

تحلیل پایداری دینامیکی VSC HVDC به هنگام وقوع خطای

تکفاز به زمین در سیستم های قدرت

بهین عادل منش^۱، آیدین سخاوتی^۲

۱- گروه برق، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

Behin_adelmanesh@yahoo.com

Aidin_sakhavati@iaut.ac.ir

چکیده:

در این مقاله یک مدل دقیق دینامیکی برای VSC HVDC ارائه شده است که این مدل در برگیرنده ی سیستم های کنترلی و مدل کامل بخش DC و AC می باشد. جنبه هایی از قبیل طراحی حلقه ی کنترلی، تاثیر PLL (phase locked loop) و فیلتر بصورت دقیق مورد بحث قرار گرفته اند و لذا می توان مدل های کاهش مرتبه یافته را با حذف برخی ثابت های زمانی بدست آورد که برای این نوع شبیه سازی ها از برنامه ی MATLAB استفاده شده است، برای صحت سنجی مدل و داده ها از دو نوع شبیه سازی RMS که همان حالت شبیه سازی بر اساس مدل گذرای الکترومکانیکی ساده و EMT که حالت شبیه سازی بر اساس مدل گذرای الکترومغناطیسی مفصل (با جزئیات) استفاده شده است، با اعمال خطای تکفاز به زمین (SLG) به مدل به تحلیل پایداری دینامیکی آن می پردازیم.

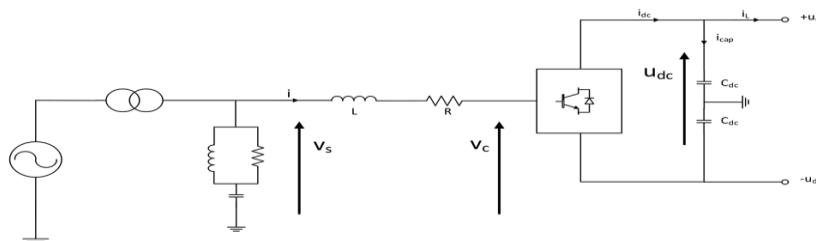
کلمات کلیدی: مدل دینامیکی، VSC HVDC، SLG

۱. مقدمه

مطالعات پایداری سیستم قدرت نیازمند مدل های فازوری تجهیزات مختلفی مثل ژنراتورها و کنترل آنها، ادوات FACTS و بارها است که در سیستم های قدرت نوین حضور دارند. در بیشتر نرم افزارهای سیستم قدرت، کاربر می تواند مدلی را از کتابخانه ی مدل های استاندارد انتخاب کرده و یا خود کاربر مدلی تعریف کند. استفاده از مدل های استاندارد برای تجهیزات سیستم قدرت دارای مزایای خاصی است و در صورتی که از مدل های استاندارد استفاده شود، تبادل و انتقال اطلاعات به بسته های نرم افزاری جدید راحت تر خواهد بود. علاوه بر این، مدل های استاندارد را می توان برای حیطه ی گسترده ای از مطالعات به کار برد. به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول، مدل های کلی باید کاملاً به صورت تشریحی و با جزئیات باشند.

۲. کنترل VSC-HVDC

مزیت اصلی استفاده از کنترل جریان برداری در VSC های متصل به شبکه، کنترل مستقل توان های اکتیو و راکتیو از طریق حلقه ی داخلی کنترل جریان می باشد. کنترل جریان برداری از قالب مرجع سنکرون dq برای نمایش مقادیر سه فاز به عنوان بردارهای ثابت در حالت ماندگار بهره برده و همچنین از تنظیم کننده های PI برای حذف خطاهای ایستا در ولتاژ و جریان استفاده میکند [1,2]. روش کنترل جریان برداری را می توان توسط نمایش دیاگرام خطی VSC متصل شده به شبکه ی DC نشان داد.



نمایش خطی مجزای یک سیستم VSC-HVDC

^۱ دانشجوی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر (نویسنده مسئول)

^۲ استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

چنانچه همهی ولتاژها و جریانها در سمت AC در سیستم مختصات ایستای $\alpha\beta$ باشند، دینامیک AC سیستم بوسیلهی دینامیک راکتور فاز و بر اساس رابطهی زیر به دست می آید:

$$L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = v_{s,\alpha\beta} - v_{c,\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}. \quad (1)$$

با تبدیل این رابطه به چارچوب مرجع چرخان dq خواهیم داشت:

$$L \frac{di_{dq}}{dt} = v_{s,dq} - v_{c,dq} - (R + j\omega L)i_{dq} \quad (2)$$

که در آن عبارت $j\omega L$ مشتق زمانی چارچوب مرجع چرخان را نشان می دهد. چنانچه معادلهی (2) به بخشهای حقیقی و موهومی تفکیک شود:

$$L \frac{di_d}{dt} = v_{s,d} - v_{c,d} - i_d R + i_q \omega L \quad (3) \text{ و } (4)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = v_{s,q} - v_{c,q} - i_q R - i_d \omega L.$$

چارچوب مرجع dq می تواند به گونه ای نوشته شود که داشته باشیم:

$$v_{s,d} = v \text{ and } v_{s,q} = 0 \quad (5)$$

که توان را از سیستم AC به صورت زیر بدست می دهد:

$$P = v_{s,d} i_d \quad (6)$$

برای طرف DC، توان به صورت زیر داده می شود:

$$Q = -v_{s,d} i_q \quad (7)$$

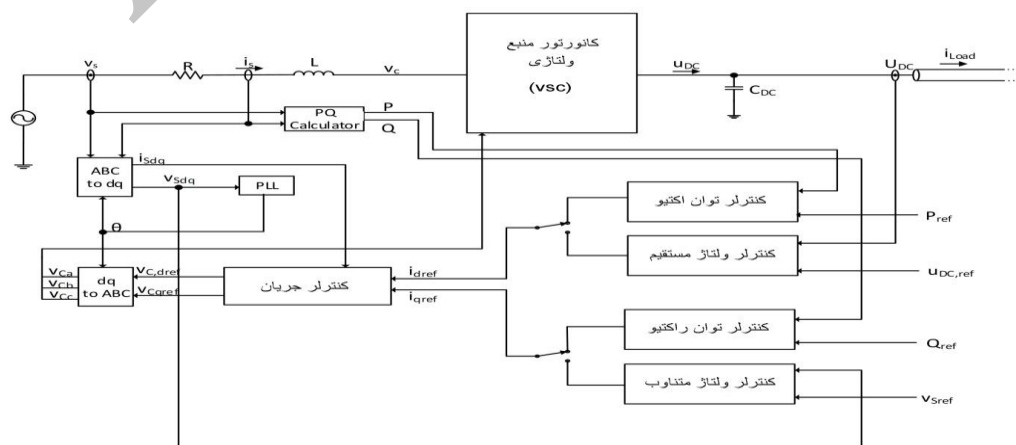
$$P_{DC} = u_{DC} i_{DC} \quad (8)$$

و دینامیک طرف DC با جریان:

$$i_C = i_{DC} - i_L \quad (9)$$

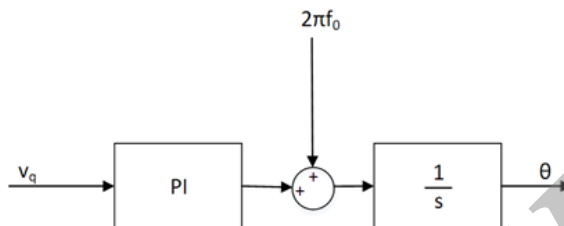
است.

۳. سیستم کنترل



۴. PLL :

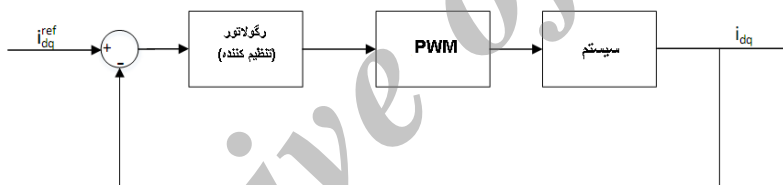
به منظور نشان دادن جریان‌ها، به صورت کمیتهای DC قابل کنترل با تنظیم کننده ی PI، لازم است که چارچوب مرجع dq را با بردار ولتاژ چرخان همسو نماییم. PLL برای تعیین زاویه فاز ولتاژ و برای محدود کردن محورهای dq در این زاویه استفاده می‌شود [3]. در این پایان‌نامه، بردار ولتاژ با محور d تنظیم شده است، این مطلب به این معنی است که اگر محور dq به درستی همراستا شود، v_q صفر خواهد شد. بنابراین، v_q می‌تواند به عنوان خطا در نظر گرفته شود و به عنوان یک ورودی به تنظیم کننده PI از آن استفاده شود. شکل زیر ساختار یک PLL شامل فرکانس نامی است که برای نمایش دادن کاهش مدت زمان مورد نیاز جهت قفل PLL در ولتاژ میباید [4].



شکل ۳-۷. نمایش بلوکی PLL

۵. کنترلر جریان

بر اساس معادلات استخراج شده در بخش‌های قبلی، کنترلر جریان داخلی می‌تواند در چارچوب dq پیاده‌سازی شود. بلوک دیاگرام اصلی کنترلر جریان در شکل زیر نشان داده شده است.



نمایش ساده بلوکی کنترلر جریان

اطلاعات بیشتر درباره هر بلوک در زیر آمده است :

۶. رگولاتور :

رگولاتور (تنظیم کننده) استفاده شده یک رگولاتور PI است.

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \frac{(1/K_p + sT_i)}{sT_i} \quad (10)$$

که در آن K_p ، k_i و T_i پارامترهای هستند که می‌بایست تعیین شوند.

۷. PWM :

ورودی‌های کانورتور PWM، ولتاژ مرجع تولید شده بوسیله حلقه کنترل جریان و تبدیل شده از dq به $\alpha\beta$ هستند. می‌توان فرض نمود که مبدل ولتاژ، مرجع را بدون هیچ‌گونه تاخیری دنبال خواهد نمود و هارمونیک‌های ایجاد شده توسط سوئیچینگ، با راکتورهای فاز و فیلترهای AC حذف خواهند شد [5]. بنابراین، عملکرد PWM می‌تواند در چارچوب مرجع dq به صورت زیر بیان شود:

$$v_{c,dq} = v_{c,dq}^{ref} \quad (11)$$

۸. سیستم :

معادله‌ی (۳) و (۴) رفتار سیستم را توصیف می‌نمایند و می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند:

(۱۲) و (۱۳)

$$v_{s,d} - v_{c,d} = L \frac{di_d}{dt} + i_d R - i_q \omega L$$

$$v_{s,q} - v_{c,q} = L \frac{di_q}{dt} + i_q R + i_d \omega L$$

از این معادلات مشاهده میشود که مدل VSC در چارچوب مرجع dq، سیستم غیر خطی با چند ورودی و چند خروجی (MIMO) است، و با توجه به القای سرعت/فرکانس در هر معادله، لذا یک کوپل متقابل بین دو محور وجود خواهد داشت. اصطلاح کوپل متقابل می تواند از نظر کنترلی یک اختلال در نظر گرفته شود. [6]. با کنترل کننده های جداگانه حلقه داخلی برای i_d و i_q ، خروجی جریان کنترل کننده، به ترتیب ولتاژ مرجع برای هر یک از محورها خواهد بود:

$$v_{c,d}^{ref} \text{ and } v_{c,q}^{ref}$$

با توجه به جبران سازی کوپل متقابل و ولتاژ رو به جلو، خروجی بلوک رگولاتور به صورت زیر خواهد بود:

$$v_{c,d}^{ref} = -(i_{d,ref} - i_d)F(s) + i_q \omega L + v_{s,d} \quad (14) \text{ و } (15)$$

$$v_{c,q}^{ref} = -(i_{q,ref} - i_q)F(s) - i_d \omega L + v_{s,q}$$

چنانچه اینها با معادلات ۱۴ و ۱۵ ترکیب شوند این ترکیب منجر به رابطه زیر می شود:

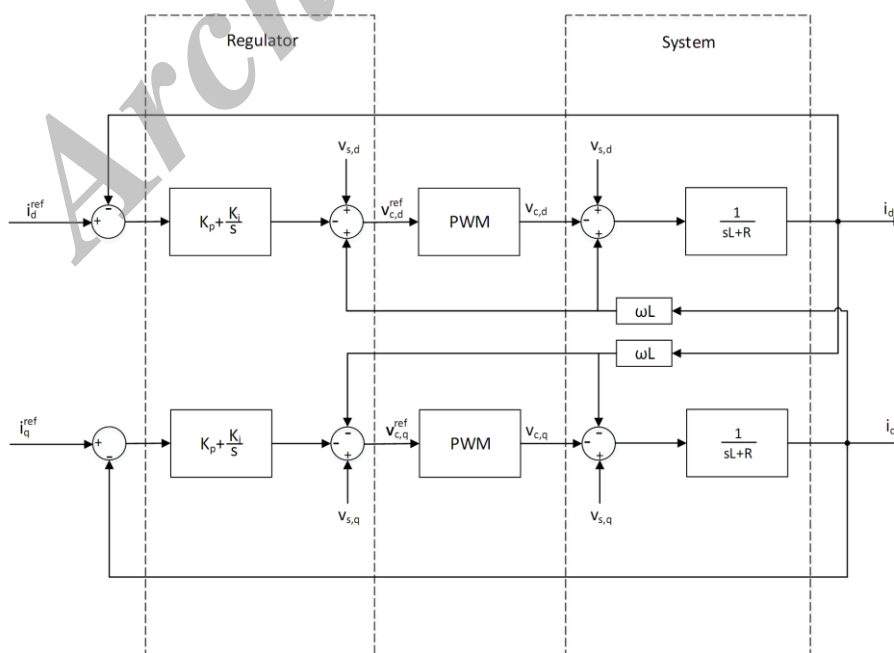
$$(i_{d,ref} - i_d)F(s)G(s) = i_d \quad (16) \text{ و } (17)$$

$$(i_{q,ref} - i_q)F(s)G(s) = i_q$$

که در آن $G(s)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$G(s) = \frac{1}{sL + R} \quad (18)$$

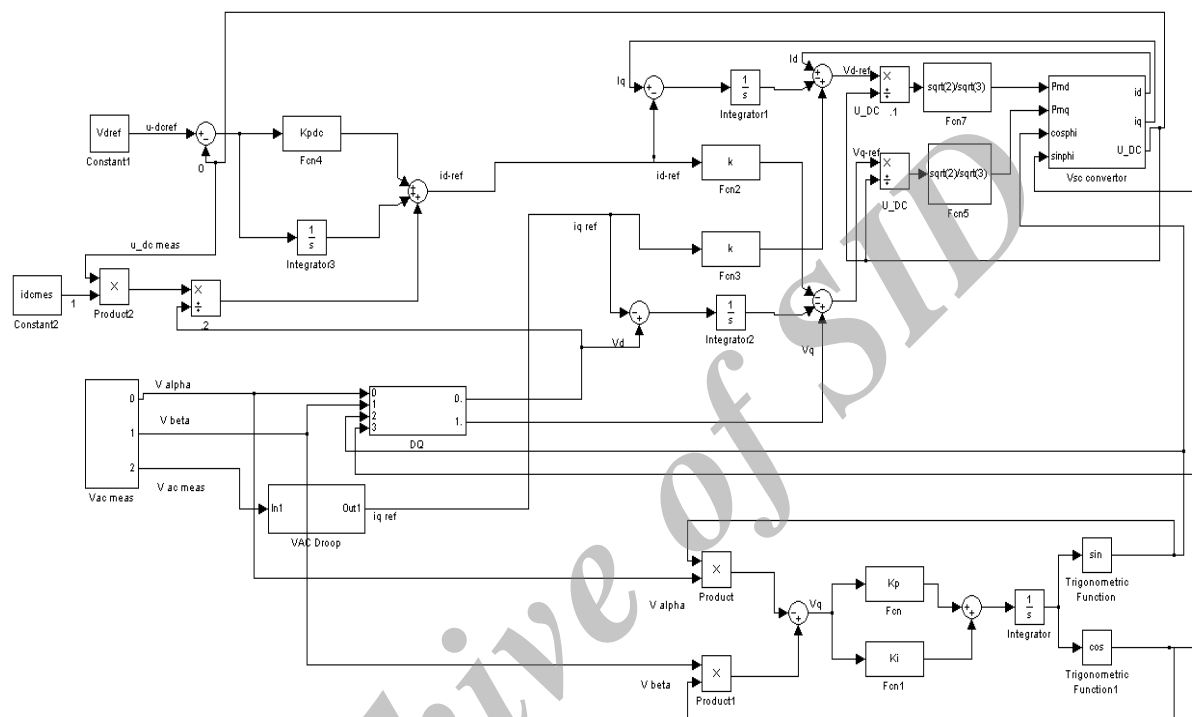
بنابراین کوپل متقابل حذف شده و محورهای d و q به صورت مستقل کنترل میشوند. دیاگرام بلوکی کامل کنترلر جریان در شکل زیر نشان داده شده است [7].



کنترلر دقیق جریان

۹. کنترلرهای خارجی

از آنجا که هیچ مدلی برای کنترلر خارجی وجود ندارد [8]، به ناچار باید از مدلهای از پیش تعریف شده توسط کاربر استفاده شود. شکل نشان دهنده ی سیستم کنترل کامل، برای یک مبدل است که توان اکتیو و ولتاژ DC را کنترل میکند و شامل یک کنترلر توان اکتیو و یک کنترلر ولتاژ DC، اندازه گیری های بدست آمده از مدلهای شبکه، PLL و کنترلر جریان شرح داده شده در بخش قبلی است.



پایاده سازی سیستم کامل کنترلرهای خارجی

۱۰. روش پایاده سازی: در ابتدا باید معیاری برای مقایسه مدلهای تعیین شود که پذیرش نتایج را کنترل کند. با توجه به تمرکز این مقاله بر اساس پایداری گذرا، فرض های زیر در نظر گرفته شده اند:

- باید از اختلاف بین مدل ها در حالت های گذرا در سمت DC صرف نظر کرد چون که آنها در مقایسه با دینامیک ماشین، سریع هستند.
- توان اکتیو در طرف AC مهم ترین کمیت در نظر گرفته می شود چرا که این توان بیشترین تاثیر را بر روی دینامیک ماشین خواهد داشت.

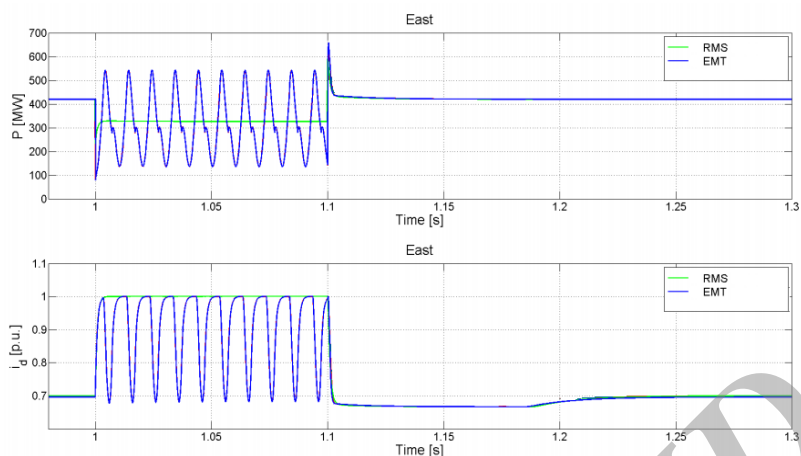
۱۱. شبیه سازی های RMS و EMT:

دو گزینه شبیه سازی برای مطالعات دینامیکی وجود دارد که می تواند استفاده شوند: RMS مبتنی بر مدلهای گذرای الکتریکی ساده سازی شده و EMT مبتنی بر مدلهای دقیق گذرای الکترو مغناطیسی. در شبیه سازی RMS، از دینامیک الکترومغناطیسی شبکه ی الکتریکی صرف نظر شده و ولتاژها و جریان ها به صورت فازوری تعریف می شوند که با اندازه و زاویه ی فاز، شکل موجهای سینوسی حالت ماندگار نمایش داده می شوند. اما ولتاژها و جریانها در شبیه سازی های EMT، بوسیله ی مقادیر لحظه ای نمایش داده می شوند و رفتار دینامیک عناصر شبکه نیز، مد نظر قرار داده می شوند.

۱۲. بررسی و ارزیابی مدل

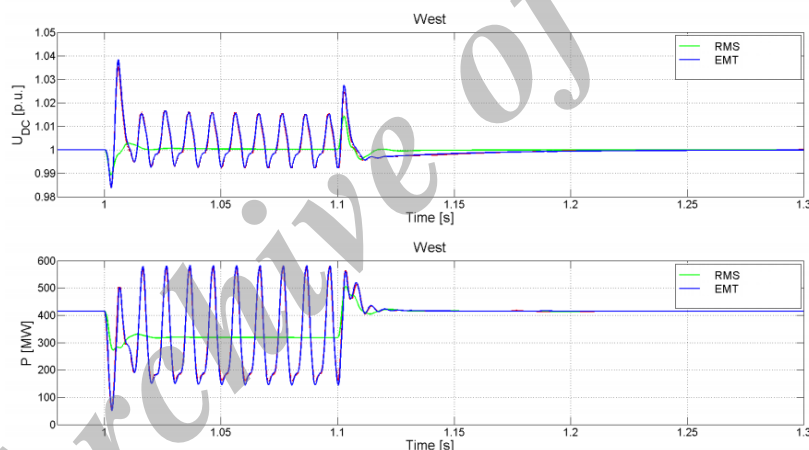
بررسی مدل از طریق اعمال خطا بر روی مدل و بررسی پایداری آن صورت گرفته است. خطای تک فاز به زمین شرقی

در این شبیه سازی خطای خط منفرد به زمین (SLG) را در ترمینال AC شرقی و در یک ثانیه با توان اکتیو منتقل شده ی $-0.7p.u$ اعمال میکنیم. خطا پس از 0.1 ثانیه رفع میشود. شکل زیر توان اکتیو و جریان در محور d را برای کانورتر شرقی نشان می دهد.



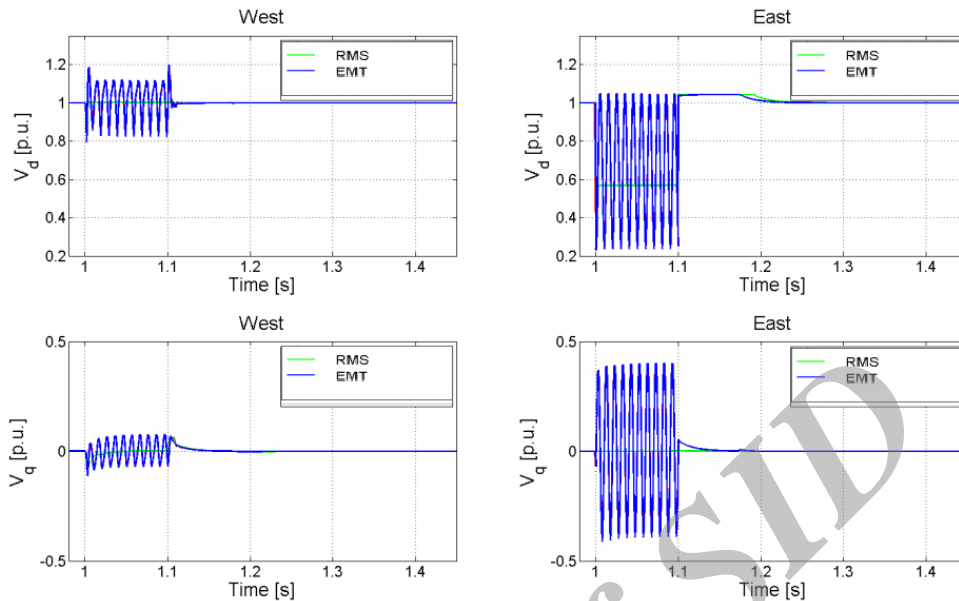
توان اکتیو و جریان محور d به دنبال خطای SLG در کانورتر شرقی

هنگامی که خطا اعمال می شود، قدرت منتقل شده در لینک HVDC بدلیل افت ولتاژ در سمت AC کانورتر، کاهش می یابد. سپس جریان محور d توسط کنترلر توان افزایش یافته و سرانجام به حد نهایی اش می رسد. در طول خطا، هر دو مدل EMT شروع به نوسان در دو برابر فرکانس شبکه می نمایند که این نوسان در مدل RMS مشاهده نمی شود. نبود نوسانات در مدل RMS بواسطه نمایش فازوری است. پس از اینکه خطا برطرف شد مدل RMS با مدل های EMT منطبق می شود.

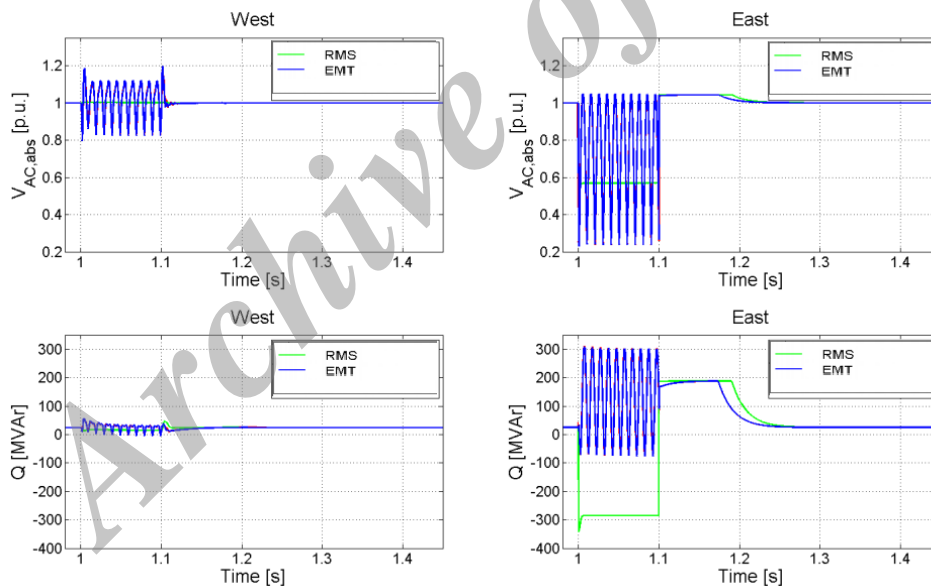


ولتاژ DC و توان اکتیو پس از خطای SLG در کانورتر شرقی

ولتاژ محورهای d و q در هر دو کانورتر به خوبی در مدل RMS در طول خطا نشان داده نمی شوند اما هنگامی که خطا برطرف می شود مدل ها با هم منطبق شده و نتایج قابل قبول می شوند. مجدداً توان راکتیو در حالت گذرا دارای اختلاف زیادی بین مدل های RMS و EMT میباشد اما تاثیر جزئی بر نتیجه ی حالت دائمی دارد.



ولتاژ محورهای d و q پس از خطای SLG در کانورتر شرقی



دامنه ولتاژ AC و توان راکتیو پس از خطای SLG در کانورتر شرقی

۱۳. نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله ارائه مدلی مناسب برای مطالعات دینامیک است و نحوه تنظیم مدل برای استفاده برای شبیه سازی RMS ساده شده را بررسی می کند.

حالت شبیه سازی RMS در Matlab با حالت شبیه سازی EMT در چندین مورد تفاوت داشته و باید سیستم کنترلی را به صورت زیر تغییر داد.

• به علت نمایش دینامیک AC در مدل RMS، کنترل کننده جریان را باید برای دست یابی به پاسخ مشابه با مدل های EMT تنظیم نمود. نتیجه گرفتیم که برای رسیدن به این هدف، قسمت تناسبی کنترل کننده جریان را صفر کرده و قسمت انتگرالی آن را نگه داشت.

• چون مدل RMS از فازور ها به جای کمیت های دورانی استفاده می کند، باید PLL را طبق آن تنظیم نمود؛ پیش از این که مدل های تعریف شده کاربر ارایه شود بررسی شده که تا چه حد مدل های درون Matlab قابل استفاده هستند. هم چنین نتیجه گرفتیم که مبدل ها، کابل ها، خازن ها و راکتور های فاز را می توان به روشی مناسب توسط مدل های درونی نشان داد، در حالی که کنترل کننده PLL را باید به صورت دستی اجرا کرد. استدلال پشت این قضیه هم چون حالت کنترل کننده جریان، بر اساس کوتاه شدن اجرا بوده و کمبود سندن سازی متناسب با رفتار مدل احساس می شود که حالت مد نظر برای PLL است. چون هیچ مدل درونی برای مبدل های خارجی وجود ندارد، باید اجرائیشان به صورت دستی انجام گردد.

• با مقایسه ی بین دو مدل RMS و EMT در تحلیل خطاهای مختلف، نتیجه می گیریم که مدل RMS در اکثر حالات کارکرد خوبی داشت، و می توان نمایشی کافی از مدل های EMT با در نظر گیری مطالعات پایداری گذرا را در نظر گرفت. ولی برخی محدودیت ها در مدل وجود دارد که باید به آن ها توجه کرد.

• می توان مشاهده کرد که مدل RMS نتایج مشابهی را با مدل های EMT در تمام موارد و با کاهش زیادی در زمان محاسبه نشان می دهد.

• می توان دریافت که معرفی VSC-HVDC در سیستم AC می تواند به افزایش پایداری گذرا به دلایل مختلفی از جمله توانایی فراهم سازی توان راکتیو جهت افزایش پروفیل ولتاژ و قابلیت کنترلی زیاد کمک نماید.

• تغییر در پیاده سازی کنترلر جریان به هیچ وجه منجر به تفاوتی بین جریان در مدل های EMT و RMS که یک مرجع را دنبال می نمایند نمی شود.

• برای خطاهای نا متقارن همانند خطای SLG، مدل RMS نمی تواند نمایش خوبی را از مدل های EMT در طول خطا بدست دهد. با این حال پس از خطا مدل RMS به مقدار حالت ماندگار مشابهی همانند مدل های EMT بر خواهد گشت بنابراین برای مطالعات پایداری در حالت گذرا، مدل RMS می تواند همچنان به عنوان تقریب خوبی از مدل های EMT در نظر گرفته شوند.

چنانچه یک خطای SLG در کانورتر کنترل کننده ی ولتاژ DC رخ دهد، مقدار توانی که می تواند به شبکه ی AC تزریق نماید کاهش می یابد و این امر منجر به این می شود که خازنهای لینک DC با افزایش در ولتاژهای DC شارژ شوند. در این مورد، تفاوت در رفتار مدل های مختلف در طول خطا بر روی نرخی که خازنها شارژ شده اند تاثیر می گذارد. این بدین معناست که هنگامی که خطا برطرف می شود ولتاژ DC در مدل RMS بزرگتر از مدل های EMT خواهد بود بنابراین زمان بیشتری طول خواهد کشید که تا آن به حالت ماندگار بازگردد. با این وجود ولتاژ باید به مقدار بالاتری افزایش یابد تا این تفاوت، تاثیر قابل توجهی بر روی نتایج داشته باشد و در عمل کنترلر توان اکتیو باید توان را در مورد یک ولتاژ بسیار زیاد در لینک DC محدود نماید.

۱۴. قدردانی

با تقدیر و تشکر شایسته از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر آیدین سخاوتی که با نکته های دلاویز و گفته های بلند، صحیفه های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه گشای بنده در اتمام و اكمال مقاله بوده اند.

۱۵. مراجع

- [1] پروفیسور پرابها شاندار کندور، پایداری و کنترل سیستم های قدرت،، تألیف، ترجمه دکتر حسین سیفی و دکتر علی خاکی صدیق، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۶.
- [2] دکتر عباس شولائی و مهندس تهزاد ایرانی. کنترل مبدل سه فاز AC/DC توسط میکروکنترلر.، نشریه علمی و فنی برق، شماره ۱۰، سال ۱۳۷۲.
- [3] دکتر عباس شولائی و مهندس بهروز عارضی. بررسی اثرات تداخلی شبکه های HVDC بر شبکه های تلفنی.، نشریه علمی فنی برق، شماره ۱۰، سال ۱۳۷۲.
- [4] همتی، علی، کنترل و بررسی اثرات دینامیکی شبکه های HVDC، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، شهریور ۱۳۷۳.
- [5] G. Pinares, "Operation of HVDC grids in parallel with AC grids," Master's thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2010.
- [6] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, et al., "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, 2004.
- [7] S. Cole, *Steady-state and Dynamic Modelling of VSC-HVDC Systems for Power System Simulation*. PhD thesis, Katholieke University Leuven, Leuven, Belgium, 2010.
- [8] F. Gonzalez-Longatt, J. Roldan, and C. Charalambous, "Power flow solution on multi-terminal HVDC systems: Supergid case," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ 12)*, Santiago de Compostela, Spain, 2012.