

## 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 شبیه‌سازی یک سیستم تست HVDC با نرم‌افزار PSCAD/EMTDC، تاثیر پارامترهای مختلف روی دامنه و شکل اضافه‌ولتاژها مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات کلی آنها بدست آمده است.

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

در این مقاله اضافه‌ولتاژهای داخلی در خطوط انتقال قدرت جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC)، شامل اضافه‌ولتاژهای نوع کلیدزنی، نوع AC و نوع DC مورد بررسی قرار گرفته است. منشا این اضافه‌ولتاژها در واقع خطاهای مختلف از جمله خطای تک قطب به زمین در سیستم‌های دو قطبی، خطای آتش، خطای کموتاسیون، هدایت ناخواسته والوهای تریستوری، بلوکه شدن مبدل‌های اینورتری و راه اندازی ناهماهنگ و کنترل نشده مبدل‌های یکسوکننده و اینورتر می‌باشد. برای بررسی این اضافه‌ولتاژها ابتدا حالت‌های 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 اضافه‌ولتاژهای داخلی سیستم دارد. این اضافه‌ولتاژها را که تا حدود زیادی با اضافه‌ولتاژهای شناخته شده در سیستم‌های جریان متناوب متفاوت می‌باشند، می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم بندی نمود [۱].

۱- اضافه‌ولتاژ نوع کلیدزنی

۲- اضافه‌ولتاژ نوع AC

۳- اضافه‌ولتاژ نوع DC

اضافه ولتاژ نوع کلیدزنی بر خلاف آنچه از نامش بر می‌آید منشا متفاوتی نسبت به اضافه‌ولتاژهای 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 می‌دهد. مطالعات اولیه روی این اضافه‌ولتاژ که با استفاده از شبیه‌سازهای 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 اضافه‌ولتاژ بسته به امپدانس انتهای خط و مکان وقوع خطا می‌تواند حتی به ۲/۲ پریونیت برسد. در واقع اختلاف بوجود آمده در نتایج این مطالعات را می‌توان ناشی از یکسری فرض‌های ساده کننده و محدودیت‌های عملی شبیه‌سازها بویژه شبیه‌سازهای 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 شبیه‌سازی با تقریب از یک مدل ساده تک فرکانسی و بدون تلفات خط استفاده گردیده و نتایج ارائه شده بر اساس آن می‌باشد. این اضافه‌ولتاژ در سیستم‌های هیبریدی [۵] و در یک سیستم سه پایانه‌ای [۶] نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اضافه‌ولتاژ نوع AC در اثر خطاهای مختلف در مبدل‌ها و تزریق مستقیم ولتاژ سیستم متناوب به خط DC روی می‌دهند. این امر

علاوه بر اینکه خود می‌تواند 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 اضافه‌ولتاژ بزرگتری سیستم را تهدید می‌نماید. اضافه‌ولتاژ دیگر که به نوع DC موسوم است زمانی روی می‌دهد که راه اندازی اینورتر نسبت به یکسوکنده با تاخیر صورت گیرد. این امر سبب می‌شود تا انتهای خط انتقال از دید موج سیار ولتاژ بصورت مدار باز دیده شده و منجر به وقوع اضافه‌ولتاژهای برگشتی با دامنه زیادتر گردد. در ارتباط با این نوع اضافه‌ولتاژها نیز مطالعات محدودی صورت گرفته است [۸،۷]. در این مراجع مقداری بین ۱/۵ تا ۲ پریونیت برای اضافه‌ولتاژهای نوع DC ذکر شده است.

ضرورت بررسی اضافه‌ولتاژهای داخلی از آنجا ناشی می‌شود 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 پیش‌بینی سیستم کنترل در هر مورد، مدار معادل ساده شده سیستم در حین خطا ارائه گردیده است. در ادامه با شبیه‌سازی 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 اضافه‌ولتاژها مورد بررسی قرار گرفته است. این امر با استفاده از امکانات نرم‌افزار EMTDC/PSCAD که یک برنامه تحلیل گذرای الکترومغناطیسی بوده و دارای مدل‌های مختلف و دقیق خط انتقال قدرت می‌باشد، میسر گردیده است.

## ۲- اضافه‌ولتاژ نوع کلیدزنی

برای تحلیل اضافه‌ولتاژهای تک قطب به زمین مانند صاعقه می‌توان 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، نمی‌توان 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 امپدانس 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 توزیع 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.

$$i_b = (i_0 - i_1) \quad , \quad v_a = (v_0 - v_1)$$

در شرایط خطا،

$$v_a = 0 \quad , \quad i_b = 0$$

بنابراین،

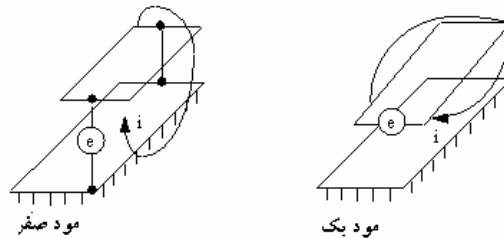
$$v_0 = -v_1 \quad , \quad i_b = 0$$

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): مودهای 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.

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

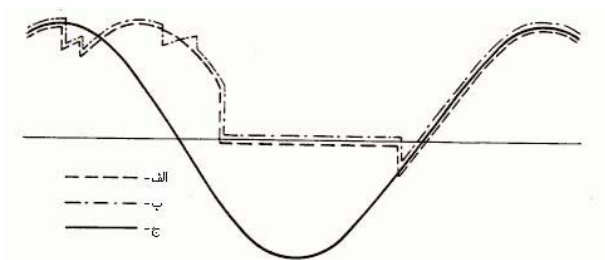
$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_{aa} + c_{ab}) & 0 \\ 0 & (c_{aa} - c_{ab}) \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### ۳- اضافه‌ولتاژهای نوع AC

این اضافه‌ولتاژها همانطور که اشاره شد بر اثر تزریق ولتاژ متناوب به خط در اثر خطاهای مختلف ایستگاه مبدل بوجود می‌آیند.

#### ۳-۱- موارد خطا

ولتاژ متناوب شبکه AC در صورتی به خط انتقال DC منتقل 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>۶</sup> می‌باشد 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 می‌شود 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 می‌باشد. روشن شدن بی‌موقع<sup>۸</sup> در والوهای قوس جیوه‌ای نیز می‌تواند نتایج مشابهی داشته باشد [۸]. و از همه مهمتر خروج یک یا چند و یا همه مبدل‌های اینورتری از مدار به علت قطع پالس‌های آتش آنها می‌باشد. 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 می‌باشد.

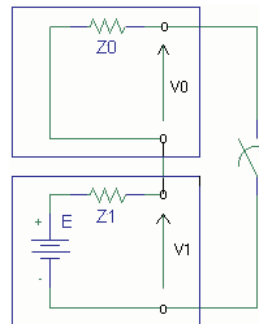


شکل (۳): ولتاژ سمت اینورتر در حالت‌های الف) نقص آتش،

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

اضافه‌ولتاژهای ناشی از بلوکه شدن اینورتر را می‌توان به دو حالت زیر تقسیم بندی نمود.

الف- اضافه‌ولتاژ 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 می‌باشد. با توجه به روابط فوق و تبدیل مودال، تغییر ولتاژ (پریش اولیه) روی قطب سالم پس از خطا از رابطه زیر بدست می‌آید.

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

این رابطه برای قطبی که دچار خطا شده بصورت زیر می‌باشد.

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

حال اگر این تغییرات به مقادیر قبل از خطا در قطب‌ها اضافه شود، مقدار واقعی ولتاژها بدست می‌آید.

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

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

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



ب- قطع پالس های آتش در تمام مبدل های اینورتر

اگر پالس های آتش کنترلی در یکی از گروه های والو اینورتر از دست برود، از آنجایی که هیچ والو جدیدی آتش نمی شود، دو والوی که قبل از بروز خطا هدایت می کردند به هدایت خود ادامه می دهند. در نتیجه ولتاژ خط سیستم AC مستقیماً به سمت DC منتقل می گردد. در چنین شرایطی از آنجا که سایر مبدل های اینورتر و یکسوکننده به کار خود ادامه می دهند، ولتاژ خط انتقال نوسانی با بایاس DC می باشد. حالت های مختلف نقص کموناسیون (نقص آتش، ادامه هدایت و هدایت بی موقع) که در آنها نیز ولتاژ خط نوسانی با ولتاژ DC است، قابل تعمیر به این حالت می باشد. اگر پالس های 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 می رسد. در لحظه صفر شدن جریان چون یکسوکننده هنوز فعال بوده و به سیستم انرژی تزریق می نماید، اضافه ولتاژ شدیدی رخ می دهد.

### ۳-۲- تشدید

یک سیستم HVDC که شامل امپدانس های 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 سیستم های HVDC دنیا که امروزه مشغول به کار می باشند، بواسطه طول بلند خطوط قدرت آنها، فرکانس طبیعی نزدیک به فرکانس شبکه AC دارند، در نتیجه وقوع خطای نوع AC می تواند سبب تشدید و بروز اضافه ولتاژهایی با دامنه زیاد شود. البته همانطور که بعداً نشان داده خواهد شد با عملکرد سیستم کنت-رل تقویت ولتاژ متناوب تزریقی کاهش می یابد.

### ۴- 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 یکسوکننده با

زاویه آتش پایین به خط DC می تواند 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 بر اثر انعکاس 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 می گردد که در عملکرد عادی سیستم، شروع انتقال، برقدار نمودن مجدد خط DC پس از خطا و قطع نمودن پل های 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 می آید [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 می گردد (چون انتهای خط باز است). موج پیشرو جریان در خط DC از رابطه زیر بدست می آید.

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

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

### ۵- مدار معادل

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

### 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

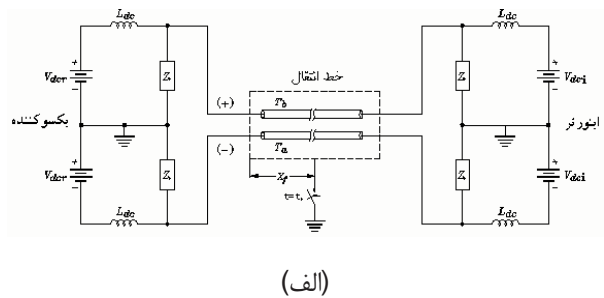
برای مطالعه اضافه‌ولتاژها از مشخصات یک خط انتقال واقعی مربوط به سیستم Pacific HVDC Intertie بین Colilo و Sylmar در آمریکا و به طول ۱۳۵۲ کیلومتر استفاده شده است. مقادیر امپدانس مشخصه (Z)، زمان سیر (T) و نسبت تضعیف (A) برای مدهای مختلف در فرکانس ۲۰ هرتز بصورت زیر می‌باشد [۲].

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

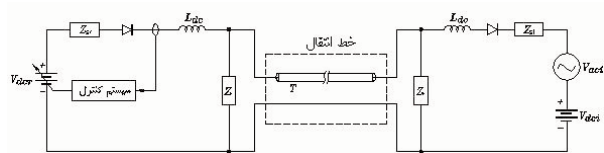
همانطور که ملاحظه می‌شود، امپدانس مشخصه، زمان سیر و درصد تضعیف مود صفر بیشتر از مود یک می‌باشد.

### ۶-۲- فیلتر DC

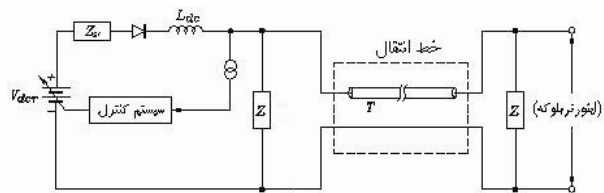
برای مطالعه اثر تجهیزات انتهای خط روی اضافه‌ولتاژ تک قطب به زمین، یک نمونه فیلتر DC در انتهای خطوط در نظر گرفته شده است. ترکیب کلی فیلتر DC استفاده شده در شکل (۵) نشان داده شده است. فیلترهای بالاگذر با اتصال خازن CRT تبدیل به فیلتر مرتبه ۱۲ می‌شود. با استفاده از این خازن، شاخه‌های فیلتری و رآکتور هموارساز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



(الف)



(ب)

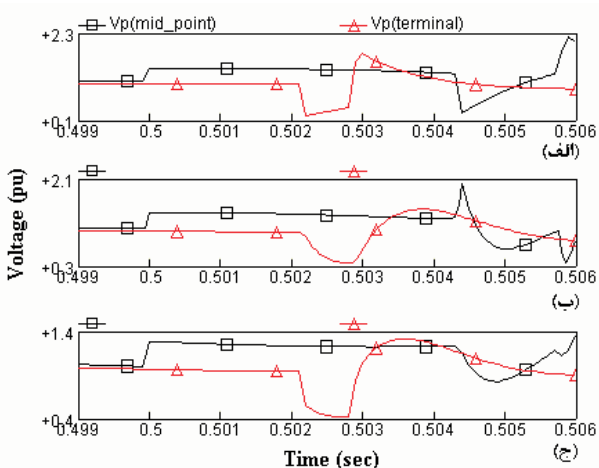


(ج)

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

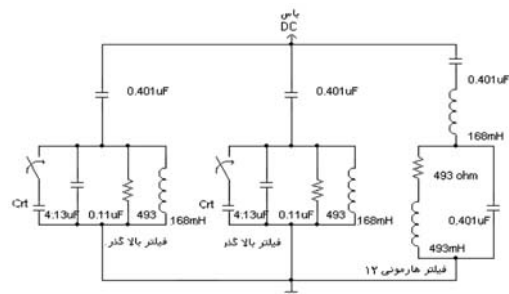
پاسخ سیستم کنترلی مبدل‌های HVDC در مقابل خطای اتصال کوتاه کند است، بنابراین می‌توان با حذف اثر کنترل، مبدل‌ها را با منابع ولتاژ ثابت جایگزین نمود. در اضافه‌ولتاژهای نوع AC عملکرد کنترل جریان و در اضافه‌ولتاژهای نوع DC عملکرد کنترل ولتاژ سیستم کنترلی اهمیت دارد. همچنین در این مدل‌ها تزریق ولتاژ متناوب با منبع AC و اینورتر بلوک 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

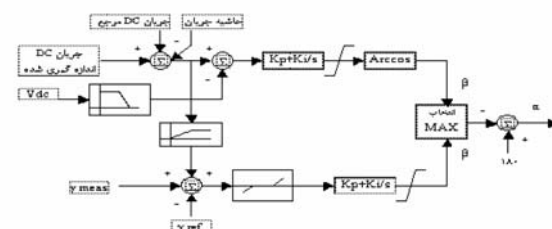
با دقت در شکل ملاحظه می‌شود در حالت خازنی اضافه‌ولتاژ ایجاد شده مربوط به مود یک و در حالت سلفی مربوط به مود صفر است که ذاتا دارای تضعیف بیشتری است. در حالت مقاومتی ( $R=Z_1$ ) شرایط از دو حالت قبلی بهتر است. این حالت با گذاردن مقاومت



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]

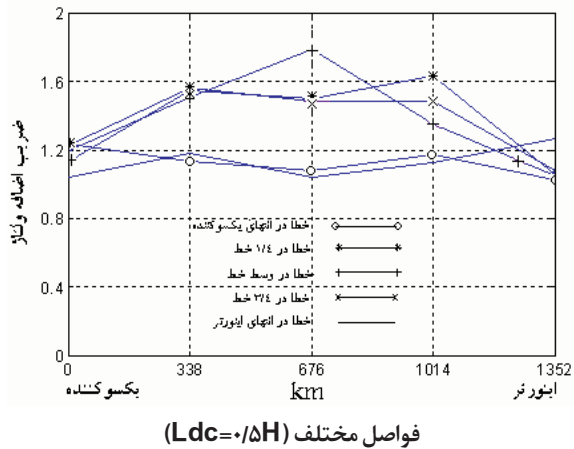
این سیستم مجهز به یک سیستم کنترل جریان بوده و با تنظیم فرمان آتش مبدل‌ها سبب می‌شود تا جریان ثابت نگه داشته شود. این مود کنترلی معمولاً در یکسوکندنده فعال می‌باشد. در هنگامی که ولتاژ سیستم افت نماید، مشخصه حد وابسته به ولتاژ فرمان جریان  $VDCOL$  باعث می‌شود تا فرمان جریان متناسب با ولتاژ سیستم کاهش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

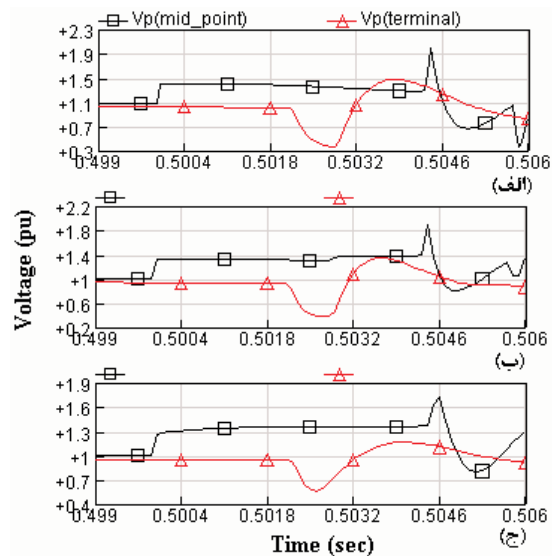
جدول (۱): دامنه اضافه ولتاژ برای ترکیبات مختلف فیلتر

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.



کمتر از نقاط نزدیک به خطا می باشد. حداقل زمان پیشانی موج در این حالت ها به ترتیب ۲۰۰ و ۹۵۰ میکروثانیه مشاهده شده است.

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

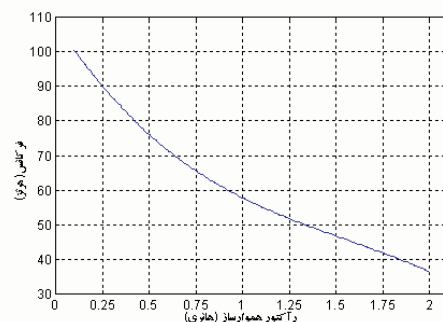
تغییر اندوکتانس راکتور هموارساز در حالت (و) از مقدار ۰/۱ H تا ۱ H حداکثر اضافه ولتاژ را از ۱/۷۴ pu تا ۱/۳۵ pu کاهش می دهد. افزایش راکتور هموارساز نرخ تغییرات جریان را محدودتر می نماید. بنابراین باعث کاهش دامنه اضافه ولتاژ می شود.

### 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 اضافه ولتاژ از ۰/۱۷۴pu به ۱/۵pu کاهش می یابد. مقاومت خطا دامنه جریان مود صفر را محدود ساخته و ضریب میرایی آن را افزایش می دهد. با تغییر مقاومت خاک از  $(\Omega \cdot m)$  ۱۰ تا  $(\Omega \cdot m)$  ۱۰۰۰ تأثیر چندانی بر اندازه اضافه ولتاژها مشاهده نگردید (کمتر از ۳ درصد).

### ۲-۷- شبیه سازی اضافه ولتاژ نوع AC

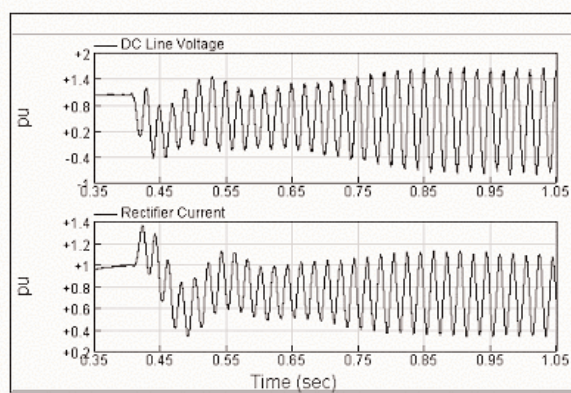
برای مطالعه اثر تشدید در حین بروز اضافه ولتاژهای نوع AC روی خط انتقال، رفتار فرکانس تشدید سیستم با تغییر مقدار راکتور هموارساز بررسی شده است. برای این منظور از امکانات موجود در نرم افزار EMTDC (بلوک های Current Injection Harmonic و FFT) استفاده شده است [۱۱]. فرکانس تشدید سیستم بر حسب مقادیر مختلف اندوکتانس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



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

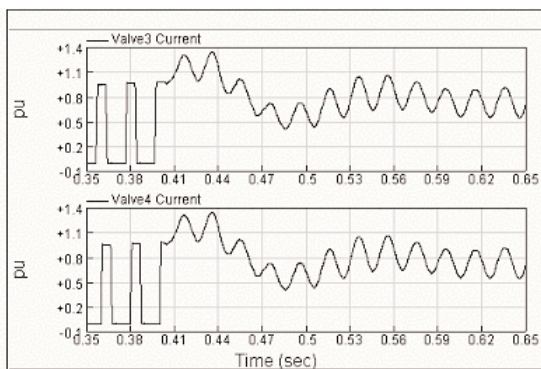
مشاهده می گردد که فرکانس تشدید خط انتخابی با راکتور هموارساز ۱/۳۵ هرتزی، تقریباً برابر ۵۰ هرتز می باشد. بنابراین انتظار می رود در صورت بروز خطا در مبدل حداکثر اضافه ولتاژها در این مقدار صورت گیرد.

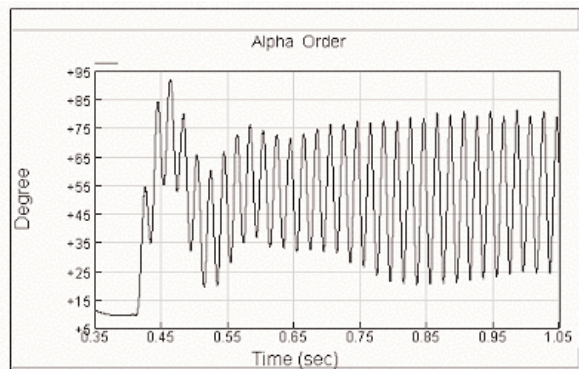
نتایجی که ابتدا ارائه می شود، مربوط به حالتی است که پالس های آتش در یکی از مبدلهای سری اینورتری قطع گردد. در شکل (۱۱) منحنی های جریان و ولتاژ خط DC با  $L_{DC} = 1H$  پس از خطا نشان داده شده است. در این شکل ها حداکثر اضافه ولتاژ ۱/۷ پرینیت می باشد و این در حالی است که متوسط ولتاژ در حدود ۰/۵ pu (چون نیمی از اینورتر بلوکه شده است) و متوسط جریان DC بلحاظ عملکرد تابع VDCOL و کنترل جریان در ۰/۷۵ pu محدود شده است.



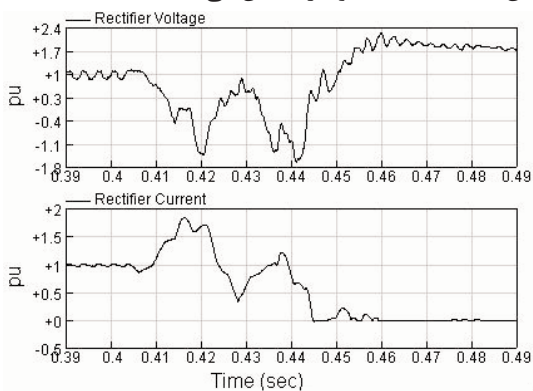
شکل (۱۱): ولتاژ و جریان خط DC پس از قطع پالس های آتش یکی از مبدل های اینورتر

در شکل (۱۲)، جریان والوهای ۳ و ۴ که قبل از بروز خطا هدایت می کرده اند و پس از خطا نیز به هدایت خود ادامه می دهند، نشان داده شده است.

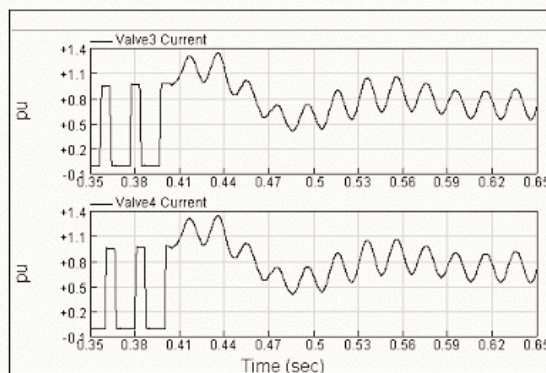




شکل (۱۴): فرمان زاویه آتش کنترل کننده پس از بروز خطا در مبدل کنترل کننده برای تنظیم جریان در مقدار مشخص شده، با فرکانس تغییرات جریان، مقدار زاویه را تغییر می‌دهد. البته در چنین شرایط مشخصات دیگر کنترلی نظیر محدودیت در نرخ تغییر زاویه آتش مبدل نیز بسیار با اهمیت است. مشاهده اضافه‌ولتاژهای حالت (ب) در 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.

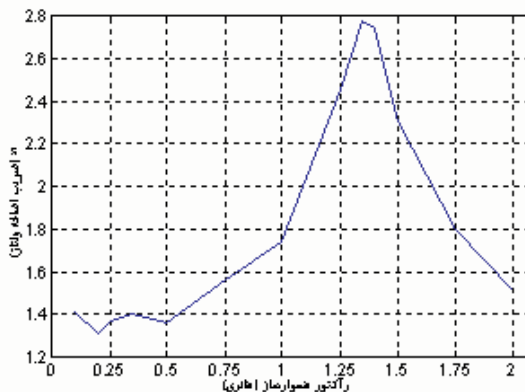


شکل (۱۵): جریان و ولتاژ طرف یکسوکننده پس از بلوکه شدن اینورتر (کنترل عادی)



شکل (۱۲): جریان والوها پس از خطا

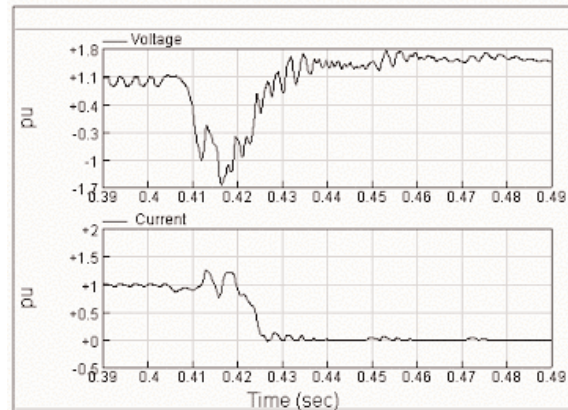
در ادامه برای مقادیر مختلف راکتور هموارساز حداکثر اضافه‌ولتاژهای AC روی خط DC تعیین گردیده که نتایج آن در شکل (۱۳) نشان داده شده است. ضریب  $n$  نسبت اضافه‌ولتاژ به ولتاژ مستقیم نامی است.



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.

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 می‌شود این عمل دامنه اضافه‌ولتاژها را تا زیر ۱/۷ pu کاهش می‌دهد.

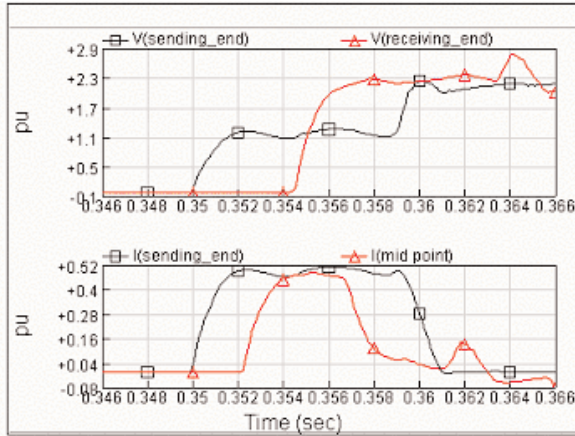


شکل (۱۶): جریان و ولتاژ در طرف یکسوکننده پس از بلوکه شدن کامل اینورتر (کنترل با کاهش فرمان جریان)

یک راه دیگر کاهش دامنه اضافه‌ولتاژ این است که بلافاصله پس از بروز خطا یکی (یا بیشتر) از گروه‌های والو یکسوکننده نیز بلوکه شود. در این حالت دامنه اضافه‌ولتاژ به زیر ۱/۹ pu کاهش می‌یابد. هر چه سرعت عمل کنترل کننده بیشتر باشد، میزان کاهش اضافه‌ولتاژ بیشتر خواهد بود. بعنوان مثال اگر عکس‌العمل کنترل کننده کمتر از ۲ میلی‌ثانیه طول بکشد، هیچ‌گونه اضافه‌ولتاژی روی نخواهد داد.

### ۷-۳- شبیه‌سازی اضافه‌ولتاژ نوع DC

برای بررسی اضافه‌ولتاژهای نوع DC در هنگام راه‌اندازی 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 پالس‌های اینورتر به خط DC اعمال می‌گردد. شکل موج ولتاژ و جریان خط DC در ابتدا، وسط و انتهای خط در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

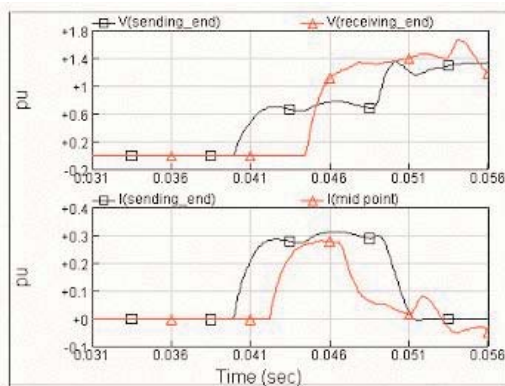


شکل (۱۷): شکل موج جریان ولتاژ در ابتدا، وسط و انتهای خط DC

در شرایط راه‌اندازی با انتهای باز

مشاهده می‌شود پس از راه‌اندازی، پرش اولیه ولتاژ در ابتدای خط در حدود ۱/۱۵ pu می‌باشد این موج پس از ۲/۲ میلی‌ثانیه به وسط خط و پس از ۴/۴ میلی‌ثانیه به انتهای خط می‌رسد. در انتهای خط ولتاژ دو برابر شده (۲/۳ pu) و دوباره به سمت یکسوکننده بر می‌گردد. دامنه موج بر اثر انعکاسات متوالی در دو انتهای خط افزایش یافته و در انتهای خط مقدار آن به ۲/۸ pu می‌رسد. با توجه به مقدار  $Z_C = 281 \Omega$  پرش اولیه جریان با رجوع به رابطه (۲۰)،  $1.15/2.25 = 0.51$  pu می‌باشد که نتایج شبیه‌سازی نیز این موضوع را تأیید می‌کند (پایین شکل (۱۷)).

در راه‌اندازی تدریجی پرش اولیه ولتاژ و جریان کمتر است. در نتیجه حتی پس از انعکاسات متوالی مقدار آن افزایش چندانی پیدا نمی‌کند. در شکل (۱۸) به ترتیب منحنی‌های ولتاژ و جریان در راه‌اندازی تدریجی نشان داده شده است.



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

## 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 DC و AC 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	
$500 \text{ kV (P-P)}$	$230 \text{ kV (L-L)}$	$345 \text{ kV (L-L)}$	ولتاژ
$1000 \text{ MW}$	$1000 \text{ MW}$	$1000 \text{ MW}$	توان
$250 \Omega$	$52/9 \Omega$	$119/3 \Omega$	امپدانس
$2000 \text{ A}$	-	-	جریان
-	$50 \text{ Hz}$	$50 \text{ Hz}$	فرکانس

