. شکل‌های 13 و 14 تفاوت موج‌های VFTO در حالت به کارگیری مقاومت وصل 60 اهمی و بدون استفاده از آن در بریکر CB3 و ترانسفورماتور قدرت را به خوبی نشان می‌دهند.



شکل 13: شکل موج VFTO در ترانسفورماتور قدرت به ازای مقاومت وصل 60 اهمی و بدون استفاده از مقاومت وصل



شکل 14: شکل موج VFTO در CB3 به ازای مقاومت وصل 60 اهمی و بدون استفاده از مقاومت وصل

در تصاویر مذکور مشاهده می‌شود که علاوه بر کاهش شدید دامنه VFTO ریپل‌های آن نیز کمتر شده است. اکنون مشخصه فرکانسی VFTC در ترانسفورماتور جریان در حالت استفاده از مقاومت وصل 60 اهمی با حالت بدون مقاومت وصل مقایسه و تفاوت‌ها بررسی می‌شوند.

کلیدزنی در بریکر با سکسیونر کمی متفاوت می‌باشد، زیرا دامنه اضافه‌ولتاژها و اضافه‌جریان‌ها بستگی به لحظه قطع دارد. چنانچه لحظه قطع بریکر با لحظه پیک جریان عبوری یکی شود، دامنه اضافه‌ولتاژها بسیار شدیدتر از هنگامی خواهد بود که جریان در صفر سینوسی است. در نتیجه دامنه VFTO در بریکر به هنگام عملیات قطع و وصل متفاوت خواهد بود و در نتیجه به مقاومت‌های متفاوتی در هنگام قطع و وصل بریکر نیاز می‌باشد [6]. در هنگام وصل بریکر در پست گازی مورد مطالعه دامنه VFTO به 470 کیلوولت می‌رسد. دامنه VFTO و VFTC در برخی المان‌ها، با اعمال مقاومت‌های وصل متفاوت در بریکر CB3 در جدول 5 ارائه شده است. جدول 5: دامنه VFTO و VFTC در چند المان GIS به ازای وصل بریکر

CB3 با مقاومت‌های وصل مختلف

VFTC		VFTO		مقاومت وصل
CT (A)	CB3 (A)	TR (p.u.)	CB3 (p.u.)	
7268	11559	2/4281	2/5079	R=0
6132	9226	2/1904	2/3366	R=10
5308	8172	2/0593	2/2029	R=20
4193	6713	2/0005	2/0668	R=40
3555	5705	2	2/0151	R=60
3166	4960	1/9979	2/0048	R=80
2855	4388	1/9973	2/0021	R=100
1913	2791	1/9968	2/0016	R=200
962	1340	1/9963	2/0005	R=500

داده‌های این جدول می‌توان دریافت که با اعمال مقاومت 60 اهمی هنگام وصل کلید، دامنه VFTO در ترانسفورماتور قدرت از 2/4 پریونیت به 2 پریونیت کاهش می‌یابد. همچنین دامنه VFTC در ترانسفورماتور جریان از 7268 به 3555 آمپر می‌رسد، یعنی به کمتر از نصف خود تقلیل می‌یابد. با بزرگتر کردن مقدار مقاومت از 60 اهم هرچند دامنه حالت‌های گذرای سریع کاهش می‌یابد، اما این روند بسیار کند و قابل اغماض است و همچنین طبق توضیحات قبلی بزرگتر کردن مقاومت در دسرهایی نظیر افزایش هزینه، پیچیدگی ساختار و



کم بوده و دامنه آنها نیز به 5 پریونیت می‌رسد که حتی توسط برگیرها قابل کنترل نیستند. هرچه فاصله از محل کلیدزنی بیشتر باشد، دامنه و فرکانس این امواج نیز کمتر می‌شود. یکی از عوامل مؤثر بر افزایش دامنه و فرکانس این امواج، وقوع قوس الکتریکی مجدد می‌باشد. هرچه سرعت عملکرد کلیدزنی بیشتر باشد تعداد وقوع قوس الکتریکی کمتر می‌گردد و بالعکس. بنابراین مدل قوس الکتریکی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از روش‌های کاهش دامنه و فرکانس امواج گذرای سریع، استفاده از مقاومت وصل موازی با سیکسیونرها و بریکرها می‌باشد. هرچه مقدار این مقاومت بزرگتر باشد، انرژی جذب آن نیز بیشتر و اضافه‌ولتاژها کمتر می‌شود اما این مقاومت نمی‌تواند خیلی بزرگ باشد بنابراین باید یک مقدار بهینه برای آن در نظر گرفته شود. طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده برای پست گازی مورد مطالعه مقدار بهینه مقاومت وصل برای سکسیونر 80 اهم و برای کلید 60 اهم می‌باشد.

## مراجع

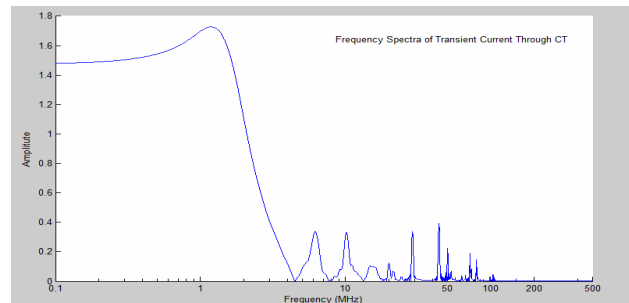
[1] سعید شهابی، احمد غلامی، "اثر میدان الکتریکی گذرای ناشی از قطع و وصل کلید بر کابل‌های کنترلی در پست‌های فشارقوی با ایزولاسیون گاز (GIS)", پنجمین کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، دانشگاه شهید بهشتی، 21 و 22 دی ماه 1389.

[2] M. M. Rao, M. J. Thomas, B. P. Singh, and P. Rajagopalan, "Computation And Measurement of Electromagnetic Interference Generated During Switching Events in a GIS," CIGRE, Paris, France, B3-202, 2004.

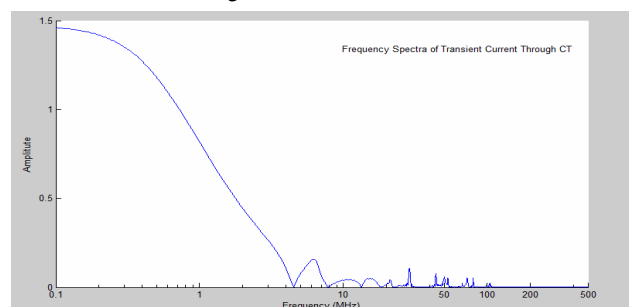
[3] J.A.Martinez, P.Chowdhuri, R.Iravani, A.Keri, D.Povh, "Modeling Guidelines For Very Fast Transients In Gas Insulated Substations," IEEE Working Group on Modeling and Analysis of System Transients, 2005.

[4] M. Mohana Rao, M. Joy Thomas, and B. P. Singh, "Frequency Characteristics of Very Fast Transient Currents in a 245-kV GIS," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 4, PP. 2450-2457, October 2005.

در شکل 15 مولفه‌های فرکانسی VFTC در ترانسفورماتور جریان تا حدود 100 مگاهرتز ادامه می‌یابند و در فرکانس‌های 6، 28، 10 و 43 مگاهرتز دامنه‌های قابل ملاحظه دارند. اما با به کارگیری مقاومت 60 اهمی موازی با بریکر، باند گذر فرکانسی مولفه های VFTC بسیار محدود شده و به جز یک مولفه قابل ملاحظه در فرکانس 6 مگاهرتز سایر مولفه های پس از 10 مگاهرتز به شدت میرا شده و قابل نظر هستند. در نتیجه به کمک مقاومت وصل موازی با بریکر در GIS مورد مطالعه دامنه VFTO و VFTC کاهش یافته و ریپل کمتری خواهند داشت. این امر در حفاظت ترانسفورماتور قدرت در برابر VFTO ناشی از کلیدزنی و نیز حفاظت CT در برابر VFTC بسیار موثر واقع می‌شود. همچنین باند گذر فرکانسی اضافه جریان‌های بسیار سریع کاهش یافته و دامنه مولفه‌های فرکانسی در فرکانس‌های بسیار بالا کاهش جدی یافته و قابل اغماض می‌باشند.



الف) بدون مقاومت وصل



ب) مجهز به مقاومت وصل 60 اهمی

شکل 15: مشخصه فرکانسی VFTC در ترانسفورماتور جریان، الف) هنگامیکه بریکر مجهز به مقاومت وصل نباشد و ب) هنگامیکه بریکر مجهز به مقاومت وصل 60 اهمی باشد

## 7- نتیجه‌گیری

امواج گذرای سریع ناشی از کلیدزنی دارای زمان صعود خیلی

[5] Santanu Singha and M.Joy Thomas, "Toepler's Spark Law in a GIS with Compressed SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixture," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 3, PP.498-505, June 2003.

[6] Rao, S. M., Wilton, D. R., Glisson, A. W., "Influence of Switching Conditions on Very Fast Transient Over-voltage in 500kV Gas Insulated Substations", IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2008), PP. 4451-4454, 2008.