

## تحلیل، مدلسازی و بررسی اضافه ولتاژهای داخلی در خطوط انتقال قدرت HVDC

سعید اسماعیلی جعفرآبادی  
کارشناسی ارشد

عباس شولائی  
استاد کامل

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق  
واژه‌های کلیدی: HVDC، خطوط انتقال قدرت، اضافه ولتاژهای داخلی، خطای آتش، خطای کموتاسیون

### چکیده

#### ۱- مقدمه

طراحی عایقی در خطوط انتقال قدرت HVDC و همچنین ایستگاههای مبدل آن بستگی زیادی به دامنه و شکل اضافه ولتاژهای داخلی سیستم دارد. این اضافه ولتاژها تا حدود زیادی با اضافه ولتاژهای شناخته شده سیستم‌های جریان متناوب متفاوت می‌باشند و می‌توان آنها را به سه دسته اصلی تقسیم بندی نمود [۱]:

۱- اضافه ولتاژ نوع کلید زنی

۲- اضافه ولتاژ نوع AC

۳- اضافه ولتاژ نوع DC

اضافه ولتاژ نوع کلیدزنی بر خلاف آنچه از نامش بر می‌آید، منشا متفاوتی نسبت به اضافه ولتاژهای کلید زنی در سیستم‌های AC داشته و در اثر خطای تک قطب به زمین در سیستم‌های دو قطبی HVDC و در قطب سالم روی می‌دهد. به واسطه اهمیت این نوع اضافه ولتاژ تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه، توسط افراد مختلف [۲-۶] و نویسندگان این مقاله [۷] صورت گرفته است.

اما بحث اصلی این مقاله روی دو نوع دیگر یعنی

در این مقاله اضافه ولتاژهای داخلی در خطوط انتقال قدرت جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC)، که بر اثر عملکرد متقابل مبدل‌های قدرت استاتیکی با خط انتقال و تجهیزات پایانه رخ می‌دهند، مورد بحث قرار گرفته است. این اضافه ولتاژها در واقع ناشی از خطای آتش، خطای کموتاسیون و هدایت ناخواسته والوهای تریستوری، بلوکه شدن مبدل‌های اینورتری و راه اندازی ناهماهنگ و کنترل نشده مبدل‌های یکسوکننده و اینورتر بوده و به دو نوع AC و DC تقسیم می‌شوند. برای بررسی این اضافه ولتاژها ابتدا حالت‌های مختلف خطا در هر حالت مورد مطالعه قرار گرفته و سپس با توجه به نوع عملکرد سیستم کنترلی مدار معادل ساده شده سیستم در حین خطا ارائه گردیده است. در ادامه با شبیه سازی یک سیستم نمونه HVDC با نرم افزار EMTDC/PSCAD، تاثیر پارامترهای مختلف روی دامنه و شکل اضافه ولتاژها و همچنین امکان بوجود آمدن تشدید در زمان وقوع شرایط مربوط به اضافه ولتاژ نوع AC مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات کلی آنها بدست آمده است.

هر دو نوع اضافه ولتاژ و با توجه به عملکردی که سیستم کنترل می‌تواند داشته باشد، مدار معادل ساده شده سیستم در حین خطا ارائه گردیده است. در ادامه با شبیه سازی یک سیستم دو قطبی کامل HVDC با سیستم کنترل مرسوم و تجهیزات پایانه، تاثیر پارامترهای مختلف، ایجاد شرایط تشدید و عملکرد سیستم کنترلی مورد بررسی قرار گرفته شده است. این امر با استفاده از امکانات نرم افزار PSCAD/EMTDC که یک برنامه تحلیل گذرای الکترومغناطیسی بوده و دارای مدل‌های مختلف ودقیق خط انتقال قدرت می‌باشد، میسر گردیده است.

## ۲- اضافه ولتاژهای نوع AC

این اضافه ولتاژ همانطور که اشاره شد بر اثر تزریق ولتاژ در اثر خطاهای مختلف در ایستگاه‌های مبدل رخ می‌دهد.

### ۲-۱- موارد خطا

ولتاژ متناوب شبکه AC در صورتی به خط انتقال DC تحمیل می‌گردد که ترتیب کموتاسیون در پل‌های تریستوری دچار اغتشاش گردد. یکی از عوامل این امر نقص متوالی یک یا چند والو در حین آتش شدن<sup>۲</sup> می‌باشد که ممکن است در اثر نقص مدار آتش رخ داده باشد و البته احتمال این نوع خطا بسیار کم است. عامل دیگری که باعث نقص کموتاسیون می‌شود و دارای احتمال بروز بیشتری نیز هست، ادامه هدایت ناخواسته<sup>۳</sup> والوها در عملکرد اینورتری و ناشی از کوچک بودن بیش از اندازه زاویه خاموشی می‌باشد. روشن شدن بی‌موقع<sup>۴</sup> در والوهای قوس جیوه‌ای نیز

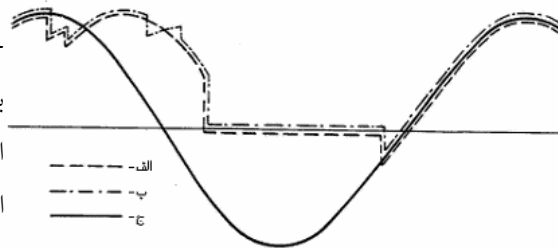
اضافه ولتاژهای نوع AC و DC می‌باشد. اضافه ولتاژ نوع AC در شرایطی رخ می‌دهد که بدلیل خطاهای مختلف در مبدل‌ها، ولتاژ سیستم متناوب مستقیماً به خط DC تزریق می‌گردد. این امر علاوه بر اینکه خود می‌تواند ولتاژ خط انتقال را از مقدار نامی آن فراتر ببرد ممکن است سبب تشدید خطوط HVDC (که معمولاً بلند می‌باشند) با راکتورهای هموارساز<sup>۱</sup> پایانه‌های مبدل را فراهم سازد. در چنین شرایطی اضافه ولتاژ بسیار بزرگی سیستم را تهدید می‌نماید. اضافه ولتاژ دیگر که به نوع DC موسوم است زمانی روی می‌دهد که راه اندازی اینورتر نسبت به یکسو کننده با تاخیر صورت گیرد. این امر سبب می‌شود انتهای خط انتقال از دید موج سیار ولتاژ بصورت باز دیده شده و منجر به وقوع اضافه ولتاژهای برگشتی با دامنه زیاد در خط انتقال شود. نکته بسیار مهمی که در ارتباط با این اضافه ولتاژ نسبت به اضافه ولتاژ نوع اول وجود دارد این است که نرخ تغییرات ولتاژ پایین بوده و تا حدود زیادی با عملکرد مطلوب سیستم کنترلی قابل مهار می‌باشند. در ارتباط با این نوع اضافه ولتاژها نیز مطالعات محدودی صورت گرفته [۸]، و در برخی موارد فقط به مقادیر این اضافه ولتاژها اشاره شده است [۹]. در این مراجع مقداری بین ۱/۵ تا ۲ پریونیت برای اضافه ولتاژهای AC و ۱/۵ تا ۲/۳ پریونیت برای اضافه ولتاژهای نوع DC ذکر شده است. ضرورت بررسی در این مورد زمانی مشخص می‌شود که بدانیم دامنه این اضافه ولتاژها بستگی زیادی به سیستم مورد مطالعه داشته و بنابراین بایستی راهکار کلی برای برآورد مقادیر آنها در سیستم‌های مختلف ارائه شود.

در این مقاله با برشمردن حالت‌های خطا در مورد

3. Conduction Through  
4. Arc-Through

1. Smoothing Reactor  
2. Firing Failure

می‌تواند نتایج مشابهی داشته باشد [۶]. در شکل (۱) ولتاژ دو سر یک پل اینورتری در حالتی که نقص آتش در یک والو آن ایجاد شده، نشان داده شده است. ولتاژ مذکور شامل یک جزء AC است که فرکانس اصلی آن فرکانس سیستم قدرت می‌باشد. ولتاژ اینورتر در حالتی که نقص کموتاسیون بصورت ادامه هدایت ناخواسته والو باشد نیز در این شکل نشان داده شده که مشابه حالت قبل است.



شکل (۱): ولتاژ پل اینورتر در حالت‌های الف) نقص آتش، ب) نقص کموتاسیون ناشی از کوچک بودن زاویه خاموشی و ج) بلوکه شدن اینورتر بدون مسیر کنارگذر [۶]

حالت آخر (ج) که ناشی از بلوکه شدن اینورتر بدون مسیر کنارگذر است را می‌توان به دو حالت زیر تقسیم بندی نمود:

### الف- اضافه ولتاژ ناشی از قطع پالس‌های آتش در یکی از مبدل‌های اینورتر

اگر پالس‌های آتش کنترلی در یکی از گروه‌های والو اینورتر از دست برود، از آنجایی که هیچ والو جدیدی آتش نمی‌شود، دو والوی که قبل از بروز خطا هدایت می‌کردند به هدایت خود ادامه می‌دهند. در نتیجه ولتاژ دو فاز سیستم AC مستقیماً روی خط DC می‌افتد. در چنین شرایطی از آنجا که سایر مبدل‌های اینورتر و یکسوکننده به کار خود ادامه می‌دهند، ولتاژ خط انتقال نوسانی با بایاس DC

می‌باشد.

حالت‌های مختلف نقص کموتاسیون (نقص آتش، ادامه هدایت و هدایت بی موقع) که در آنها نیز ولتاژ خط نوسانی با ولتاژ DC است، قابل تعمیم به این حالت می‌باشد.

### ب- قطع پالس‌های آتش در تمام مبدل‌های اینورتر

اگر پالس‌های آتش کل مبدل اینورتری بر اثر بروز خطا قطع شود، سیستم تمایل دارد که مانند حالت قبل با جریان و ولتاژ نوسانی به کار خود ادامه دهد. اما در این شرایط چون بایاس DC جریان و ولتاژ در خط انتقال وجود ندارد، جریان پس از چند سیکل قدرت به صفر می‌رسد. در لحظه صفر شدن جریان چون یکسوکننده هنوز فعال است و به سیستم انرژی تزریق می‌نماید، اضافه ولتاژ شدیدی رخ می‌دهد. این حالت متناظر با  $V_{DC} = 0$  بوده و در بین خطاهای نوع AC بدترین حالت است.

### ۲-۲- مدار معادل

اندازه اضافه ولتاژهای ایجاد شده علاوه بر ماهیت خطای صورت گرفته، به مشخصات امپدانس خط HVDC و ایستگاه‌های مبدل و شبکه AC تغذیه کننده و عملکرد سیستم کنترل دارد. عملکرد سیستم کنترل در چنین شرایطی بصورت کنترل جریان خواهد بود. بنابراین مدار معادل ساده شده سیستم در حین این خطا بصورت شکل (۲) می‌باشد.

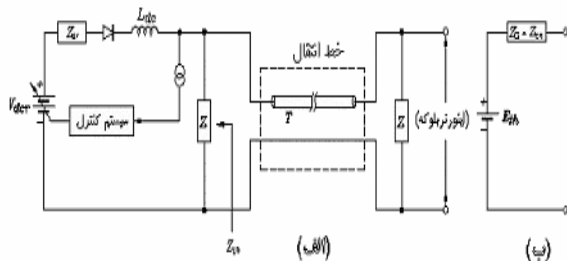
### ۳- اضافه ولتاژ نوع DC

در شرایطی که انتهای خط DC باز است و در واقع اتصال اینورتر به خط DC به هر دلیلی برقرار نشده، اتصال ناگهانی یکسوکنده با زاویه آتش پایین به خط DC می‌تواند باعث بروز اضافه ولتاژهای شدیدی گردد. اندازه این اضافه ولتاژ با توجه به تئوری امواج سیار بایستی دو برابر ولتاژ نامی باشد، اما در عمل بخاطر نوسان ایجاد شده بین راکتور و خط DC و همچنین بر اثر برگشت‌های متوالی موج ولتاژ مقدار اضافه ولتاژ، بدون در نظر گرفتن تأثیر سیستم کنترل ممکن است از این مقدار فراتر رود.

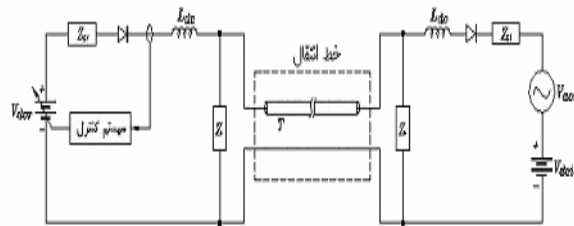
در عمل سیستم کنترل طوری طراحی می‌گردد که در عملکرد عادی سیستم، شروع انتقال، برقرار نمودن مجدد خط DC پس از خطا و قطع نمودن پل‌های مبدل با یک ولتاژ کنترل شده صورت گیرد. در نتیجه حتی اگر خط DC بطور اتفاقی در سمت اینورتر مدار باز باشد، افزایش ولتاژ قابل کنترل است.

### ۳-۱- مدار معادل

با توجه به توصیف فوق مدار معادل سیستم در هنگام بروز این حالت را بصورت شکل (۳) می‌توان در نظر گرفت. در این جا یکسوکنده با یک منبع کنترل شده ولتاژ و اینورتر بصورت مدار باز مدل شده است.



شکل (۳): الف) مدار معادل سیستم در زمان کلیدزنی خط DC ب) مدار معادل تونن ایستگاه مبدل از ابتدای خط DC



شکل (۲): مدار معادل سیستم HVDC برای مطالعه اضافه ولتاژهای نوع AC

در این مدار معادل یکسوکنده با یک منبع کنترل شده با جریان DC و اینورتر با یک منبع ترکیبی AC و DC مدلسازی شده است. امپدانس‌های مؤثر در این مطالعه امپدانس منابع ( $Z_{sr}$  و  $Z_{si}$ )، امپدانس راکتورهای هموارساز ( $Z_{dc}$ )، امپدانس فیلترها و سایر تجهیزات پایانه ( $Z_f$ ) و امپدانس خط انتقال می‌باشد.

### ۲-۲- تشدید

یک سیستم HVDC که شامل امپدانس‌های خط انتقال و پایانه مبدل بویژه راکتور هموارساز است، دارای یک فرکانس طبیعی یا فرکانس تشدید خواهد بود. در این فرکانس نسبت بین ولتاژ و جریان تزریقی به سیستم بدون در نظر گرفتن عملکرد سیستم کنترل حداکثر مقدار خود را خواهد داشت.

بسیاری از سیستم‌های HVDC دنیا که امروزه مشغول به کار می‌باشند، بواسطه طول بلند خطوط قدرت آنها، فرکانس طبیعی نزدیک به فرکانس شبکه AC دارند، در نتیجه وقوع خطای نوع AC می‌تواند سبب تشدید و بروز اضافه ولتاژهایی با دامنه زیاد شود. البته همانطور که بعداً نشان داده خواهد شد با عملکرد سیستم کنترل تقویت ولتاژ متناوب تزریقی کاهش می‌یابد.

### ۳-۲- پرش اولیه ولتاژ

با توجه به تئوری امواج سیار، پرش اولیه ولتاژ در ابتدای فرستنده خط DC در حوزه لاپلاس از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۰].

$$V_F(s) = E(s) \cdot \frac{Z_C}{Z_C + Z_G(s)} \quad (1)$$

در این رابطه E و  $Z_G$  ولتاژ و امپدانس منبع DC در مدار معادل تونن از دید ابتدای خط و  $Z_C$  امپدانس مشخصه خط انتقال است.

در هنگام راه اندازی خطوط DC تابع E یک تابع پله است، بنابراین اگر بعنوان مثال  $Z_G = 0$  یا  $Z_G = Z_C$  باشد موج اولیه ولتاژ برابر با E و  $\frac{E}{2}$  خواهد بود.

پس از رسیدن موج ولتاژ به انتهای خط با ضریب شکست  $\tau = 2$  منعکس می‌گردد (چون انتهای خط باز است). موج پیشرو جریان در خط DC که در ارتباط با موج سیار ولتاژ بوجود می‌آید، باعث شارژ خازنهای خط می‌گردد. رابطه این موج با موج ولتاژ بصورت رابطه زیر می‌باشد:

$$I_f(s) = \frac{V_f(s)}{Z_C} = E(s) \cdot \frac{1}{Z_C + Z_G(s)} \quad (2)$$

برای کاهش دامنه اضافه ولتاژهای DC با توجه به رابطه (۱)، بایستی پرش اولیه ولتاژ (E) کاهش یابد. برای این منظور باید ولتاژ در انتهای فرستنده به تدریج و بصورت کنترل شده افزایش یابد تا موج پله با دامنه زیاد، در ابتدای خط به سیستم اعمال نشود.

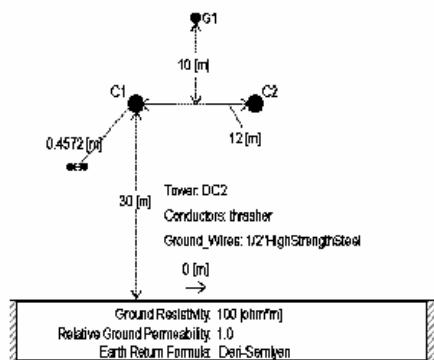
### ۴- معرفی سیستم نمونه شبیه سازی:

برای مطالعه کمی و کیفی روی اضافه‌ولتاژها، یک سیستم کامل دو قطبی ۱۲ پالسه به همراه سیستم کنترل و تجهیزات پایانه و خط شبیه‌سازی شده است. این سیستم در واقع مبتنی بر سیستم نمونه تک قطبی

سیگره<sup>۱</sup> [۱۱] می‌باشد. با این تفاوت که یک خط انتقال بلند واقعی بجای مدل ساده خط انتقال آن جایگزین شده و در پایانه‌های DC فیلتر نصب شده است. این سیستم در شین AC مجهز به فیلترهای بالاگذر، پایین‌گذر و بانک خازنی می‌باشد، که مشخصات آن در [۱۱] موجود است. شمای کلی و مقادیر پایه سیستم نمونه در ضمیمه آورده شده است.

### ۴-۱- خط انتقال انتخابی:

برای مطالعه اضافه ولتاژها از مشخصات یک خط انتقال واقعی مربوط به سیستم Pacific HVDC Intertie بین Colilo و Sylmar در آمریکا و بطول ۱۳۵۲ کیلومتر استفاده شده است. شمای برج و فواصل آن در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): شمای برج خط انتقال DC

مقادیر امپدانس مشخصه ( $Z$ )، زمان سیر ( $T$ ) و نسبت تضعیف ( $A$ ) برای مودهای مختلف در فرکانس ۲۰۰ هرتز بصورت زیر می‌باشد [۲].

$$\begin{array}{lll} Z_0 = 507 (\Omega) & T_0 = 5.67 (ms) & A_0 = 0.56 \\ Z_1 = 281 (\Omega) & T_1 = 4.48 (ms) & A_1 = 0.95 \end{array}$$

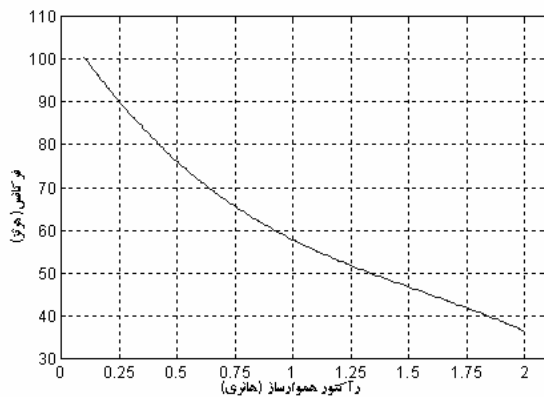
## ۵- نتایج شبیه سازی

### ۵-۱- نوع AC

همانطور که قبلا اشاره شد اضافه ولتاژهای این حالت را می‌توان به دو حالت (الف) و (ب) در بخش (۱-۲) تعمیم داد.

### ۵-۱-۱- پویش (اسکن) فرکانسی سیستم

برای مطالعه اثر تشدید در حین بروز اضافه ولتاژهای نوع AC روی خط انتقال، رفتار فرکانس تشدید سیستم با تغییر مقدار راکتور هموارساز بررسی شده است. برای این منظور از امکانات موجود در نرم افزار EMTDC (بلوک‌های Harmonic Current Injection و FFT) استفاده شده است [12]. فرکانس تشدید سیستم بر حسب مقادیر مختلف اندوکتانس بصورتی که در منحنی شکل (۷) نشان داده شده، تغییر می‌نماید.



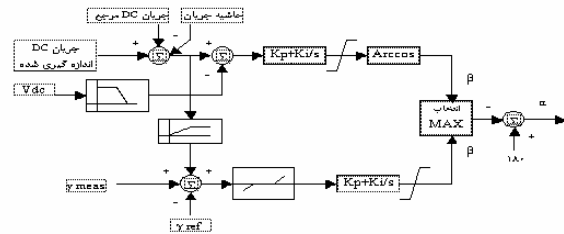
شکل (۷): منحنی تغییرات فرکانس تشدید بر حسب اندوکتانس راکتور هموارساز

با توجه به این منحنی مشاهده می‌گردد که فرکانس تشدید خط انتخابی با راکتور هموارساز ۱/۳۵ هانری، تقریباً برابر ۵۰ هرتز می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود در صورت بروز خطا در مبدل حداکثر اضافه ولتاژها در این مقدار صورت گیرد.

همانطور که ملاحظه می‌شود، امیدانس مشخصه، زمان سیر و درصد تضعیف مود صفر بیشتر از مود یک می‌باشد.

### ۴-۲- سیستم کنترلی :

بلوک دیاگرام ساده شده سیستم کنترل در شکل (۵) نشان داده شده است. این بلوک دیاگرام کلی، سیستم کنترل یکسوکنده و هم اینورتر را با هم شامل می‌گردد. این سیستم مجهز به یک سیستم کنترل جریان بوده و با تنظیم فرمان آتش مبدل‌ها سبب میشود تا جریان سیستم

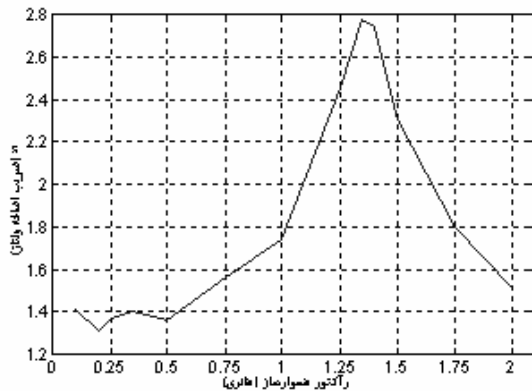


شکل (۶): بلوک دیاگرام مدار کنترل سیستم نمونه [۵]

ثابت نگه داشته شود. این مود کنترلی معمولاً در یکسوکنده فعال می‌باشد. در هنگامی که ولتاژ سیستم افت نماید، مشخصه حد وابسته به ولتاژ فرمان جریان (VDCOL) باعث می‌شود تا فرمان جریان متناسب با ولتاژ سیستم کاهش یابد. مسیر دیگر مدار کنترل، زاویه خاموشی (γ) مبدل اینورتر را در یک مقدار از پیش تعیین شده تنظیم می‌نماید. انتخاب بین مود کنترل جریان ثابت و زاویه خاموشی ثابت با تعیین فرمان زاویه آتش کمتر بین دو فرمان زاویه آتش صورت می‌گیرد.

### ۵-۱-۲- حالت الف

در ادامه برای مقادیر مختلف راکتور هموارساز پیک اضافه ولتاژهای AC روی خط DC تعیین گردیده که نتایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است



شکل (۱۰): منحنی تغییرات ضریب اضافه ولتاژ n بر حسب

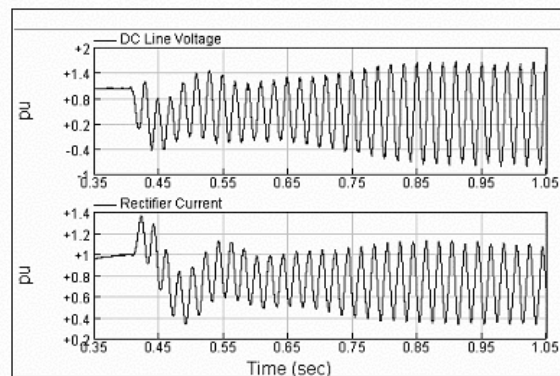
مقدار راکتور DC

$$\left( n = \frac{V_{\max}}{(V_{DC})_{\text{rated}}} \right)$$

همانطور که انتظار می‌رفت در  $L_{DC}=1/35 H$  به سبب بروز تشدید دامنه اضافه ولتاژ حداکثر مقدار خود را دارا می‌باشد. بعلاوه این منحنی نشان می‌دهد که برای مقادیر  $L(0.5H)$  حداکثر دامنه اضافه ولتاژها زیر  $1/5 pu$  است.

برای نشان دادن تأثیر عملکرد سیستم کنترل، فرمان زاویه آتش مبدل یکسوساز که توسط کنترل کننده صادر شده، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. کنترل کننده برای تنظیم جریان در مقدار مشخص شده، با فرکانس تغییرات جریان، مقدار زاویه  $\alpha$  را تغییر می‌دهد. البته در چنین شرایط مشخصات دیگر کنترلی نظیر محدودیت در نرخ تغییر زاویه آتش مبدل نیز بسیار با اهمیت است.

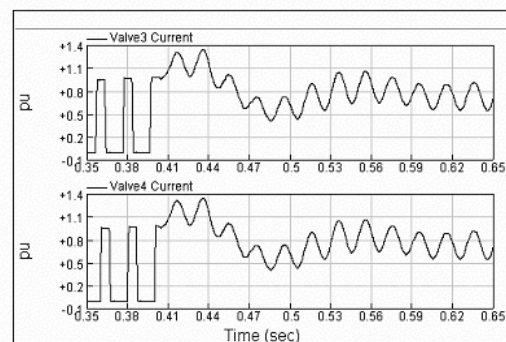
نتیجی که در این قسمت ارائه می‌شود، مربوط به حالتی است که پالس‌های آتش در یکی از مبدلهای سری اینورتری قطع گردد. در شکل (۸) منحنی‌های جریان و ولتاژ خط DC در  $L=1 H$  و پس از خطا (S)  $(t=0/4)$  نشان داده شده است.



شکل (۸): ولتاژ و جریان خط DC پس از قطع پالس‌های

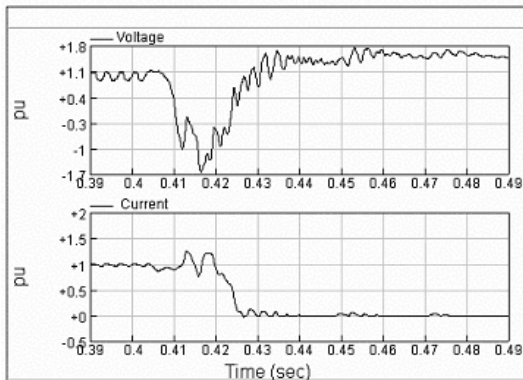
آتش یکی از مبدلهای اینورتر در  $t=0/4 s$

در این شکل موج‌ها حداکثر اضافه ولتاژ در حدود  $1/7$  پریونیت می‌باشد و این در حالی است که متوسط ولتاژ در حدود  $0/5 pu$  (چون نیمی از اینورتر بلوکه شده است) و متوسط جریان DC بلحاظ عملکرد تابع  $VDCOL$  و کنترل جریان در حدود  $0/75 pu$  محدود شده است. در شکل (۹)، جریان والوهای ۳ و ۴ که قبل از بروز خطا هدایت می‌کرده‌اند و پس از خطا نیز به هدایت خود ادامه می‌دهند، نشان داده شده است.



شکل (۹): جریان والوها پس از خطا

عملکرد سیستم کنترل در هنگام بروز چنین خطایی نیز بسیار تعیین کننده است. بعنوان مثال اگر بلافاصله پس از خطا فرمان جریان کاهش یابد، دامنه اضافه ولتاژ کاهش می‌یابد. در شکل (۱۳) این کاهش با تغییر فرمان جریان ۷ میلی‌ثانیه پس از بروز خطا از ۱ pu به ۰/۳pu نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود این عمل دامنه اضافه ولتاژها را تا زیر ۱/۷ pu کاهش می‌دهد.

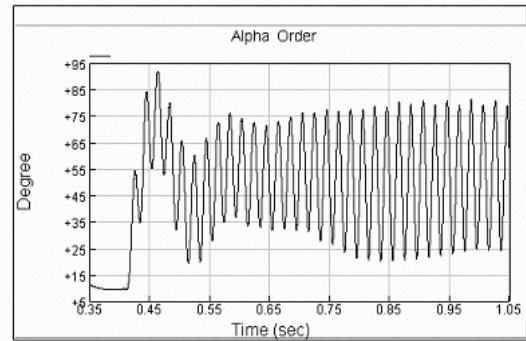


شکل (۱۳): جریان و ولتاژ در طرف یکسوکننده پس از بلوکه شدن کامل اینورتر (کنترل با کاهش فرمان جریان)

یک راه دیگر کاهش دامنه اضافه ولتاژ این است که بلافاصله پس از بروز خطا یکی (یا بیشتر) از گروه‌های والو یکسوکننده نیز بلوکه شود. در این حالت دامنه اضافه ولتاژ به زیر ۱/۹ pu کاهش می‌یابد. هر چه سرعت عمل کنترل کننده بیشتر باشد، میزان کاهش اضافه ولتاژ بیشتر خواهد بود. بعنوان مثال اگر عکس العمل کنترل کننده کمتر از ۲ میلی ثانیه طول بکشد، هیچ گونه اضافه ولتاژی روی نخواهد داد.

### ۵-۲- نوع DC

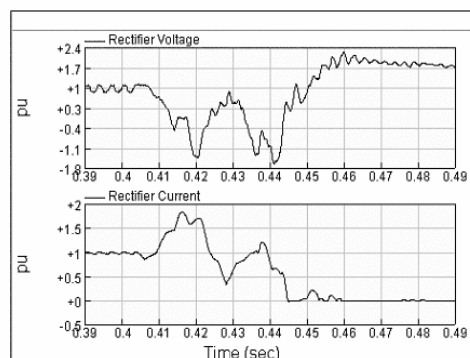
برای بررسی اضافه ولتاژهای نوع DC در هنگام راه اندازی سیستم نمونه، فیلترهای DC حذف و با H



شکل (۱۱): فرمان زاویه آتش کنترل کننده پس از بروز خطا در مبدل

### ۵-۱-۳- حالت ب

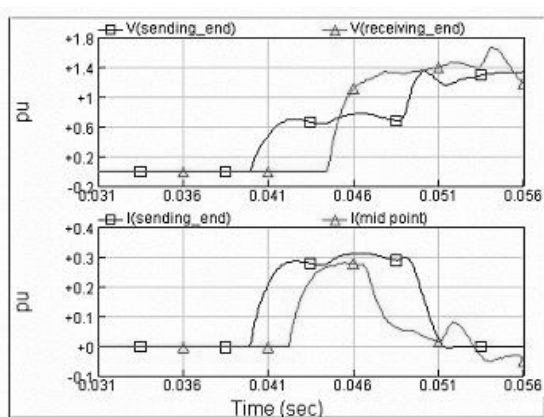
مشاهده اضافه ولتاژهای این حالت مستلزم این است که طول خط انتقال و مقدار راکتور هموارساز کمتر انتخاب شود. زیرا در غیر اینصورت سیستم کنترل با کمک اندوکتانس‌های خط و راکتور جریان را محدود نموده و از قطع شدن جریان جلوگیری می‌نماید. در این حالت طول خط انتقال به ۴۰۰ km کاهش یافته و مقدار راکتور DC، ۰/۲۵ H در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۲) منحنی‌های جریان و ولتاژ طرف یکسوکننده پس از بلوکه شدن اینورتر در  $t=0/4$  نشان داده شده است. حداکثر اضافه ولتاژ در این حالت ۲/۴ pu می‌باشد که بعد از صفر شدن جریان رخ می‌دهد.



شکل (۱۲): جریان و ولتاژ طرف یکسوکننده پس از بلوکه شدن اینورتر (کنترل عادی)



که در راه اندازی تدریجی پرش اولیه ولتاژ و جریان کمتر است. در نتیجه حتی پس از انعکاسات متوالی مقدار آن افزایش چندانی پیدا نمی‌کند. در شکل (۱۵) به ترتیب منحنی‌های ولتاژ و ولتاژ و جریان در راه اندازی تدریجی نشان داده شده است. همانطور که در این شکلها دیده می‌شود پرش اولیه ولتاژ و جریان به ترتیب به  $0.7 \text{ pu}$  و  $0.3 \text{ pu}$  کاهش یافته است. در نتیجه حداکثر ولتاژها در انتهای خط از  $1/6 \text{ pu}$  فراتر نمی‌رود. زمان پیشانی این اضافه ولتاژها بین  $2$  تا  $13/5$  میلی ثانیه مشاهده گردیده که بستگی به امپدانس مشخصه خط و امپدانس‌های پایانه دارد.



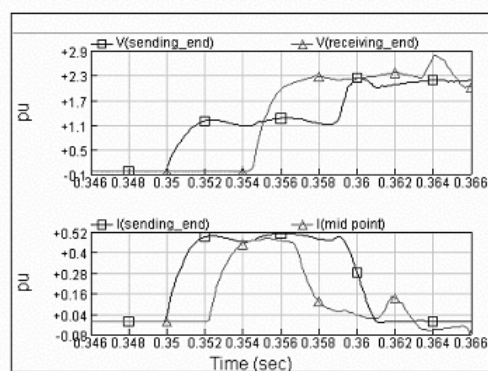
شکل (۱۵): شکل موج ولتاژ و جریان در خط DC در شرایط راه اندازی کنترل شده

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله اضافه ولتاژهای نوع AC و DC مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- در اضافه ولتاژ نوع AC امپدانس‌های سیستم، اعم از خط انتقال، پایانه‌ها و فرکانس تشدید سیستم کلی و مخصوصاً عملکرد سیستم کنترل جریان از اهمیت اساسی برخوردار است. نوسانات ولتاژ و جریان در این حالت با فرکانس سیستم قدرت صورت می‌گیرد، بنابراین عملکرد سیستم‌های کنترلی روی دامنه اضافه ولتاژها، حتی در شرایطی که فرکانس تشدید

$L_{dc}=0.25$  در نظر گرفته شده است. در ابتدا ولتاژ یکسوکننده در شرایطی که مقدار آن در حد ولتاژ نامی است، قبل از ارسال پالس‌های اینورتر به خط DC اعمال می‌گردد. شکل موج ولتاژ و جریان خط DC در ابتدا، وسط و انتهای خط در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۴): شکل موج جریان ولتاژ در ابتدا، وسط و انتهای خط DC در شرایط راه اندازی با انتهای باز

همانطورکه در شکلها دیده می‌شود پس از راه اندازی در  $t = 0.35 \text{ s}$  پرش اولیه ولتاژ در ابتدای خط در حدود  $1/15 \text{ pu}$  می‌باشد این موج پس از  $2/2$  میلی‌ثانیه به وسط خط و پس از  $4/4$  میلی‌ثانیه به انتهای خط می‌رسد. در انتهای خط ولتاژ دو برابر شده ( $2/3$ ) و دوباره به سمت یکسوکننده بر می‌گردد. دامنه موج بر اثر برگشت‌های متوالی در دو انتهای خط افزایش یافته و در انتهای خط مقدار آن به  $2/8 \text{ pu}$  می‌رسد.

با توجه به مقدار  $Z_c = 281 \Omega = 2/25 \text{ pu}$  پرش اولیه جریان با رجوع به رابطه (۲)،  $0.51 \text{ pu}$  می‌باشد که نتایج شبیه سازی نیز این موضوع را تأیید می‌کند (پایین شکل (۱۴)).

اگر ولتاژ یکسوکننده به آرامی افزایش یابد دامنه اضافه ولتاژها کاهش می‌یابد. علت این امر این است

- خط به فرکانس قدرت نزدیک باشد، تعیین کننده است.
- ۲- سخت‌ترین اضافه ولتاژ نوع AC در شرایط اینورتر بلوکه شده و پس از صفر شدن جریان اینورتر رخ می‌دهد. البته این حالت در شرایطی بوجود می‌آید که طول خط انتقال کوتاه بوده و اندوکتانس‌های سیستم از جمله اندوکتانس راکتور هموارساز کم باشد، زیرا در غیر این صورت و در شرایطی که سرعت کنترل کننده بالا باشد، سیستم کنترل می‌تواند نوسانات جریان را کنترل نموده و از صفر شدن جریان جلوگیری کند.
- ۳- مدت زمان حضور نوسانات فرکانس قدرت در این خطا بستگی به جریان مستقیم اولیه، اندوکتانس مدار، دامنه نوسانات جریان پس از خطا (فرکانس تشدید سیستم) و مشخصه سیستم کنترل دارد.
- ۴- برای اضافه ولتاژهای نوع DC نیز امپدانس‌های خط و پایانه اهمیت دارند. اما در اینجا عملکرد سیستم کنترل ولتاژ تعیین کننده می‌باشد، بطوریکه اگر راه اندازی بصورت کنترل شده و بتدریج صورت گیرد، دامنه اضافه ولتاژهای بوجود آمده قابل توجه نخواهد بود.
- ۵- بطور کلی اضافه ولتاژهای نوع AC و DC تا حدود زیادی تحت تأثیر عملکرد سیستم کنترل قرار داشته و می‌توان با طراحی یک سیستم کنترل بهینه آنها را تا حدود زیادی محدود نمود.
- ۷- مراجع
- [1] E.W.Kimbark, Direct Current Transmission, Wiley-Interscience, 1971.
- [2] E.W.Kimbark, "Transient Overvoltage Caused by Monopolar Ground Fault on Bipolar DC Line, Theory and Simulation", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.PAS-89, No.4, pp. 584-592, April 1970.
- [3] N.C.Hingorani, "Transient Overvoltage on a Bipolar HVDC Overhead Line Caused by DC Line Faults", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.PAS- 89, No.4, pp.592-602, April 1970.
- [4] D.J.Melvold, P.G.Odam, J.J.Vithayatil, "Transient Overvoltages on an HVDC Bipolar Line during Monopolar Line Faults", IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, PAS -96, No.2, pp.591-601, March/April 1977.
- [5] R.Verdolin, A.M.Gole, "Induced Overvoltages on an AC-DC Hybrid Transmission System", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.10, No.3, pp.1514-1521, July 1995.
- [6] G.T.Wrate, I.K.Tasinga, "Transient Overvoltage on a Three Terminal DC Transmission System due to Monopolar Ground Faults ", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.5, No.2, pp.1047-1053, April 1990.
- [7] سعید اسماعیلی جعفرآبادی، عباس شولایی "تحلیل، مدلسازی و بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از خطای تک‌قطب به زمین در سیستم‌های دوقطبی HVDC"، یازدهمین کنفرانس مهندسی برق شیراز ۱۳۸۲.
- [8] A.Ekstrom, E.Borg, "DC Line Overvoltages in Connection With Injection of Alternating Voltages into the Line", Electra (Cigre), No.53, pp.21-30, 1978.
- [9] Y.Watanabe, "Study on the Insulation Design of Overhead DC Lines", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.PAS- 95, pp.1473-1479, July/Aug 1979.
- [10] T.Gonen, Electric Power Transmission System Engineering, Analysis and Design, Wiley Publication, 1988.
- [11] Cigre WG 14-02, "First Benchmark Model for HVDC Control Studies", Electra, pp.55-75, April 1991.
- [12] EMTDC/PSCAD Version.3 Help Manual, 1999

سیستم AC یکسوکنداده	سیستم AC اینورتر	سیستم DC	
۳۴۵ KV (L-L)	۲۳۰ KV (L-L)	۵۰ KV (P-P)	ولتاژ
۱۰۰۰ MW	۱۰۰۰ MW	۱۰۰۰ MW	توان
۱۱۹,۰۳۵	۵۲,۹	۲۵۰	امپدانس
-	-	۲۰۰۰ A	جریان
۵۰ Hz	۵۰ Hz		فرکانس

