

## تحلیل و بررسی جامع انواع اضافه ولتاژهای داخلی در خطوط انتقال قدرت HVDC

عباس شولایی

سعید اسماعیلی جعفرآبادی

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران - ایران

### چکیده

و تئوری مودال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سپس با توجه به عملکرد سیستم کنترلی مدار معادل ساده شده سیستم در حین خطا ارائه گردیده است. در ادامه با شبیه سازی یک سیستم تست HVDC با نرم افزار PSCAD/EMTDC، تاثیر پارامترهای مختلف روی دامنه و شکل اضافه ولتاژها مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات کلی آنها بدست آمده است.

**واژه های کلیدی:** HVDC خطوط انتقال قدرت، اضافه ولتاژ داخلی، خطای تک قطب به زمین، خطای آتش، خطای کموتاسیون

در این مقاله اضافه ولتاژهای داخلی در خطوط انتقال قدرت جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC)، شامل اضافه ولتاژهای نوع کلیدزنی، نوع AC و نوع DC مورد بررسی قرار گرفته است. منشا این اضافه ولتاژها در واقع خطاهای مختلف از جمله خطای تک قطب به زمین در سیستم های دو قطبی، خطای آتش، خطای کموتاسیون، هدایت ناخواسته والوهای تریستوری، بلوکه شدن مبدل های اینورتری و راه اندازی ناهماهنگ و کنترل نشده مبدل های یکسوکننده و اینورتر می باشد. برای بررسی این اضافه ولتاژها ابتدا حالت های مختلف خطا به کمک ابزارهایی نظیر تئوری امواج سیار

## ANALYSIS, MODELLING AND SIMULATION OF HVDC TRANSMISSION LINE INTERNAL OVERVOLTAGES

A. Shoulaie

S. Esmaeili Jafarabadi

Department of Electrical Engineering Iran University of Science Technology

**Abstract:** In this paper, internal overvoltages on HVDC transmission line including switching, AC and DC type overvoltages which are produced respectively by pole to ground fault, interaction between static converters with lines and terminal equipment and uncontrolled starting of remote converters are studied. For this purpose all fault cases are analyzed using traveling waves and modal theories as well as abnormal condition and control strategies in HVDC converters. Then a simplified equivalent circuit of the system in the faults condition with respect

to control system operation is introduced. Finally by employing a full bipolar HVDC test system in PSCAD/EMTDC, effects of various parameters on shape and magnitude of overvoltages is studied and their general characteristics are obtained.

**Keywords:** HVDC, Power Transmission Line, Internal Overvoltages, Pole to Ground Fault, Firing failure, Commutation failure

۱- مقدمه

طراحی عایقی در خطوط انتقال قدرت HVDC و همچنین ایستگاههای مبدل آن وابستگی زیادی به دامنه و شکل اضافه ولتاژهای داخلی سیستم دارد. این اضافه ولتاژها را که تا حدود زیادی با اضافه ولتاژهای شناخته شده در سیستمهای جریان متناوب متفاوت می باشند، می توان به سه دسته اصلی تقسیم بندی نمود [۱].

۱- اضافه ولتاژ نوع کلیدزنی

۲- اضافه ولتاژ نوع AC

۳- اضافه ولتاژ نوع DC

اضافه ولتاژ نوع کلیدزنی بر خلاف آنچه از نامش بر می آید منشأ متفاوتی نسبت به اضافه ولتاژهای کلیدزنی در سیستمهای AC داشته و در اثر خطای تک قطب به زمین<sup>۲</sup> در سیستمهای دو قطبی HVDC و در قطب سالم روی می دهد. مطالعات اولیه روی این اضافه ولتاژ که با استفاده از شبیه سازهای فیزیکی DC و آنالیزگرهای شبکه گذرا صورت گرفته، مقدار آن را در حدود ۱/۷ پریونیت نشان دادند [۱]. اما تحلیل کیمبارک<sup>۳</sup> [۲] و پس از آن آنالیز کامپیوتری هینگورانی<sup>۴</sup> [۳] نشان داد که حداکثر دامنه این اضافه ولتاژ بسته به امپدانس انتهای خط و مکان وقوع خطا می تواند حتی به ۲/۲ پریونیت برسد. در واقع اختلاف بوجود آمده در نتایج این مطالعات را می توان ناشی از یکسری فرض های ساده کننده و محدودیت های عملی شبیه سازها بویژه شبیه سازهای فیزیکی دانست. زیرا این سیستمها دارای پاسخ فرکانسی محدود بوده و وابستگی فرکانسی پارامترهای خطوط انتقال در آن لحاظ نشده است [۴]. در مطالعات کیمبارک و هینگورانی هر چند تاثیر فرکانس روی پارامترهای خط (سرعت موج و ضریب میرایی) بررسی شده، اما در عمل برای تحلیل و شبیه سازی با تقریب از یک مدل ساده تک فرکانسی و بدون تلفات خط استفاده گردیده و نتایج ارائه شده بر اساس آن می باشد. این اضافه ولتاژ در سیستمهای هیبریدی [۵] و در یک سیستم سه پایانه ای [۶] نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اضافه ولتاژ نوع AC در اثر خطاهای مختلف در مبدلها و تزریق مستقیم ولتاژ سیستم متناوب به خط DC روی می دهند. این امر

علاوه بر اینکه خود می تواند ولتاژ خط انتقال را از مقدار نامی فراتر برد، ممکن است اسباب تشدید خطوط HVDC بلند را با راکتورهای هموارساز<sup>۵</sup> در پایانه مبدل فراهم سازد. در چنین شرایطی اضافه ولتاژ بزرگتری سیستم را تهدید می نماید. اضافه ولتاژ دیگر که به نوع DC موسوم است زمانی روی می دهد که راه اندازی اینورتر نسبت به یکسوکننده با تاخیر صورت گیرد. این امر سبب می شود تا انتهای خط انتقال از دید موج سیار ولتاژ بصورت مدار باز دیده شده و منجر به وقوع اضافه ولتاژهای برگشتی با دامنه زیادتر گردد. در ارتباط با این نوع اضافه ولتاژها نیز مطالعات محدودی صورت گرفته است [۸،۷]. در این مراجع مقداری بین ۱/۵ تا ۲ پریونیت برای اضافه ولتاژهای نوع DC ذکر شده است.

ضرورت بررسی اضافه ولتاژهای داخلی از آنجا ناشی می شود که مقدار آنها بستگی زیادی به سیستم مورد مطالعه و مشخصات کنترلی آن دارد. در این مقاله ضمن تحلیل کامل و برشمردن موارد خطا، با توجه به عملکرد قابل پیش بینی سیستم کنترل در هر مورد، 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، با هدف ایجاد یک ساختار کلی و هدفمند جهت برآورد این اضافه ولتاژها مورد بررسی قرار گرفته است. این امر با استفاده از امکانات نرم افزار EMTDC/PSCAD که یک برنامه تحلیل گذرای الکترومغناطیسی بوده و دارای مدل های مختلف و دقیق خط انتقال قدرت می باشد، میسر گردیده است.

۲- اضافه ولتاژ نوع کلیدزنی

برای تحلیل اضافه ولتاژهای تک قطب به زمین مانند صاعقه می توان از تئوری امواج سیار کمک گرفت. اما تئوری امواج سیار و روابط آن در خطوط تکفازه صادق بوده و برای خطوط چند فازه که بین فازهای مختلف تزویج وجود دارد، نمی توان از روابط مربوط به حالت تکفازه استفاده نمود. در چنین شرایطی بایستی با استفاده از ماتریسهای تبدیل مودال نظیر ماتریس کلارک، معادلات چند

1- High Voltage DC Current  
2- Pole to Ground Fault  
3- Kimbark

4- Hingorani  
5- Smoothing Reactor



شکل امپدانسی معادلات (۵) و (۶) به صورت زیر خواهد بود.

$$V_a = Z_s I_a + Z_m I_b \quad V_b = Z_m I_a + Z_s I_b \quad (7)$$

$$I_a = Y_s V_a + Y_m V_b \quad I_b = Y_m V_a + Y_s V_b \quad (8)$$

که پس از تبدیل مودال به صورت زیر در خواهند آمد.

$$V_0 = Z_0 I_0 \quad V_1 = Z_1 I_1 \quad (9)$$

$$I_0 = Y_0 V_0 \quad I_1 = Y_1 V_1 \quad (10)$$

با توجه به روابط اخیر امپدانس و ادمیتانس مود صفر و مود یک بصورت زیر تعریف می شوند.

$$Z_0 = Z_s + Z_m \quad Z_1 = Z_s - Z_m \quad (11)$$

$$Y_0 = Y_s + Y_m \quad Y_1 = Y_s - Y_m \quad (12)$$

$Z_m$  و  $Z_s$  امپدانس و  $Y_m$  و  $Y_s$  ادمیتانس خودی و متقابل می باشند. مقدار دقیق این پارامترها با در نظر گرفتن اثر زمین استاتیکی و مغناطیسی از روابط کارسون [۹] بدست می آید.

دو خط انتقال یک سیستم انتقال DC دو قطبی دارای تزویج الکترواستاتیکی و الکترومغناطیسی می باشند. بنابراین با بروز خطای قطب به زمین در یک قطب اضافه ولتاژهایی در قطب سالم رخ می دهد. موج اضافه ولتاژ از نقطه بروز خطا بسوی دو انتهای خط حرکت نموده و پس از برخورد به انتهای خط منعکس می گردد.

اگر قطب منفی که دچار خطا شده با اندیس  $a$  و قطب مثبت یا قطب سالم با اندیس  $b$  نامیده شوند، با توجه به روابط مودال و فاز داریم.

$$i_b = (i_0 - i_1) \quad , \quad v_a = (v_0 - v_1) \quad \text{در شرایط خطا.}$$

$$v_a = 0 \quad , \quad i_b = 0 \quad \text{بنابراین.}$$

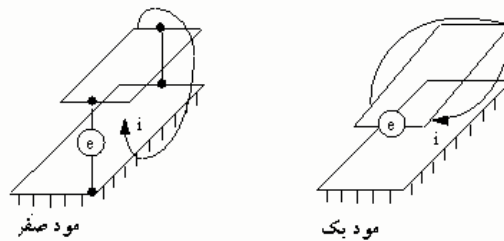
$$v_0 = -v_1 \quad , \quad i_b = 0$$

در نتیجه با استفاده از روابط (۹) و (۱۱) مدار معادل سیستم در حین خطا بصورت شکل (۲) خواهد بود.

فازه را قطری نموده و آن را به چند مد انتشار مستقل بصورت زیر تبدیل نمود.

$$[F_{phase}] = [T][F_{mode}] \quad (1)$$

هر مد مانند یک خط تکفاز رفتار نموده و دارای امپدانس مشخصه و زمان سیر مخصوص به خود می باشد. برای خطوط انتقال با دو هادی نظیر خطوط دو قطبی DC دو مسیر برگشت وجود دارد. این مسیرها در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): مدهای مختلف سیستم دو قطبی HVDC

در مود صفر یا مود زمین جریان از هر دو هادی به طرف زمین انتقال می یابد، ولی در مود یک یا مثبت جریان بین دو هادی بصورت رفت و برگشت جاری می شود. با مشخص نمودن جهت جریان با  $+1$  و  $-1$  ماتریس مودال را می توان بصورت زیر در نظر گرفت.

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

در یک خط دو قطبی که هادی های آن بطور متقارن نسبت به زمین واقع شده اند، معادلات ماتریسی جریان و ولتاژ بصورت زیر می باشد.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} \\ M_{ab} & L_{bb} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{aa} & -c_{ab} \\ -c_{ab} & c_{aa} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

با اعمال ماتریس تبدیل مودال (رابطه (۲))، تبدیل مودال معادلات (۳) و (۴) بصورت زیر می باشد.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_{aa} - M_{ab}) & 0 \\ 0 & (L_{aa} + M_{ab}) \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

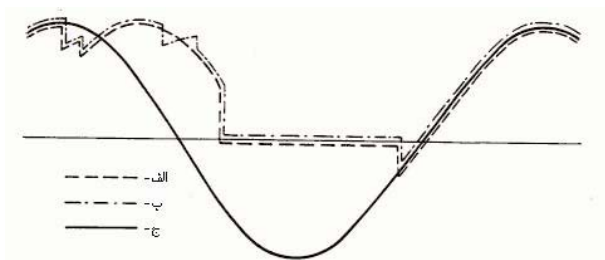
$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_{aa} + c_{ab}) & 0 \\ 0 & (c_{aa} - c_{ab}) \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### ۳- اضافه ولتاژهای نوع AC

این اضافه ولتاژها همانطور که اشاره شد بر اثر تزریق ولتاژ متناوب به خط در اثر خطاهای مختلف ایستگاه مبدل بوجود می آیند.

#### ۳-۱- موارد خطا

ولتاژ متناوب شبکه AC در صورتی به خط انتقال DC منتقل می گردد که ترتیب کموتاسیون در پل های تریستوری دچار اغتشاش گردد. یکی از عوامل این امر نقص متوالی یک یا چند والو در حین آتش شدن<sup>۶</sup> می باشد که ممکن است در اثر مشکلات مدار آتش رخ داده باشد. البته احتمال این نوع خطا بسیار کم است. عامل دیگری که باعث نقص کموتاسیون می شود و احتمال بروز بیشتری نیز دارد، ادامه هدایت ناخواسته<sup>۷</sup> والوهای تریستوری در عملکرد اینورتری، ناشی از کوچک بودن بیش از اندازه زاویه خاموشی می باشد. روشن شدن بی موقع<sup>۸</sup> در والوهای قوس جیوه ای نیز می تواند نتایج مشابهی داشته باشد [۸]. و از همه مهمتر خروج یک یا چند و یا همه مبدل های اینورتری از مدار به علت قطع پالس های آتش آنها می باشد. موارد فوق در شکل (۳) نشان داده شده است. در همه این خطاها ولتاژ سیستم شامل یک جزء AC است که فرکانس اصلی آن فرکانس سیستم قدرت می باشد.

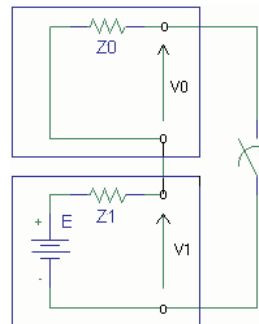


شکل (۳): ولتاژ سمت اینورتر در حالت های الف) نقص آتش،

ب) نقص کموتاسیون و ج) بلوکه شدن اینورتر [۸]

اضافه ولتاژهای ناشی از بلوکه شدن اینورتر را می توان به دو حالت زیر تقسیم بندی نمود.

الف- اضافه ولتاژ ناشی از بلوکه شدن یک یا چند مبدل اینورتری



شکل (۲): مدار معادل مودال سیستم در حین خطای تک قطب به زمین  
تغییرات ولتاژ ظاهر شده دو سر هر شبکه پس از خطا متناسب با امپدانس تونن آن است. در نتیجه،

$$\Delta v_1 = E \frac{Z_1}{Z_1 + Z_0} \quad (13)$$

$$\Delta v_0 = E \frac{Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (14)$$

در این روابط  $Z_0$  و  $Z_1$  به ترتیب امپدانس مشخصه مود صفر و یک و  $E$  ولتاژ سیستم قبل از خطا می باشد. با توجه به روابط فوق و تبدیل مودال، تغییر ولتاژ (پریش اولیه) روی قطب سالم پس از خطا از رابطه زیر بدست می آید.

$$\Delta v_b = \Delta v_1 - \Delta v_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1 + Z_0} E \quad (15)$$

این رابطه برای قطبی که دچار خطا شده بصورت زیر می باشد.

$$\Delta v_a = \Delta v_1 + \Delta v_0 = E \quad (16)$$

حال اگر این تغییرات به مقادیر قبل از خطا در قطب ها اضافه شود، مقدار واقعی ولتاژها بدست می آید.

$$v_a = -E + E = 0 \quad (17)$$

$$v_b = E + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} E = \frac{2Z_0 E}{Z_0 + Z_1} \quad (18)$$

در بخش شبیه سازی نتایج بدست آمده روی یک سیستم تست با نتایج روابط فوق قابل مقایسه است.

6- Firing Failure  
7- Conduction Through

8- Arc-Through

زاویه آتش پایین به خط DC می‌تواند باعث بروز اضافه‌ولتاژهای شدیدی گردد. اندازه این اضافه‌ولتاژ با توجه به تئوری امواج سیار بایستی دو برابر ولتاژ نامی باشد، اما در عمل بر اثر انعکاس متوالی موج ولتاژ مقدار اضافه‌ولتاژ 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، برقدار 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.

با توجه به تئوری امواج سیار، پرش اولیه ولتاژ در ابتدای فرستنده خط DC در حوزه لاپلاس از رابطه زیر بدست می‌آید [۹].

$$V_F(s) = E(s) \cdot \frac{Z_C}{Z_C + Z_G(s)} \quad (19)$$

در این رابطه E و ZG ولتاژ و امپدانس منبع DC در مدار معادل تونن از دید ابتدای خط و ZC امپدانس مشخصه خط انتقال است. پس از رسیدن موج ولتاژ به انتهای خط با ضریب شکست منعکس می‌گردد (چون انتهای خط باز است). موج پیشرو جریان در خط DC از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$I_f(s) = \frac{V_f(s)}{Z_C} = E(s) \cdot \frac{1}{Z_C + Z_G(s)} \quad (20)$$

برای کاهش دامنه اضافه‌ولتاژهای DC با توجه به رابطه (۱۹)، بایستی پرش اولیه ولتاژ (E) کاهش یابد. برای این منظور افزایش تدریجی و کنترل شده ولتاژ سمت فرستنده می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

#### ۵- مدار معادل

با توجه به ویژگی‌های ارائه شده برای هر یک از اضافه‌ولتاژهای داخلی مدار معادل ساده پیشنهادی برای هر یک از آنها در شکل (۴) نشان داده شده است.

ب- قطع پالس‌های آتش در تمام 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 خط سیستم AC مستقیماً به سمت DC منتقل می‌گردد. 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 کموناسیون (نقص آتش، ادامه هدایت و هدایت بی‌موقع) که در آنها نیز ولتاژ خط نوسانی با ولتاژ DC است، قابل تعمیم به این حالت می‌باشد. 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 بوده و به سیستم انرژی تزریق می‌نماید، اضافه‌ولتاژ شدیدی رخ می‌دهد.

#### ۳-۲- تشدید

یک سیستم HVDC که شامل امپدانس‌های خط انتقال و پایانه مبدل بویژه رآکتور 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 اضافه‌ولتاژهایی با دامنه زیاد شود. البته همانطور که بعداً نشان داده خواهد شد با عملکرد سیستم کنت-رل تقویت ولتاژ متناوب تزریقی کاهش می‌یابد.

#### ۴- اضافه‌ولتاژ 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 یکسوکننده با

### ۶- معرفی سیستم تست

برای مطالعه کمی و کیفی روی اضافه‌ولتاژها، یک سیستم کامل دوقطبی 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>۹</sup> [۱۰] می‌باشد. با این تفاوت که یک خط انتقال بلند واقعی بجای مدل ساده خط انتقال آن جایگزین شده و در پایانه‌های DC آن فیلتر نصب شده است. این سیستم در شین AC مجهز به فیلترهای بالاگذر، پایین‌گذر و بانک خازنی می‌باشد، که مشخصات آن در [۱۰] موجود است. شمای کلی و مقادیر پایه سیستم تست در ضمیمه آورده شده است.

### ۶-۱- خط انتقال انتخابی

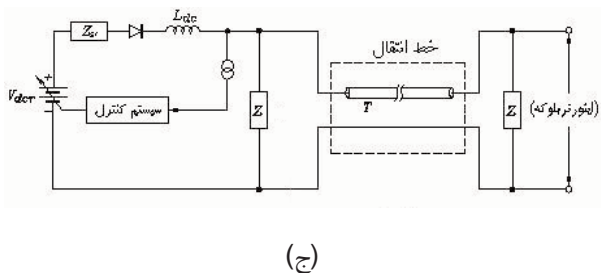
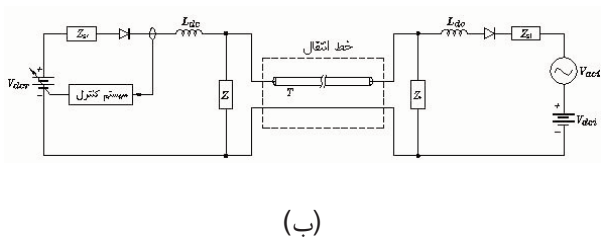
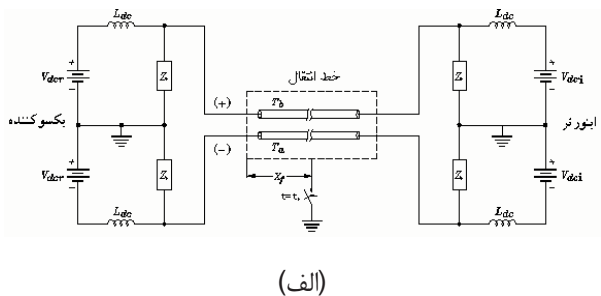
برای مطالعه اضافه‌ولتاژها از مشخصات یک خط انتقال واقعی مربوط به سیستم Pacific HVDC Intertie بین Colilo و Sylmar در آمریکا و به طول ۱۳۵۲ کیلومتر استفاده شده است. مقادیر امپدانس مشخصه (Z)، زمان سیر (T) و نسبت تضعیف (A) برای مدهای مختلف در فرکانس ۲۰ هرتز بصورت زیر می‌باشد [۲].

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

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

### ۶-۲- فیلتر DC

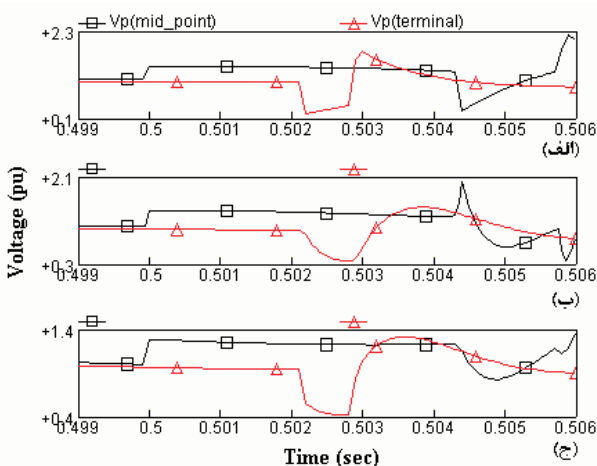
برای مطالعه اثر تجهیزات انتهای خط روی اضافه‌ولتاژ تک قطب به زمین، یک نمونه فیلتر DC در انتهای خطوط در نظر گرفته شده است. ترکیب کلی فیلتر DC استفاده شده در شکل (۵) نشان داده شده است. فیلترهای بالاگذر با اتصال خازن CRT تبدیل به فیلتر مرتبه ۱۲ می‌شود. با استفاده از این خازن، شاخه‌های فیلتری و رآکتور هموارساز DC می‌توان ترکیبات مختلف سلفی و خازنی را در انتهای خط ایجاد نمود.



شکل (۴): مدار معادل سیستم برای الف- اضافه‌ولتاژ کلیدزنی، ب- اضافه‌ولتاژ نوع AC و ج- اضافه‌ولتاژ نوع DC

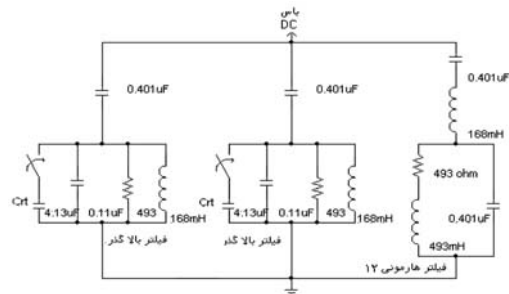
پاسخ سیستم کنترلی مبدل‌های HVDC در مقابل خطای اتصال کوتاه کند است، بنابراین می‌توان با حذف اثر کنترل، مبدل‌ها را با منابع ولتاژ ثابت جایگزین نمود. در اضافه‌ولتاژهای نوع AC عملکرد کنترل جریان و در اضافه‌ولتاژهای نوع DC عملکرد کنترل ولتاژ سیستم کنترلی اهمیت دارد. همچنین در این مدل‌ها تزریق ولتاژ متناوب با منبع AC و اینورتر بلوکه با مدار باز مدل شده‌اند. در این مدل‌ها تجهیزات پایانه شامل امپدانس منابع ( $Z_{sf}$  و  $Z_{si}$ ), رآکتور هموارساز (Ldc), فیلترهای DC ( $Z_f$ ) و خط انتقال (T) نیز در نظر گرفته شده است.

استفاده می‌شود. در مرحله اول خط با مدل تک فرکانسی برزرون و بدون تلفات در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده برای ترکیبات مختلف انتهای خط در شکل (۷) نشان داده شده است. در لحظه بروز خط یک پرش اولیه  $3pu$  که با رابطه (۱۵) و مشخصات خط انتقال انتخابی تطابق دارد. در وسط خط و در قطب سالم ایجاد می‌گردد. موج مود یک سریعتر و پس از سپری شدن زمان  $2/19$  میکروثانیه ( $T_{1/2}$ ) به انتهای خط می‌رسد و به عنوان نمونه در انتهای سلفی با پرش اولیه  $-0.71pu = 2\Delta V_1$  (رابطه ۱۳) منعکس می‌گردد. موج مود صفر با اندکی تاخیر و پس از زمان  $2/91$  میکروثانیه ( $T_{0/2}$ ). به انتهای سلفی می‌رسد و موج برگشتی آن  $2\Delta V_0 = 1.29pu$  می‌باشد. این امواج پس از طی مسافتی به اندازه طول یک خط کامل دوباره به وسط خط می‌رسند و حداکثر اضافه‌ولتاژ را در آن نقطه ایجاد می‌نمایند. اثر این دو مود در شکل (۷) بوضوح قابل مشاهده است.



شکل (۷): اضافه‌ولتاژها ناشی از خطای تک قطب به زمین در وسط خط برای الف) انتهای سلفی، ب) انتهای خازنی و ج) انتهای مقاومتی

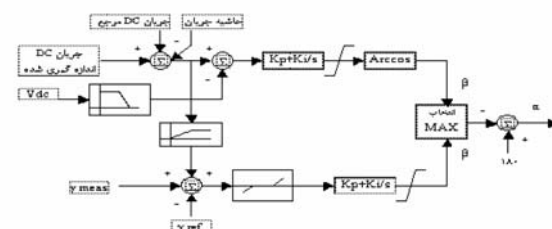
با دقت در شکل ملاحظه می‌شود در حالت خازنی اضافه‌ولتاژ ایجاد شده مربوط به مود یک و در حالت سلفی مربوط به مود صفر است که ذاتا دارای تضعیف بیشتری است. در حالت مقاومتی ( $R=Z_1$ ) شرایط از دو حالت قبلی بهتر است. این حالت با گذاردن مقاومت



شکل (۵): ترکیب کلی فیلتر DC

### ۳-۶- سیستم کنترلی

بلوک دیگرام ساده شده سیستم کنترل در شکل (۶) نشان داده شده است. این بلوک دیگرام کلی، سیستم کنترل یکسوکندنده و هم اینورتر را با هم شامل می‌گردد.



شکل (۶): بلوک دیگرام ساده شده مدار کنترل [۵]

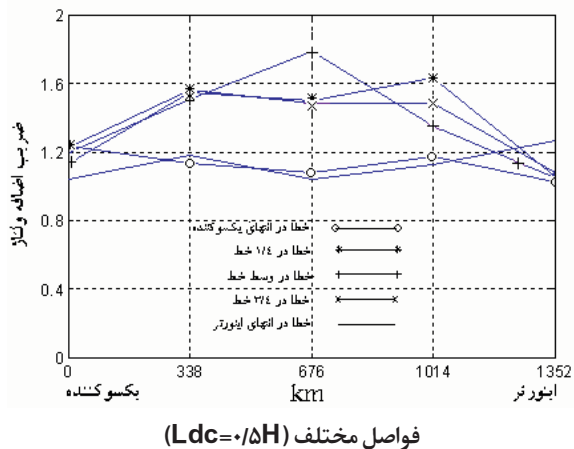
این سیستم مجهز به یک سیستم کنترل جریان بوده و با تنظیم فرمان آتش مبدل ها سبب می‌شود تا جریان ثابت نگه داشته شود. این مود کنترلی معمولا در یکسوکندنده فعال می‌باشد. در هنگامی که ولتاژ سیستم افت نماید، مشخصه حد وابسته به ولتاژ فرمان جریان  $VDCOL$  باعث می‌شود تا فرمان جریان متناسب با ولتاژ سیستم کاهش یابد. مسیر دیگر مدار کنترل، زاویه خاموشی  $\mu$  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.

### ۷- نتایج شبیه‌سازی

#### ۷-۱- شبیه‌سازی اضافه‌ولتاژ نوع کلیدزنی

برای شروع مطالعه ابتدا از مدار معادل ساده شده شکل (۳-الف)

شکل (۹): حداکثر اضافه ولتاژها ناشی از خطای تک قطب به زمین در



مشاهده می شود که حداکثر اضافه ولتاژ در وسط خط و ناشی از خطا در همان نقطه روی می دهد. همچنین حداکثر دامنه اضافه ولتاژها در نقاط غیر از وسط خط در نقطه قرینه نسبت به وسط خط روی می دهد. علت این امر این است که در نقطه قرینه موج پیشرو و برگشتی تقریباً بطور همزمان به هم می رسند و باعث افزایش دامنه ولتاژ می شوند.

۷-۱-۲- حساسیت به ترکیبات مختلف فیلتر

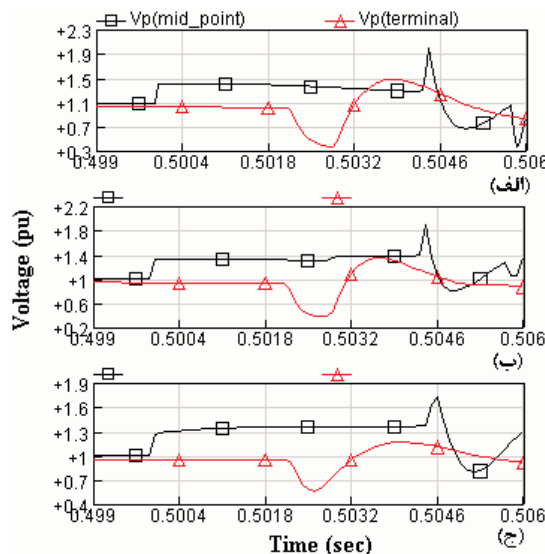
در جدول (۱) حداکثر اضافه ولتاژها برای ترکیبات مختلف فیلتر درج گردیده است. مشاهده می شود که حداکثر اضافه ولتاژ در قطب سالم در حالت (الف) که انتهای خط بیشترین خاصیت خازنی را دارد رخ می دهد و در این راستا شاخه های بالاگذر بیشترین تاثیر را دارا می باشند. از حالت (ه) به بعد خاصیت انتهای خط از حالت خازنی به حالت سلفی تغییر می یابد و اثر راکتور هموارساز غالب می شود.

جدول (۱): دامنه اضافه ولتاژ برای ترکیبات مختلف فیلتر

ترکیب	توضیحات	دامنه اضافه ولتاژ (pu)
الف	وصل همه شاخه های فیلتر	1/82
ب	حالت الف بدون خازنهای Crt	1/79
ج	حالت الف بدون یکی از شاخه های بالاگذر	1/58
د	حالت ج بدون خازن Crt در شاخه بالاگذر	1/54
ه	قطع هر دو شاخه بالاگذر	1/66
و	قطع تمام شاخه های فیلتر	1/52

شیب اضافه ولتاژها در نقاط دور از خطا به واسطه تضعیف و اعوجاج

در فیلتر DC بالاگذر ایجاد گردیده است. حداکثر دامنه اضافه ولتاژها در این شکل بین ۲ و ۲/۲ پریونیت می باشد، که با نتایج به دست آمده توسط کیمبارک و هینگورانی کاملاً تطابق دارد. برای نزدیک شدن به شرایط واقعی خط انتقال بایستی تلفات و وابستگی پارامترهای آن به فرکانس مدنظر قرار گیرد. برای این منظور مدل خط وابسته به فرکانس و با تلفات انتخاب می گردد. نتایج در حالت خازنی در شکل (۸) نشان داده شده است. مقاومت خط سبب می شود تا دامنه و شیب اضافه ولتاژ کاهش یابد. اما تاثیر وابستگی پارامترهای خط انتقال به فرکانس در این راستا بیشتر می باشد. دامنه اضافه ولتاژ در اثر این دو عامل به ترتیب از ۲/۰۴ به ۱/۹۱ و سپس به ۱/۷۳ پریونیت کاهش می یابد. در حالت (ج) که به واقعیت بسیار نزدیک است، تفکیک بین مودهای صفر و یک بخاطر اثر فرکانس های بالا امکانپذیر نیست.



شکل (۸): اضافه ولتاژها ناشی از خطای تک قطب به زمین در حالت خازنی (الف) خط بدون تلفات و مدل تک فرکانسی، (ب) خط با تلفات و مدل تک فرکانسی و (ج) خط با تلفات و مدل وابسته به فرکانس

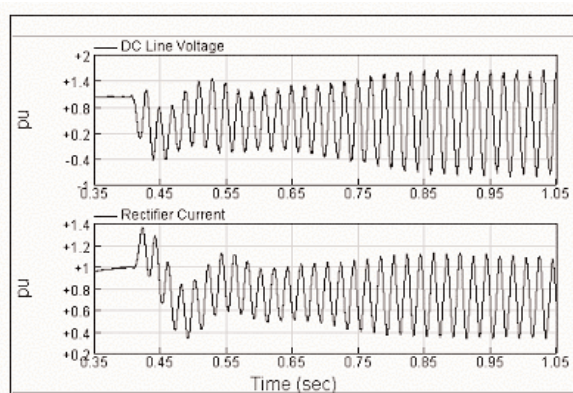
۷-۱-۱- مکان خطا

برای نشان دادن تاثیر مکان خطا، در سیستم تست خط انتقال به چهار مقطع مساوی (۳۳۸ km) تقسیم گردیده است. حداکثر اضافه ولتاژهای ناشی از خطا در مقاطع مختلف بصورت منحنی در شکل (۹) نشان داده شده است.



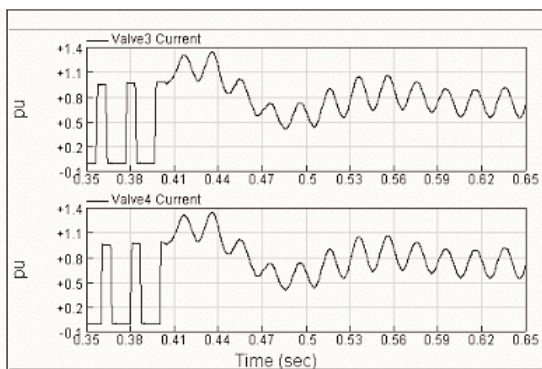
مشاهده می‌گردد که فرکانس تشدید خط انتخابی با راکتور هموارساز ۱/۳۵ هرتزی، تقریباً برابر ۵۰ هرتز می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود در صورت بروز خطا در مبدل حداکثر اضافه‌ولتاژها در این مقدار صورت گیرد.

نتایجی که ابتدا ارائه می‌شود، مربوط به حالتی است که پالس‌های آتش در یکی از مبدلهای سری اینورتری قطع گردد. در شکل (۱۱) منحنی‌های جریان و ولتاژ خط DC با  $L_{DC} = 1H$  پس از خطا نشان داده شده است. در این شکل‌ها حداکثر اضافه‌ولتاژ ۱/۷ پریونیت می‌باشد و این در حالی است که متوسط ولتاژ در حدود ۰/۵ pu (چون نیمی از اینورتر بلوکه شده است) و متوسط جریان DC بلحاظ عملکرد تابع VDCOL و کنترل جریان در ۰/۷۵ pu محدود شده است.



شکل (۱۱): ولتاژ و جریان خط DC پس از قطع پالس‌های آتش یکی از مبدل‌های اینورتر

در شکل (۱۲)، 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.



کمتر از نقاط نزدیک به خطا می‌باشد. حداقل زمان پیشانی موج در این حالت‌ها به ترتیب ۲۰۰ و ۹۵۰ میکروثانیه مشاهده شده است.

### ۳-۱-۷- تأثیر اندوکتانس راکتور هموارساز (LDC)

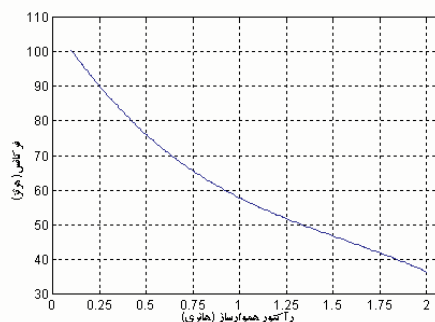
تغییر اندوکتانس راکتور هموارساز در حالت (و) از مقدار ۰/۱ H تا ۱ H حداکثر اضافه‌ولتاژ را از ۱/۷۴ pu تا ۱/۳۵ pu کاهش می‌دهد. افزایش راکتور هموارساز نرخ تغییرات جریان را محدودتر می‌نماید. بنابراین باعث کاهش دامنه اضافه‌ولتاژ می‌شود.

### ۴-۱-۷- تأثیر مقاومت خطا (RF) و اثر مقاومت خاک

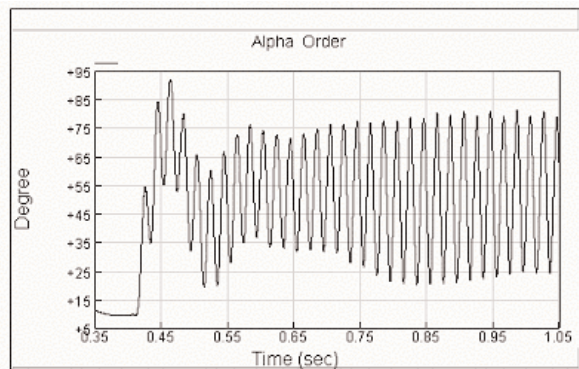
مقاومت خطا ناشی از مقاومت قوس الکتریکی و یا دکل در عمل وجود دارد. در حالت (و) ( $L_{DC} = 0.1H$ ), با افزایش مقاومت خطا از صفر تا  $100 \Omega$  دامنه اضافه‌ولتاژ از ۰/۱۷۴pu به ۱/۵pu کاهش می‌یابد. مقاومت خطا دامنه جریان مود صفر را محدود ساخته و ضریب میرایی آن را افزایش می‌دهد. با تغییر مقاومت خاک از  $(\Omega \cdot m)$  ۱۰ تا  $(\Omega \cdot m)$  ۱۰۰۰ تأثیر چندانی بر اندازه اضافه‌ولتاژها مشاهده نگردید (کمتر از ۳ درصد).

### ۲-۷- شبیه‌سازی اضافه‌ولتاژ نوع AC

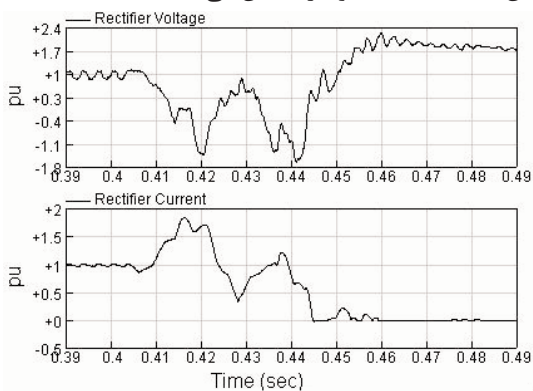
برای مطالعه اثر تشدید در حین بروز اضافه‌ولتاژهای نوع AC روی خط انتقال، رفتار فرکانس تشدید سیستم با تغییر مقدار راکتور هموارساز بررسی شده است. برای این منظور از امکانات موجود در نرم افزار EMTDC (بلوک‌های Current Injection Harmonic و FFT) استفاده شده است [۱۱]. فرکانس تشدید سیستم بر حسب مقادیر مختلف اندوکتانس بصورتی که در منحنی شکل (۱۰) نشان داده شده، تغییر می‌نماید.



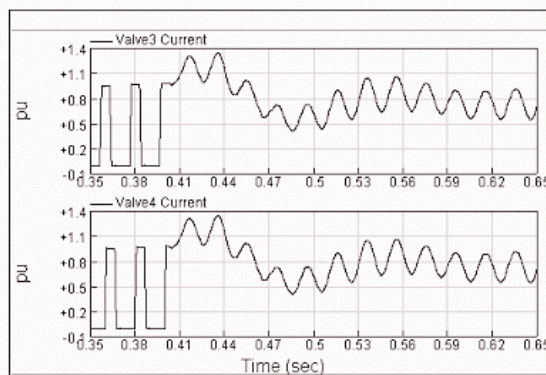
شکل (۱۰): تغییرات فرکانس تشدید با اندوکتانس راکتور هموارساز



شکل (۱۴): فرمان زاویه آتش کنترل کننده پس از بروز خطا در مبدل کنترل کننده برای تنظیم جریان در مقدار مشخص شده، با فرکانس تغییرات جریان، مقدار زاویه را تغییر می‌دهد. البته در چنین شرایط مشخصات دیگر کنترلی نظیر محدودیت در نرخ تغییر زاویه آتش مبدل نیز بسیار با اهمیت است. مشاهده اضافه‌ولتاژهای حالت (ب) در بخش (۱-۳) 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  $400 \text{ km}$  کاهش یافته و مقدار راکتور،  $0.25 \text{ H}$  در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۵) منحنی‌های جریان و ولتاژ طرف یکسوکننده پس از بلوکه شدن اینورتر نشان داده شده است. حداکثر اضافه‌ولتاژ در این حالت  $2/4 \text{ pu}$  می‌باشد که بعد از صفر شدن جریان رخ می‌دهد. 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 اضافه‌ولتاژ کاهش می‌یابد.

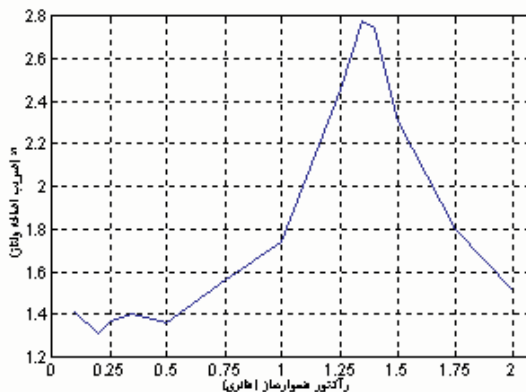


شکل (۱۵): جریان و ولتاژ طرف یکسوکننده پس از بلوکه شدن اینورتر (کنترل عادی)



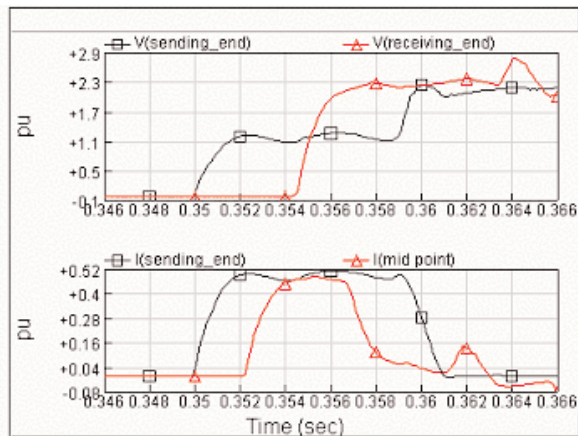
شکل (۱۲): جریان والوها پس از خطا

در ادامه برای مقادیر مختلف راکتور هموارساز حداکثر اضافه‌ولتاژهای AC روی خط DC تعیین گردیده که نتایج آن در شکل (۱۳) نشان داده شده است. ضریب  $n$  نسبت اضافه‌ولتاژ به ولتاژ مستقیم نامی است.



شکل (۱۳): تغییرات ضریب اضافه‌ولتاژ  $n$  بر حسب مقدار راکتور DC

همانطور که انتظار می‌رفت در به سبب بروز تشدید دامنه اضافه‌ولتاژ حداکثر مقدار خود را دارا می‌باشد. بعلاوه این منحنی نشان می‌دهد که برای مقادیر حداکثر دامنه اضافه‌ولتاژها زیر  $1/5 \text{ pu}$  است. برای نشان دادن تأثیر عملکرد سیستم کنترل، فرمان زاویه آتش مبدل یکسو ساز که توسط کنترل کننده صادر شده، در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

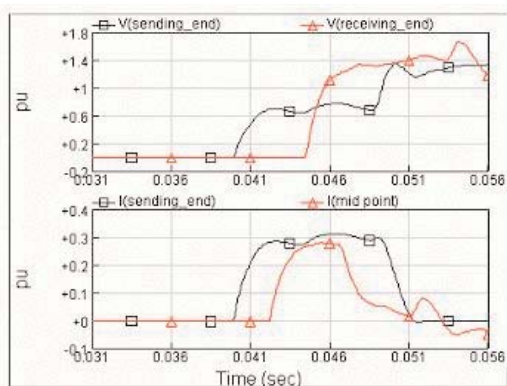


شکل (۱۷): شکل موج جریان ولتاژ در ابتدا، وسط و انتهای خط DC

در شرایط راه اندازی با انتهای باز

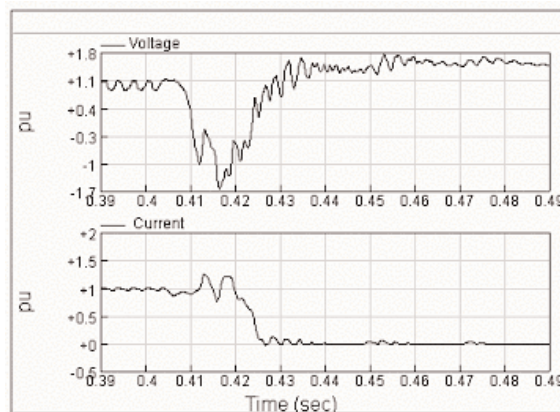
مشاهده می شود پس از راه اندازی، پرش اولیه ولتاژ در ابتدای خط در حدود ۱/۱۵ pu می باشد این موج پس از ۲/۲ میلی ثانیه به وسط خط و پس از ۴/۴ میلی ثانیه به انتهای خط می رسد. در انتهای خط ولتاژ دو برابر شده (۲/۳ pu) و دوباره به سمت یکسوکننده بر می گردد. دامنه موج بر اثر انعکاسات متوالی در دو انتهای خط افزایش یافته و در انتهای خط مقدار آن به ۲/۸ pu می رسد. با توجه به مقدار  $Z_C = 281 \Omega$  پرش اولیه جریان با رجوع به رابطه (۲۰)،  $1.15/2.25 = 0.51$  pu می باشد که نتایج شبیه سازی نیز این موضوع را تأیید می کند (پایین شکل (۱۷)).

در راه اندازی تدریجی پرش اولیه ولتاژ و جریان کمتر است. در نتیجه حتی پس از انعکاسات متوالی مقدار آن افزایش چندانی پیدا نمی کند. در شکل (۱۸) به ترتیب منحنی های ولتاژ و جریان در راه اندازی تدریجی نشان داده شده است.



شکل (۱۸): شکل موج ولتاژ و جریان در خط DC در شرایط راه اندازی کنترل شده

در شکل (۱۶) این کاهش با تغییر فرمان جریان ۷ میلی ثانیه پس از بروز خطا از ۱ pu به ۰/۳ pu نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود این عمل دامنه اضافه ولتاژها را تا زیر ۱/۷ pu کاهش می دهد.



شکل (۱۶): 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 گروه های والو یکسوکننده نیز بلوکه شود. در این حالت دامنه اضافه ولتاژ به زیر ۱/۹ pu کاهش می یابد. 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.

### ۳-۷- شبیه سازی اضافه ولتاژ نوع DC

برای بررسی اضافه ولتاژهای نوع DC در هنگام راه اندازی سیستم تست، فیلترهای DC حذف و  $L_{DC} = 0.25H$  در نظر گرفته شده است. در ابتدا ولتاژ یکسوکننده در شرایطی که مقدار آن در حد ولتاژ نامی است، قبل از ارسال پالس های اینورتر به خط DC اعمال می گردد. شکل موج ولتاژ و جریان خط DC در ابتدا، وسط و انتهای خط در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

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, and et al, "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] 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.  
 [8] 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.  
 [9] T. Gonen, Electric Power Transmission System Engineering, Analysis and Design, Wiley Publication, 1988.  
 [10] Cigre WG 14-02, "First Benchmark Model for HVDC Control Studies", Electra, pp. 55-75, April 1991.  
 [11] EMTDC/PSCAD Version.3 Help Manual, 1999

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 نمی رود. زمان پیشانی این اضافه ولتاژها بین ۲ تا  $13/5$  میلی ثانیه مشاهده گردیده که بستگی به امپدانس مشخصه خط و امپدانس های پایانه دارد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله انواع اضافه ولتاژهای داخلی در سیستم HVDC که خطوط انتقال DC را تحت تاثیر قرار می دهند، تجزیه و تحلیل و از جنبه های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده گردید که مشخصات اضافه ولتاژ نوع کلیدزنی وابستگی زیادی به امپدانس های انتهای خط، مکان وقوع خط، فاصله از خط، مقاومت خطوط، وابستگی فرکانسی پارامترهای خط انتقال دارد. زمان پیشانی (نیم موج) این اضافه ولتاژ به زیر  $500 \mu\text{s}$  نیز ممکن است برسد. و از این جهت مشابه اضافه ولتاژ کلیدزنی در سیستم های متناوب است. بیشترین مقدار آن در وسط خط و ناشی از خطا در وسط قطب معیوب بروز می کند که در شبیه سازی های انجام شده  $1/8$  پریونیت مشاهده گردید. در اضافه ولتاژهای نوع AC و DC نیز تاثیر امپدانس های موجود و فرکانس تشدید سیستم تعیین کننده است. اما عامل مهمتر در این حالت ها عملکرد سیستم کنترلی می باشد. بدترین اضافه ولتاژ نوع AC در شرایط اینورتر بلوکه شده و پس از صفر شدن جریان اینورتر رخ می دهد. اما با عملکرد کنترل جریان سیستم مقدار آن را می توان به زیر دو پریونیت کاهش داد. در این مقاله ساختار کلی برای مطالعه اضافه ولتاژهای داخلی ترسیم گردیده است. در این راستا استفاده از مدل های ساده شده پیشنهادی، انجام این مطالعات را بدون شبیه سازی مبدل های الکترونیک قدرت میسر می سازد.

ضمیمه: مقادیر پایه و شمای کلی سیستم نمونه شبیه سازی

سیستم DC	سیستم AC اینورتر	سیستم AC یکسوکننده	
۵۰۰ kV (P-P)	۲۳۰ kV (L-L)	۳۴۵ kV (L-L)	ولتاژ
۱۰۰۰ MW	۱۰۰۰ MW	۱۰۰۰ MW	توان
۲۵۰ Ω	۵۲/۹ Ω	۱۱۹/۰۳ Ω	امپدانس
۲۰۰۰ A	-	-	جریان
-	۵۰ Hz	۵۰ Hz	فرکانس