

## اتصال نواحی روستایی دورافتاده جهت تبادل انرژی با شبکه توسط سیستم HVDC-Light

علی اصغر قدیمی

### چکیده

از سالها پیش، خطوط انتقال با ولتاژ بالای جریان مستقیم<sup>(1)</sup> (HVDC) برای انتقال توانهای زیاد در فواصل طولانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. HVDC-Light یک تکنولوژی انتقال جدید است که بر اساس منابع<sup>(2)</sup> متغیر ولتاژ (VSC) و ترانسفورماتورهای<sup>(3)</sup> IGBT بنا شده است. این تکنولوژی برای انتقال توانهای تا حد چند مگاوات به مناطق دوردمت شبکه مثل روستاها و جزایر نسبت به شبکه AC و همچنین تولید محلی، دارای مزایای هستی. اقتصادی است. از طرف دیگر این تکنولوژی می‌تواند برای رساندن انرژی تولیدی توسط نیروگاههای کوچک (انرژیهای تجدیدپذیر) به شبکه AC نیز انتخاب مناسب باشد. در این مقاله به بررسی عملی و اقتصادی استفاده از HVDC-Light برای برق‌رسانی به مناطق دوردمت نظیر روستاها و برعکس انتقال توانهای تولیدی نیروگاههای کوچک (انرژیهای تجدیدپذیر) به شبکه AC می‌پردازیم. نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم نمونه HVDC-Light نشان دهنده قابلیت انتقال با کیفیت توان مناسب به یک منطقه روستایی دوردمت بوده است.

1: High Voltage Direct Current

2: Voltage Source Converter

3: Insulated Gate Bipolar Transistor

از حدود صد سال پیش، انتقال قدرت از فواصل دور و توزیع آن در بین مصرف کنندگان مستعد از طریق سیستم سه فاز جریان متناوب انجام می‌پذیرفت. ترانسفورماتورهای قدرت و خطوط انتقال این امکان را بوجود آورده‌اند که نیروگاهها یا در محل‌های بهینه قرار دهیم و بارده تولید را بالا ببریم. مثلاً با ایجاد امکان نصب نیروگاههای حرارتی در نزدیکی منابع سوخت می‌توانیم با داشتن آلودگی و تلفات کم انرژی تولید را با بارده بالایی انجام دهیم.

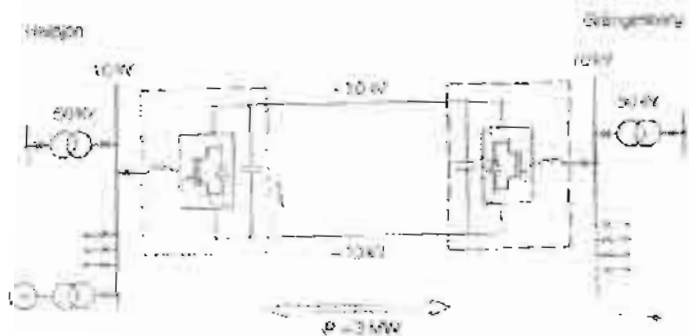
با وجود این که پیشرفتهایی در زمینه تولید انرژی بوجود آمده است اما اصول کلی آن با صد سال پیش تفاوت چندانی نکرده است و تولید قدرت، بالا بردن ولتاژ یا ترانسفورماتوره انتقال قدرت، کاهش ولتاژ یا ترانسفورماتور و بالاخره توزیع قدرت بعنوان مراحل کار در فاصله تولید تا مصرف مانده‌اند. علیرغم وجود مزایای زیاد برای سیستمهای انتقال AC هنگام کردن سیستم AC با افزایش تقاضای بار و افزایش رشد نیروگاههایی با تنیاس کوچک که بیشتر از انرژیهای تجدیدپذیر استفاده می‌کنند، مقدور نیست چراکه مجموع نیروگاههای کوچک نیاز به خطوط انتقالی دارند که تعداد آنها در مقایسه با نیروگاههای بزرگ خیلی زیاد است [۱] برای برق‌رسانی به مناطق دور افتاده نظیر روستاها، معادن، سکوهای حفاری و جزایر بحر راه حل اتصال آنها به شبکه AC، راه دیگری مطرح است و آن تولید محلی با نیروگاههای کوچک سوخت فسیلی نظیر نیروگاههای دیزلی است.

اتصال به شبکه AC از طریق نصب خطوط انتقال جدید و طولانی نیاز به ملاحظات زیست محیطی، اقتصادی و مقررات خاصی دارد تولید محلی نیرو باعث ایجاد آلودگی و تولید نویز در محل شده و نوع دیزلی آن نیز قابل اطمینان نمی‌باشد. روند رشد سریع مصرف و پیدایش تولید، نیاز به شبکه‌های انعطاف‌پذیر را مطرح ساخته است. این شبکه‌ها باید قابلیت امداد با تغییرات سریع و متفاوت در الگوی تولید و همچنین مقررات زیست محیطی داشته باشند. در شبکه‌های قابل انعطاف بمنظور با مدارسازی و اتصالاتی کردن شبکه، نیاز به کنترل دقیق ولتاژ و سیلان توان مطرح است. با توجه به موارد فوق و همچنین نیاز تغذیه نواحی دور افتاده (روستایی) با اتصال نیروگاههای

کوچک. به شبکه، مقاله حاضر پیشنهاد تکنولوژی جدید HVDC-Light را ارائه می‌نماید.

## ۲- تکنولوژی HVDC-Light

همانگونه که از عنوان این تکنولوژی پیداست، در وهله اول این تکنولوژی در رابطه با یک سیستم انتقال DC است. با این وجود با پیشرفت‌های HVDC مرسوم که بیشتر برای انتقال انرژیهای زیاد در فواصل دور از طریق خطوط انتقال هوایی یا کابلهای زیردریایی بکار می‌روند، متفاوت است. این تکنولوژی نیاز به ارتباط سریع بین ایستگاههای مبدل AC/DC و جبران‌سازی توان راکتیو در سمت AC مبدلها ندارد. شکل (۱) اولین سیستم HVDC-Light را که در کشور سوئد نصب و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، نشان می‌دهد. این شکل نمای کلی یک سیستم HVDC-Light را نشان می‌دهد که در حالت کلی این سیستم شامل دو جزء اصلی است: یکی ایستگاههای مبدل و دیگری یک حقت کابل زمینی یا هوایی.

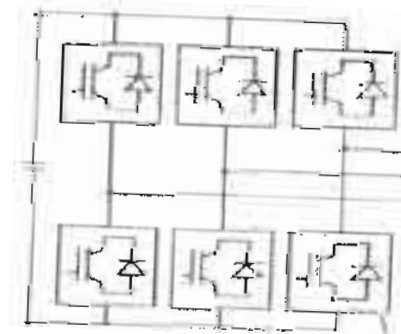


شکل (۱) یک نمونه سیستم HVDC-Light

در این سیستم توان راکتیو می‌تواند در دو جهت انتقال باشد. در سمت Göteborg

هیچ منبع تولیدی وجود ندارد و از طریق این سیستم به شبکه سراسری وصل شده است.

مبدل‌های AC/DC از نوع مبدل منبع ولتاژ (VSC) می‌باشند [۲] شمایی از مبدل در شکل (۲) داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود هر مبدل از یک مجموعه با شش درجه<sup>(۱)</sup> تشکیل شده است. در هر بازوی مبدل، دو درجه برای خازن در نظر گرفته شده است. درجه‌ها از ترانزیستورهای قدرت از نوع IGBT ساخته می‌شوند که یک دیود موازی معکوس همراه خود دارند. درجه‌های مبدل با استفاده از روش مدولاسیون پهنای پالس<sup>(۲)</sup> (PWM) کنترل می‌شوند [۱] و با توجه به قابلیت روشن و همچنین خاموش کردن IGBT، ولتاژ و جریان طرف AC براحتی می‌توانند کنترل شوند و همچنین برعکس مبدل‌های کلاسیک سیستم HVDC، نیاز به شبکه AC برای پایدارسازی ولتاژ و فرکانس وجود ندارد و با توجه به این خاصیت برای برقرسانی به مناطق دورافتاده‌ای که دارای تولید نیستند و یا اینکه به شبکه وصل نیستند بسیار مناسب بوده و تولید و کنترل ولتاژ و فرکانس مورد نیاز منطقه از طریق آنها آسان است.



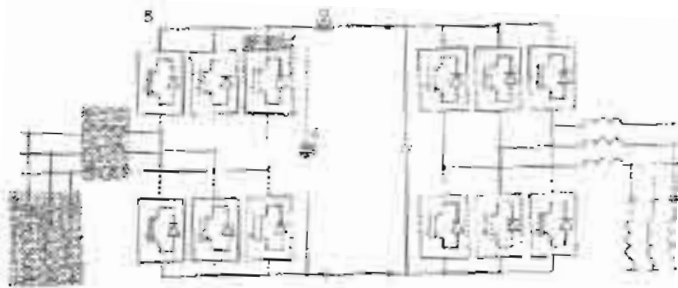
شکل (۲) شمایی از یک مبدل VSC

ایستگاه مبدلها برای محدوده قدرت ۱۰-۱۰۰ MW و سطح ولتاژ DC خطوط در

1. Vane

2. Pulse Width Modulation

محدوده ۱۰-۱۰۰ KV قابل طراحی است. اینچنین ایستگاهی نیاز به مساحتی کمتر از ۲۵۰ مترمربع برای المانهای نظیر دو کانتینر مبدل و سیستم کنترل، سه راکتور فاصله‌دهی AC، یک فیلترها رزونانسی ساده و چند دمنده برای خنک‌سازی دارد. شکل (۳) شمایی از یک سیستم HVDC-Light را نشان می‌دهد.



شکل (۳) شمایی از یک سیستم HVDC-Light

در شکل فوق:

۱- فیلترهای هارمونیک، ۲- راکتورهای مبدل، ۳- فیلترهای مبدل، ۴- خازنهای کم‌ولتاژ، ۵- اتصال به کابل و ۶- خود مبدل می‌باشند.

یک سیستم HVDC-Light می‌تواند بطور کلی در حالت‌های زیر بکار گرفته شود:

۱- یک مبدله: جهت انتقال انرژی تولیدی از منابع انرژی‌های نو DC مانند نیروگاههای خورشیدی و نیروگاههای سلول سوختی<sup>(۱)</sup>

۲- دو مبدله: انتقال انرژی از شبکه AC به معنارفه کم ولتی دور افتاده یا به شبکه AC دیگر.

۳- چند ترمیناله: تبادل توان بین شبکه‌های مختلف AC از طریق ایجاد شبکه DC.

شمای از یک سیستم HVDC-Light

1. Fuel cell

سیستم انتقال HVDC-Light علاوه بر مزایای سیستمهای کلاسیک HVDC دارای مزایای اضافی زیر است:

### ۱-۳ حذف خطوط هوایی

ساخت و نصب خطوط هوایی دارای مشکلات متعددی می باشد که از جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- خطوط هوایی فضای زیادی اشغال می کنند که در برق رسانی به روستاها نصب خطوط در زمینهای کشاورزی باعث اشغال مقداری از سطح زیر کشت، اعتراض کشاورزان زمین دار و ایجاد مشکلات در عبور و مرور ماشینهای کشاورزی در آنجا می شود.

- تهیه مجوز برای نصب خطوط جدید مقررات مشکلی دارد که بسیار وقتگیر و هزینه بر دار است.

- میدانهای الکتریکی و مغناطیسی تولید شده توسط آنها برای مردم اطراف این خطوط از لحاظ زیست محیطی مضر است و باید یک حریم مجاز برای آنها در نظر گرفت که در مناطق روستایی حریم مورد نظر به معنی اشغال زمینهای کشاورزی است. نصب خطوط هوایی بخاطر تجهیزات آنها و عملیات نصب دارای قیمت زیادی است.

اما نصب کابلهای زیرزمینی دارای روند ساده تری نسبت به خطوط هوایی می باشد. کابلهای جدید مورد استفاده در سیستمهای HVDC از نوع تک قطبی و برآمده (1) می باشد که علاوه بر قابلیت انتقال توان بالا، وزن مخصوص کمی دارند (حدود 1kg/m)

(1)

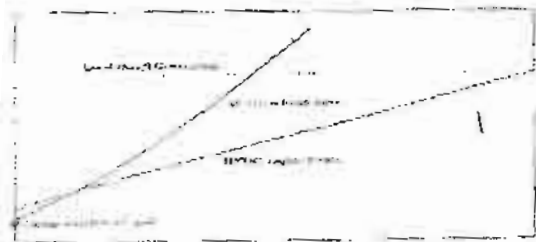
نصب این کابلها با حفار کردن زمین و خواباندن آن در زیر زمین انجام می شود و بعد از پرتیبند سر کابل هیچ ارزی از آن دیده نخواهد شد و این قابلیت در زمینهای کشاورزی حائز اهمیت است. میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در این کابلها کم است و مشکلات زیست محیطی کمتری برای مردم و حیوانات در بر دارد. از طرف دیگر نصب کابلهای

زیر زمینی بسیار سریع و ارزاتر از خطوط هوایی است.

### ۲-۳ حذف تولید محلی:

برق رسانی به مناطق دورافتاده از شبکه AC بخاطر عدم توجه اقتصادی و فنی ناشی از فاصله زیاد و مصرف کم، از طریق اتصال به شبکه AC مقدور نیست و دستور در اینگونه مناطق نظیر روستاها، معادن، ایستگاههای حفاری نفت و گاز و جزایر، تولید برق بصورت محلی و از طریق نیروگاههای دیزلی (سوخت فسیلی) انجام می شود. اما تولید محلی دارای آلودگی زیست محیطی و صوتی است، بارده تولید پایین است و حمل و نقل سوخت به اینگونه محلها معمولاً مشکل می باشد. این نیروگاهها یارمند تعمیرات و نگهداری زیاد و از طرفی از لحاظ فنی دارای قابلیت اطمینان بسیار کم هستند. از طرفی قیمت و نیاز و فرکانس آنها نیز آسان نیست. بطور کلی هزینه تولید آنها بسیار بالا است. اما تکنولوژی HVDC-Light دارای مزایای زیادی نسبت به تولید محلی است و تمام عيوب ذکر شده در بالا را می تواند بواحی برطرف کند.

هزینه تولید انرژی در HVDC-Light تابع خطی از فاصله است و این انتخاب تولید محلی، اتصال به شبکه AC و HVDC-Light برای برق رسانی به مناطق دور افتاده ملاحظات اقتصادی را باید در نظر گرفت. شکل (۲) نتیجه بررسی انجام شده برای قیمت تولید انرژی بر حسب فاصله است (۲) دیده می شود که در فواصل زیاد از لحاظ اقتصادی، HVDC-Light بهترین انتخاب است.

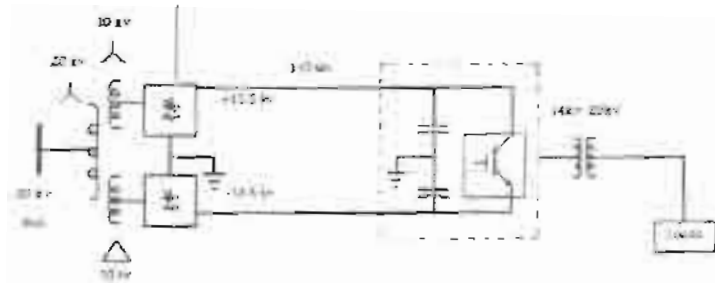


شکل (۲): مقایسه قیمت سه نوع روش برق رسانی به نقاط دورافتاده

### ۳-۳ اتصال نیروگاههای کوچک به شبکه

۳- مطالعه یک سیستم دوقطبی

برای نشان دادن قابلیت‌های سیستم HVDC-Light در تأمین انرژی مصرف کنندگانی در دست، از نمونه ساده شده HVDC-Light در تأمین برق یک منطقه روستایی از طریق یک شبکه AC که به فاصله ۱۱۰ km از آن قرار دارد مطابق شکل (۶) استفاده کرده‌ایم.



شکل (۶). سیستم مورد مطالعه

در اینجا شبکه AC دارای ولتاژ ۲۰ کیلوولت است. توسط یک مدل دیودی ۱۲ پالسه دو ولتاژ نسبت به سر وسط تولید می‌کنیم. بدین ترتیب یک سیستم DC دو قطبی با ولتاژ در  $\pm ۱۳$  کیلوولت تشکیل می‌شود. در طرف مدل VSC نیز وسط خازن‌ها را زمین می‌کنیم. خروجی مدل VSC نیز با استفاده از یک ترانسفورماتور به ولتاژ ۲۰ کیلوولت تبدیل می‌شود و از آن می‌توان توان را در بین مصرف کنندگانی توزیع کرد. باید توجه داشت که در سمت مصرف کننده، تولیدی وجود ندارد.

این سیستم دو قطبی دارای این خاصیت است که با قطع یکی از هادیها برق سانی محال نمی‌شود چون امکان بستن مسیر جریان از طریق زمین وجود است.

۴- مدل منبع ولتاژ VSC

در سیستم مورد مطالعه، در طرف شبکه AC مدل دیودی ۱۲ پالسه بکار گرفته شده است و در این سمت هیچ عملیات کنترلی بجز تغییرات تپ ترانس مطرح نیست.

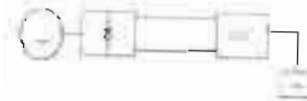
معمولاً در نقاط دور دست شبکه AC و در بسیاری از روستاها انرژیهای تجدیدپذیری وجود دارد که می‌توان از آنها بصورت نیروگاههای کوچک بهره‌برداری کرد و اتصال آنها به شبکه AC از طریق HVDC-Light مناسب است چراکه معمولاً تولید در اینگونه مناطق با انرژیهای طبیعی، در فرکانس‌های غیر از فرکانس شبکه نیروگاههای آبی کوچک یا در فرکانس‌های متغیر (نیروگاه بادی) یا در ولتاژ DC (نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک) می‌باشد و اتصال آنها از طریق HVDC-Light که توانایی تنظیم فرکانس ولتاژ را داراست بسیار مناسب است. استفاده از این تکنولوژی در مزرعه‌های بادی می‌تواند جبران‌سازی توان را کمیو برای ژنراتورهای القایی توربین‌های بادی را نیز انجام دهد.

معمولاً روستاها در جوار منابع طبیعی نظیر رودخانه‌ها ساخته شده‌اند و با تولید برق در اینگونه نقاط می‌توان علاوه بر تأمین مصرف روستاها، مابقی انرژی را از طریق یک سیستم HVDC-Light به شبکه AC دور دست رساند.

۴- ساده‌سازی سیستم HVDC-Light برای کاربرد در کشور

برای کاهش هزینه‌های برق‌سانی به نقاط دور افتاده، مطابق با شکل (۵) می‌توان مدل طرف شبکه AC را از نوع یکسوساز دیودی و بدون کنترل در نظر گرفت و در طرف مصرف کنندگان از مدل منبع ولتاژ استفاده کرد. بدین ترتیب کنترل ولتاژ و فرکانس فقط در محل انجام می‌شود.

با توجه به مصرف کم در روستاهای دور افتاده و یا در بعضی مناطق معدنی و ... این روش قابل استفاده است و استفاده از یکسوساز کاملاً دیودی در طرف شبکه AC نیاز به کنترل و نگهداری زیاد و صرف هزینه نصب اولیه را بسیار پایین می‌آورد.



شکل (۵). مدل ساده شده از HVDC-Light

خازن‌های یک خازن به حالت ۱۲ باره برداشته می‌شود و کم بودن توان انتقالی در مقایسه با قدرت اتصال کوتاه شبکه بسیار ناچیز است. طبیعی است تعجب فیلترها در این رابطه ممکن است

اما در طرف مصرف کننده‌ها مبدل قابلیت بالای کنترل شدن را دارد.

همانطور که می‌دانیم یک مبدل منبع ولتاژ دارای دو پارامتر کنترلی است:  $m$  و  $\alpha$ . تغییر در  $m$  باعث تغییر دامنه ولتاژهای خروجی از مبدل (اینورتر) خواهد شد و تغییر در  $\alpha$  باعث جابجایی شدن فاز ولتاژهای سه فاز خروجی خواهد شد (تغییر در  $m$  و  $\alpha$  باعث تغییر در اندازه و فاز موج سینوسی مدولاسیون در روش PWM می‌شود و فرکانس موج سینوسی مدولاسیون، فرکانس ولتاژهای خروجی را تعیین خواهد کرد [۱۲]).

در سیستم مورد بحث چون در طرف AC مبدل مصرف کننده هیچ منبع تولیدی وجود ندارد، تنها پارامتر مورد استفاده جهت کنترل سیستم  $m$  می‌باشد. چراکه در این سیستم تنها خاصیت مورد نیاز جهت کنترل، فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی است که فرکانس توسط موج مدولاسیون تعیین می‌شود و با  $m$  می‌توان دامنه ولتاژ را کنترل کرد و (در این بار مصرفی محض استفاده‌ای ندارد، ولی در صورتیکه قصد ما انرژی دادن به یک شبکه AC باشد، با کنترل پارامتر  $\alpha$  می‌توانیم میلان توان اکتیو بین مبدل و شبکه را تحت کنترل در آوریم.

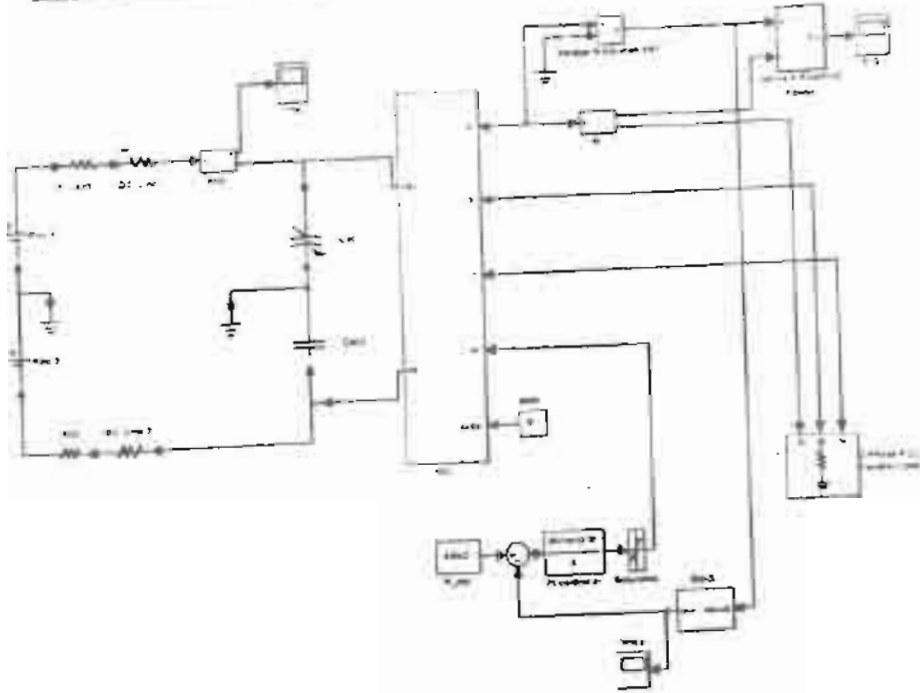
#### ۷- شبیه‌سازی سیستم نمونه

سیستم مورد بحث که مدل مناسبی برای برقرسانی به روستاها و مناطق دور افتاده کم مصرف در حد چند مگاوات می‌تواند باشد، بصورت شکل (۷) شبیه‌سازی شده است.

برای شبیه‌سازی از مدار معادل یکسو سازها استفاده شده است و در طرف AC مبدل، بار بصورت متغیر نگار بوده شده است و با فیدبک‌گیری از ولتاژ سین AC کنترل ولتاژ انجام می‌شود.

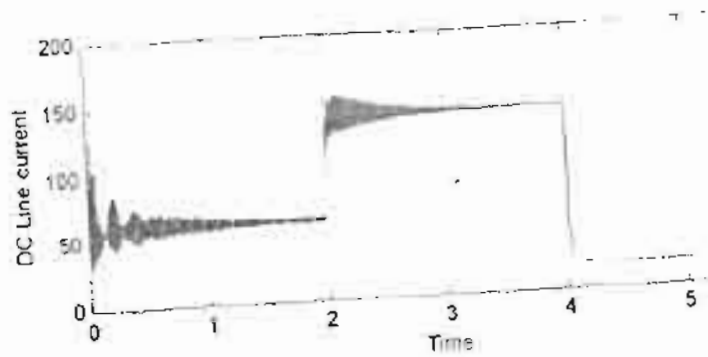
1. Modulation Index
2. Angle Index

شکل (۶) سیستم نمونه شبیه‌سازی شده

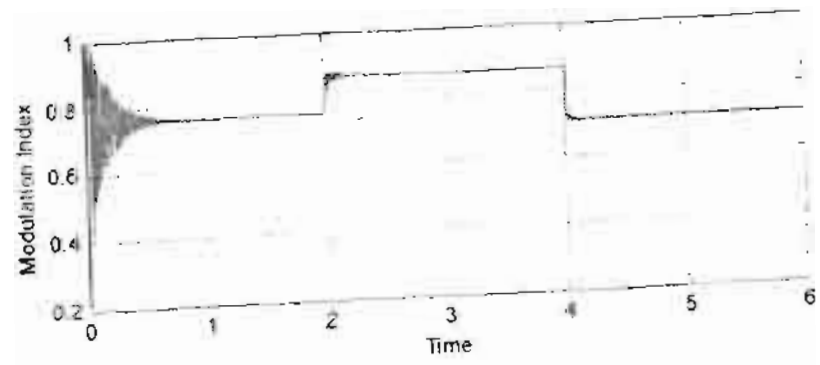


شکل (۶) سیستم نمونه شبیه‌سازی شده

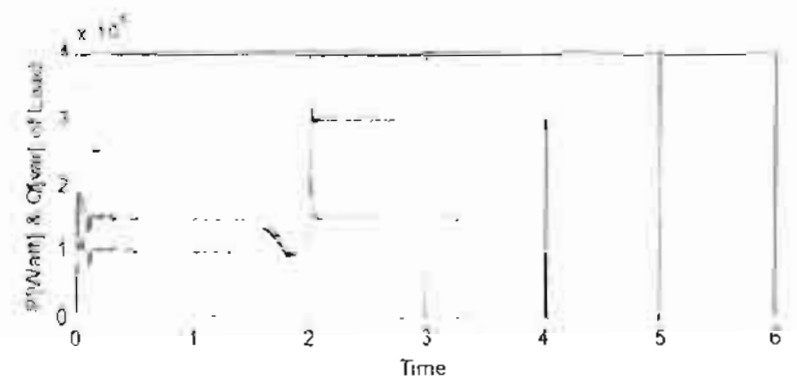
مطابق شکل (۸) فرض شده است که بار مصرفی در سمت VSC در لحظات ۲ و ۴ ثانیه به ناگهان تغییر کند، مطابق شکل (۷) یک سیستم کنترل ساده PI عهده‌دار تغییرات مورد نیاز اعمالی جهت تغییر  $m$  به ازای اعمال ورودی از ولتاژ موثر شین است. شکل (۹) نشان دهنده تغییر ولتاژ موثر دوسر مصرف کننده بعلمت تغییرات بار، شکل (۱۰) نشان دهنده تغییرات ولتاژ سمت DC مبدل، شکل (۱۱) نشان دهنده تغییرات جریان خط DC مبدل و شکل (۱۲) نشان دهنده تغییرات پارامتر کنترلی  $m$  می‌باشد. در مجموع دیده می‌شود که سیستم HVDC Light به آنها قادر به تأمین انرژی مصرفی به مناطق دور با توانهای در حد چند مگاوات است، بلکه این توانایی را نیز دارد که در برابر تغییرات بار مصرفی سریعاً ولتاژ را تنظیم نماید.



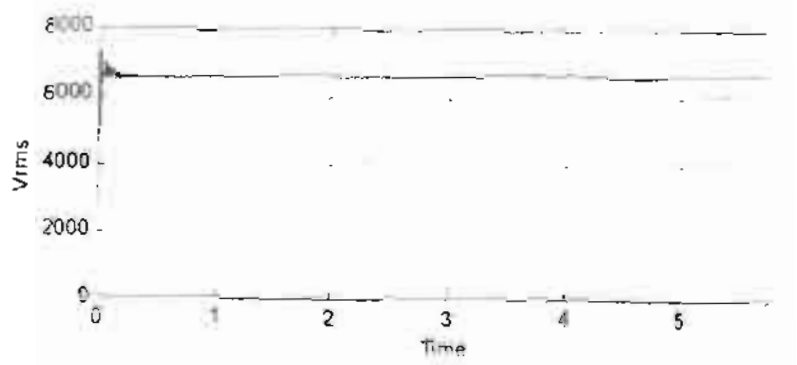
شکل (۱۱): تغییرات جریان عبوری از خط ۱۳۳ به مدت تغییرات بار



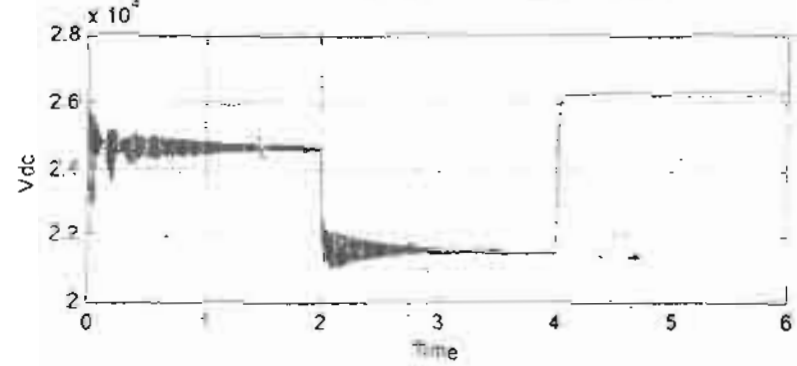
شکل (۱۲): تغییرات پارامتر کنترلی m به مدت تغییرات بار



شکل (۱۳): مشخصه‌های تغییرات توان اکتیو و راکتیو مصرفی در سمت VCS



شکل (۱۴): تغییرات ولتاژ در سر مصرف کننده به مدت تغییرات بار



شکل (۱۵): تغییرات ولتاژ مستقیم در سمت VCS

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله سیستم HVDC-Light معرفی شد. نشان داده شد که سیستم مذکور برای برقرسانی به نقاط دورافتاده و روستایی و برعکس رساندن انرژی تولیدی در این نقاط توسط نیروگاههای انرژیهای تجدیدپذیر به شبکه AC از لحاظ فنی و اقتصادی دارای توجیه می باشد.

شبه سازی یک نمونه سیستم HVDC-Light در برقرسانی به یک منطقه نشان می دهد که با کنترل مناسب می توان با تغییرات بار در شبکه توزیع منطقه، ولتاژ و فرکانس را کنترل نمود.

با توجه به گستردگی این مرز و بوم مصرف کنندگان متعدد انرژی روستایی که از شبکه سراسری دور افتاده اند در سراسر کشور وجود دارد. از طرفی بحثهای زیادی در جهت استفاده از نیروگاههای آبی کوچک و همچنین استفاده از انرژیهای نو مطرح می باشد. با توجه به موارد فوق، پیشنهاد می شود که این روش انتقال انرژی برای یک طرح خاص مورد بررسی دقیق فنی و اقتصادی قرار گیرد و طرح به مرحله اجرا درآید.

## ۹- فهرست مراجع

- 1- Lars Weimners, "HVDC-Light - a new technology for a better environment", Presented at the IEEE Winter Meeting in Tampa, Florida, USA
- 2- Gunnar Aspönd, Kjell Eriksson, Kjell Svensson, "HVDC-Light DC transmission (based on voltage source converters)", ABB Review 1/1999