

## ناپایداری سیستم‌های HVDC ناشی از اشباع ترانسفورماتور مبدل بوسیله تاثیر متقابل‌ها رمونیک‌ها

گئورگ قره پتیان

دانشگاه صنعتی امیر کبیر

حسین محسنی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده مهندسی برق

تهران - ایران

افشین رضائی زارع

دانشکده فنی - دانشگاه تهران

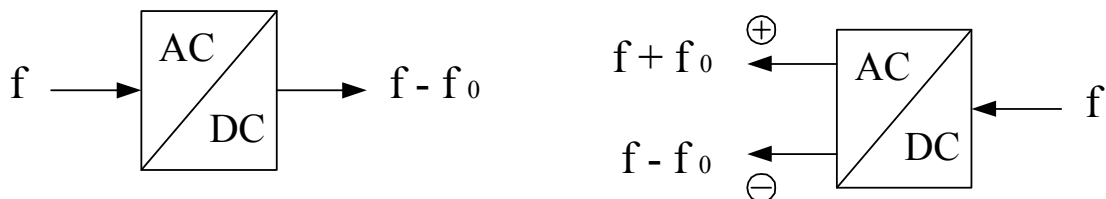
واژه‌های کلیدی: ناپایداری سیستم HVDC، ترانسفورماتور مبدل، اشباع، تاثیر متقابل‌ها رمونیک‌ها

### ۱- مقدمه

هسته ترانسفورماتور منبع شناخته شده ای برای تولیدها رمونیک است. اشباع هسته معمولا در اثر جریان مغناطیس شونده DC و یا اضافه تحریک ترانسفورماتورها ایجاد می‌شود. این‌ها رمونیک‌ها عمدتا از مرتبه فرد بوده وها رمونیک مرتبه سوم آن‌ها رمونیک غالب است. ترانسفورماتورهای مبدل HVDC دارای شرایط خاصی هستند که علاوه برها رمونیک‌ها ی سوم، جریان DC نیز تولید می‌کنند. اشباع هسته ترانسفورماتورها یک عامل تقویت کننده ناپایداری هارمونیک است.

### چکیده

ناپایداری ناشی از اشباع هسته نوعی ناپایداری است که ممکن است در مبدلهای HVDC رخ دهد. این ناپایداری از تاثیر متقابل بین‌ها رمونیک دوم و مؤلفه DC ولتاژ و جریان‌ها در سمت AC مبدل و مؤلفه اول فرکانسی در سمت DC مبدل بوجود می‌آید و می‌تواند بوسیله اشباع نامتعادل ترانسفورماتور مبدل تشدید شود. در این مقاله یک روش تحلیلی جهت بررسی ناپایداری ناشی از اشباع ترانسفورماتور در سیستم‌های HVDC معرفی شده و با استفاده از آن یک شبکه نمونه CIGRE توسط نرم افزار PSCAD/EMTDC مورد شبیه سازی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی، ناپایداری سیستم را به ازاء نتایج بدست آمده از روش تحلیلی تأیید می‌کند.



شکل ۱- انتقال و تغییر فرکانس نوسانات از سیستم AC به شبکه DC و بالعکس توسط مبدل HVDC (علامت مثبت نشان دهنده فرکانس توالی مثبت و علامت منفی نشان دهنده فرکانس نوسانات توالی منفی است)

اغتشاش باعث ایجاد یک جریان فرکانس اصلی می‌شود که از امپدانس سمت DC مبدل عبور می‌کند. این اغتشاش جریانی نیز به نوبه خود باعث ایجاد جریان توالی مثبت‌ها رمونیک دوم ( $f_0+f_0$ ) و جریان توالی منفی شبه DC ( $f_0-f_0$ ) در سمت AC مبدل می‌شود. از آنجا که اغتشاشات سمت DC دقیقاً در فرکانس اصلی ( $f_0$ ) اتفاق نمی‌افتد، جریان DC منتقل شده به سمت AC نیز یک جریان شبه DC با توالی منفی و با تغییرات آرام است. این مؤلفه DC شروع به اشباع بردن ترانسفورماتور می‌کند. در نتیجه مؤلفه‌های هارمونیک سمت AC با به اشباع رفتن ترانسفورماتور تقویت شده و این روند چرخه خود را می‌بندد. مؤلفه‌ها رمونیک دوم انتقالی از سمت DC به سمت AC نیز با مؤلفه‌ها رمونیک دوم اولیه سیستم جمع شده و اغتشاشی مشابه با دامنه بزرگتر در سمت DC ایجاد می‌کند و این چرخه همراه با فیدبک مثبت بسته شده و سرانجام باعث ناپایداری ولتاژ و جریان در مبدل HVDC می‌گردد. جریان شبه DC با توالی منفی در سیم پیچ‌های سمت مبدل ترانسفورماتور جاری و بین فازها به صورت تناوبی جابجا می‌شود. تغییرات این مؤلفه جریانی از یک طرف به اندازه به اشباع بردن ترانسفورماتور کند بوده و از طرف دیگر به اندازه کافی نیز سریع است که درصدی از آن بتواند به سمت دیگر ترانسفورماتور و به شبکه AC منتقل شود

معمولاً بروز ناپایداری خودبخودی اشباع هسته پدیده‌ای نادر است. ناپایداری اکثراً با رخ دادن خطا در شبکه AC و یا سوئیچینگ و یا برقرار شدن ترانسفورماتور شروع می‌شود. سیستم‌هایی که احتمال قرار گرفتن در شرایط ناپایداری اشباع هسته را دارند معمولاً در حالت ماندگار فاقد میرایی کافی در برابر نوسانات مربوطه هستند. کلید زنی پرریودیک تأییرستورها در هر مبدل HVDC یک نوسان با فرکانس معین در سیستم AC را تبدیل به نوسانی با فرکانس متفاوت در سمت DC می‌کند و بالعکس. بطور کلی یک نوسان توالی مثبت ولتاژ با فرکانس  $f$  در سیستم AC باعث ایجاد فرکانس  $f-f_0$  در سیستم DC از طریق مبدل می‌شود که در آن فرکانس اصلی و نامی سیستم است. از طرف دیگر جریانی با فرکانس  $f$  در سمت DC باعث القاء یک نوسان توالی مثبت با فرکانس  $f+f_0$  و یک نوسان توالی منفی با فرکانس  $f-f_0$  در سمت AC می‌شود. این تبدیل فرکانسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

بر این اساس مکانیسم ناپایداری در اثر اشباع هسته ترانسفورماتور مبدل را می‌توان بدین ترتیب تشریح کرد که اگر اغتشاش کوچکی بصورت‌ها رمونیک دوم ( $2f_0$ ) و با توالی مثبت در سمت AC مبدل ایجاد شود، اغتشاش به صورت فرکانس اصلی مبدل ( $2f_0-f_0=f_0$ ) به سمت DC منتقل می‌شود. این

و درصد کمی از آن باعث اشباع ترانسفورماتور شود. هر چه تغییرات مؤلفه DC سریعتر باشد درصد بیشتری از آن وارد شبکه AC شده و درصد کمتری باعث اشباع ترانسفورماتور می‌شود.

شروع ناپایداری هسته به سطح اشباع ترانسفورماتور مبدل وابسته است. بنابراین ناپایداری را بر اساس شرایط آغاز شدن آن می‌توان به دو دسته تقسیم نمود. اولین دسته در شرایط عملکرد طبیعی بدون هیچگونه تحریک خارجی ممکن است ایجاد شوند. نامتعادلی سیستم و نامتقارن آتش شدن تریستورها در مبدل باعث ایجاد سطح پایینی از اشباع در ترانسفورماتور می‌شوند که می‌تواند باعث گسترش فوری شرایط کار عادی به حالت ناپایدار شود. مطالعه این نوع ناپایداری به بررسی پاسخ ترانسفورماتور در سطوح پایین اشباع نیازمند است. نوع دوم ناپایداری ناشی از ضربه‌ها و تحریک‌ها ی ایجاد شده در شبکه و وارد شده به ترانسفورماتور مبدل است. این شرایط ممکن است باعث اشباع شدید ترانسفورماتور و متعاقباً ناپایداری هسته بعد از رفع اغتشاش شود. برای این نوع ناپایداری پاسخ ترانسفورماتور در سطوح بالای اشباع بسیار حائز اهمیت است.

## ۲ - بررسی ناپایداری با استفاده از ماتریس

### تاثیر متقابل

شبیه سازی ناپایداری هسته در حالت ماندگار و تاثیر متقابل سیستم‌های AC و DC در برنامه‌های شبیه ساز کامپیوتری تحلیل حالت‌ها ی گذرا به دلیل ثابت زمانی بزرگ اشباع هسته و سطح نسبتاً پایین جریان تحریک DC و مؤلفه‌های رمونیک در سیم پیچ ترانسفورماتور کاری مشکل است. در این حالت با بزرگتر در نظر گرفتن مؤلفه‌های رمونیک نسبت به

حالت واقعی این پدیده در طول زمان شبیه سازی قابل ایجاد و بررسی می‌باشد. با روش تحلیلی نیز می‌توان تاثیر متقابل‌ها رمونیک‌ها در سیستم AC و DC را به صورت مراحل زیر مورد بررسی قرار داد:

### الف) تاثیر مبدل :

برای یک شبکه AC با فرکانس 50 Hz می‌توان ماتریس تاثیرات متقابل سیستم‌های AC و DC را در دو سمت مبدل به صورت زیر نشان داد :

$$\begin{bmatrix} i_p(100) \\ v_d(50) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Hy_{11} & Hi_{12} \\ Hv_{21} & Hz_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_p(100) \\ i_d(50) \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن :

$v_d(50)$  مؤلفه 50 Hz ولتاژ سمت DC

$e_p(100)$  مؤلفه توالی مثبت 100 Hz ولتاژ AC

$i_d(50)$  مؤلفه 50 Hz جریان DC

$i_p(100)$  مؤلفه توالی مثبت 100 Hz جریان AC

ورودی به مبدل

که همه کمیت‌ها ی بالا به صورت مختلط یا قطبی هستند.

ضرایب ماتریس H را می‌توان با شبیه سازی به دست آورد. ضرایب  $Hy_{11}$  و  $Hv_{21}$  را می‌توان با در نظر گرفتن یک ولتاژ توالی مثبت هارمونیک دوم که بر ولتاژ باس AC مبدل سوار شده است و در حالتی که هیچ جریان فرکانس قدرتی در سمت DC مبدل برقرار نیست، بدست آورد. بطور مشابه ضرایب  $Hi_{12}$  و  $Hz_{22}$  را می‌توان با تزریق یک جریان فرکانس قدرت در سمت DC مبدل، بدون حضور هارمونیک دوم ولتاژ در سمت AC تعیین نمود. با تحلیل فوریه می‌توان دامنه و فاز این ضرایب را با استخراج جریانها و ولتاژهای فرکانس قدرت و هارمونیک دوم بدست آورد. در این شبیه سازی و اندازه گیری دامنه سیگنال اعمالی باید کوچک باشد تا بتوان پاسخ سیگنال کوچک

سیستم را حول نقطه کار آن بدست آورد. که در آن :

$$Ky_{11} = Hy_{11} + Cy_{11}$$

$$Ki_{12} = Hi_{12} + Ci_{12}$$

$$Kv_{21} = Hv_{21}$$

$$Kz_{22} = Hz_{22}$$

که در این روابط  $i_{tp}(100)$  جریان هارمونیک دوم توالی مثبت متوجه با توجه به تاثیرات مبدل و اشباع ترانسفورماتور است.

با توجه به ماتریس تاثیر متقابل  $K$ ، امپدانس مبدل دیده شده از سمت DC در فرکانس قدرت و با در نظر گرفتن سیستم AC به صورت زیر خواهد بود :

$$Z_C(50) = \frac{v_a(50)}{i_d(50)} = Kz_{22} - \frac{Kv_{21} \cdot Ki_{12}}{y_a(100) + Ky_{11}} \quad (۴)$$

در این رابطه  $y_a(100)$ ، ادمیتانس توالی مثبت سیستم AC در فرکانس 100 Hz و  $Z_C(50)$  امپدانس فرکانس قدرت مبدل دیده شده از سمت راکتور صاف کننده جریان است. با بررسی رابطه (۴) به ازاء محدوده وسیع تغییرات کندوکنانس و سوسپتانس‌ها رمونیک دوم توالی مثبت سیستم AC، به ازاء ناحیه خاصی از این تغییرات،  $Z_C(50)$  دارای یک مؤلفه مقاومت منفی بوده و در نتیجه مبدل در میرا کردن مؤلفه فرکانس قدرت دارای میرایی منفی خواهد بود.

بطور مشابه می‌توان تاثیر امپدانس فرکانس اصلی شبکه DC را بر امپدانس متوجه مبدل، دیده شده توسط ولتاژ هارمونیک دوم توالی مثبت سمت AC به صورت زیر بدست آورد :

$$y_C(100) = \frac{i_p(100)}{e_p(100)} = Ky_{11} - \frac{Kv_{21} \cdot Ki_{12}}{Z_d(50) + Kz_{22}} \quad (۵)$$

در این رابطه  $y_C(100)$ ، ادمیتانس‌ها رمونیک دوم

### ب) اشباع ترانسفورماتور:

از آنجا که به اشباع رفتن ترانسفورماتور خود منبعی اصلی برای تولید هارمونیک‌ها است ماتریس ضرایب بدست آمده در رابطه (۱) را باید با توجه به اشباع ترانسفورماتور اصلاح کرد. در این صورت باید رابطه‌ای بین جریان‌های هارمونیک دوم توالی مثبت ترانسفورماتور بر حسب میزان جریان DC عبوری از ترانسفورماتور بدست آید. بنابراین ضرایب زیر را می‌توان تعریف کرد :

(با تزریق جریان 50 Hz در سمت DC)

$$Ci_{12} = \frac{i_{sp}(100)}{i_d(50)}$$

(با سوار شدن ولتاژها رمونیک دوم توالی مثبت بر ولتاژ سمت AC)

$$Cy_{11} = \frac{i_{sp}(100)}{e_p(100)} \quad (۲)$$

که در این روابط  $i_{sp}(100)$  جریان هارمونیک دوم توالی مثبت مورد انتظار از اشباع ترانسفورماتور است.

### ج) تاثیر توام مبدل و اشباع ترانسفورماتور:

جریان هارمونیک دوم متوجه عبوری از ترانسفورماتور با در نظر گرفتن مؤلفه اشباع (C) و مؤلفه‌های مبدل (H) بدست می‌آید. بنابراین ماتریس تاثیر متقابل نهایی به صورت زیر در می‌آید :

$$\begin{bmatrix} i_{tp}(100) \\ v_d(50) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ky_{11} & Ki_{12} \\ Kv_{21} & Kz_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_p(100) \\ i_d(50) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

ناپایداری سیستم در اثر اشباع هسته یک ولتاژها رمونیک دوم را سوار بر ولتاژ 345 kV با دامنه 3% در نظر می‌گیریم. این‌ها رمونیک ممکن است به علل مختلف از جمله برقدار شدن ترانسفورماتور و یا بروز اغتشاش در شبکه AC1 بوجود آمده باشد. مقادیر راکتانس‌ها و فیلترهای شبکه مورد مطالعه به گونه ای تنظیم شده اند که شبکه DC دارای فرکانس رزونانسی نزدیک به 50 Hz و شبکه AC1 دارای فرکانس رزونانسی نزدیک به 100 Hz داشته باشد.

توالی مثبت مبدل، دیده شده در سمت AC ترانسفورماتور مبدل و  $Z_C(50)$ ، امپدانس شبکه DC در 50 Hz با در نظر گرفتن مبدل اینورتر و شبکه AC آن است. امپدانس بدست آمده از رابطه اخیر به ازاء برخی مقادیر مقاومتی و راکتانس خازنی شبکه DC در 50 Hz دارای کندکتانس منفی و سیستم ناپایدار می‌باشد. بنابراین اگر ادمیتانس‌ها رمونیک دوم توالی مثبت سمت AC در ناحیه ناپایدار قرار گیرد و شبکه DC قادر به میرایی نوسانات 50 Hz نباشد، ناپایداری در اثر اشباع هسته رخ خواهد داد، ولی با وجود میرایی 50 Hz در شبکه DC خطر ناپایداری رفع خواهد شد. بطور مشابه اگر ادمیتانس 50 Hz سیستم DC در ناحیه ناپایدار واقع شود و سیستم AC دارای میرایی ضعیفی برای نوسانات 100 Hz باشد، ناپایداری در اثر اشباع هسته رخ می‌دهد ولی با بالا بردن میرایی 100 Hz شبکه AC، پایداری سیستم حفظ خواهد شد.

### ۳- شبیه‌سازی یک شبکه HVDC نمونه

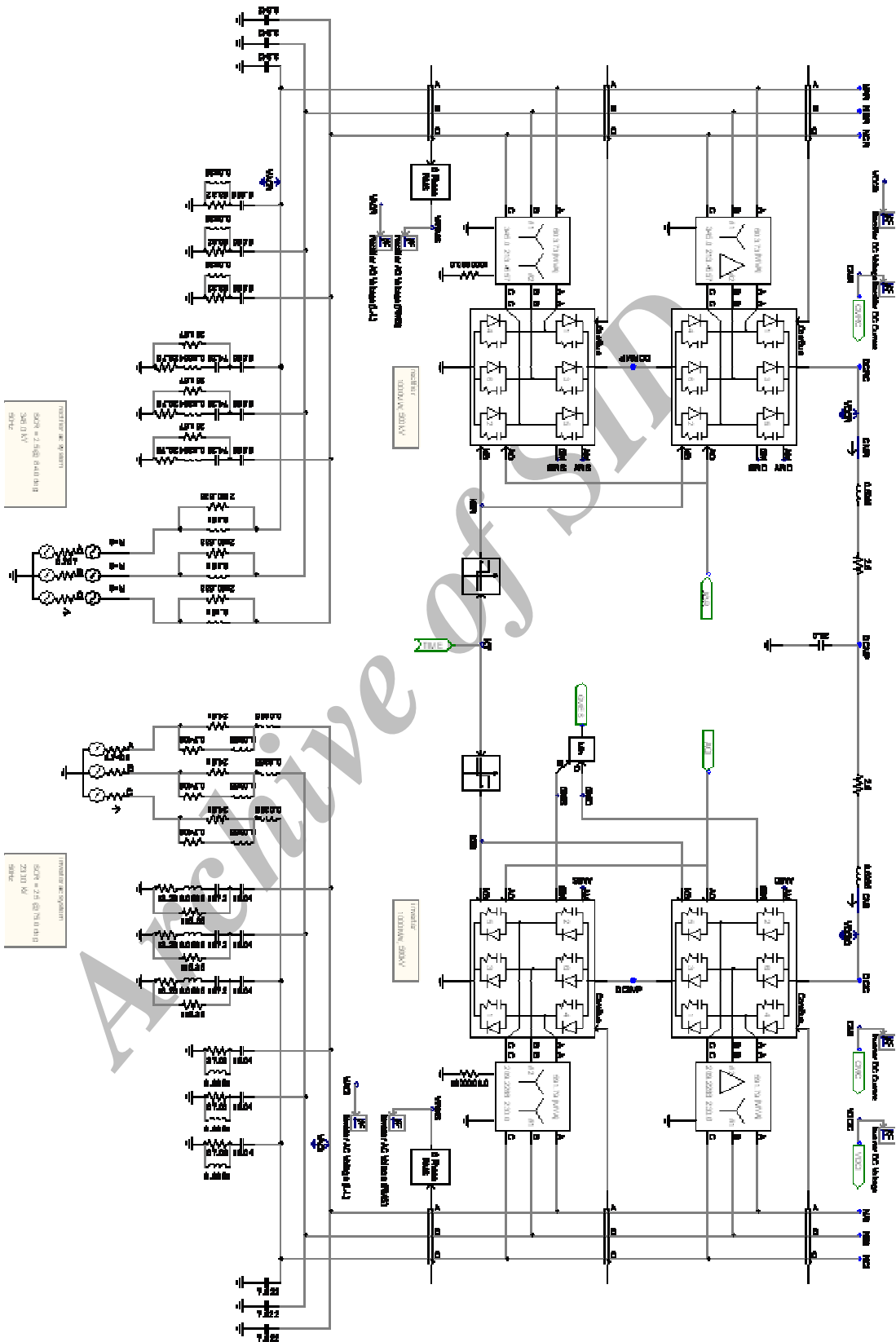
همانطور که قبلاً ذکر شد کوچک بودن دامنه مؤلفه‌های رمونیکی از طرفی و ثابت زمانی بزرگ اشباع هسته ترانسفورماتور از طرف دیگر شبیه‌سازی پدیده ناپایداری در اثر اشباع هسته را مشکل می‌سازد. ولی با بزرگتر گرفتن مؤلفه‌های فرکانسی می‌توان این ناپایداری را در شبیه‌سازی با سرعت بیشتری ایجاد و مورد مطالعه قرار داد. شکل (۱) شبکه نمونه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این شبکه HVDC، شبکه CIGRE Benchmark با مقدار نامی

1000 MW-500 kV تک قطبی 12 پالسه بوده

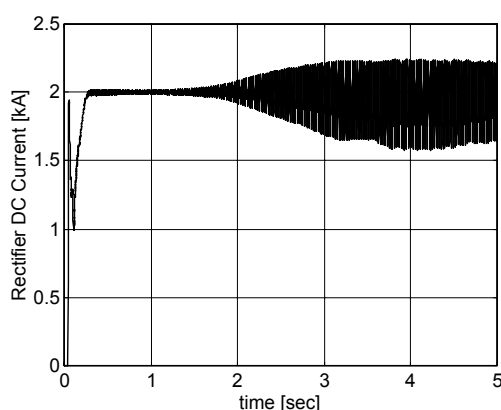
که شبکه AC1 با ولتاژ 345 kV و فرکانس

50 Hz را به شبکه AC2 با ولتاژ 230 kV و

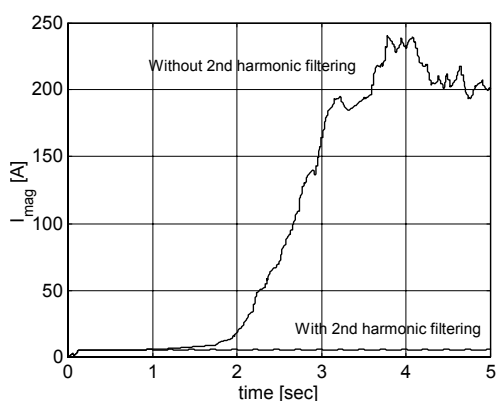
فرکانس 50 Hz متصل می‌کند. برای شبیه‌سازی



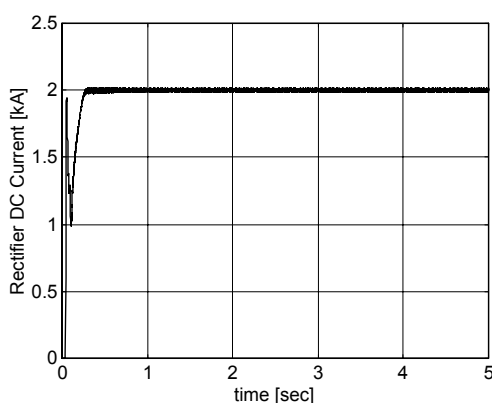
شکل ۲- شبکه HVDC مورد مطالعه 500 kV - 1000 MW (CIGRE Benchmark)



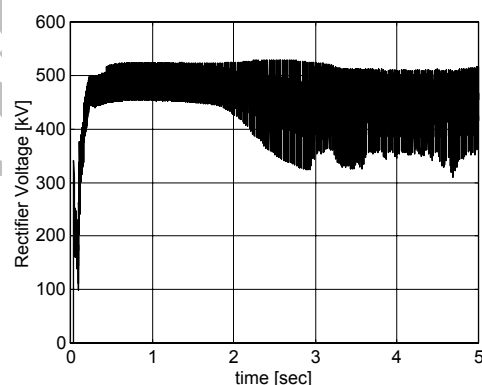
شکل ۴- ناپایداری جریان شبکه DC در اثر اشباع ترانسفورماتور مبدل



شکل ۳- جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور مبدل در شرایط ناپایدار و به هنگام فیلتر کردن هارمونیک دوم و پایدار ماندن سیستم



شکل ۶- پایدار نگه داشتن جریان سیستم DC با حذف هارمونیک دوم شبکه AC



شکل ۵- ناپایداری ولتاژ یکسو کننده در اثر اشباع ترانسفورماتور مبدل

(۵) به صورت نوسانی و ناپایدار در می‌آید. ناپایداری هسته را می‌توان با میرا کردن فرکانس‌ها ی مربوطه حذف نمود. بنابراین با تنظیم درست فیلترها و یا پارامترهای کنترلر مبدل و یا پارامترهای عملکرد حالت ماندگار مبدل خطر ناپایداری حذف می‌شود. از طرف دیگر اندازه گیری‌ها و مونیتورینگ سیستم نیز امکان عکس العمل مناسب به هنگام آشکار شدن علائم ناپایداری را فراهم می‌کند. این اقدامات باید به گونه ای انجام شود که از به اشباع رفتن ترانسفورماتور

نتایج شبیه سازی در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده اند. شکل (۳) جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور مبدل را در دو حالت تزریق و فیلتر شدن هارمونیک دوم نشان می‌دهد. در حالت تزریق‌ها رمونیک دوم به علت ایجاد مؤلفه DC در جریان، هسته ترانسفورماتور اشباع شده و جریان مغناطیس کننده پس از 4 s به حدود 240 A رسیده و ترانسفورماتور بطور کامل اشباع شده است. بنابراین ولتاژ و جریان DC سیستم مطابق شکل‌های (۴) و

ب) دارای امپدانس بالا با خاصیت اندوکتیو غالب برای‌ها رمونیک دوم در سمت AC با حضور یک مدار رزونانس موازی با فرکانس تشدید نزدیک و کمی بالاتر از فرکانس‌ها رمونیک دوم

ج) امپدانس بالا در حوالی 0 Hz در سمت AC با نتایج بدست آمده هم در مرحله طراحی و هم در مرحله مونیتورینگ می‌توان از بروز ناپایداری در سیستم جلوگیری کرد.

جلوگیری کند و به ازاء فرکانس‌ها ی مربوطه عکس العمل نشان داده و پاسخ حالت ماندگار سیستم را خیلی تحت تاثیر قرار ندهد. شکل‌ها ی (۳) و (۶) جریان‌ها ی مغناطیس کننده و جریان شبکه DC را به هنگام حذف مؤلفه‌ها رمونیک دوم شبکه AC1 نشان می‌دهد. در این حالت همانطور که در شکل‌ها مشهود است ترانسفورماتور به اشباع نرفته و سیستم پایدار می‌ماند.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله رفتارها رمونیک‌ها ی اصلی و دوم فرکانس قدرت در سیستم‌ها ی HVDC و ناپایداری ناشی از آنها مطرح و عملکرد غیر خطی مبدل و اشباع ترانسفورماتور مبدل با استفاده از ماتریس ضرایب مربوطه مورد بررسی قرار گرفت. با این روش امکان بررسی پدیده اشباع هسته و ناپایداری ناشی از آن به صورت تحلیلی امکان پذیر گردید.

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که سمت DC باید دارای میرایی کافی برای نوسانات فرکانس قدرت و سمت AC نیز باید دارای میرایی کافی برای نوسانات‌ها رمونیک دوم باشد. در شبیه سازی نمونه انجام شده سیستم دارای شرایط ناپایداری، در دو حالت تزریق و فیلتر شدن‌ها رمونیک دوم شبکه AC مورد مطالعه قرار گرفت و اهمیت حذف این‌ها رمونیک جهت پایدار نگه داشتن سیستم مشخص گردید.

بطور کلی یک مبدل HVDC که بروز ناپایداری ناشی از اشباع هسته در آن محتمل است بطور نمونه دارای پروفیل امپدانس مطابق زیر می‌باشد :

الف) دارای امپدانس پایین با خاصیت خازنی غالب در سمت DC در فرکانس اصلی با رزونانس سری با فرکانس تشدید نزدیک و کمی بالاتر از فرکانس اصلی

#### ۵- مراجع

- [1] E. V. Larsen, D. H. Baker and J. C. McIver, "Low order harmonic instability on AC/DC systems", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 4, July 1989.
- [2] R. S. Burton, C. F. Fuchshuber, D. A. Woodford and A. M. Gole, "Prediction of core saturation instability at an HVDC converter", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 11, no. 4, pp1961-1969, Oct. 1996.
- [3] T. Hasegawa, et al, " Screening for HVDC system core saturation instability ", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, no. 4, Oct. 2000.
- [4] J. Arrillaga, " High voltage direct current transmission ", IEE publication, London, UK, 1998.
- [5] S. Chen et. al. , " HVDC converter transformer core saturation instability; A frequency domain analysis ", IEE Proc. Generation Transmission and Distribution. 1996, 143(1), pp 75-81.
- [6] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS", December 1999, Wiley-IEEE Press.