مدل سیگنال کوچک خطی شدهٔ ترکیبی حوزه‌های زمان – فرکانس مبدل HVDC (قسمت اول)

عباس شولائی استاد گروه قدرت ، دانشکده مهندسی برق ، دانشگاه علم و صنعت ایران
سید قدرت‌اله سیف السادات عضو هیات علمی دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهیدچمران

چکیده

در این مقاله یک مدل سیگنال کوچک خطی شده برای یک سیستم HVDC شش پالسه در حوزه‌های زمان – فرکانس ارائه خواهد شد. در این مدل اثرات مقاومتهای R_{on} و R_{off} تریستورها ، افت ولتاژ مستقیم تریستورها ، مدارات اسنابر و فیلتر در نظر گرفته می‌شوند و برای مدل کردن ترانسفورماتور مبدل و شبکهٔ AC از مدارات RL سری استفاده می‌شود. برای تأئید مدل ارائه شده ، نتایج حاصل از این مدل با نتایج حاصل از برنامه شبیه‌سازی حوزهٔ زمان PSCAD/EMTDC مقایسه می‌گردد.

کلمات کلیدی: مدل هارمونیکی، مبدل HVDC، پاسخ حالت پایدار جزئی، پاسخ حالت گذرای جزئی، مدل سیگنال کوچک خطی شده.

A Linearised Small- Signal Model of an HVDC Converter – Part I

A. Shoulaie Iran University of Science and Technology, Iran
Gh. Seifossadat Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran

Abstract

In this paper a Linearized Small- Signal Model for a six-pulse HVDC system is presented. In this paper the effects of on and off states resistances, forward voltage drop, filter and snubber circuits of the thyristors are taken into account. RL series circuits are used for modeling of the converter transformer and AC system. To validate the model developed in this paper, a comparison is made with the PSCAD/EMTDC time domain simulation program.

Key words: Harmonic model, HVDC converter, Linearized Small, Signal Model.

Archive of SID

www.SID.ir

۱-مقدمه

امروزه از سیستم‌های HVDC با توجه به ویژگیهای خاص و مفیدشان به‌طور وسیعی در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. امتیاز اصلی انتقال HVDC هزینهٔ کمتر آن در انتقال انرژی در مسافتهای طولانی می‌باشد. فاکتور کنترل‌پذیری حتی بدون در نظر گرفتن هزینه، موجب اعتبار بیشتر انتقال DC می‌باشد که رشد روز افزون تعداد لینکهای پشت به پشت مؤید این امر می‌باشد [۱].

علی‌رغم مزیت‌های موجود، سیستم‌های HVDC دارای یکسری مشکلات عمده نیز می‌باشند. مهمترین آنها مشکل هارمونیک‌زائی این نوع شبکه‌ها است که در اثر عملکرد غیرخطی مبدلهای HVDC بوجود می‌آید. و در صورت عدم حذف آن مشکلاتی نظیر تداخل در خطوط تلفن، تولید اضافه حرارت خازنها و ژنراتورهای سنکرون ، ایجاد تشدید در شبکه و حتی شکستن محور توربین‌ها را بوجود می‌آورد.

مبدلهای HVDC باعث ایجاد اعوجاجهای هارمونیکی در هر دو طرف AC و DC مبدل می‌شوند. این اعوجاجها از یک طرف مبدل به طرف دیگر آن منتقل می‌شوند و باعث ایجاد اختلالهای هارمونیکی در طرف دیگر می‌شوند.

در شرایط کار ایده‌آل، هارمونیکهای مشخصه‌ای n=PK (P: تعداد پالسهای مبدل و K: عدد صحیح) در طرف DC مبدل و هارمونیکهای n=PK±1 در طرف AC آن تولید مـی‌شوند [۲]. زمانی که مبدل تحت شرایط غیر ایده‌آل ، همچون تغذیه نامتعادل یا تغذیه همراه با هارمونیک کار می‌کند ، محدودهٔ وسیعی از هارمونیکهای غیر مشخصه‌ای در هر دو طرف AC و DC مبدل تزریق می‌گردند [۳].

یکی از مراحل اساسی در مطالعهٔ هارمونیکی هر شبکه، مشخص کردن و مدل کردن دقیق منابع هارمونیک‌زا در آن شبکه می‌باشد [۴]. این مدل باید عکس‌العمل‌های هارمونیکی بین طرفهای AC و DC مبدل را به خوبی نمایش دهد. مدلهای هارمونیکی زیادی برای مبدلهای HVDC ارائه شده‌اند که می‌توان آنها را به سه دستهٔ مدلهای حوزهٔ زمان، مدلهای حوزهٔ فرکانس تکراری، و مدلهای حوزهٔ فرکانس مستقیم تقسیم‌بندی کرد. در مدلهای حوزهٔ زمان معادلات دیفرانسیل یا فضای حالت سیستم نوشته شده و با استفاده از روشهای انتگرال عددی حل می شوند. نرم افزارهائی همچون EMTP [۵] و EMTDC [۶] از این روشها استفاده می‌کنند. در این برنامه‌ها ویژگیهای غیرخطی عناصر الکترونیک قدرت را می‌توان مدل کرد. اما این روشها دارای بار محاسباتی زیادی هستند ، زیرا شبیه‌سازیهای حوزهٔ زمان باید تا پایان دورهٔ گذرا طول بکشد. همچنین استفاده از این برنامه‌ها درک صحیحی از فرآیند انتقال هارمونیک در سیستم HVDC را ارائه نمی‌دهند [۳]. در مدلهای حوزهٔ فرکانس تکراری از روشهای تکراری همچون روش نیوتن برای حل عکس‌العمل هارمونیکی در اطراف مبدل AC-DC استفاده می‌شود. در واقع در این روشها معادلات عدم تعادل سیستم در یک پخش بار هارمونیکی حل می‌گردند. یکی از مهمترین این مدلها، مدلی است که توسط Smith [۷] ارائه شده است و در آن از روش حل تکراری چند متغیرهٔ نیوتن برای حل معادلات عدم تعادل سیستم استفاده شده است. در مدلهای حوزه فرکانس مستقیم از خطی‌سازی مبدل HVDC حول یک نقطه کار استفاده می‌شود. در این روش روابط بین اعوجاج شکل موج دو طرف AC و DC مبدل و سیستم کنترل زاویه آتش مبدل توسط یک مجموعه معادلات جبری خطی نمایش داده می‌شود [۸].

در تمام این مدلها تریستور به‌صورت کلید ایده‌آل در نظر گرفته شده و از اثر مدارات اسنابر در مدلسازی صرفنظر شده است.

در این مقاله که اکنون ارائه خواهد شد یک مدل سیگنال کوچک خطی شده برای یک مبدل HVDC شش پالسه به همراه مدارات فیلتر و ترانسفورماتور مبدل و شبکه AC ارائه می‌شود که در آن برای در نظر گرفتن مقاومت R_{on} و R_{off} تریستور و همچنین برای در نظر گرفتن افت ولتاژ مستقیم دو سر تریستورها و در نظر گرفتن مدارات اسنابرها و مدارات فیلترها از یک روش ترکیبی حوزهٔ فرکانسی و حوزهٔ زمان استفاده می‌شود. در این مدل پاسخ سیستم از مجموع پاسخ‌های حالت پایدار و حالت گذرا به‌دست می‌آید که در آن برای به‌دست آوردن پاسخ گذرا از روش معادلات حالت استفاده می‌شود. پاسخ حالت پایدار مدار از حل معادلات سیستم در حوزه فرکانس به‌دست می‌آید.

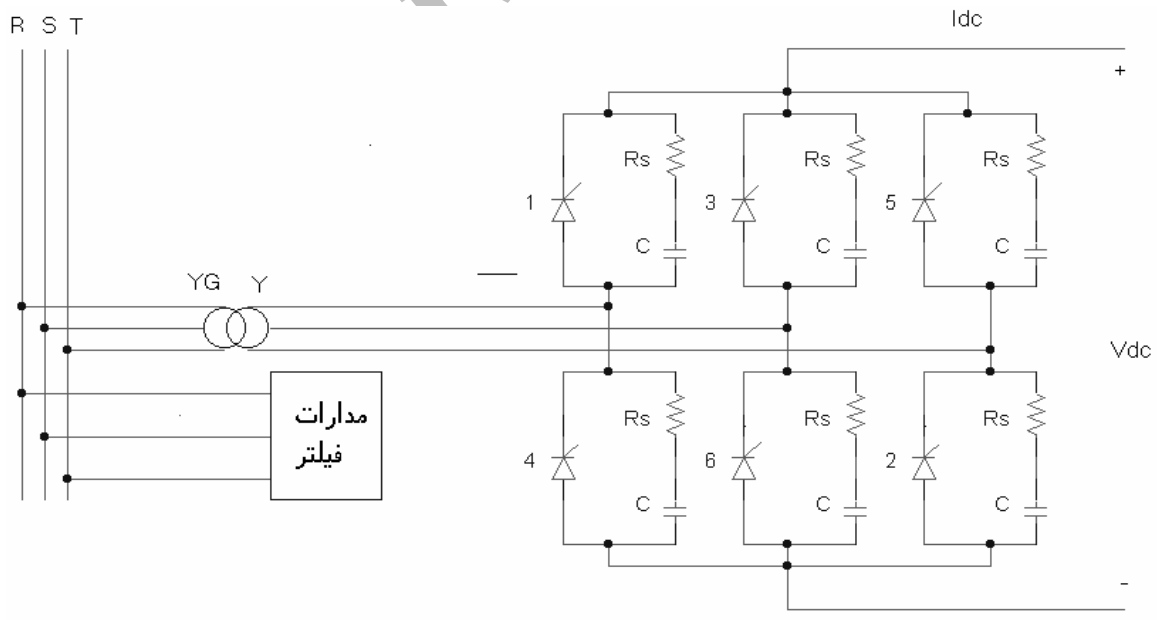
۲- مدل سیگنال کوچک خطی شدهٔ مبدل HVDC

شبکه‌های قدرت، شبکه‌های بزرگ و پیچیده‌ای هستند که در آنها وسایل الکترونیک قدرت زیادی وجود دارند. مدل کردن کامل چنین شبکه‌هائی غیر عملی است و باید از روشهای کاهش

Archive of SID
www.SID.ir

شبکه یا ساده‌سازیهائی برای اینکار استفاده شود. یکی از این ساده‌سازیها خطی کردن عناصر غیرخطی است که منجر به جوابهای سریعی برای شبکه‌های قدرت بزرگ می‌شود [۹]. این روش قبلاً توسط HU [۳]، Larson [۱۰]، Hume [۱۱] برای مطالعات هارمونیکی و توسط Perrson [۱۲]، Todd [۱۳] و Jovicic [۱۴] برای مطالعات کنترلی مورد استفاده قرار گرفته است. Osauskas در مقاله [۸] یک مدل سیگنال کوچک خطی شده برای یک مبدل HVDC شش پالسه ارائه کرده است. در حالت پایدار و بدون اعوجاج، مبدل HVDC در نقطه کار اصلی خود قرار دارد و هارمونیکهای مشخصه‌ای را تولید می‌کند. زمانی که سیستم دارای اعوجاج و یاعدم تقارن باشد، شکل موجها و لحظات کلیدزنی مبدل دچار تغییر خواهند شد. در مدل خطی شده ابتدا یک منبع اعوجاج با فرکانس دلخواه در نظر گرفته می‌شود و سپس با استفاده از اصل جمع آثار به چندین فرکانس و یا چندین منبع اعوجاج تعمیم داده می‌شود [۹].

شکل (۱) یک مبدل شش پالسه به‌همراه مدارات فیلتر، ترانسفورماتور مبدل و شین AC آن را نشان می‌دهد. در این مقاله ما یک مدل سیگنال کوچک خطی شده برای این شبکه ارائه می‌دهیم که در آن برای مدل کردن تریستور در حالت وصل از یک منبع ولتاژ DC برای نمایش افت ولتاژ مستقیم در دو سر هر تریستور در حال هدایت، به‌طور سری با یک مقاومت R_{on} و برای مدل کردن آن در حالت قطع از یک مقاومت R_{off} استفاده می‌کنیم. همچنین در دو سر هر تریستور یک مدار اسنابر شامل یک مدار RC سری برای حفاظت تریستور در مقابل $\frac{dv}{dt}$ زیاد در نظر گرفته می‌شود. مدارات فیلتر در نظر گرفته شده شامل پنج فیلتر هارمونیک پنجم، هارمونیک هفتم، هارمونیک یازدهم، هارمونیک سیزدهم و فیلتر بالاگذر می‌باشند. برای مدل کردن ترانسفورماتور مبدل و شبکه AC از مدارات RL سری استفاده می‌شوند. مبدل شش پالسه درحالت پایدار در هر دورهٔ تناوب فرکانس اصلی خود از ۱۲ حالت هدایتی شامل ۶ حالت کموتاسیون و ۶ حالت هدایت مستقیم عبور می‌کند. شکل موجهای ولتاژ و جریان در طی هر حالت هدایتی به‌صورت حاصل جمع پاسخ‌های حالت پایدار و حالت گذرای مدار مربوطه توصیف می‌شوند. پاسخ حالت پایدار موقعی به‌دست می‌آید که شکل موجها را به‌طور نامحدود ادامه دهیم تا حالت گذرای مدار به صفر میرا شود.



شکل ۱- مبدل شش پالسه به‌همراه مدارات فیلتر و ترانسفورماتور مبدل و شین AC آن

Archive of SID
www.SID.ir

از آنجائیکه این حالت با توجه به تغییر پیوستهٔ حالت کار مبدل هیچ وقت رخ نمی‌دهد، پاسخ‌های حالت پایدار و گذرا در هر حالت هدایتی به پاسخ‌های حالت پایدار جزئی [1](PSS) و پاسخ گذرای جزئی [2](PT) موسوم هستند [۱۵].

پاسخ‌های گذرای جزئی با حل معادلات حالت مدارهای مربوطه در حوزهٔ زمان تعیین می‌شوند. در حالیکه پاسخ‌های حالت پایدار جزئی با حل معادلات مدار مربوطه در حالت پایدار و در حوزهٔ فرکانس به‌دست می‌آیند.

۳- مدل حالت پایدار

مدار معادل کلی حالت پایدار هارمونیک h ام سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است. پارامترهای مبدل شش پالسه با توجه به حالت هدایتی مبدل باید تعریف شوند.

در این مدل منابع ولتاژ و جریان به‌عنوان ورودی و جریان سلف‌ها و ولتاژ خازنها به‌عنوان متغیرهای مدار در نظر گرفته می‌شوند. بردار متغیرهای سیستم دراین مدل به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}\overline{X}_h = \big[&I_{Ath}, I_{Bth}, I_{Cth}, I_{Ah}, I_{Bh}, I_{Ch}\\ &,V_{am}, V_{bm}, V_{cm}, V_{an}, V_{bn}, V_{cn}\\ &,I_{Af5h}, I_{Af7h}, I_{Af11h}, I_{Af13h}, I_{AfHh}\\ &,V_{Af5h}, V_{Af7h}, V_{Af11h}, V_{Af13h}, V_{AfHh}\\ &,I_{Bf5h}, I_{Bf7h}, I_{Bf11h}, I_{Bf13h}, I_{BfHh}\\ &,V_{Bf5h}, V_{Bf7h}, V_{Bf11h}, V_{Bf13h}, V_{BfHh}\\ &,I_{Cf5h}, I_{Cf7h}, I_{Cf11h}, I_{Cf13h}, I_{CfHh}\\ &,V_{Cf5h}, V_{Cf7h}, V_{Cf11h}, V_{Cf13h}, V_{CfHh}\big]\end{aligned} \quad (۱)$$

۳-۱- حالت کموتاسیون در شینهٔ مثبت

از شش حالت هدایتی مبدل در حالت کموتاسیون، سه حالت مربوط به کموتاسیون در شینهٔ مثبت می‌باشد. برای استفاده از مدار معادل کلی شکل (۲) در حالت کموتاسیون در شینهٔ مثبت، مثلاً در حالتی که فاز A در حال پایان هدایت ، فاز B در حال شروع هدایت، و فاز C در کموتاسیون شرکت نداشته باشد، می‌بایست پارامترهای مبدل شش پالسه را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{aligned}&E_1 = E_2 = E_4 = E_{fh}\\ &E_3 = E_5 = E_6 = 0\\ &R_{t1} = R_{t2} = R_{t4} = R_{on}\\ &R_{t3} = R_{t5} = R_{t6} = R_{off}\end{aligned}$$

با توجه به رابطه (۱)، تعداد متغیرهای سیستم ۴۲ تا می‌باشد. با نوشتن ۴۲ معادله KVL و KCL مناسب و حل آنها می‌توان فازور هر متغیر حالت را برحسب فازورهای ورودی به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\begin{aligned}&\overline{X}_h(i) = L_{i1h}V_{Ah} + L_{i2h}V_{Bh}\\ &+ L_{i3h}V_{Ch} + L_{i4h}E_{fh} + L_{i5h}I_{dch} \quad i = 1,...,42\end{aligned} \quad (۲)$$

به‌طوری که $\overline{X}_h(i)$ فیزور متغیر i ام، V_{Ah} ، V_{Bh} و V_{Ch} فازورهای ولتاژهای هارمونیک h ام منابع ولتاژ ورودی، I_{dch} فازور جریان هارمونیک h ام منبع جریان ورودی و E_{fh} فازور ولتاژ هارمونیک h ام منبع ولتاژ مدل کنندهٔ افت ولتاژ مستقیم در دو سر هر تریستور در حال هدایت است که فقط برای h=0 دارای مقدار می‌باشد. L_{i1h} تا L_{i5h} مقادیر ثابتی هستند که به پارامترهای مدار و هارمونیک h ام بستگی دارند. در حالتی که ورودیها بدون اعوجاج باشند، V_{Ah}، V_{Bh} و V_{Ch} فقط برای فرکانس اصلی شبکه (h=1) مقدار دارند و I_{dch} فقط برای h=0. با توجه به شکل (۲) فازور ولتاژ DC در هارمونیک h ام را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

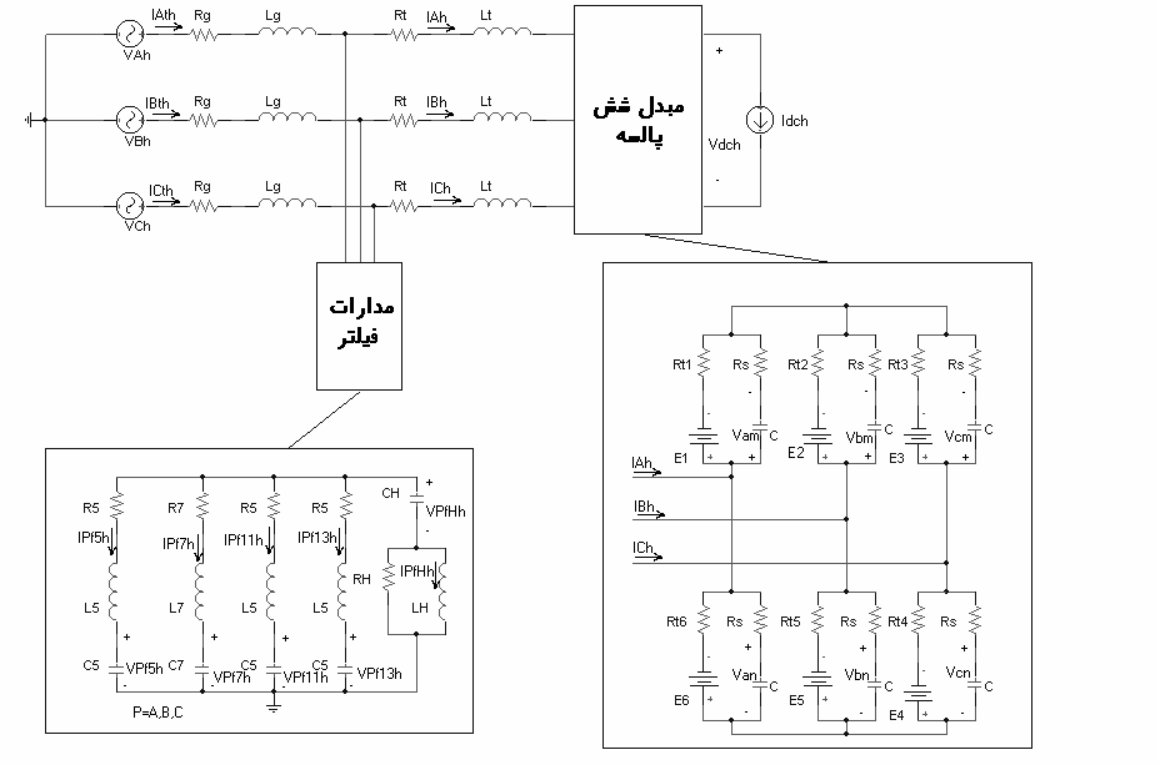
$$V_{dch} = (1 + jh\omega R_5 C)(V_{anh} - V_{amh}) \quad (۳)$$

۳-۲- حالت کموتاسیون در شینهٔ منفی

از شش حالت هدایتی مبدل در حالت کموتاسیون، سه حالت مربوط به کموتاسیون در شینهٔ منفی می‌باشد.

1- Partial Steady State
2- Partial Transient

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲- مدار معادل کلی حالت پایدار هارمونیک h ام سیستم

برای استفاده از مدار معادل کلی شکل (۲) در حالت کموتاسیون در شینهٔ منفی، مثلاً در حالتی که فاز A در حال پایان هدایت، فاز B در حال شروع هدایت و فاز C در کموتاسیون شرکت نداشته باشد، می‌بایست پارامترهای مبدل شش پالسه را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$E_3 = E_5 = E_6 = E_{fh}$$
$$E_1 = E_2 = E_4 = 0$$
$$R_{t3} = R_{t5} = R_{t6} = R_{on}$$
$$R_{t1} = R_{t2} = R_{t4} = R_{off}$$

فازور هر متغیر حالت را می‌توان برحسب فازورهای ورودی به‌صورت زیر نوشت:

$$\overline{X}_h(i) = L_{Ni1h}V_{Ah} + L_{Ni2h}V_{Bh} + L_{Ni3h}V_{Ch} + L_{Ni4h}V_{fh} + L_{Ni5h}I_{dch} \qquad i = 1,...,42 \qquad (۴)$$

به‌طوری که L_{Ni1h} تا L_{Ni5h} مقادیر ثابتی هستند که به پارامترهای مدار و هارمونیک h ام بستگی دارند. فازور ولتاژ DC در هارمونیک h ام را می‌توان از رابطه (۳) به‌دست آورد.

۳-۳- حالت هدایت مستقیم

از ۱۲ حالت هدایتی مبدل، شش حالت مربوط به هدایت مستقیم می‌باشد. برای استفاده از مدار معادل کلی شکل (۲) در حالت هدایت مستقیم، مثلاً در حالتی که تریستور فاز A در حالت هدایت بوده و به شینهٔ مثبت متصل باشد و تریستور فاز C نیز در حالت هدایت بوده و به شینهٔ منفی متصل باشد، می‌بایست پارامترهای مبدل شش پالسه را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$E_1 = E_4 = E_{fh}$$
$$E_2 = E_3 = E_5 = E_6 = 0$$
$$R_{t1} = R_{t4} = R_{on}$$
$$R_{t2} = R_{t3} = R_{t5} = R_{t6} = R_{off} \qquad (۵)$$

Archive
www.SID.ir

فازور هر متغیر حالت را می‌توان برحسب فازورهای ورودی به‌صورت زیر نوشت:

$$\overline{X}_h(i) = L_{Fi1h}V_{Ah} + L_{Fi2h}V_{Bh} + L_{Fi3h}V_{Ch} \\ L_{Fi4h}E_{fh} + L_{Fi5h}I_{dch} \qquad i = 1,...,42 \tag{۶}$$

به‌طوری که L_{Fi1h} تا L_{Fi5h} مقادیر ثابتی هستند که به پارامترهای مدار و هارمونیک h ام بستگی دارند.

۴- مدل حالت گذرا

مدار معادل کلی گذرای سیستم در شکل (۳) نشان داده شده است. پارامترهای مبدل شش پالسه با توجه به نوع حالت هدایتی مبدل باید تعریف شوند.

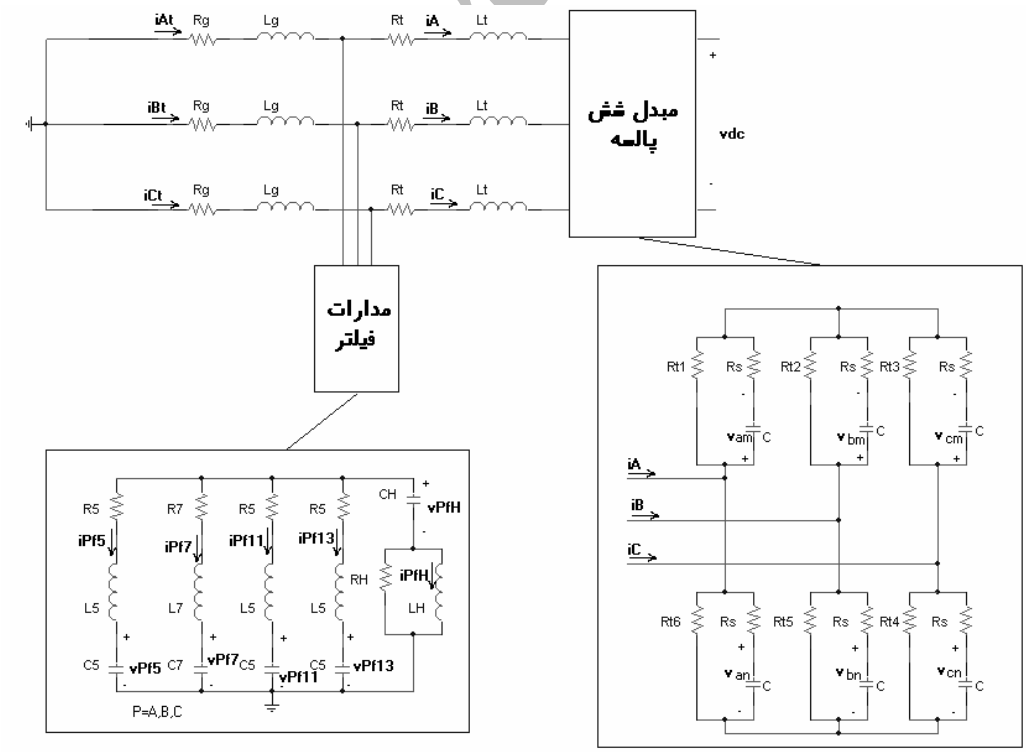
بردار متغیرهای حالت سیستم در حوزهٔ زمان به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\overline{x} = [i_{At}, i_{Bt}, i_{Ct}, i_A, i_B, i_C, v_{am}, v_{bm}, v_{cm}, v_{an}, v_{bn}, v_{cn}, i_{Af5}, i_{Af7}, i_{Af11}, i_{Af13}, i_{AfH}, v_{Af5}, v_{Af7}, v_{Af11}, v_{Af13}, v_{AfH}, i_{Bf5}, i_{Bf7}, i_{Bf11}, i_{Bf13}, i_{BfH}, v_{Bf5}, v_{Bf7}, v_{Bf11}, v_{Bf13}, v_{BfH}, i_{Cf5}, i_{Cf7}, i_{Cf11}, i_{Cf13}, i_{CfH}, v_{Cf5}, v_{Cf7}, v_{Cf11}, v_{Cf13}, v_{CfH}] \tag{۷}$$

۴-۱- حالت کموتاسیون در شینهٔ مثبت

برای استفاده از مدار معادل کلی گذرای شکل (۳) در حالت کموتاسیون در شینهٔ مثبت، مثلاً در حالتی که فاز A در حال پایان هدایت، فاز B در حال شروع هدایت و فاز C در کموتاسیون شرکت نداشته باشد، می‌بایست پارامترهای مبدل شش پالسه را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$R_{t1} = R_{t2} = R_{t4} = R_{on}$$
$$R_{t3} = R_{t5} = R_{t6} = R_{off}$$



شکل ۳- مدار معادل کلی گذرای سیستم

Archive of SID
www.SID.ir

با توجه به رابطهٔ (۷) تعداد متغیرهای حالت ۴۲ عدد می‌باشد. با نوشتن ۴۲ معادله KVL و KCL مناسب در حوزهٔ زمان می‌توان معادلات حالت سیستم را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\dot{\bar{x}}(i)=\sum_{j=1}^{42}K_{ij}\,\bar{x}(j)\quad i=1,...,42 \qquad (۸)$$

به‌طوری که $\dot{\bar{x}}(i)$ مشتق متغیر i ام بردار حالت نسبت به زمان می‌باشد. K_{ij} مقادیر ثابتی هستند که به پارامترهای مدار بستگی دارند. معادلات (۸) را می‌توان به فرم ماتریسی زیر در آورد:

$$\dot{\bar{x}}=A\bar{x} \qquad (۹)$$

به‌طوری که $A_{(42\times42)}$ ماتریس حالت سیستم می‌باشد:

$$A=\begin{bmatrix}K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{142}\\ \vdots & & & \\ K_{421} & K_{422} & \cdots & K_{4242}\end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

۴-۲- حالت کموتاسیون در شینهٔ منفی

برای استفاده از مدار معادل کلی گذرای شکل (۳) در حالت کموتاسیون در شینهٔ منفی، مثلاً در حالتی که فاز A در حال پایان هدایت، فاز B در حال شروع هدایت و فاز C در کموتاسیون شرکت نداشته باشد، می‌بایست پارامترهای مبدل شش پالسه را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$R_{t3}=R_{t5}=R_{t6}=R_{on}$$
$$R_{t1}=R_{t2}=R_{t4}=R_{off}$$

در اینحالت نیز با نوشتن ۴۲ معادله KVL و KCL مناسب در حوزهٔ زمان می‌توان با معادلات حالت سیستم را به‌صورت زیر نوشت:

$$\dot{\bar{x}}(i)=\sum_{j=1}^{42}K_{nij}\,\bar{x}(j)\quad i=1,...,42 \qquad (۱۱)$$

K_{nij} مقادیر ثابتی هستند که به پارامترهای مدار بستگی دارند. معادلات بالا را می‌توان به‌صورت ماتریسی زیر نوشت:

$$\dot{\bar{x}}=A_n\bar{x} \qquad (۱۲)$$

به‌طوری که A_n ماتریس حالت سیستم به‌صورت زیر می‌باشد.

$$A_n=\begin{bmatrix}K_{n11} & \cdots & K_{n142}\\ \vdots & & \\ K_{n421} & \cdots & K_{n4242}\end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

۴-۳- حالت هدایت مستقیم

برای استفاده از مدار معادل کلی گذرای شکل (۳) در حالت هدایت مستقیم، مثلاً در حالتی که تریستور فاز A در حالت هدایت بوده و به شینهٔ مثبت متصل باشد و تریستور فاز C نیز در حالت هدایت بوده و به شینهٔ منفی متصل باشد، می‌بایست پارامترهای مبدل شش پالسه را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$R_{t1}=R_{t4}=R_{on}$$
$$R_{t2}=R_{t3}=R_{t5}=R_{t6}=R_{off}$$

در اینحالت نیز با نوشتن ۴۲ معادله KVL و KCL مناسب در حوزهٔ زمان می توان معادلات حالت سیستم را به‌صورت زیر نوشت:

$$\dot{\bar{x}}(i)=\sum_{j=1}^{42}K_{fij}\,\bar{x}(j)\quad i=1,...,42 \qquad (۱۴)$$

به‌طوری که K_{fij} مقادیر ثابتی هستند که به پارامترهای مدار بستگی دارند. معادلات بالا را می‌توان به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$\dot{\bar{x}}=A_f\bar{x} \qquad (۱۵)$$

به‌طوری که A_n ماتریس حالت سیستم به‌صورت زیر می‌باشد.

$$A_n=\begin{bmatrix}K_{f11} & \cdots & K_{f142}\\ \vdots & & \\ K_{f421} & \cdots & K_{f4242}\end{bmatrix} \qquad (۱۶)$$

Archive of SID
www.SID.ir

۵- نقطه کار اصلی مبدل

در نقطهٔ کار اصلی مبدل، منابع ولتاژ سینوسی دارای فرکانس اصلی شبکه (۵۰ HZ) می‌باشند و منبع جریان DC و منبع ولتاژ DC دارای مقادیر ثابتی با فرکانس صفر هستند و زاویهٔ آتش تریستورها مقدار ثابتی است. به‌عبارت دیگر ورودیها دارای هیچ گونه اعوجاجی نیستند. جدول (۱) حالتهای مختلف یک مبدل شش پالسه در یک دورهٔ تناوب فرکانس اصلی خود را نشان می‌دهد. در جدول(۱)، B نشان دهنده فازی است که در حال شروع هدایت است، E نشان دهنده فازی است که در حال خاتمه هدایت است و O نشان دهنده فازی است که در کموتاسیون شرکت ندارد. لحظات t_0 ، t_2 ، t_4 ، t_6 ، t_8 ، t_{10} و t_{12} لحظات آتش تریستورهای مختلف می‌باشند که با فرض ثابت بودن زاویهٔ آتش تریستورها ، مقادیر معلومی هستند، اما لحظات t_1 ، t_3 ، t_5 ، t_7 ، t_9 ، t_{11} لحظات پایان حالتهای کموتاسیون مختلف هستند که مجهول می‌باشند و باید آنها را به‌دست آورد. زمانی که سیستم در حالت پایدار کار می‌کند این ۱۲ حالت در هر سیکل فرکانسی اصلی تکرار می‌شوند. بردارهای $\overline{X}_0$ تا $\overline{X}_{12}$ بردارهایی هستند که مقدار پاسخ کامل متغیرهای حالت در لحظات ابتدایی و انتهایی حالتهای مختلف را نشان می‌دهند. پاسخ کامل متغیرهای حالت در هر حالت هدایتی از حاصل جمع پاسخ حالت پایدار جزئی و پاسخ حالت گذرای جزئی و با توجه به شرایط اولیه در آن حالت تعیین می‌شود. با توجه به متناوب بودن پاسخ مبدل در هر دورهٔ تناوب فرکانس اصلی بردارهای $\overline{X}_0$ و $\overline{X}_{12}$ با هم مساوی می‌باشند. بردارهای $\overline{X}_0$ تا $\overline{X}_{12}$ نیز قسمتی از مجهولات مسئله می‌باشند که باید تعیین گردند.

جدول ۱- حالت های مختلف مبدل ۶ پالسه در یک دوره تناوب فرکانس اصلی

حالت	وضعیت	فاز A	فاز B	فاز C	لحظهٔ شروع	لحظهٔ پایان	بردار حالت در لحظهٔ شروع	بردار حالت در لحظهٔ پایانی
۱	کموتاسیون در شینهٔ مثبت	B	O	E	t_0	t_1	$\overline{X}_0$	$\overline{X}_1$
۲	هدایت مستقیم	+	-	O	t_1	t_2	$\overline{X}_1$	$\overline{X}_2$
۳	کموتاسیون در شینهٔ منفی	O	E	B	t_2	t_3	$\overline{X}_2$	$\overline{X}_3$
۴	هدایت مستقیم	+	O	-	t_3	t_4	$\overline{X}_3$	$\overline{X}_4$
۵	کموتاسیون در شینهٔ مثبت	E	B	O	t_4	t_5	$\overline{X}_4$	$\overline{X}_5$
۶	هدایت مستقیم	O	+	-	t_5	t_6	$\overline{X}_5$	$\overline{X}_6$
۷	کموتاسیون در شینهٔ منفی	B	O	E	t_6	t_7	$\overline{X}_6$	$\overline{X}_7$
۸	هدایت مستقیم	-	+	O	t_7	t_8	$\overline{X}_7$	$\overline{X}_8$
۹	کموتاسیون در شینهٔ مثبت	O	E	B	t_8	t_9	$\overline{X}_8$	$\overline{X}_9$
۱۰	هدایت مستقیم	-	O	+	t_9	t_{10}	$\overline{X}_9$	$\overline{X}_{10}$
۱۱	کموتاسیون در شینهٔ منفی	E	B	O	t_{10}	t_{11}	$\overline{X}_{10}$	$\overline{X}_{11}$
۱۲	هدایت مستقیم	O	-	+	t_{11}	t_{12}	$\overline{X}_{11}$	$\overline{X}_{12}$

Archive of SID

www.SID.ir

پاسخ کامل متغیرهای حالت در حالت هدایتی iام را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد [۱۶]:

$$\overline{X}_i(t)=\overline{X}_{pssi}(t)+e^{A_i(t-t_{i-1})}\left(\overline{X}_{i-1}-\overline{X}_{pssi}(t_{i-1})\right) \quad (۱۷)$$

به‌طوری که $\overline{X}_i(t)$ پاسخ کامل متغیرهای حالت در حالت هدایتی i ام و در لحظهٔ t، $\overline{X}_{i-1}$ پاسخ کامل متغیرهای حالت در ابتدای حالت i ام، $\overline{X}_{pssi}(t)$ پاسخ حالت پایدار جزئی متغیرهای حالت در هدایت i ام و در لحظهٔ t، $\overline{X}_{pssi}(t_{i-1})$ پاسخ حالت پایدار جزئی متغیرهای حالت در ابتدای i ام و A_i ماتریس حالت سیستم در حالت هدایتی i ام می‌باشند. با توجه به رابطهٔ (۱۷) و جدول (۱) خواهیم داشت:

$$\overline{X}_1=\overline{X}_{pss1}(t_1)+e^{A_1(t_1-t_0)}\left(\overline{X}_0-\overline{X}_{pss1}(t_0)\right) \quad (۱۸)$$

$$\overline{X}_2=\overline{X}_{pss2}(t_2)+e^{A_2(t_2-t_1)}\left(\overline{X}_1-\overline{X}_{pss2}(t_1)\right) \quad (۱۹)$$

$$\overline{X}_3=\overline{X}_{pss3}(t_3)+e^{A_3(t_3-t_2)}\left(\overline{X}_2-\overline{X}_{pss3}(t_2)\right) \quad (۲۰)$$

$$\overline{X}_4=\overline{X}_{pss4}(t_4)+e^{A_4(t_4-t_3)}\left(\overline{X}_3-\overline{X}_{pss3}(t_3)\right) \quad (۲۱)$$

$$\overline{X}_5=\overline{X}_{pss5}(t_5)+e^{A_5(t_5-t_4)}\left(\overline{X}_4-\overline{X}_{pss5}(t_4)\right) \quad (۲۲)$$

$$\overline{X}_6=\overline{X}_{pss6}(t_6)+e^{A_6(t_6-t_5)}\left(\overline{X}_5-\overline{X}_{pss6}(t_5)\right) \quad (۲۳)$$

$$\overline{X}_7=\overline{X}_{pss7}(t_7)+e^{A_7(t_7-t_6)}\left(\overline{X}_6-\overline{X}_{pss7}(t_6)\right) \quad (۲۴)$$

$$\overline{X}_8=\overline{X}_{pss8}(t_8)+e^{A_8(t_8-t_7)}\left(\overline{X}_7-\overline{X}_{pss8}(t_7)\right) \quad (۲۵)$$

$$\overline{X}_9=\overline{X}_{pss9}(t_9)+e^{A_9(t_9-t_8)}\left(\overline{X}_8-\overline{X}_{pss9}(t_8)\right) \quad (۲۶)$$

$$\overline{X}_{10}=\overline{X}_{pss10}(t_{10})+e^{A_{10}(t_{10}-t_9)}\left(\overline{X}_9-\overline{X}_{pss10}(t_9)\right) \quad (۲۷)$$

$$\overline{X}_{11}=\overline{X}_{pss11}(t_{11})+e^{A_{11}(t_{11}-t_{10})}\left(\overline{X}_{10}-\overline{X}_{pss11}(t_{10})\right) \quad (۲۸)$$

$$\overline{X}_{12}=\overline{X}_0=\overline{X}_{pss12}(t_{12})+e^{A_{12}(t_{12}-t_{11})}\times\left(\overline{X}_{11}-\overline{X}_{pss12}(t_{11})\right) \quad (۲۹)$$

در روابط (۱۸) تا (۲۹)، بردارهای $\overline{X}_0$ تا $\overline{X}_{12}$ و لحظات t_1، t_3، t_5، t_7، t_9 و t_{11} مجهولات مسئله هستند. بنابراین تعداد معادلات از تعداد مجهولات شش تا کمتر می‌باشد. برای به‌دست آوردن شش معادلهٔ باقی مانده باید به این نکته توجه کرد که لحظهٔ انتهای کموتاسیون زمانی است که جریان در تریستوری که در حال خاموش شدن است به صفر کاهش می‌یابد.

در حالت اول، حالت کموتاسیون در شینهٔ مثبت، تریستور شمارهٔ (۵)، تریستور شینهٔ مثبت فاز C، در حال خاموش شدن است. در پایان این حالت داریم:

$$i_C(t_1)-C\frac{dv_{cm}(t_1)}{dt}-C\frac{dv_{cn}(t_1)}{dt}-\left(R_sC\frac{dv_{cn}(t_1)}{dt}+v_{cn}(t_1)\right)G_b=0 \quad (۳۰)$$

به‌طوری که:

$$G_b=\frac{1}{R_b} \quad (۳۱)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$i_c(t_1)-G_bV_{cn}(t_1)-C\dot{v}_{cm}(t_1)-CP\dot{v}_{cn}(t_1)=0 \quad (۳۲)$$

به‌طوری که:

$$CP=C+G_bR_sC \quad (۳۳)$$

با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸) می‌توان رابطهٔ (۳۲) را به شکل ماترسی زیر نوشت:

$$\overline{a}_1\overline{X}_{pss1}(t_1)-\overline{c}_1\overline{\dot{X}}_{pss1}(t_1)+\left\{\overline{a}_1-\overline{c}_1A_1\right\}e^{A_1(t_1-t_0)}\left(\overline{X}_0-\overline{X}_{pss1}(t_0)\right)=0 \quad (۳۴)$$

Archive of SID
www.SID.ir

به‌طوری که:

$$\bar{a}_1 = [0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,-G_b,0,0 \\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, \\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۳۵)$$

$$\bar{c}_1 = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,C,0,0, \\ CP,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, \\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۳۶)$$

در حالت سوم، حالت کموتاسیون در شینهٔ منفی، تریستور شمارهٔ (۶)، تریستور شینهٔ منفی فاز B، در حال خاموش شدن است. در پایان این حالت داریم:

$$i_B(t_3) - G_b V_{bn}(t_3) - CP\dot{v}_{bm}(t_3) - C\dot{v}_{bn}(t_3) = 0 \quad (۳۷)$$

با توجه به روابط (۱۷) و (۲۰) می‌توان رابطهٔ (۳۷) را به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$\bar{a}_2 \overline{X}_{pss3}(t_3) - \bar{c}_2 \dot{\overline{X}}_{pss3}(t_3) + \{\bar{a}_3 - \bar{c}_3 A_3\} \\ e^{A_3(t_3-t_2)}\left(\overline{X}_2 - \overline{X}_{pss3}(t_2)\right) = 0 \quad (۳۸)$$

به‌طوری که:

$$\bar{a}_2 = [0,0,0,0,1,0,0,-G_b,0,0, \\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0 \\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۳۹)$$

$$\bar{c}_2 = [0,0,0,0,0,0,0,CP,0,0,C \\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, \\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۴۰)$$

در حالت پنجم، حالت کموتاسیون در شینهٔ مثبت، تریستور شماره (۱)، تریستور شینهٔ مثبت فاز A در حال خاموش شدن است. در پایان این حالت خواهیم داشت:

$$i_A(t_5) - G_b V_{bn}(t_5) - C\dot{v}_{am} - CP\dot{v}_{an} = 0 \quad (۴۱)$$

با توجه به روابط (۱۷) و (۲۲) می‌توان رابطهٔ (۴۱) را به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$\bar{a}_3 \overline{X}_{pss5}(t_5) - \bar{c}_3 \dot{\overline{X}}_{pss5}(t_5) + \\ \{\bar{a}_3 - \bar{c}_3 A_5\} e^{A_5(t_5-t_4)} \\ * \left(\overline{X}_4 - \overline{X}_{pss5}(t_4)\right) = 0 \quad (۴۲)$$

به‌طوری که:

$$\bar{a}_3 = [0,0,0,1,0,0,0,0,0,-G_b,0 \\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, \\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۴۳)$$

$$\bar{c}_3 = [0,0,0,0,0,0,C,0,0,CP,0,0 \\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, \\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۴۴)$$

در حالت هفتم، حالت کموتاسیون در شینهٔ منفی، تریستور شماره (۲)، تریستور منفی فاز C، در حال خاموش شدن است. در پایان این حالت داریم:

$$i_c(t_7) - G_b V_{cm} - CP\dot{v}_{cm} - C\dot{v}_{cn} = 0 \quad (۴۵)$$

با توجه به روابط (۱۷) و (۲۴) می‌توان رابطهٔ (۴۵) را به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$\bar{a}_4 \overline{X}_{pss7}(t_7) - \bar{c}_4 \dot{\overline{X}}_{pss7}(t_7) + \\ \{\bar{a}_4 - \bar{c}_4 A_7\} e^{A_7(t_7-t_6)}\left(\overline{X}_6 - \overline{X}_{pss7}(t_6)\right) = 0 \quad (۴۶)$$

به‌طوری که:

$$\bar{a}_4 = [0,0,0,0,0,1,0,0,-G_b,0 \\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, \\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۴۷)$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$\bar{c}_4 = [0,0,0,0,0,0,0,0,CP,0,0,\\ C,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۴۸)$$

در حالت نهم، حالت کموتاسیون در شینهٔ مثبت، ترسیتور شمارهٔ (۳)، تریستور شینهٔ مثبت فاز B، در حال خاموش شدن است. در پایان این حالت خواهیم داریم:

$$i_B(t_9) - G_b V_{bn}(t_9) - C\dot{v}_{bm} - CP\dot{v}_{bn} = 0 \quad (۴۹)$$

با توجه به روابط (۱۷) و (۲۶) می‌توان رابطهٔ (۴۹) را به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$\bar{a}_9 \overline{X}_{pss9}(t_9) - \bar{c}_5 \overline{\dot{X}}_{pss9}(t_9) + \left\{\bar{a}_5 - \bar{c}_5 A_9\right\} e^{A_9(t_9-t_8)}\left(\overline{X}_8 - \overline{X}_{pss9}(t_8)\right) = 0 \quad (۵۰)$$

به‌طوری که:

$$\bar{a}_5 = [0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,-G_b,0,\\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۵۱)$$

$$\bar{c}_5 = [0,0,0,0,0,0,0,C,0,0,CP,0,0,\\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,\\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۵۲)$$

در حالت یازدهم، حالت کموتاسیون در شینهٔ منفی، تریستور شماره (۴)، تریستور شینهٔ منفی فاز A، در حال خاموش شدن است. در پایان این حالت داریم:

$$i_A(t_{11}) - G_b V_{am}(t_{11}) - CP\dot{v}_{am} - C\dot{v}_{an} = 0 \quad (۵۳)$$

با توجه به روابط (۱۷) و (۲۸) می‌توان رابطهٔ (۸۳) را به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$\bar{a}_6 \overline{X}_{pss11}(t_{11}) - \bar{c}_6 \overline{\dot{X}}_{pss11}(t_{11}) + \left\{\bar{a}_6 - \bar{c}_6 A_{11}\right\} e^{A_{11}(t_{11}-t_{10})}\left(\overline{X}_{10} - \overline{X}_{pss11}(t_{10})\right) = 0 \quad (۵۴)$$

بطوریکه:

$$\bar{a}_6 = [0,0,0,1,0,0,-G_b,0,0,0,\\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۵۵)$$

$$\bar{c}_6 = [0,0,0,0,0,0,CP,0,0,C,\\ 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\\ ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] \quad (۵۶)$$

روابط (۳۴)، (۳۸)، (۴۲)، (۴۶)، (۵۰) و (۵۴) شش معادلهٔ باقی مانده را ارائه می‌کنند. از این روابط برای به‌دست آوردن لحظات t_1، t_3، t_5، t_7، t_9 و t_{11} با استفاده از روش نیوتن- رافسون، کمک می‌گیریم. برای اینکار ابتدا توابع زیر را تعریف می‌کنیم:

$$f_1(t_1) = \bar{a}_1 \overline{X}_{pss1}(t_1) - \bar{c}_1 \overline{\dot{X}}_{pss1}(t_1) + \left(\bar{a}_1 - \bar{c}_1 A_1\right) e^{A_1(t_1-t_0)}\left(\overline{X}_0 - \overline{X}_{pss1}(t_0)\right) \quad (۵۷)$$

$$f_3(t_3) = \bar{a}_2 \overline{X}_{pss3}(t_3) - \bar{c}_2 \overline{\dot{X}}_{pss3}(t_3) + \left(\bar{a}_2 - \bar{c}_2 A_3\right) e^{A_3(t_3-t_2)}\left(\overline{X}_2 - \overline{X}_{pss3}(t_2)\right) \quad (۵۸)$$

$$f_5(t_5) = \bar{a}_3 \overline{X}_{pss5}(t_5) - \bar{c}_3 \overline{\dot{X}}_{pss5}(t_5) + \left(\bar{a}_3 - \bar{c}_3 A_5\right) e^{A_5(t_5-t_4)}\left(\overline{X}_4 - \overline{X}_{pss5}(t_4)\right) \quad (۵۹)$$

$$f_7(t_7) = \bar{a}_4 \overline{X}_{pss7}(t_7) - \bar{c}_4 \overline{\dot{X}}_{pss7}(t_7) + \left(\bar{a}_4 - \bar{c}_4 A_7\right) e^{A_7(t_7-t_6)}\left(\overline{X}_6 - \overline{X}_{pss7}(t_6)\right) \quad (۶۰)$$

$$f_9(t_9) = \bar{a}_5 \overline{X}_{pss9}(t_9) - \bar{c}_5 \overline{\dot{X}}_{pss9}(t_9) + \left(\bar{a}_5 - \bar{c}_5 A_9\right) e^{A_9(t_9-t_8)}\left(\overline{X}_8 - \overline{X}_{pss9}(t_8)\right) \quad (۶۱)$$

$$f_{11}(t_{11}) = \bar{a}_6 \overline{X}_{pss11}(t_{11}) - \bar{c}_6 \overline{\dot{X}}_{pss11}(t_{11}) + \left(\bar{a}_6 - \bar{c}_6 A_{11}\right) e^{A_{11}(t_{11}-t_{10})}\left(\overline{X}_{10} - \overline{X}_{pss11}(t_{10})\right) \quad (۶۲)$$

مشتق این توابع نسبت به زمان به‌صورت زیر است:

Archive of SID

www.SID.ir

$$Jt_1 = \frac{\partial f_1(t_1)}{\partial t_1} = \bar{a}_1 \overline{\dot{X}}_{pss1}(t_1) - \bar{c}_1 \overline{\ddot{X}}_{pss1}(t_1) + \left(\bar{a}_1 - \bar{c}_1 A_1\right) A_1 e^{A_1(t_1 - t_0)} \left(\overline{X}_0 - \overline{X}_{pss1}(t_0)\right) \quad (۶۳)$$

$$Jt_3 = \frac{\partial f_3(t_3)}{\partial t_3} = \bar{a}_2 \overline{\dot{X}}_{pss3}(t_3) - \bar{c}_2 \overline{\ddot{X}}_{pss3}(t_3) + \left(\bar{a}_2 - \bar{c}_2 A_3\right) A_3 e^{A_3(t_3 - t_2)} \left(\overline{X}_2 - \overline{X}_{pss3}(t_2)\right) \quad (۶۴)$$

$$Jt_5 = \frac{\partial f_5(t_5)}{\partial t_5} = \bar{a}_3 \overline{\dot{X}}_{pss5}(t_5) - \bar{c}_3 \overline{\ddot{X}}_{pss5}(t_5) + \left(\bar{a}_3 - \bar{c}_3 A_5\right) A_5 e^{A_5(t_5 - t_4)} \left(\overline{X}_4 - \overline{X}_{pss5}(t_4)\right) \quad (۶۵)$$

$$Jt_7 = \frac{\partial f_7(t_7)}{\partial t_7} = \bar{a}_4 \overline{\dot{X}}_{pss7}(t_7) - \bar{c}_4 \overline{\ddot{X}}_{pss7}(t_7) + \left(\bar{a}_4 - \bar{c}_4 A_7\right) A_7 e^{A_7(t_7 - t_6)} \left(\overline{X}_6 - \overline{X}_{pss7}(t_6)\right) \quad (۶۶)$$

$$Jt_9 = \frac{\partial f_9(t_9)}{\partial t_9} = \bar{a}_5 \overline{\dot{X}}_{pss9}(t_9) - \bar{c}_5 \overline{\ddot{X}}_{pss9}(t_9) + \left(\bar{a}_5 - \bar{c}_5 A_9\right) A_9 e^{A_9(t_9 - t_8)} \left(\overline{X}_8 - \overline{X}_{pss9}(t_8)\right) \quad (۶۷)$$

$$Jt_{11} = \frac{\partial f_{11}(t_{11})}{\partial t_{11}} = \bar{a}_6 \overline{\dot{X}}_{pss11}(t_{11}) - \bar{c}_6 \overline{\ddot{X}}_{pss11}(t_{11}) + \left(\bar{a}_6 - \bar{c}_6 A_{11}\right) A_{11} * e^{A_{11}(t_{11} - t_{10})} \left(\overline{X}_{10} - \overline{X}_{pss11}(t_{10})\right) \quad (۶۸)$$

با استفاده از این توابع، فرمولهای تکرار نیوتن- رافسون به‌صورت زیر خواهند بود:

$$t_{1new} = t_{1old} - \frac{f_1(t_1)}{Jt_1} \qquad t_0 \langle t_{1new} \langle t_2 \quad (۶۹)$$

$$t_{3new} = t_{3old} - \frac{f_3(t_3)}{Jt_3} \qquad t_2 \langle t_{3new} \langle t_4 \quad (۷۰)$$

$$t_{5new} = t_{5old} - \frac{f_5(t_5)}{Jt_5} \qquad t_4 \langle t_{5new} \langle t_6 \quad (۷۱)$$

$$t_{7new} = t_{7old} - \frac{f_7(t_7)}{Jt_7} \qquad t_6 \langle t_{7new} \langle t_8 \quad (۷۲)$$

$$t_{9new} = t_{9old} - \frac{f_9(t_9)}{Jt_9} \qquad t_8 \langle t_{9new} \langle t_{10} \quad (۷۳)$$

$$t_{11new} = t_{11old} - \frac{f_{11}(t_{11})}{Jt_{11}} \qquad t_{10} \langle t_{11new} \langle t_{12} \quad (۷۴)$$

در نهایت مراحل انجام محاسبات برای به‌دست آوردن مجهولات مسئله به‌صورت زیر می‌باشد:

۱- حدس اولیه $\overline{X}_0$ و لحظات t_1، t_3، t_5، t_7، t_9 و t_{11}

۲- به‌دست آوردن t_1 با روش تکراری نیوتن- رافسون

۳- محاسبه بردارهای $\overline{X}_1$ و $\overline{X}_2$ با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹)

۴- به‌دست آوردن t_3 با روش تکراری نیوتن- رافسون

۵- محاسبهٔ بردارهای $\overline{X}_3$ و $\overline{X}_4$ با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱)

۶- به‌دست آوردن t_5 با روش تکراری نیوتن- رافسون

۷- محاسبهٔ بردارهای $\overline{X}_5$ و $\overline{X}_6$ با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۳)

۸- به‌دست آوردن t_7 با روش تکراری نیوتن- رافسون

۹- محاسبه بردارهای $\overline{X}_7$ و $\overline{X}_8$ با استفاده از روابط (۲۴) و (۲۵)

۱۰- به‌دست آوردن t_9 با روش تکراری نیوتن- رافسون

۱۱- محاسبه بردارهای $\overline{X}_9$ و $\overline{X}_{10}$ با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷)

۱۲- به‌دست آوردن t_{11} با روش تکراری نیوتن- رافسون

۱۳- محاسبهٔ بردارهای $\overline{X}_{11}$ و $\overline{X}_{12}$ با استفاده از روابط (۲۸) و (۲۹)

۱۴- اگر $\Delta\overline{X} = \overline{X}_{12} - \overline{X}_0$ از یک مقدار از پیش تعیین شده کوچکتر باشد جواب به‌دست آمده است و گرنه $\overline{X}_0$ را برابر با $\overline{X}_{12}$ قرار داده و به مرحله ۲ بر می‌گردیم.

با مشخص شدن تمامی مجهولات مسئله، با استفاده از رابطهٔ (۱۷) می‌توان پاسخ کامل تمام متغیرهای حالت را به‌دست آورد.

Archive of SID

www.SID.ir

۶- اثر اعوجاج هارمونیکی در ولتاژهای AC ورودی

فرض کنید که ولتاژهای AC ورودی دارای یک مؤلفهٔ هارمونیکی به‌صورت زیر باشند:

$$\Delta V_{\psi}(t) = V_h \sin\left(h\omega t + \varphi_h - s\psi\right) \qquad \psi = 0^{\circ},120^{\circ},240^{\circ} \qquad (۷۵)$$

به‌طوری که s برای توالی مثبت برابر با ۱ و برای توالی منفی برابر ۱- می‌باشد. h عدد صحیحی است که مرتبهٔ هارمونیکی را نشان می‌دهد. ابتدا تغییرات به‌وجود آمده در پاسخ‌های حالت پایدار متغیرهای حالت با توجه به روابط (۲)، (۴) و (۶) محاسبه می‌گردند. از طرف دیگر مؤلفهٔ اعوجاجی در ولتاژهای AC ورودی باعث تغییر لحظات پایان کموتاسیون می‌گردد. بنابراین باید برای هر هارمونیک این لحظات را دوباره محاسبه کرد. روابط مورد استفاده مشابه با روابط نقطه کار اصلی مبدل هستند و فقط باید مؤلفه اعوجاجی در پاسخ‌های حالت پایدار جزئی و پاسخ‌های حالت گذرای جزئی در نظر گرفته شوند.

۷- اثر اعوجاج هارمونیکی در جریان DC ورودی

فرض کنید که جریان DC دارای یک مؤلفه هارمونیکی بصورت زیر باشد:

$$\Delta i_{dc}(t) = I_h \sin\left(h\omega t + \varphi_h\right) \qquad (۷۶)$$

تغییرات بوجود آمده در پاسخ‌های حالت پایدار متغیرهای حالت با توجه به روابط (۲)، (۴) و (۶) محاسبه می‌گردند. از طرف دیگر مؤلفه اعوجاجی جریان DC باعث تغییر لحظات انتهای کموتاسیون می‌شود. بنابراین باید برای هر هارمونیک این لحظات را دوباره محاسبه کرد. روابط مورد استفاده مشابه با روابط نقطه کار اصلی مبدل هستند و فقط باید مؤلفه اعوجاجی در پاسخ‌های حالت پایدار و گذرا در نظر گرفته شوند.

۸- شبیه‌سازی

برای تأئید مدل ارائه شده، نتایج حاصل از مدل با نتایج حاصل از برنامه شبیه‌سازی حوزهٔ زمان PSCAD/EMTDC مقایسه می‌گردد. برای انجام اینکار از سیستم HVDC در شکـل (۱) استفاده می‌شود. مقادیر پارامترهای مختلف مورد استفاده در این آزمایش به‌صورت زیر می‌باشند:

شبکه AC

$Lg = 0.0667\ H \qquad R_g = 2.1236\ \Omega$

ولتاژ خط- ۲۳۰ KV

ترانسفورماتور مبدل

ستاره / ستاره زمین شده

$L_t = 0.0268\ H \qquad R_t = 0.733\ \Omega$

$230KV / 230KV$

منابع جریان و ولتاژ DC

$E_f = 1\ V \qquad I_{dc} = 2000\ A$

مدار اسنابر

$C = 25\times10^{-9}\ F \qquad R_s = 3500\ \Omega$

مدارات فیلتر

هارمونیک پنجم

$C_5 = 2.14\ \mu F\ L_5 = 189.3\ mH\ R_5 = 2.48\ \Omega$

هارمونیک هفتم

$C_7 = 2.14\ \mu F\ L_7 = 96.62\ mH\ R_7 = 1.77\ \Omega$

هارمونیک یازدهم

$C_{11} = 2.14\ \mu F, L_{11} = 39.13\ mH, R_{11} = 1.515\ \Omega$

هارمونیک سیزدهم

$C_{13} = 2.14\ \mu F, L_{13} = 28\ mH, R_{13} = 1.282\ \Omega$

فیلتر بالاگذر

$C_H = 2.14\ \mu F, L_H = 39.168\ mH, R_H = 225.6\ \Omega$

مقاومتهای تریستور

$R_{off} = 1\ M\Omega \qquad R_{on} = 10\ m\Omega$

زاویه آتش

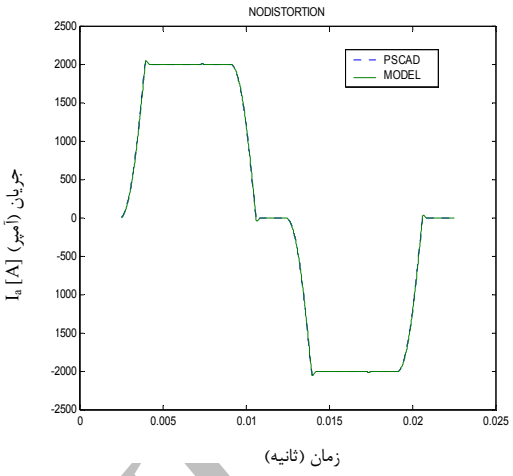
$\alpha = 0.26\ rad \approx 15^{\circ}$

شکلهای (۴) و(۵) به ترتیب شکل موجهای جریان فاز AC و ولتاژ DC در نقطه کار اصلی مبدل را نشان می‌دهند.

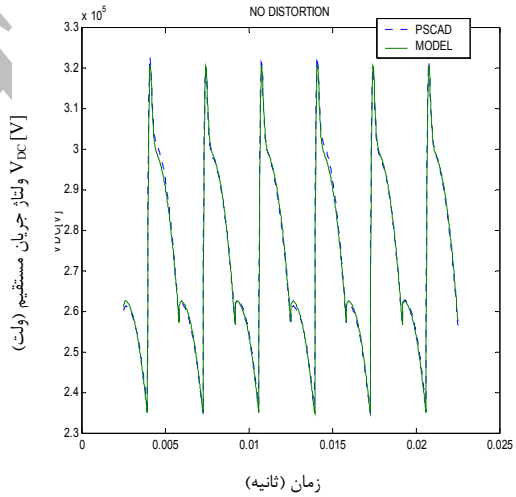
شکلهای (۶) و (۷) به ترتیب شکل موجهای جریان AC فاز A و ولتاژ DC مبدل را در حالت وجود اعوجاج جریان DC با مقدار مؤثر ۲۰A و فرکانس ۱۰۰Hz نشان می‌دهند.

در تمامی این شکلها نزدیکی بسیار خوب نتایج هر دو روش کاملاً مشخص می‌باشد.

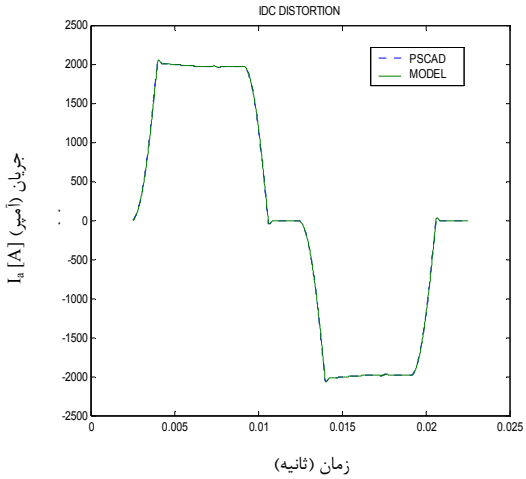
Archive of SID
www.SID.ir



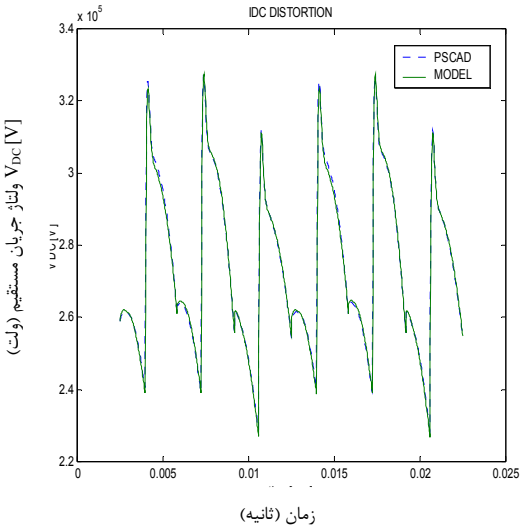
شکل ۴- شکل موج جریان فاز A در نقطه کار اصلی مبدل



شکل ۵- شکل موج ولتاژ DC در نقطه کار اصلی مبدل



شکل ۶- شکل موج جریان AC در حالت وجود اعوجاج جریان DC



شکل ۷- شکل موج ولتاژ DC در حالت وجود اعوجاج جریان DC

۹- نتیجه‌گیری

یک مدل سیگنال کوچک خطی شده برای یک سیستم HVDC شش پالسه ارائه گردیده است. در این مدل برای در نظر گرفتن اثر مقاومتهای R_{on} و R_{off} تریستورها و اثر افت ولتاژ مستقیم آنها و همچنین اثر مدارات اسنابر و فیلتر از یک روش ترکیبی حوزهٔ زمان- حوزهٔ فرکانس استفاده شده است. پاسخ کامل هر متغیر حالت در هر حالت هدایتی از حاصل جمع پاسخ حالت پایدار جزئی (PSS) و پاسخ حالت گذرای جزئی (PT) مدار مربوط به آن حالت به‌دست می‌آید. پاسخ گذرای جزئی از حل معادلات حالت مدار مربوطه در حوزهٔ زمان، و پاسخ حالت پایدار جزئی از حل معادلات حالت پایدار در حوزهٔ فرکانس به‌دست می‌آیند. برای تعیین لحظات پایان کموتاسیون در نقطه کار اصلی مبدل و در هنگام وجود اعوجاج هارمونیکی در ولتاژهای AC ورودی یا جریان DC ورودی از روش تکراری نیوتن- رافسون و برای به‌دست آوردن حالت اولیه سیستم از روش تکراری گوس- سایدل استفاده شده است. مقایسهٔ شکل موجهای جریان AC ورودی و ولتاژ DC در نقطه کار اصلی مبدل و در حالت وجود اعوجاج ولتاژ یک درصدی توالی مثبت ۲۵۰ HZ در ولتاژهای AC ورودی و در حالت وجود اعوجاج جریان DC یک درصدی ۱۰۰ HZ در جریان DC ورودی، نزدیکی بسیار خوب نتایج

Archive of SID
www.SID.ir

حاصل از مدل و شبیه سازی حوزه زمان PSCAD/EMTDC را نشان می‌دهند.

مراجع

[1] C. A. Wegner and et.al, “Control design of san to tome back-to-back HVDC link”, IEEE Trans. PWS, vol. 8, no. 3, pp. 1250-1256, Aug. 1993.

[2] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. L. Watson and A. R. Wood, “Power system harmonic analysis”, John Wiley and Sons, 1997.

[3] L. Hu and R. Yacamini, “Harmonic transfer through converters and HVDC links”, IEEE Trans. Power Electronics, vol. 7, no. 3, Jul. 1992.

[4] Task force on harmonics modelling and simulation, IEEE PES harmonic working group, “Characteristics and modelling of harmonic sources-power electronic devices”, IEEE Trans. Power delivery, vol. 16, no. 4, pp. 791-800, Oct. 2001.

[5] D. H. W. Yan and A. WeiShi, “Harmonics from transformer saturation”, IEEE Trans. vol. PWRD-1, no. 2, 1986.

[6] The Manitoba HVDC research Center EMTDC users Manual, 1988.

[7] B. C. Smith, N. R. Watson, A. R. Wood, and J. Arrillaga, “Newton Solution for the steady-state interaction of AC/DC systems”, IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 143(2), pp. 200-207, Mar. 1996.

[8] C. M. Osauskas, D. J. Hume, and A. R. Wood, “A small signal frequency domain model of an HVDC converter”, IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 148(6), pp. 573-578, Nov. 2001.

[9] A. R. Wood and et.al, “Small signal modelling of HVDC transmission systems”, AC-DC Power Transmission, no. 485, pp. 28-30, Nov. 2001, Conference Publication, IEE 2001.

[10] E. V. Larson, M. Sublich and S. C. Kapoor, “Impact of stray capacitance on HVDC harmonics”, IEEE Trans. Power delivery, vol. 4, no. 1, pp. 637-645, Jan. 1989.

[11] D. J. Hume and et.al, “Linearised direct harmonic solution method for a back-to-back HVDC link”, ICHQPS Conference, pp. 727-733, 14-16 Oct. 1998, Athens, Greece.

[12] E. V. Persson, “Calculation of transfer functions in grid controlled converter systems”, IEE Proc. 117(5), pp. 989-997, 1979.

[13] S. Todd and et.al, “An s-domain model of an HVDC converter”, IEEE Trans. Power delivery, 12(4), pp. 1719-1723, 1997.

[14] Jovcic and et.al, “Analytic modelling of HVDC-HVAC systems”, IEEE Trans. Power delivery, 14(2), pp. 506-511, 1999.

[15] Contreras and et.al, “New steady-state algorithm for piece-wise linear circuit”, IEE Proc. Electr. Power Appl. 148(3), pp. 245-250, 2001.

[۱۶] دکتر علی خاکی صدیق، "اصول کنترل مدرن"، آذرماه ۱۳۷۳ (چاپ اول)، انتشارات دانشگاه تهران.

Archive of SID
www.SID.ir