

# شبیه سازی سیستم HVDC در حالت تک قطبی و تک قطبی همراه با یک خط انتقال AC موازی

محمد هادی اصلی نژاد  
بخش مهندسی برق  
دانشگاه فنی دانشگاه تربیت معلم آذربایجان  
[Hadiasli80@yahoo.com](mailto:Hadiasli80@yahoo.com)

محمدآب روشن  
بخش مهندسی برق  
دانشگاه فنی  
دانشگاه تربیت معلم آذربایجان  
[Mohammad\\_abroshan@yahoo.com](mailto:Mohammad_abroshan@yahoo.com)

مهدی دانشور  
بخش مهندسی برق  
دانشگاه فنی  
دانشگاه تربیت معلم آذربایجان  
[Danesh\\_102@yahoo.com](mailto:Danesh_102@yahoo.com)

**چکیده:** در این مقاله به بررسی چند سیستم نمونه HVDC می پردازیم و آنها را شبیه سازی خواهیم نمود. به طور کلی این مقاله دو سیستم را شبیه سازی می نماید که عبارتند از یک سیستم تک قطبی برای انتقال انرژی به یک بار DC و سیستم تک قطبی همراه با یک خط انتقال AC موازی برای تبادل انرژی میان دو سیستم با فرکانس یکسان به هر دو صورت AC و DC. شبیه سازی ها در محیط نرم افزار MATLAB انجام می گیرد، با استفاده از بخش قدرت این نرم افزار می توان اکثر سیستم های قدرت را شبیه سازی نمود.

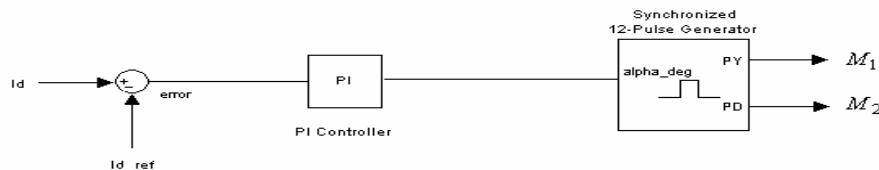
**کلید واژه:** شبیه سازی ، تک قطبی ، هارمونیک، HVDC

## ۱- مقدمه

در این قسمت به شرح بخش های مشترک میان سیستم های شبیه سازی می پردازیم تا پس از شناخت این مباحث شبیه سازی HVDC را انجام دهیم.

### ۱-۱ سیستم کنترل

سیستم کنترل این شبیه سازی به صورت PI می باشد با توجه به شکل (۱) روند کنترل را شرح می دهیم.



شکل (۱) سیستم کنترل

سیستم کنترل به صورت یک حلقه بسته است بدین صورت که از جریان خروجی نمونه برداری می شود و با یک جریان مرجع مقایسه می شود و خروجی بدست می آید. با توجه به شکل مشاهده می شود که ورودی سیستم کنترل جریان خط انتقال DC می باشد که در یک مقایسه کننده میان این

ورودي و يك جريان مرجع مقايسه اي صورت مي گيرد، پس از اين مرحله سيگنال وارد يك بلوك PI مي شود، تابع تبديل اين بلوك به شكل مقابل است:

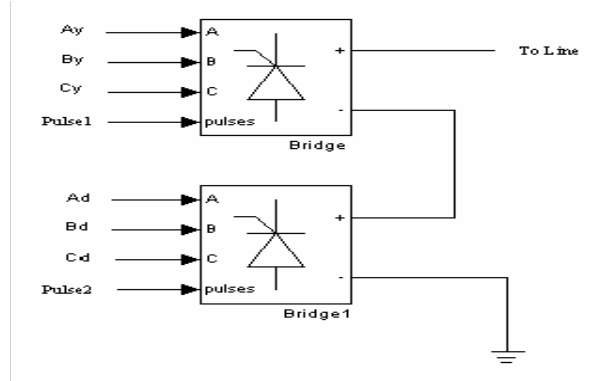
$$K_p + \frac{K_i}{S} \quad (1)$$

که ثابت هاي، رابطه با توجه به المان هاي مدار بدست مي آيد، در اينجا  $K_p=65$  و  $K_i=5000$  مي باشد، پس از اين مرحله سيگنال به شكل زاويه آتش تريستورها است.

سيگنال زاويه آتش وارد بلوكي مي گردد که در آن اين زاويه تبديل به پالس هايي براي دو مبدل ۶ پالسي مي گردد. هر دسته پالس به يك واحد انتقال مي يابد تا زمان روشن و خاموش شدن تريستورها مشخص گردد. با توجه به سيستم کنترل مي توان اندازه جرياني را که از مبدل ها خارج مي شوند با تغيير جريان مرجع تغيير داد، همچنين مي توان براي آن تابعي بر حسب زمان و يا هر عنصر ديگر تعريف نمود.

### ۱-۲- اتصال مبدل ها و ترانسفورماتور

ترانسفورمري که براي اين منظور در نظر گرفته شده است داراي يك سيم پيچ سه فاز اوليه و دو سيم پيچ ثابتي سه فاز است که براي هر مبدل يك سيم پيچي در نظر گرفته شده است. اتصال يکي از ترانسفورمرها به صورت Y-Y و ديگري به صورت Y-Δ مي باشد. در شکل (۲) مي توان دياگرام اتصال اين دو مبدل را مشاهده نمود.



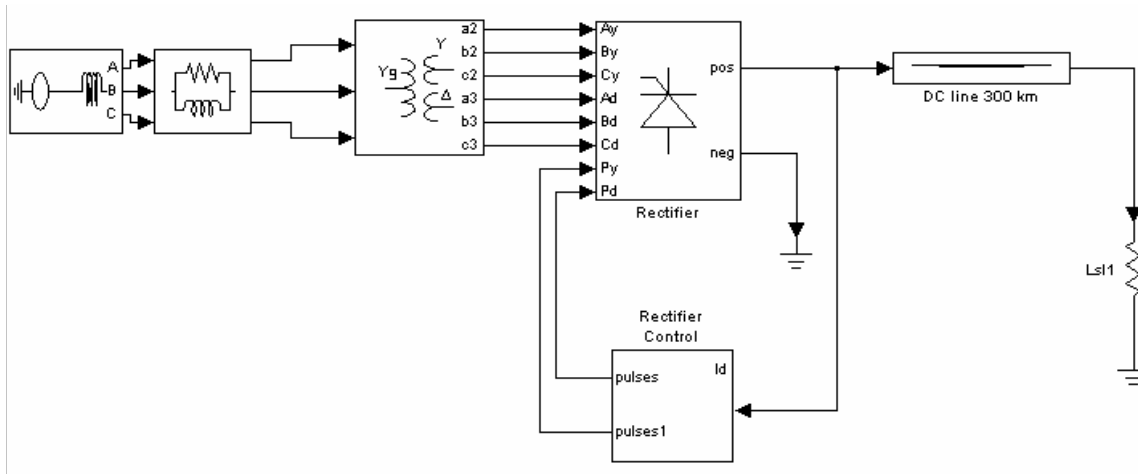
شکل (۲) نحوه اتصال مبدل ها

### ۲- شبیه سازی سیستم تک قطبي انتقال انرژي به بار DC

سیستم مورد نظر از يك ژنراتور تشكيل يافته است که توسط يك ترانسفورمر به مبدل ۱۲ پالسه متصل گرديده است، تنها سيستم مبدل يکسوکنده مي باشد و عمل تبديل ولتاژ و جريان AC را به DC بر عهده دارد، پس از فرايند يکسوسازي انرژي توسط يك خط انتقال DC که پارامترهاي آن در جدول (۱) ارائه شده است به مصرف کننده منتقل مي گردد. شکل (۳) دياگرام کلي سيستم را نشان مي دهد.

جدول (۱) مشخصات سيستم تک قطبي انتقال انرژي به بار DC

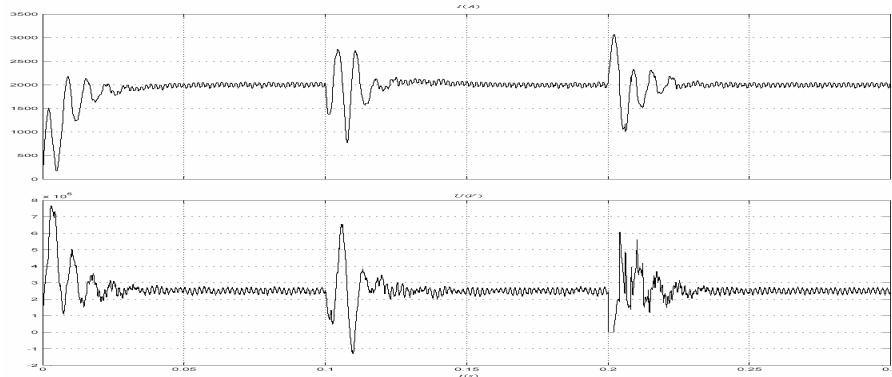
Generator	$U_n=400KV$
Transformer	$U_n=400KV, S_n=500MVA$
Series Reactor in DC side	$R=0.1\Omega, L=1H$
DC line	$L=300KM$ $R=0.015\Omega$ per unit length $C=14nF$ per unit length $L=0.5mH$ per unit length
Active load	$P=500MW$



شکل (۳) حالت کلی سیستم

## ۲-۱- خطا در سیستم

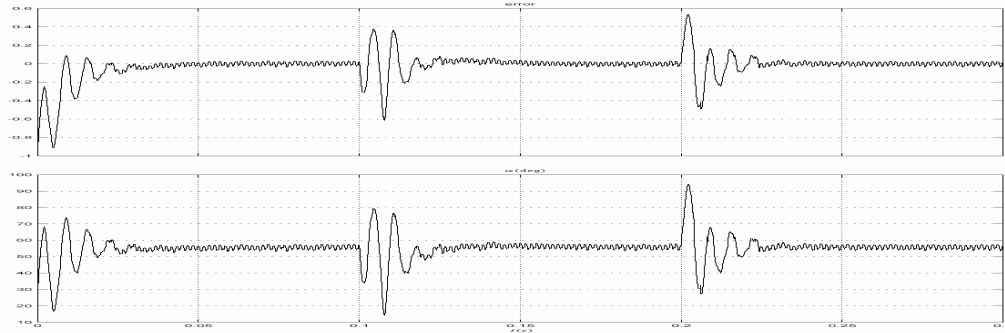
در سیستم دو خطی اتصال به زمین ایجاد می‌نماییم و پاسخ سیستم به این خطاها را مشاهده می‌کنیم، ابتدا خطای اتصال کوتاه در سمت AC در لحظه  $t=0.1s$  به مدت  $0.1s$  سپس یک اتصال کوتاه در سمت DC در لحظه  $t=0.2s$  به مدت زمان  $0.005s$  رخ می‌دهد. به دلیل اینکه سیستم دارای ابزارهایی برای قطع مدار اتصال کوتاه نمی‌باشد باید با توجه این نکته که اگر ولتاژ یکسوکنده در یک لحظه صفر گردد اگر حتی خطا هم رفع گردد دیگر ولتاژ به مقدار قبلی نمی‌رسد و صفر باقی می‌ماند، پس باید به این نکته توجه داشت که نباید مدت زمان خطای اتصال کوتاه در سمت DC مقداری باشد که ولتاژ یکسوکنده به صفر برسد. شکل (۴) نمودار ولتاژ و جریان DC را در مدت زمان  $t=0.3s$  با وقوع خطا نشان می‌دهد.



شکل (۴) ولتاژ و جریان DC با خطای AC و DC

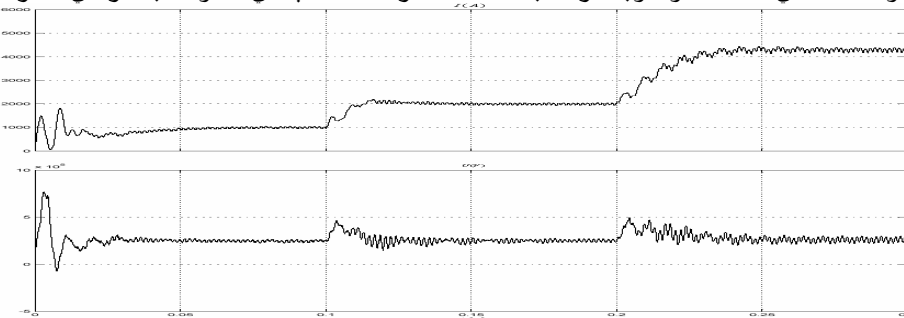
## ۲-۲- نمودار ورودی و خروجی PI

با توجه به توضیحات بخش PI، ورودی PI، سیگنال خطایی است که تفاضل جریان واقعی سیستم و جریان مرجع می‌باشد و همچنین خروجی نیز به صورت زاویه آتش تریستورها است. در شکل (۵) ورودی و خروجی PI را مشاهده می‌نماییم.



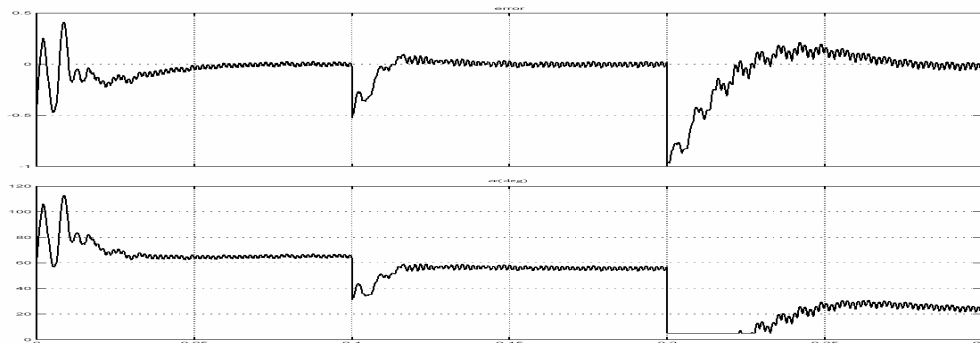
شکل (۵) ورودی و خروجی PI  
۲-۳- پاسخ سیستم به تغییرات جریان مرجع یکسوکنده

شکل (۶) ولتاژ و جریان DC را نشان می دهد که در آن ابتدا جریان مرجع برابر  $I=1000A$  بوده سپس در لحظه  $t=0.1s$  جریان مرجع به  $I=2000A$  و سپس در لحظه  $t=0.2s$  جریان مرجع را به  $I=4000A$  می رسانیم با توجه منحنی مشاهده می کنیم که جریان DC به سرعت مقدار مرجع را دنبال می کند و نیز ولتاژ هم در لحظه تغییر پله ای جریان مرجع دارای نوساناتی است و دوباره به مقدار 0.1 قبلی خود بازمی گردد.



شکل (۶) ولتاژ و جریان DC با تغییر جریان مرجع

در شکل (۷) نمودار ورودی و خروجی PI را مشاهده می کنیم. در لحظات تغییر جریان مرجع با توجه به اینکه به طور لحظه ای جریان مرجع از جریان واقعی سیستم بیشتر می شود سیگنال خطا منفی می گردد ولی به سرعت به مقدار صفر می رسد.



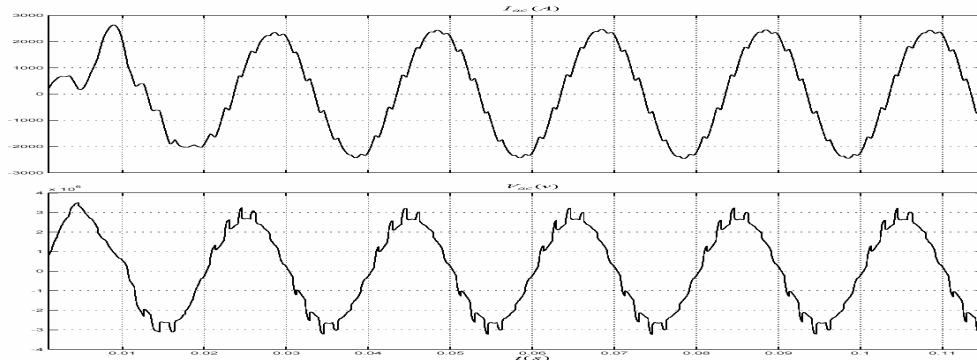
شکل (۷) سیگنال خطا و زاویه آتش

نمودار زاویه  $\alpha$  (زاویه آتش تریستورها) بین صفر تا  $0.1s$  که جریان مرجع 1000 آمپر است، ثابت و برابر 65 درجه است و در لحظه  $0.1s$  که جریان مرجع 2000A می شود تا حدود 30 درجه پایین آمده و دوباره بالا رفته به مقدار 55 درجه می رسد در پله دوم نیز در لحظه اول به زاویه 5 درجه

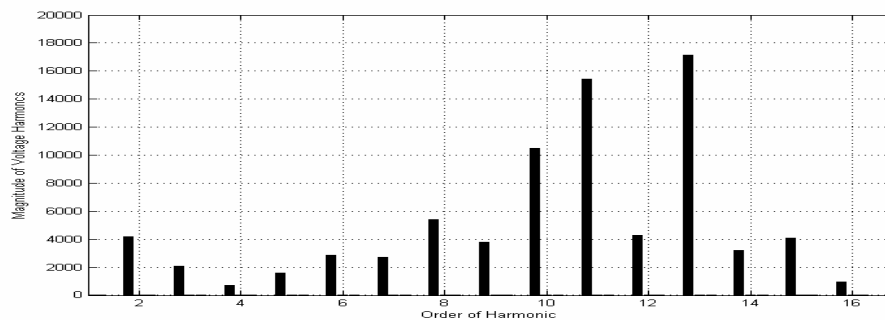
که می نیمم مقدار تعیین شده برای  $\alpha$  می باشد می رسد و سپس دوباره بالا رفته و در 25 درجه ثابت می ماند.

## ۲-۴- هارمونیک های جریان و ولتاژ درست AC

در شکل (۸) منحنی های ولتاژ فاز به زمین و جریان خط در سمت AC رسم شده است. با استفاده از نمودار میله ای میزان هارمونیک های ولتاژ را از مرتبه ۲ تا ۱۶ مشخص می نمایم ذکر این نکته مهم است که ولتاژ منبع  $400/\sqrt{3}KV$  (فاز به زمین) می باشد. در شکل (۹) مشاهده می شود که هارمونیک های ۱۱ و ۱۳ بالاترین دامنه را دارند (11th=15.5KV و 13th=17KV).

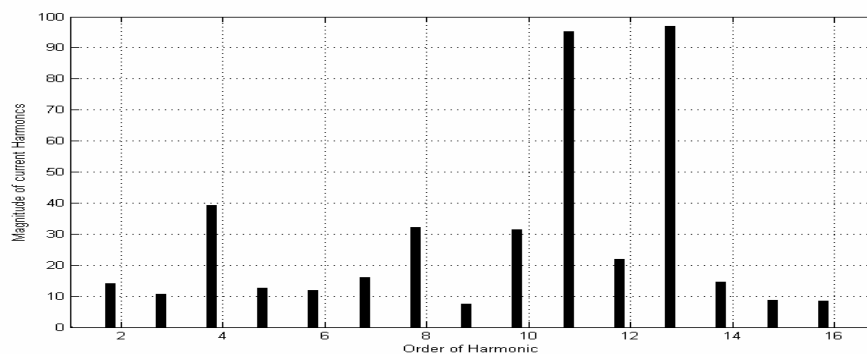


شکل (۸) جریان و ولتاژ AC



شکل (۹) دامنه هارمونیک های ولتاژ

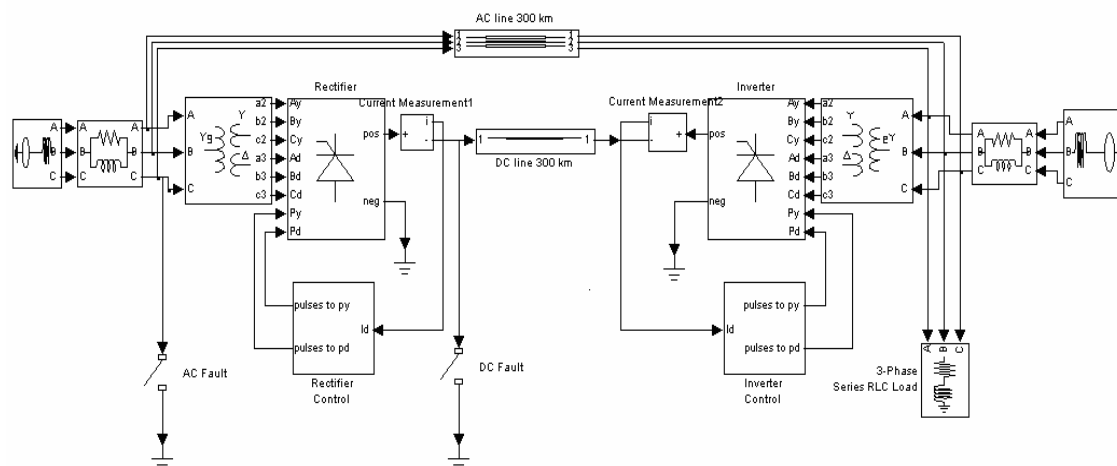
در شکل (۱۰) نیز اندازه هارمونیک های جریان رسم شده اند، در جریان نیز مانند ولتاژ هارمونیک های ۱۱ و ۱۳ بالاترین میزان را دارند.



شکل (۱۰) دامنه هارمونیک های جریان

### ۳- شبیه سازی خط HVDC با خط AC موازی با آن

دیاگرام کلی این سیستم در شکل (۱۱) ترسیم شده است همچنین در جدول (۲) مشخصات سیستم آورده شده است، لازم به ذکر است که اختلاف فاز بین منابع ۵۰ درجه می باشد. در این نوع از سیستم با تغییر در جریان انتقالی از طریق خط انتقال DC می خواهیم تغییرات در توان انتقالی از طریق خط انتقال AC را بررسی نماییم. شکل (۱۲) جریان و توان انتقالی از طریق خط انتقال AC را نشان می دهد در این نمودار جریان انتقالی از طریق خط انتقال DC برابر ۲۰۰۰A می باشد، پیک جریان AC در حدود ۲۴۰۰A و توان انتقالی AC نیز تقریباً  $10 \times 10^8$  وات می باشد. شکل (۱۳) نیز جریان و توان انتقالی از خط DC را مشخص نموده است ( $P_{dc} = 6 \times 10^8$ ).

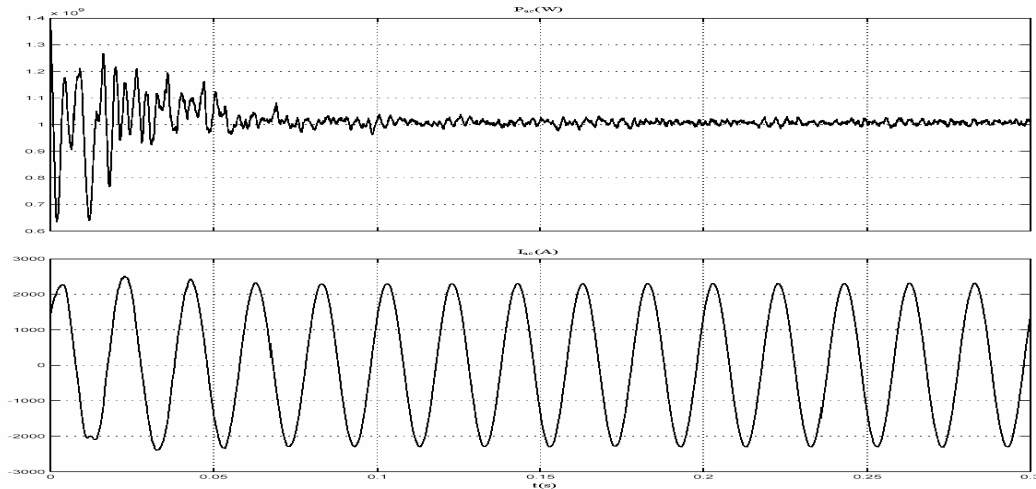


شکل ۱۱ دیاگرام کلی سیستم

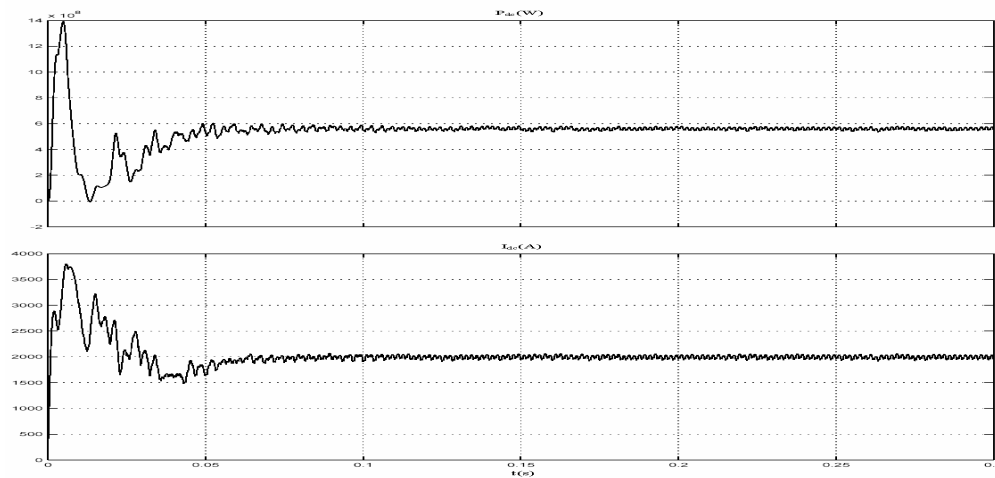
حال جریان مرجع را به ۴۰۰۰A می رسانیم و دوباره نمودارهای جریان و توان را به دست می آوریم (نمودار (۱۴) و (۱۵)). همانگونه که در نمودارها نیز مشاهده می شود زمانی که توان انتقالی از طریق خط انتقال DC افزایش می یابد توان انتقالی از طریق خط AC کاهش می یابد، در این مورد توان AC به مقدار  $P_{ac} = 7 \times 10^8$  وات می رسد و توان انتقالی از طریق خط DC برابر است با  $13 \times 10^8$ .

جدول (۲) مشخصات سیستم خط انتقال HVDC با خط انتقال موازی با آن

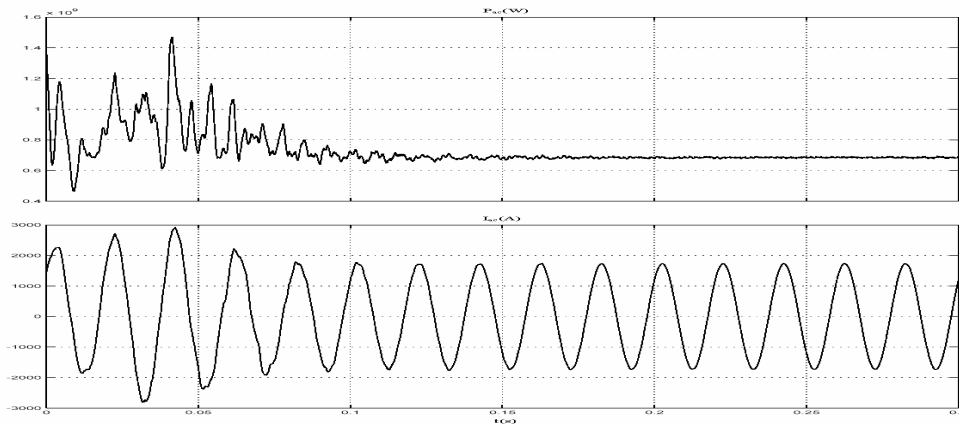
Generator <sub>rec</sub> & Generator <sub>inv</sub>	$U_n = 400KV, f = 50HZ$
Transformer <sub>rec</sub> & Transformer <sub>inv</sub>	$U_n = 400KV, S_n = 500MVA$
Series Reactor in DC side	$R = 0.1\Omega, L = 1H$
Shunt Capacitor	$C = 10\mu f$
DC line	$L = 300KM$ $R = 0.015\Omega$ per unit length $C = 14nF$ per unit length $L = 0.5mH$ per unit length
AC line	$L = 300KM$ $R = 0.015\Omega$ per unit length $C = 15nF$ per unit length $L = 0.8mH$ per unit length



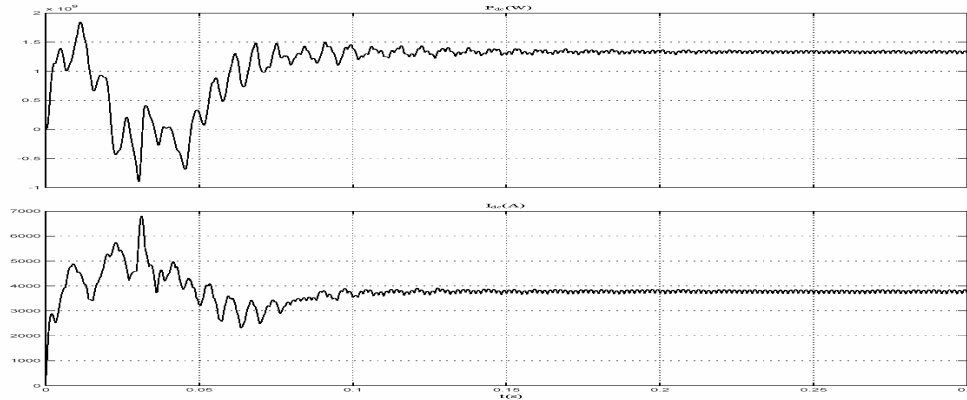
شکل ۱۲ توان انتقالی و جریان خط انتقال AC، در جریان مرجع 2000A



شکل ۱۳ توان انتقالی و جریان خط انتقال DC، در جریان مرجع 2000A

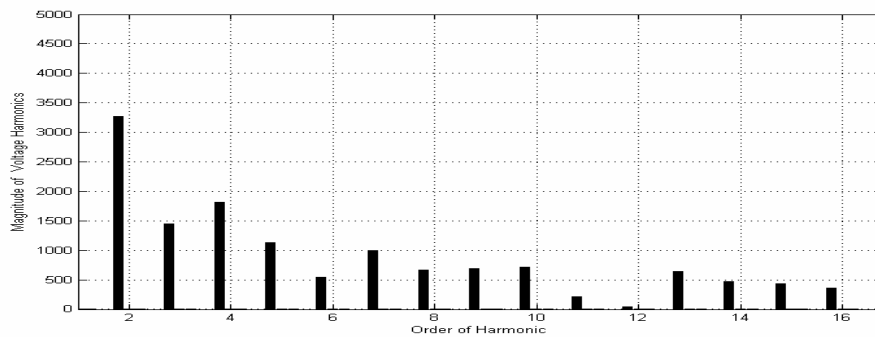


شکل ۱۴ توان انتقالی و جریان خط انتقال AC، در جریان مرجع 5000A

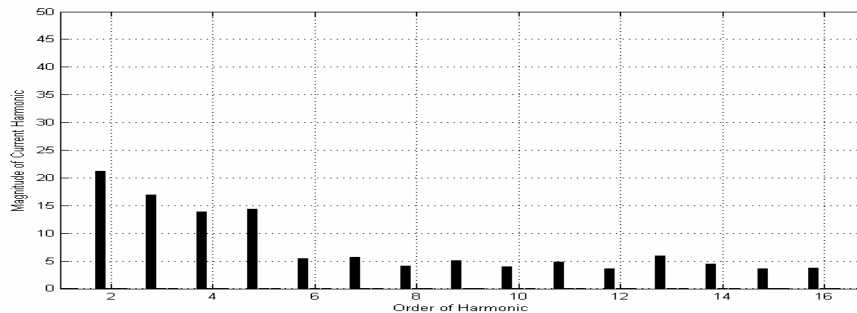


شکل ۱۵ توان انتقالی و جریان خط انتقال DC، در جریان مرجع 4000A  
**۳-۱- هارمونیک های جریان و ولتاژ**

در شکل (۱۶) دامنه هارمونیک های ولتاژ را به صورت میله ای ترسیم شده است، در این شبیه سازی از فیلتر های ۱۱ و ۱۳ استفاده شده است. دامنه این هارمونیک ها محدود گردد. شکل (۱۷) دامنه هارمونیک های جریان را نشان می دهد.



شکل ۱۶ دامنه هارمونیک های ولتاژ



شکل ۱۷ دامنه هارمونیک های جریان

#### ۴- نتیجه گیری

در تمام سیستم های شبیه سازی شده مشاهده می شود که پاسخ سیستم به تغییرات فرکانس و ولتاژ سیستم ها بسیار سریع می باشد. مساله هارمونیک ها یکی از مشکلاتی است که در سیستم های HVDC وجود دارد، مبدل ها باعث ایجاد هارمونیک ها در شبکه های متصل به آنها می باشند، با توجه به شبیه سازیها بیشترین دامنه هارمونیک ها مربوط

به هارمونيك مرتبه ۱۱ و ۱۳ مي باشد كه با استفاده از فيلترها مي توان دامنة اين هارمونيك ها را کاهش داد.

## ۵- مراجع

[1] . Rao S , " EHV – AC , HVDC Transmission & Distribution Engineering " , Khanna Publishers 2-B NathMarket , Nai Sarak Delhi – 110006 , Thirth Edition , 1999