

عملکرد سیستم‌های HVDC و کنترل آن در برابر اغتشاشات

منصوره نیکیان قویدل

موسسه آموزش عالی صدرالمتالهین

m_nikian@yahoo.com

چکیده - بعنوان قلب یک سیستم HVDC عملکرد و کنترل مبدل‌های آن از اهمیت اساسی برخوردار است. یک سیستم انتقال HVDC تا حد زیادی کنترل‌پذیر است. استفاده‌ی مؤثر از آن به بهره‌وری مناسب از این کنترل‌پذیری (به منظور اطمینان از عملکرد مطلوب سیستم قدرت) بستگی دارد. با هدف تأمین بهره‌برداری مؤثر و پایدار و حداکثرسازی قابلیت انعطاف کنترل توان و بدون به مخاطره انداختن ایمنی تجهیزات، از سطوح مختلف کنترلی بصورت سلسله مراتبی استفاده می‌شود. یکی از شروط مهم عملکرد رضایت‌بخش خط ارتباطی HVDC، کنترل سریع مبدل‌ها به منظور جلوگیری از تغییرات شدید در جریان مستقیم است. در این مقاله با استفاده از سیستم کنترلی که برای مبدل‌ها طراحی شده است می‌توانیم به نحو مطلوبی خروجی را در برابر اغتشاشات کنترل کنیم. با استفاده از نرم‌افزار pscad سیستم مورد مطالعه که یک سیستم دو ناحیه‌ای است که با یک خط DC به هم مرتبط شده است مدل‌سازی شده است. همچنین عملکرد این سیستم در حالت عادی و در حالتی که یک خطا اتفاق افتد نشان داده شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌ها دیده می‌شود که سیستم عملکرد مناسبی دارد.

کلیدواژه- HVDC، اینورتر، یکسوساز، کنترل

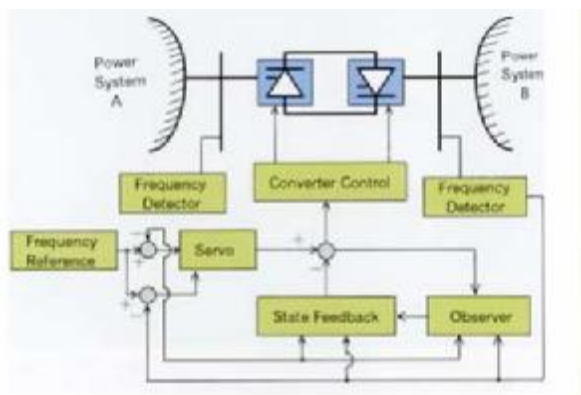
1- مقدمه

HVDC برای اتصال شبکه‌های ناهم‌بند و یا بهبود پایداری و حفظ سطح اتصال کوتاه شبکه‌های AC متصل به آنها با کنترل‌پذیری بالایی که دارند، نیز استفاده می‌گردند [1]. امروزه با توجه به پیشرفت‌های وسیعی که در ساخت ادوات نیمه‌هادی با توان‌های بالاتر و قیمت‌های ارزانتر صورت گرفته است، انتقال به صورت HVDC بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

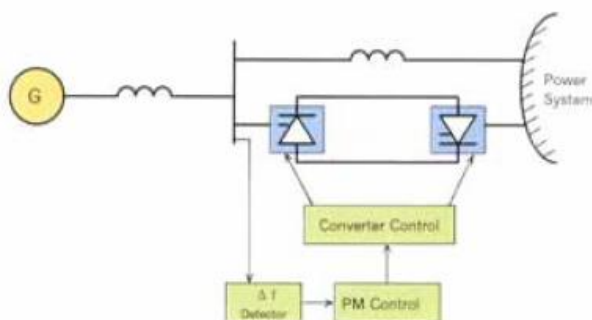
2- عملکرد کلی سیستم HVDC

همانطور که در این شکل (1) نشان داده شده است دو مبدل الکترونیک قدرت در دو انتها وظیفه تبدیل انرژی را به عهده دارند که یکی به صورت یکسوکننده و دیگری به صورت اینورتر عمل می‌نماید. توان از طریق خط DC، از طرف یکسوکننده به طرف اینورتر جریان می‌یابد. جریان عبوری از خط و ولتاژ آن یکسوشده و بصورت مستقیم می‌باشد. با توجه به خصوصیات مبدل‌های بکارگرفته شده می‌توان جهت و اندازه انتقال توان

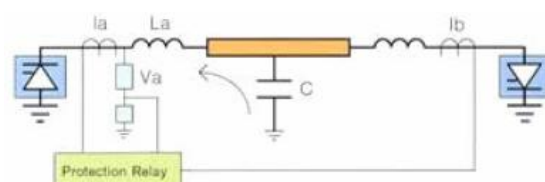
برای انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاه‌ها به مصرف‌کنندگان، یک سیستم بهم پیوسته مورد نیاز می‌باشد. این سیستم شامل مراکز تولید انرژی، ایستگاه‌ها، خطوط انتقال و یا کابل‌ها و مصرف‌کنندگان می‌باشد. به علت سهولت تولید و تبدیل ولتاژ و جریان متناوب AC نسبت به جریان مستقیم DC، جریان متناوب سه‌فاز به عنوان جریان عمومی و عمده سیستم‌های قدرت پذیرفته شده و کلیه تجهیزات و لوازم الکتریکی مصرف‌کنندگان با این سیستم سازگار می‌باشند. تولید جریان مستقیم و تبدیل آن خصوصاً در مقادیر بزرگ، بسیار مشکل بوده و نسبت به جریان متناوب بسیار گران می‌باشد. اما انتقال انرژی الکتریکی با استفاده از سیستم‌های جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC) به عنوان مکمل سیستم‌های AC و حتی در مواردی جایگزین آنها مطرح می‌باشد. علاوه بر این سیستم‌های



شکل (3): کنترل فرکانس سیستم قدرت با پیوند HVDC



شکل (4): کنترل میرایی نوسانات سیستم قدرت با پیوند HVDC

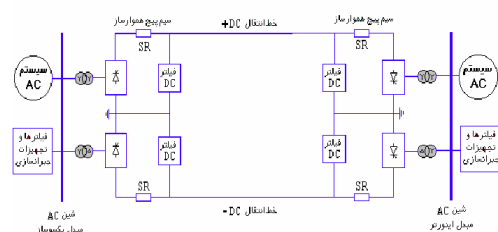


شکل (5): کنترل جریان خطا در خط با پیوند HVDC

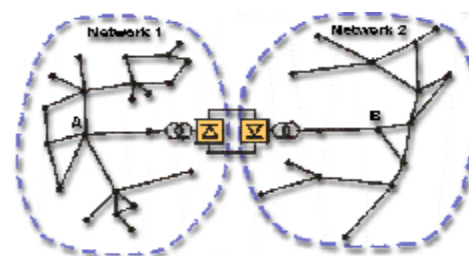
4- عملکرد مبدل‌های HVDC

بعنوان قلب یک سیستم HVDC عملکرد و کنترل مبدل‌های آن از اهمیت اساسی برخوردار است. عنصر پایه مبدل‌های HVDC یک پل گرتس 6 پالسه می‌باشد. این پل‌ها اصولاً بر مبنای کموتاسیون خط کار نموده و بواسطه وجود سلف‌های بزرگ و جریان صاف در سمت DC به آنها مبدل‌های مبتنی بر منبع جریان یا CSC اطلاق می‌شود [6]. در شکل (6) عملکرد این مبدل‌ها در یک سیستم ساده HVDC شش پالسه و همچنین در یک مبدل 12 پالسه نشان داده شده است [7].

بین دو شبکه متناوب مبدأ و مقصد که ممکن است ناهماهنگ (با فرکانس‌های متفاوت) نیز باشند (شکل 2) را کنترل نمود. ایستگاه‌های مبدلی یکسوساز و اینورتر بدلیل عملیات کلیدزنی باعث تولید هارمونیک در شبکه می‌گردند و توان راکتیو نسبتاً بالایی را مصرف می‌نمایند. در نتیجه در شین AC متصل به مبدل‌های HVDC احتیاج به تجهیزات فیلتر و جبران‌سازی توان راکتیو خواهد بود. در سمت DC نیز برای صاف شدن جریان از راکتورهای نسبتاً بزرگی بنام راکتور هموارساز و همچنین برای حذف هارمونیک‌های فرکانس بالای ولتاژ DC از فیلترهای DC استفاده می‌گردد [2].



شکل (1): سیم دو ناحیه‌ای که با HVDC به هم مرتبط شده است.



شکل (2): دو ناحیه که با HVDC به هم مرتبط شده‌اند.

3- افزایش کنترل‌پذیری

به منظور حفظ ضریب قدرت سیستم حوالی مقدار 1، در سیستم AC، از بانک‌های خازنی استفاده می‌شود. این خازن‌ها اثر سلفی جریان راکتیو تولید شده توسط موتورها و دیگر تجهیزات را که به خط نیرو متصل هستند، کاهش می‌دهد. سیستم HVDC، امکان کنترل مرکزی را فراهم می‌نماید. این نوع کنترل شامل مواردی نظیر کنترل فرکانس ثابت، توزیع مجدد توان در سیستم AC، میراسازی نوسانات شبکه‌ای AC و کنترل جریان خطا در خط DC و ... می‌شود. برخی از این موارد در شکل‌های (3) تا (5) نشان داده شده است [3و4].

در این روابط R_c موسوم به مقاومت کموتاسیون در واقع مدل کننده افت ولتاژ ناشی از همپوشانی والوهای تریستور در زمان کموتاسیون و بواسطه سلف های مسیر کموتاسیون می باشد. a زاویه آتش و g زاویه خاموشی می باشند که در شکل (6) بوضوح نشان داده شده اند. E_m حداکثر دامنه منابع AC در سمت اینورتر و یکسو کننده می باشد.

یکی از ویژگی های منفی مبدل های CSC مبتنی بر کموتاسیون خط احتمال بروز نقص کموتاسیون در مبدل های اینورتری در شرایط نامطلوب سیستم AC از جمله بروز خطا و افت ولتاژ در آن می باشد. در واقع بروز افت ولتاژ در سیستم AC و کافی نبودن زمان مورد نیاز برای خاموش شدن والو تریستوری بدلیل زاویه آتش بالا سبب می گردد که بویژه در مبدل های اینورتری عملیات کموتاسیون با موفقیت صورت نپذیرد. نقص کموتاسیون در شبکه های AC ضعیف محتمل تر بوده و سبب می گردد تا ولتاژ سمت AC مستقیماً به خط DC منتقل شده و مشکلاتی را بروز نماید.

5- اصول اساسی کنترل

خط ارتباطی HVDC را مطابق شکل (7) در نظر بگیرید که نمایشگر یک خط ارتباطی تک قطبی یا یک قطب از یک خط ارتباطی دوقطب است. مدار معادل مربوطه و دیاگرام برداری ولتاژ به ترتیب در این شکل نشان داده شده اند. جریان مستقیم از یکسوساز به اینورتر به صورت زیر است:

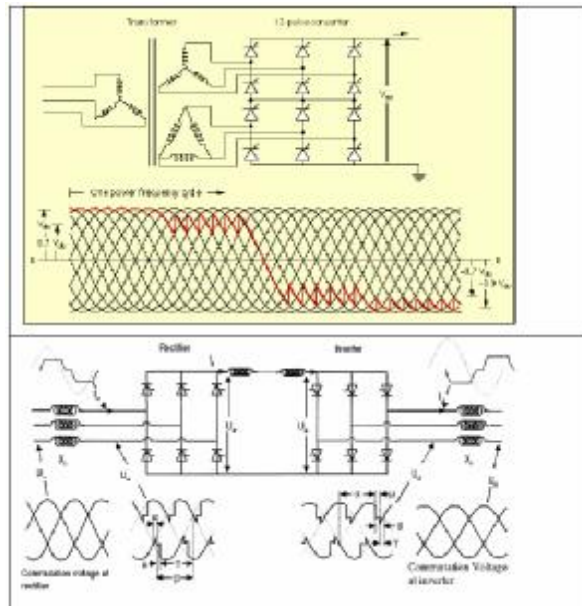
$$I_d = \frac{V_{d0r} \cdot \cos a - V_{d0i} \cdot \cos g}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \quad (3)$$

توان در پایانه های یکسوساز به صورت زیر؛

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \quad (4)$$

و در پایانه ای اینورتر به شکل زیر بیان می شود:

$$P_{di} = V_{di} I_d = P_{dr} - R_L I_d^2 \quad (5)$$



شکل (6): عملکرد مبدل های سیستم HVDC

تبدیل جریان بین سمت AC و DC با هدایت متوالی والوهای تریستوری و انتقال جریان یکسوشده صورت می گیرد. در کموتاسیون خط بایستی ولتاژ AC در دو سمت AC مبدل های یکسو کننده و اینورتر وجود داشته باشد. در بالای شکل (6) شکل موج خروجی نشان می دهد که مبدل ابتدا در مود یکسو کنندگی ($0 < a < 90$) و سپس در مود اینورتری ($90 < a$) کار نموده است. روابط ولتاژ DC در حالت یکسو کنندگی و اینورتری به صورت زیر است.

برای یکسو کننده،

$$V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha_r - R_{cr} I_{dr} \quad (1)$$

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_{mr}$$

$$R_{cr} = \frac{3}{\pi} X_{cr}$$

و برای اینورتر داریم،

$$V_{di} = V_{doi} \cos g_i - R_{ci} I_{di} \quad (2)$$

$$R_{ci} = \frac{3}{\pi} X_{ci}$$

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_{mi}$$

جلوگیری از کموتاسیون ناموفق در اینورترها و حالت معکوس هدایتی در یکسوسازهایی که از والوهای قوس جیوه‌ای استفاده می‌کنند [9].

یکی از شروط مهم عملکرد رضایت‌بخش خط ارتباطی HVDC، کنترل سریع مبدلها به منظور جلوگیری از تغییرات شدید در جریان مستقیم است. با مراجعه به معادله‌ی (1) دیده می‌شود که، مقاومت‌های خط و مبدل کوچک است، بنابراین، تغییر کوچکی در V_{d0r} یا V_{d0i} باعث تغییر بزرگی در I_d می‌شود. این موضوع به طور ضمنی دلالت بر این دارد که اگر a و g ثابت نگه داشته شوند، جریان مستقیم می‌تواند در مقابل تغییرات کوچکی در دامنه‌ی ولتاژ متناوب هر طرف، در محدوده‌ی وسیعی تغییر نماید. برای عملکرد رضایت‌بخش سیستم قدرت، چنین تغییراتی عموماً غیر قابل قبول است.

به علاوه، جریان حاصل ممکن است به اندازه‌ای زیاد باشد که باعث آسیب رسیدن به والوها و سایر تجهیزات شود. بنابراین برای عمل‌کرد صحیح سیستم، کنترل سریع مبدل به منظور جلوگیری از نوسان‌های جریان مستقیم، اساسی است. بدون چنین کنترلی، سیستم HVDC غیر عملی است.

برای یک توان انتقالی مشخص، باید دیاگرام برداری ولتاژ مستقیم در طول خط، نزدیک به مقدار نامی باشد. این موضوع منجر به حداقل سازی جریان مستقیم و در نتیجه تلفات می‌شود. دلایل مختلفی برای حفظ مقادیر بالای ضریب توان وجود دارد که از جمله‌ی آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

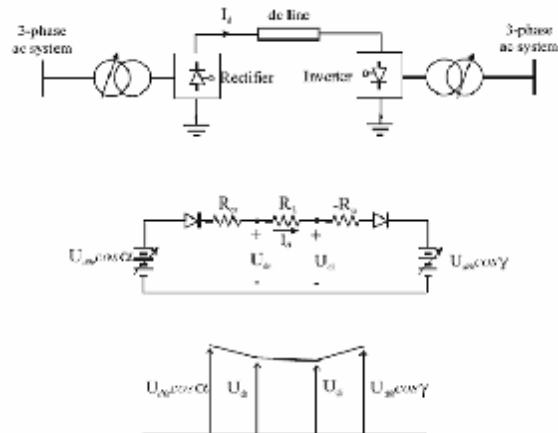
الف) حفظ توان نامی مبدل تا حد ممکن در مقادیر بالا، برای ظرفیت‌های مشخص ولتاژ و جریان ترانسفورمر و والو؛

ب) کاهش تنش در والوها؛

ج) حداقل سازی تلفات و ظرفیت جریان تجهیزات در سیستم جریان متناوبی که مبدل به آن متصل شده است؛

د) حداقل سازی افت ولتاژ در پایانه‌های جریان متناوب در مقابل افزایش بار؛

هـ) حداقل سازی هزینه‌ی تأمین توان راکتیو به مبدلها؛



شکل (7): دیاگرام تک خطی، مدار معادل و پروفیل ولتاژ در یک سیستم تک‌قطبی HVDC [8]

5_1 ابزار اساسی کنترل

ولتاژ مستقیم در هر نقطه‌ی روی خط می‌تواند به کمک کنترل ولتاژهای داخلی $(V_{d0r} \cdot \cos a)$ و $(V_{d0i} \cdot \cos g)$ کنترل شود. این کار به وسیله‌ی کنترل درجه‌ی زاویه‌ی روشن شدن والو یا کنترل ولتاژ جریان متناوب از طریق تغییر تپ ترانسفورمر مبدل عملی می‌شود. کنترل درجه که سریع است (1 تا 10 میلی‌ثانیه) و تغییر تپ که کند است (5 تا 6 ثانیه به ازای هر گام)، بصورت مکمل استفاده می‌شوند. در ابتدا از کنترل درجه برای عملکرد سریع استفاده می‌شود و پس از آن به منظور باز گردان کمیت‌های مبدل a برای یکسوساز و g برای اینورتر) به محدوده‌ی معمول خود، از تغییر تپ استفاده می‌شود. معکوس کردن جهت انتقال توان با معکوس کردن پلاریته ولتاژهای مستقیم، در هر دو انتها صورت می‌پذیرد.

5_2 مبانی کنترل‌ها

ملاحظات زیر بر انتخاب مشخصه‌های کنترلی تأثیر می‌گذارد:

جلوگیری از تغییرات شدید در جریان مستقیم ناشی از تغییرات ولتاژ جریان متناوب سیستم؛

حفظ ولتاژ مستقیم در نزدیکی مقدار نامی؛

حفظ ضرایب توان در انتهای خطوط فرستنده و گیرنده تا حد ممکن در مقادیر بالا؛

6-1 - طراحی مدارهای اینورتر

در طراحی یک یکسوکننده باید مشخصات دیودهای نیمه‌رسانا را تعیین کرد. مشخصات دیودها به طور معمول بر حسب جریان متوسط، جریان مؤثر، پیک جریان و پیک ولتاژ معکوس بیان می‌شوند.

کنترل‌کننده طراحی شده مطابق شکل (13) با ورودی‌هایی که از جریان یکسوساز و ولتاژ و جریان اینورتر می‌گیرد زاویه آتش اینورتر را کنترل می‌کند.

خروجی یکسوکننده‌های سه‌فاز شامل هارمونی می‌باشد. می‌توان از فیلترها برای مسطح کردن ولتاژ خروجی یکسوکننده استفاده کرد و این فیلترها با نام فیلترهای dc شناخته می‌شوند. فیلترهای dc به طور معمول از نوع L و C می‌باشند. در نتیجه عمل یکسوسازی جریان ورودی یکسوکننده شامل هارمونی می‌باشد و به یک فیلتر ac برای فیلتر کردن مقداری از هارمونی‌ها از منبع سیستم نیاز است. فیلتر ac به طور معمول از نوع LC می‌باشد. عموماً در فیلترها تعیین کردن اندازه و فرکانس هارمونی‌ها مورد احتیاج می‌باشد.

بنابراین بر کسب رضایت کامل از سیستم HVDC لازم است ضریب توان سیستم را با کاهش a برای یکسوساز و g برای اینورتر، افزایش داد.

6- طراحی کنترل‌کننده و مدارهای اینورتر و یکسوساز

در این مقاله کنترل‌کننده به روی یک سیستم دو ناحیه‌ای مطابق شکل (12) اعمال شده است. سیستم دو ناحیه‌ای با استفاده از یک مجموعه HVDC تک‌قطبی 12 پالس، 500 کیلوولت و 1000MW به هم مرتبط شده‌اند.

6-1 - طراحی مدارهای اینورتر

تعیین ولتاژها و جریان‌های نامی قطعات توان در مدارهای اینورتر به نوع اینورتر، بار و روش‌های بکار رفته برای کنترل و جریان، بستگی دارد. طراحی مستلزم

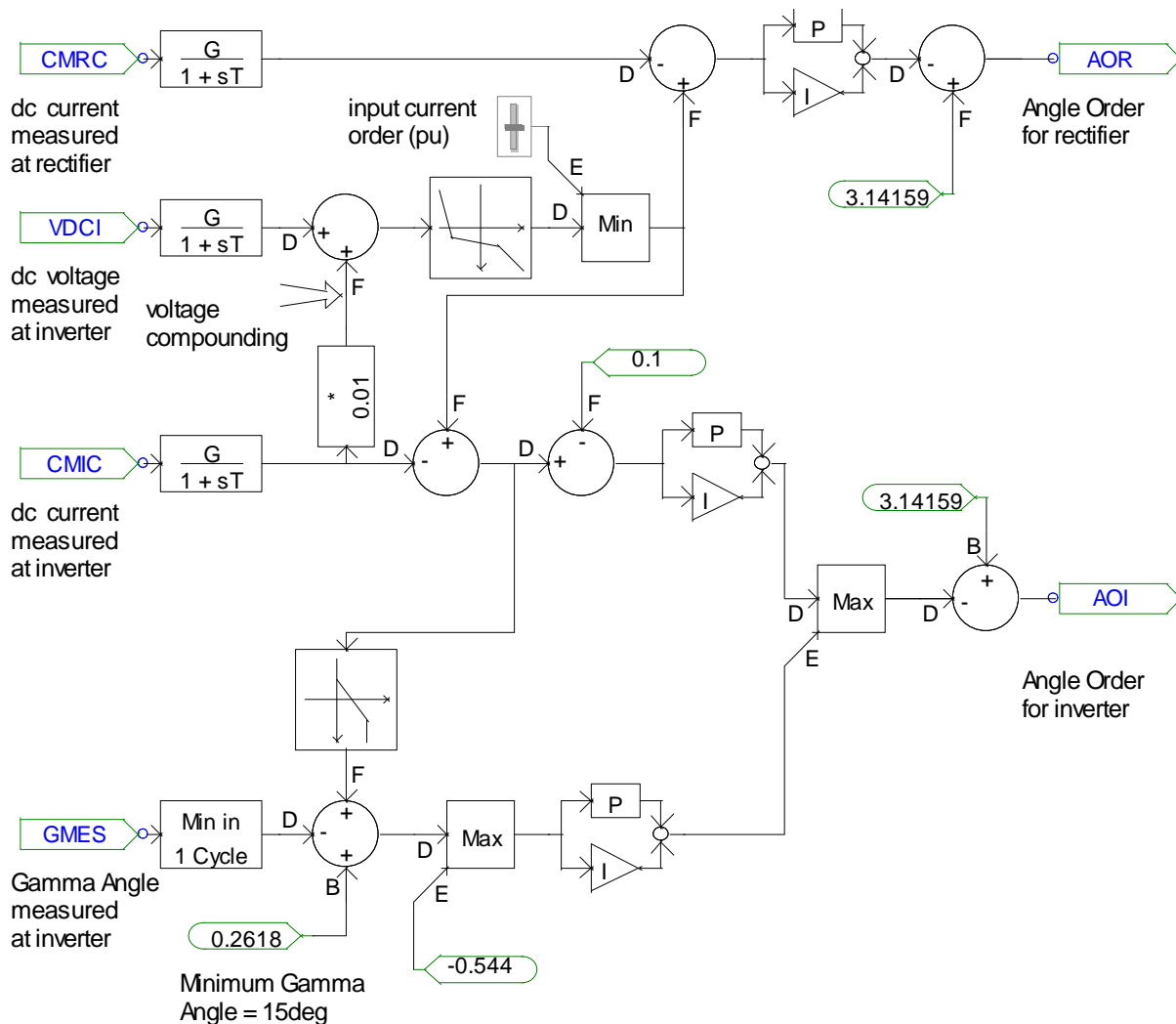
(1) بدست آوردن عبارتی برای جریان لحظه‌ای بار

(2) ترسیم شکل موج‌های جریان برای تمامی عناصر می‌باشد.

تعیین مقادیر نامی ولتاژها مستلزم بدست آوردن ولتاژهای معکوس هر عنصر است.

کنترل‌کننده طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار pscad مطابق شکل (13) با ورودی‌هایی که می‌گیرد زاویه آتش اینورتر را کنترل می‌کند.

برای کاهش هارمونیک‌های خروجی، استفاده از فیلترهای خروجی ضروری است. فیلتر C بسیار ساده است اما توان راکتیو زیادی جذب می‌کند. فیلتر LC تنظیم شده می‌تواند یک فرکانس را حذف کند. یک فیلتر CLC با طراحی مناسب، برای کاهش هارمونیک‌ها در یک پهنای باند وسیع مناسب‌تر است و توان راکتیو کمتری جذب می‌کند.



شکل (13): سیستم کنترل یکسو ساز و اینورتر HVDC

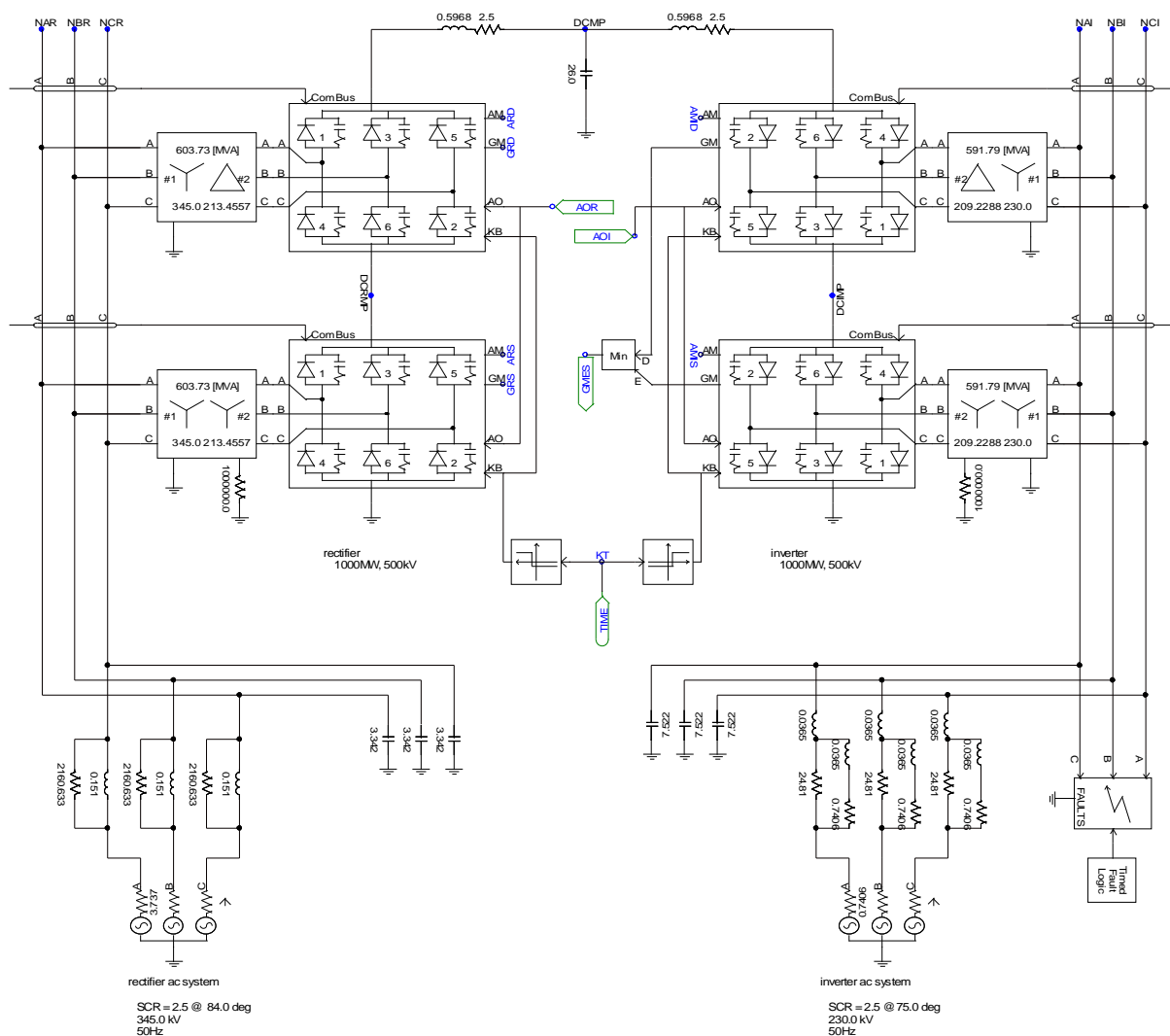
7- رفتار شبکه در برابر اغتشاشات

در سیستم تک قطبی 12 پالسه شکل (12) یک شبکه قدرت دو ناحیه‌ای که ولتاژ یک ناحیه 345 کیلو ولت است به ناحیه دیگر که دارای ولتاژ 230 کیلو ولت است مرتبط کرده است. در دو حالت رفتار سیستم بررسی شده است. حالت اول رفتار عادی سیستم را نشان می‌دهد.

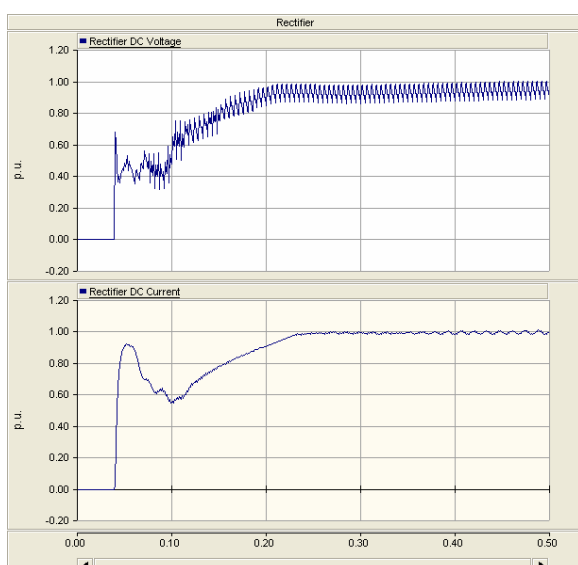
در شکل (8) ولتاژ ورودی یکسوساز و ولتاژ خروجی اینورتر در دو حالت یکی ولتاژ خط به خط و دیگر rms را نشان می‌دهد.

شکل (9) ولتاژ و جریان یکسوشده را نشان می‌دهد که دیده می‌شود بعد از مدت زمان کوتاه مدار به حالت کار عادی می‌رسد.

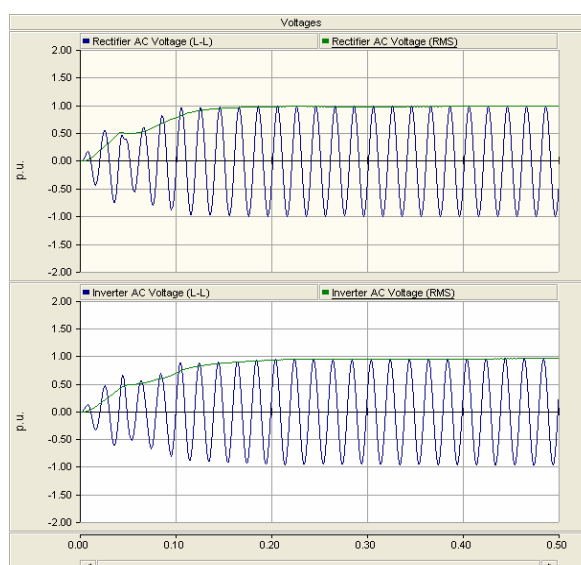
شکل‌های (10) و (11) رفتار سیستم وقتی یک خطا در لحظه $t = 0/2s$ بر روی ناحیه 230 کیلو ولتی اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد.



شکل (12): شماتیک سیستم دو ناحیه‌ای که با خطوط HVDC به هم وصل شده‌اند. (سیستم مورد مطالعه)



شکل (9): ولتاژ و جریان DC یکسوساز در حالت عادی



شکل (8): ولتاژ AC یکسوساز و اینورتر در حالت عادی

سیستم در حالت عادی و پس از یک خطا نیز نشان داده شده است که با توجه به شکل دیده می‌شود که کنترل‌کننده به صورت مطلوب عمل کرده است.

9- مراجع

[1] K.R. Padiyar, *HVDC Transmission - Technology and System Interactions*, New York: John Wiley & Sons, 1990

[2] M. H. Rashid, *Power Electronics*, Prentice-Hall, 1999

[3] www.siemens.com/hvdc.HVDC_Proven_Technology.pdf

[4] http://www.abb.com, technology_abb.pdf

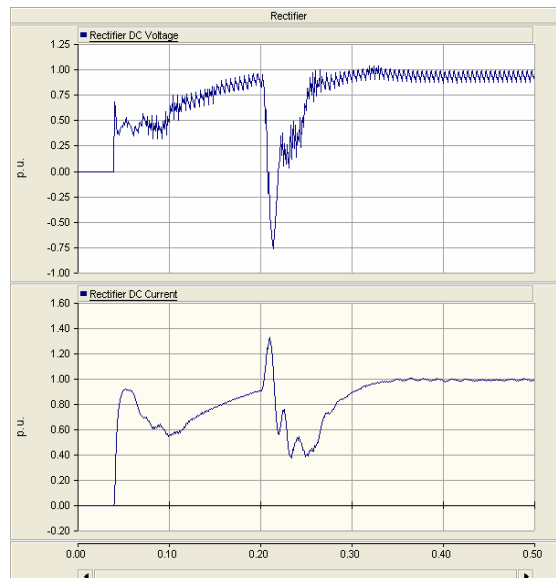
[5] [http://www.abb.com, Thyristor valves, projects 1970-, Reference brochure.pdf](http://www.abb.com, Thyristor_valves_projects_1970-,_Reference_brochure.pdf)

[6] U.Corbellini, P.Pelacchi, "Corona Losses in HVDC Bipolar Lines", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.11, No.3, July 1996.

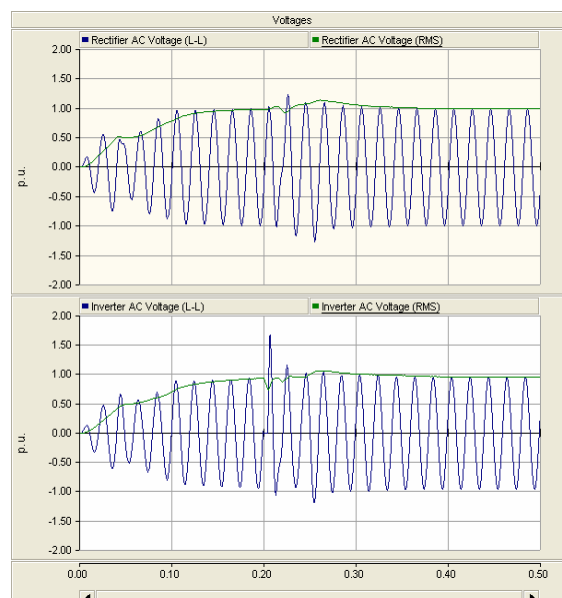
[7] D. A. Woodford, *HVDC Transmission*, Manitoba HVDC Research Centre, 400-1619 Pembina Highway, Winnipeg, Manitoba, R3T 3Y6, Canada, 1998

[8] P. F. Toledo, *Feasibility of HVDC for City Infeed*, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electric Power Systems, Sweden 2003

[9] Cuiqing Du, *The control of VSC-HVDC and its use for large industrial power systems*, Doctoral Thesis, Department of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, GÅteborg, Sweden 2003



شکل (10): ولتاژ و جریان DC یکسوساز در حالتی که یک خطای سه‌فاز متقارن در 0,2 ثانیه اتفاق افتد.



شکل (11): ولتاژ یکسوساز و اینورتر در حالتیکه یک خطای سه‌فاز متقارن در 0,2 ثانیه اتفاق افتد.

8- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تولید جریان مستقیم و تبدیل آن خصوصاً در مقادیر بزرگ گران می‌باشد انتقال انرژی الکتریکی با استفاده از سیستم‌های جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC) مطرح شده است. لکن باید سیستم کنترلی طوری باشد که شبکه در برابر اغتشاشات پایدار باشد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار pscad یک سیستم دو ناحیه‌ای که توسط HVDC به هم ارتباط داده شده‌اند مدل شده است. عملکرد