

یک سیستم VSC-HVDC بدون سنسور برای اتصال شبکه‌های فعال آسنکرون

عبدالرضا رحمتی، سید ادیب ابریشمی‌فر و ابراهیم عبیری جهرمی

غلبه بر این معایب از سوئیچ‌های IGBT استفاده شده است. سیستم HVDC که از سوئیچ‌های IGBT با مدولاسیون PWM استفاده می‌کند به VSC-HVDC معروف است [۱]. با این سیستم نه تنها توان راکتیو را کنترل می‌کنند بلکه توسط آن می‌توان توان اکتیو دلخواه را دریافت یا ارسال کرد. به علاوه استفاده از این سیستم در نقاط میانی سیستم‌های توزیع و فوق توزیع باعث بالابردن مقاوم‌پذیری سیستم می‌شود [۲]. این سیستم‌ها همچنین می‌توانند برای کارخانجات فولاد و صنایع مرتبط با معادن مفید باشند بدون آن که از مزایای کیفیت توان تخطی کرده و یا به مشتریان دیگر انرژی، ضرر و زیان برسانند [۲]. از مزایای VSC-HVDC نسبت به HVDC معمولی برای انتقال توان می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۲]:

- ۱- عدم نیاز به جبران‌سازی توان راکتیو.
- ۲- فقط نیازمند به فیلتر فرکانس بالا که مربوط به فرکانس سوئیچینگ است.
- ۳- امکان اتصال چندترمیناله.
- ۴- امکان اتصال به شبکه غیر فعال.

روش‌های مختلفی برای کنترل سیستم‌های HVDC بر پایه VSC بیان شده است. در [۳] کنترل‌کننده‌ای بر پایه مدل معکوس حالت پایدار سیستم VSC-HVDC بیان شده است. از این روش کنترل برای ایجاد حلقه کنترلی مجزا و مستقل از هم استفاده شده است. در [۴] نیز کنترل‌کننده‌ای بر اساس محور مختصات d-q بیان شده است. این روش کنترلی موجب کنش‌دینامیک سیستم می‌شود و بنابراین مناسب سیستم‌های توان بالا نمی‌باشد. همچنین در این دو روش فرض بر این است که سیستم HVDC به یک خط بی‌نهایت وصل باشد. اما ممکن است که در بعضی از مواقع یکی از ایستگاه‌های HVDC Light به یک ژنراتور متصل باشد [۵]. در این روش کنترل فقط به طراحی روش کنترل پرداخته شده و اثر متقابل سیستم AC بر روی سیستم DC در نظر گرفته نشده است. یک روش کنترلی بهینه برای اتصال سیستم VSC-HVDC به ژنراتور در [۶] بیان شده است. به دست آوردن و محاسبه روابط کنترلی در این روش، پیچیده و بفرنج است و باعث محدودشدن فرکانس نمونه‌برداری و سوئیچینگ می‌شود. برای بهینه‌کردن پارامترهای سیستم کنترل پس از محاسبه‌کردن آنها، روش کنترلی بر مبنای الگوریتم ژنتیک [۷] بیان شده است. این روش کنترلی دارای خطای حالت پایدار است و تضمینی برای رسیدن به نقطه بهینه ندارد. همچنین از روش کنترلی فاز و دامنه [۸] و [۹] و روش غیر خطی [۱۰] نیز برای سیستم VSC-HVDC استفاده شده است. این روش کنترل در برابر اعوجاج خط مقاوم نمی‌باشد. از طرفی برای پیاده‌سازی آن به یک پردازشگر خیلی سریع احتیاج می‌شود. به علت نیاز به سنسور ولتاژ و جریان در روش‌های کنترلی بیان شده [۳] تا [۱۰]، پیاده‌سازی عملی این روش‌های کنترلی با هزینه زیاد همراه خواهد بود.

چکیده: در این مقاله از یک سیستم (HVDC Light) VSC-HVDC برای انتقال توان میان شبکه‌های توزیع آسنکرون استفاده شده است. روش کنترل مستقیم توان با استفاده از مدولاسیون SVM^۳ برای این روش به کار رفته است. همچنین از یک تخمین‌زن شار به جای سنسور ولتاژ خط استفاده شده است. استفاده از شار مجازی و مدولاسیون SVM باعث می‌شود که هارمونیک جریان کمتری تولید گردد و کیفیت توان به طور قابل توجهی افزایش یابد. شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن هستند که این روش برای مستهلک‌کردن نوسانات و اصلاح پایداری در سیستم توزیع، هنگامی که جهت توان معکوس می‌شود مناسب است. همچنین پاسخ دینامیکی مطلوب و به دست آوردن ضریب قدرت واحد در سمت یکسوکننده از مزیت‌های دیگر این روش کنترل است.

کلید واژه: پایداری، شبکه‌های توزیع، VSC-HVDC، DPC.

۱- مقدمه

پایداری سیستم‌های قدرت مخصوصاً در سیستم‌های قدرت بزرگ بسیار مهم و پیچیده می‌باشد. اغتشاشاتی نظیر کاهش ولتاژ، نوسانات، فلیکر، هارمونیک‌ها و نامتعادلی در فازها نامطلوب هستند و هر کدام به نحوی زیان‌آور می‌باشند و باید کنترل شوند. یک راه عمومی برای از بین‌بردن ضعف شبکه و بالابردن کیفیت توان، تقویت شبکه با ساختن خطوط جدید، نصب ترانس‌های بزرگ و بالابردن سطح ولتاژ است که گران‌قیمت و زمان‌بر می‌باشند [۱]. در سال‌های اخیر با پیشرفت مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC)، استفاده از آن‌ها در سیستم‌های HVDC در سطح توزیع و فوق توزیع باعث بهبود پایداری سیستم‌های قدرت و پاسخ دینامیکی شده است [۱]. تکنولوژی HVDC بر پایه شیرهای^۵ تریستوری از سال ۱۹۷۰ ایجاد شد. این سیستم معمولاً برای انتقال توان در فواصل طولانی و از نقطه‌ای به نقطه دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از معایب HVDC می‌توان به وابستگی آن به شبکه AC برای پایداری فرکانس و ولتاژ، احتیاج به کانال ارتباطی بسیار سریع بین ایستگاه‌های مختلف مبدل و همچنین وابستگی کنترل توان راکتیو و اکتیو نام برد. اخیراً برای

این مقاله در تاریخ ۲۳ اسفند ماه ۱۳۸۵ دریافت و در تاریخ ۲۳ مرداد ماه ۱۳۸۶ بازنگری شد.

عبدالرضا رحمتی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، کدیستی ۱۶۸۴۴ (email: rahmati@iust.ac.ir).

سید ادیب ابریشمی‌فر، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، کدیستی ۱۶۸۴۴ (email: abrishamifar@iust.ac.ir).

ابراهیم عبیری جهرمی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز، بلوار مدرس، شیراز، کد پستی ۷۱۵۵۷-۱۳۸۷۶ (email: abiri@sutech.ac.ir).

1. High Voltage Direct Current Light
2. Voltage Source Converter - High Voltage DC
3. Space Vector Modulation
4. Direct Power Control
5. Valves

$$p = L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + U_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \quad (۱)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 3L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - U_{dc} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)] \right\} \quad (۲)$$

در این روابط S_a ، S_b و S_c حالت‌های سوئیچ‌های مبدل و i_a ، i_b و i_c جریان‌های فاز منبع AC و L مقدار سلف فیلتر و U_{dc} مقدار ولتاژ DC در خروجی یکسوکننده و یا ورودی اینورتر می‌باشند. از مقاومت منابع R_r و R_i به دلیل کوچکی صرف نظر شده است. قسمت‌های اول (۱) و (۲) مربوط به توان سلف و قسمت‌های دوم مربوط به توان مبدل است. این روابط مقدار دقیق توان را مشخص می‌کنند.

۲-۲ تخمین‌زن شار مجازی برای یکسوکننده و اینورتر

به منظور اقتصادی‌بودن طرح، سادگی و جداسازی مدار قدرت و فرمان و همچنین قابلیت اعتماد بیشتر، می‌توان سنسورهای ولتاژ خط AC را با تقریب‌زن شار جایگزین کرد. در صورتی که $\Psi_{L\alpha}$ شار ناشی از ولتاژ AC و $u_{L\alpha}$ و $u_{L\beta}$ ولتاژ خط در محور مختصات $\alpha-\beta$ باشد، می‌توان نوشت [۱۱]

$$\underline{\Psi}_L = \begin{bmatrix} \Psi_{L\alpha} \\ \Psi_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int u_{L\alpha} dt \\ \int u_{L\beta} dt \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$\underline{i}_L = \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (۴)$$

همچنین روابط مبدل به صورت زیر قابل دستیابی است

$$u_{S\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} [(S_a - \frac{1}{\sqrt{3}})(S_b + S_c)] \quad (۵)$$

$$u_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{dc} (S_b - S_c) \quad (۶)$$

۳-۲ تخمین‌زن توان‌های اکتیو و راکتیو

توان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای را می‌توان از مقدار حقیقی و موهومی حاصل ضرب ولتاژ خط در جریان خط به دست آورد

$$p = \text{Re}\{\underline{u}_L \dot{\underline{i}}_L^*\}, \quad q = \text{Im}\{\underline{u}_L \dot{\underline{i}}_L^*\} \quad (۷)$$

در حالی که علامت * مزدوج بردار جریان خط را مشخص می‌کند. با استفاده از (۳) می‌توان توان اکتیو و راکتیو را به صورت زیر تخمین زد [۱۲]

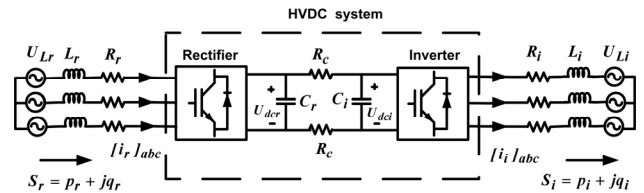
$$p = \omega(\Psi_{L\alpha} \dot{i}_{L\beta} - \Psi_{L\beta} \dot{i}_{L\alpha}) \quad (۸)$$

$$q = \omega(\Psi_{L\alpha} \dot{i}_{L\alpha} + \Psi_{L\beta} \dot{i}_{L\beta}) \quad (۹)$$

کلید روابط (۳) الی (۹) هم برای یکسوکننده و هم اینورتر صادق هستند.

۴-۲ روابط یکسوکننده

ولتاژ خط (u_{Lr}) را می‌توان به صورت جمع ولتاژ سلف (u_{Lr}) و ولتاژ یکسوکننده (u_{Sr}) نوشت



شکل ۱: بلوک دیاگرام ساده‌شده یک سیستم VSC-HVDC.

یکی از روش‌های کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت که مبتنی بر کنترل لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو و با استفاده از بردار ولتاژ می‌باشد به DPC معروف است [۱۱] تا [۱۵]. در این مقاله از روش کنترل مستقیم توان (DPC)، بدون استفاده از سنسور ولتاژ خط و با کمک تقریب شار مجازی جهت کنترل سیستم VSC-HVDC استفاده شده است. استفاده از تخمین شار، مقاوم‌بودن سیستم کنترل در برابر اعوجاج خط را تضمین می‌کند. همچنین جریان سینوسی با هارمونیک کم به دست می‌آید. نکته‌های بارز این روش کنترل نسبت به دیگر روش‌های کنترل مستقیم توان [۱۱] تا [۱۵] عبارتند از:

- ۱- استفاده از یک حلقه قفل فاز به نام SDRF-PLL جهت کارکرد صحیح روش DPC در شبکه‌های اعوجاج‌دار یا نامتقارن.
 - ۲- استفاده از مدولاسیون بردار فضایی دوازده‌ناحیه‌ای جهت تصحیح رفتار DPC در عبور از ناحیه‌ها.
 - ۳- طراحی جدول سوئیچینگ مناسب جهت حداقل کردن خطای توان اکتیو و راکتیو.
 - ۴- گسترش روش کنترل DPC برای اینورتر.
- همچنین استفاده از روش SVM [۱۲] با توجه به بالا رفتن سرعت سوئیچینگ ادوات الکترونیک قدرت باعث بالا رفتن سرعت سیستم، افزایش کیفیت توان و کاهش هزینه خواهد شد. این روش به سادگی در پردازش‌گرهای دیجیتالی قابل اعمال است.
- برای پیاده‌سازی عملی این روش به کمک پردازش‌گرهای دیجیتالی (DSP) باید به زمان محاسبه روابط کنترلی و تناسب آن با فرکانس ورودی DSP و فرکانس نمونه‌برداری مدار توجه داشت.
- شکل ۱ بلوک دیاگرام ساده‌شده یک سیستم VSC-HVDC را نشان می‌دهد.

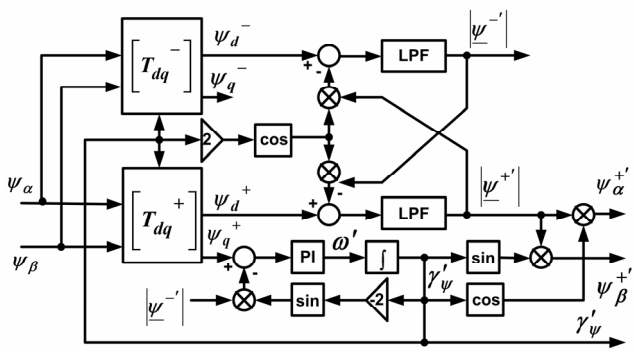
در طرف یکسوکننده متغیرهای کنترل‌کننده، ولتاژ DC خروجی یکسوکننده (U_{dc}) و توان راکتیو (q_r) و در طرف اینورتر توان اکتیو (p_i) و توان راکتیو (q_i) می‌باشند. R_c مقاومت معادل کابل انتقال است. اگر از این مقاومت صرف نظر شود می‌توان ولتاژ خازن‌های سمت یکسوکننده و اینورتر را یکسان در نظر گرفت $U_{dc} \approx U_{dci} = U_{dc}$.

۲- کنترل مستقیم توان (DPC)

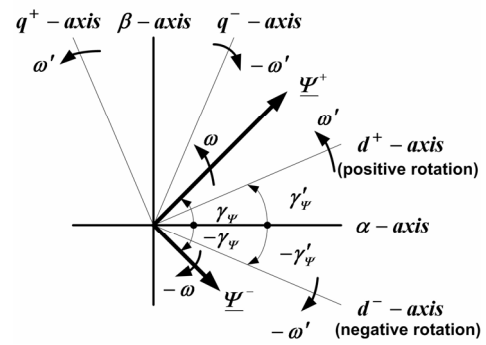
در این حالت حلقه کنترل داخلی جریان و بلوک مدولاتور PWM وجود ندارد. چون حالت‌های سوئیچینگ مبدل به وسیله یک جدول جستجو و با روش SVM مشخص می‌شود. حالت‌های انتخاب‌شده بستگی به خطای بین مقدار تقریب زده شده و مقدار فرمان توان‌های اکتیو و راکتیو دارد. در این روش کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو با استفاده از شار تقریب‌زده محاسبه می‌شود. نکته کلیدی در استفاده از روش DPC، تقریب صحیح و سریع توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشد.

۱-۲ تقریب‌زن توان بر پایه ولتاژ

ایده اصلی تقریب‌زن توان بر پایه ولتاژ برای DPC در [۱۴] بیان شده است. مقدار توان اکتیو و راکتیو به وسیله (۱) و (۲) بیان می‌شود



شکل ۳: بلوک دیاگرام SDRF-PLL



شکل ۲: نمایش شار مجازی و محور مختصات دوگانه.

هنگامی که ولتاژ شبکه نامتقارن است شار مجازی در محور مختصات $\alpha - \beta$ به صورت زیر بیان می‌گردد

$$\begin{aligned} \underline{\psi}_{(\alpha\beta)} &= \underline{\psi}^+ + \underline{\psi}^- \\ &= \left| \underline{\psi}^+ \right| \begin{bmatrix} \cos(\gamma_\psi) \\ \sin(\gamma_\psi) \end{bmatrix} + \left| \underline{\psi}^- \right| \begin{bmatrix} \cos(\gamma_\psi) \\ -\sin(\gamma_\psi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\gamma_\psi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\psi_\beta}{\psi_\alpha} \right) \quad (19)$$

این بردار شار مجازی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این محور مختصات دوگانه، محورهای d^+ و d^- با ψ^+ و ψ^- به صورت جداگانه منطبق می‌شوند. شار مجازی در این دو محور مختصات به صورت زیر بیان می‌شوند

$$\begin{aligned} \underline{\psi}_{(dq^+)} &= \begin{bmatrix} \psi_{d^+} \\ \psi_{q^+} \end{bmatrix} = [T_{dq^+}] \underline{\psi}_{(\alpha\beta)} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\gamma'_\psi) & \sin(\gamma'_\psi) \\ -\sin(\gamma'_\psi) & \cos(\gamma'_\psi) \end{bmatrix} \underline{\psi}_{(\alpha\beta)} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \underline{\psi}_{(dq^-)} &= \begin{bmatrix} \psi_{d^-} \\ \psi_{q^-} \end{bmatrix} = [T_{dq^-}] \underline{\psi}_{(\alpha\beta)} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\gamma'_\psi) & -\sin(\gamma'_\psi) \\ \sin(\gamma'_\psi) & \cos(\gamma'_\psi) \end{bmatrix} \underline{\psi}_{(\alpha\beta)} \end{aligned} \quad (21)$$

γ'_ψ زاویه شار مجازی در محور مختصات دوگانه می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

بلوک دیاگرام SDRF-PLL در شکل ۳ نشان داده شده است. اگر کنترل‌کننده PI طوری تنظیم گردد که $\gamma'_\psi \approx \gamma_\psi$ می‌توان (۲۰) و (۲۱) را به صورت زیر تقریب زد

$$\psi_{d^+} \approx \left| \underline{\psi}^+ \right| + \left| \underline{\psi}^- \right| \cos(-2\gamma'_\psi) \quad (22)$$

$$\psi_{d^-} \approx \left| \underline{\psi}^- \right| + \left| \underline{\psi}^+ \right| \cos(-2\gamma'_\psi) \quad (23)$$

$$\psi_{q^+} \approx \left| \underline{\psi}^+ \right| (\gamma_\psi - \gamma'_\psi) + \left| \underline{\psi}^- \right| \sin(-2\gamma'_\psi) \quad (24)$$

$$\psi_{q^-} \approx -\left| \underline{\psi}^- \right| (\gamma_\psi - \gamma'_\psi) - \left| \underline{\psi}^+ \right| \sin(-2\gamma'_\psi) \quad (25)$$

از (۲۲) و (۲۳) و استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر دامنه مؤلفه‌های مثبت و منفی شار مجازی به دست می‌آید. بنابراین زاویه شار مجازی (γ'_ψ) با استفاده از SDRF-PLL اصلاح می‌گردد.

$$\underline{u}_{Lr} = \underline{u}_{Sr} + \underline{u}_{Lr} \quad (10)$$

به طور مشابه برای شار مجازی معادله زیر را داریم [۱۱]

$$\underline{\psi}_{Lr} = \underline{\psi}_{Sr} + \underline{\psi}_{Lr} \quad (11)$$

معادله ولتاژ نیز به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\underline{u}_{Lr} = L_r \frac{d\underline{i}_{Lr}}{dt} + \frac{d}{dt} \underline{\psi}_{Sr} = L_r \frac{d\underline{i}_{Lr}}{dt} + \underline{u}_{Sr} \quad (12)$$

اگر ولتاژهای مبدل و جریان خط بر روی مختصات $\alpha - \beta$ به صورت (۴) و (۵) و (۶) داده شود شار تقریبی به صورت زیر به دست می‌آید

$$\psi_{Lr\alpha(est)} = \int (u_{Sr\alpha} + L_r \frac{di_\alpha}{dt}) dt \quad (13)$$

$$\psi_{Lr\beta(est)} = \int (u_{Sr\beta} + L_r \frac{di_\beta}{dt}) dt \quad (14)$$

۲-۵ روابط اینورتر

با توجه به جهت توان و جریان در ایستگاه اینورتری در شکل ۱ ولتاژ اینورتر (\underline{u}_{Si}) را می‌توان به صورت جمع ولتاژ سلف معادل شبکه و فیلتر (\underline{u}_{Li}) و ولتاژ شبکه (\underline{u}_{Li}) نوشت

$$\underline{u}_{Si} = \underline{u}_{Li} + \underline{u}_{Li} \quad (15)$$

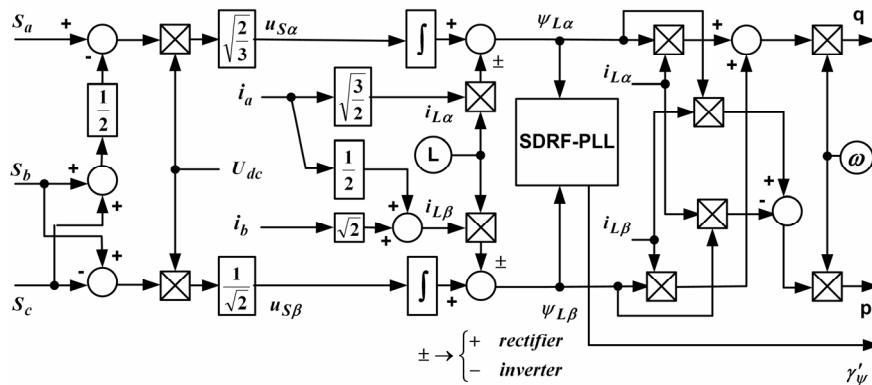
بنابراین با توجه به (۴) و (۵) و (۶)، شار تقریبی در طرف اینورتر به صورت زیر به دست می‌آید

$$\psi_{Li\alpha(est)} = \int (u_{Si\alpha} - L_i \frac{di_\alpha}{dt}) dt \quad (16)$$

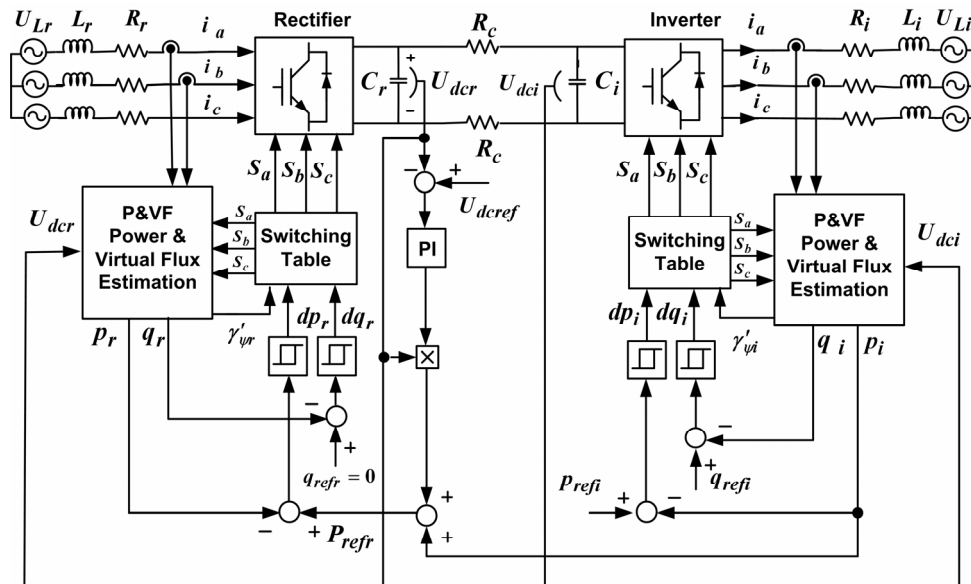
$$\psi_{Li\beta(est)} = \int (u_{Si\beta} - L_i \frac{di_\beta}{dt}) dt \quad (17)$$

۳- SDRF-PLL

تشخیص صحیح زاویه شار مجازی در اتصال مبدل‌ها به یک شبکه نامتقارن یا اعوجاج‌دار، امری مشکل و پیچیده می‌باشد. عدم تشخیص صحیح زاویه، باعث ایجاد خطا در سیستم کنترل مبدل‌ها می‌شود. برای کارکرد صحیح سیستم VSC-HVDC و بالابردن کارایی آن در اتصال به شبکه‌های غیر ایده‌ال، از یک قفل فاز مؤثر به نام SDRF-PLL استفاده می‌گردد. این حلقه قفل فاز در هنگامی که ولتاژ شبکه دارای اعوجاج یا نامتقارنی است، زاویه شار مجازی را به درستی مشخص می‌کند [۱۶].



شکل ۴: تخمین‌زن شار و توان (P&VF).



شکل ۵: بلوک دیاگرام VSC-HVDC با کنترل مستقیم توان و شار مجازی.

هیستریزیس برای یکسوکنده و اینورتر d_p و d_q می‌باشند که مقدار یک یا صفر را دارند. ورودی‌های جدول سوئیچینگ d_p و d_q و موقعیت بردار شار یعنی γ_{ψ} و خروجی‌ها S_a ، S_b و S_c می‌باشند. شاید ساده‌تر باشد که به جای استفاده از موقعیت بردار شار از موقعیت بردار ولتاژ یعنی $\gamma_{ul} = \arctg(u_{L\beta}/u_{L\alpha})$ استفاده کنیم، اما به دلیل رفتار پایین‌گذر انتگرال‌های موجود در (۱۳)، (۱۴)، (۱۶) و (۱۷)، γ_{ψ} کمتر از γ_{ul} به عوجاج ولتاژ خط حساس است. بنابراین از آن در جهت تعیین موقعیت بردار مرجع و آدرس‌دهی جدول جستجو استفاده می‌گردد.

برای دقت بیشتر و تصحیح رفتار DPC یا باید تعداد ناحیه‌ها را زیاد کرد و یا سطوح هیستریزیس را افزایش داد (مثلاً سه‌سطحی به جای دوسطحی).

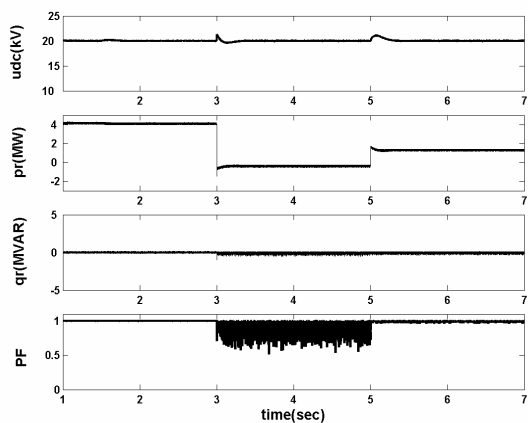
مقایسه‌کننده‌های سه‌سطحی کارایی بهتری نسبت به دوسطحی دارند. اگر مقایسه‌کننده‌های هیستریزیس سه‌سطحی استفاده گردد، بردارهای صفر به صورت طبیعی انتخاب می‌شوند. بنابراین تعداد سوئیچینگ آن کمتر از سیستم دوسطحی است. اما بردارهای صفر (۰۰۰) و $U_v(111)$ برای ولتاژ خط به خط حالت اتصال کوتاه ایجاد می‌کنند.

استفاده از دوازده ناحیه انتخاب بردار، ولتاژ دقیق‌تری را فراهم می‌کند و رفتار DPC در عبور از یک بخش به بخش دیگر را بهبود می‌بخشد. اما به حافظه بزرگ‌تری احتیاج می‌شود.

۴- بلوک DPC

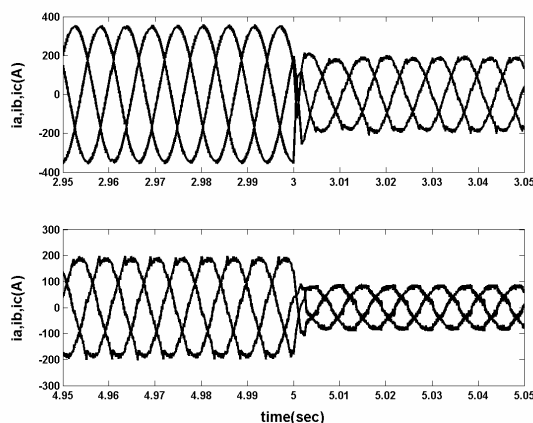
ایده اصلی DPC مشابه روش شناخته‌شده DTC است. با جریان اندازه‌گیری شده i_a و i_b و ولتاژ DC خروجی و حالت‌های سوئیچینگ S_a ، S_b و S_c طبق (۴)، (۵)، (۶)، (۸)، (۹)، (۱۳)، (۱۴)، (۱۶) و (۱۷) توان اکتیو و راکتیو تخمین زده می‌شود. بلوک دیاگرام تخمین‌زن شار و توان (P&VF) در شکل ۴ نشان داده شده است.

بلوک اصلی یک سیستم DPC همراه با تخمین شار در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است در ایستگاه یکسوکنده، ولتاژ DC خروجی و توان راکتیو کنترل می‌شود. برای داشتن ضریب قدرت واحد، مقدار توان راکتیو مرجع (q_{refr}) برابر با مقدار صفر تنظیم می‌گردد. در حالت ایده‌آل مقدار توان اکتیو سمت اینورتر و یکسوکنده با هم برابر است. در حالت واقعی اختلاف این توان‌ها اجتناب‌ناپذیر است و به وسیله خازن DC جذب و به صورت اغتشاش در ولتاژ دو سر خازن ظاهر می‌شود. این اختلاف توان با استفاده از یک سنسور ولتاژ DC در دو سر خازن خروجی یکسوکنده و با کمک یک کنترل‌کننده PI تخمین زده می‌شود. توان اکتیو مرجع سمت یکسوکنده (p_{refr}) جمع توان اکتیو سمت اینورتر و اختلاف توان ظاهر شده در دو سر خازن DC می‌باشد. در ایستگاه اینورتر توان اکتیو و راکتیو کنترل می‌شود. توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع در سمت اینورتر (p_{refi} و q_{refi}) به مقدار درخواست شده توسط شبکه خروجی تنظیم می‌گردد. خروجی کنترل‌کننده

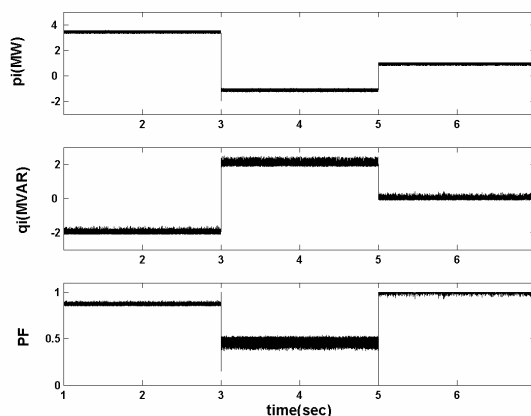
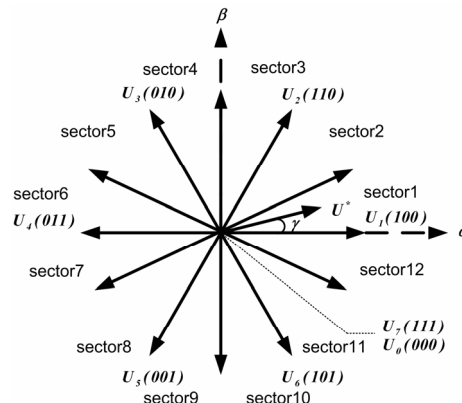


شکل ۶: سیستم ۱۲ ناحیه.

شکل ۸: ولتاژ خروجی، توان اکتیو و راکتیو و ضریب قدرت خروجی یکسوکننده.



شکل ۹: جریان‌های سه‌فاز اینورتر در تغییر پله‌ای توان مرجع در سمت اینورتر.



شکل ۷: توان اکتیو و راکتیو و ضریب قدرت خروجی اینورتر.

جدول ۱: جدول سوئیچینگ برای یکسوکننده.

ناحیه	d_{pr}	۰	۰	۱	۱
	d_{qr}	۰	۱	۰	۱
۱	U۱	U۱	U۲	U۶	U۴
۲	U۲	U۲	U۳	U۶	U۴
۳	U۲	U۲	U۳	U۱	U۵
۴	U۳	U۳	U۴	U۱	U۵
۵	U۳	U۳	U۴	U۲	U۶
۶	U۴	U۴	U۵	U۲	U۶
۷	U۴	U۴	U۵	U۳	U۱
۸	U۵	U۵	U۶	U۳	U۱
۹	U۵	U۵	U۶	U۴	U۲
۱۰	U۶	U۶	U۱	U۴	U۲
۱۱	U۶	U۶	U۱	U۵	U۳
۱۲	U۱	U۱	U۲	U۵	U۳

جدول ۲: جدول سوئیچینگ برای اینورتر.

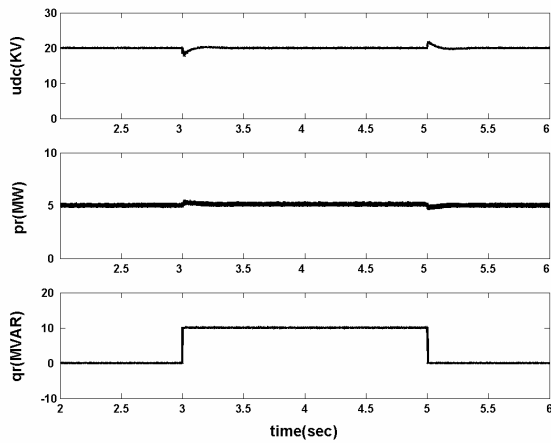
ناحیه	d_{pi}	۰	۰	۱	۱
	d_{qi}	۰	۱	۰	۱
۱	U۴	U۶	U۲	U۱	U۱
۲	U۴	U۶	U۳	U۲	U۲
۳	U۵	U۱	U۳	U۲	U۲
۴	U۵	U۱	U۴	U۳	U۳
۵	U۶	U۲	U۴	U۳	U۳
۶	U۶	U۲	U۵	U۴	U۴
۷	U۱	U۳	U۵	U۴	U۴
۸	U۱	U۳	U۶	U۵	U۵
۹	U۲	U۴	U۶	U۵	U۵
۱۰	U۲	U۴	U۱	U۶	U۶
۱۱	U۳	U۵	U۱	U۶	U۶
۱۲	U۳	U۵	U۲	U۱	U۱

در این مقاله از روش افزایش تعداد ناحیه‌ها استفاده شده است. همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است ناحیه برداری به دوازده ناحیه تقسیم شده است.

به دلیل محدوده وسیع فرکانس خروجی و دینامیک سیستم، روش‌های زیادی در جدول سوئیچینگ وجود دارد. جدول ۱ و ۲ که یک جدول سوئیچینگ برای SVM دوازده‌ناحیه‌ای برای یکسوکننده و اینورتر است بهترین پاسخ جهت روش DPC را نشان می‌دهد. این جداول با توجه به تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در نواحی مختلف SVM تنظیم شده است.

۵- شبیه‌سازی

سیستم کنترل مورد نظر با نرم‌افزار MATLAB و برای یک سیستم VSC - HVDC با بلوک دیاگرام شکل ۵ و با پارامترهای مداری مشخص شده در جدول ۳ شبیه‌سازی شده است. در شکل ۷ مقدار تخمین زده شده توان اکتیو، راکتیو و مقدار ضریب قدرت اینورتر و در شکل ۸ مقدار تخمین زده شده توان اکتیو، راکتیو، ضریب قدرت و مقدار ولتاژ DC خروجی یکسوکننده و در شکل ۹



شکل ۱۳: ولتاژ DC خروجی و توان اکتیو و راکتیو سمت یکسوکننده در حالت توان اکتیو و راکتیو مرجع ثابت در سمت اینورتر.

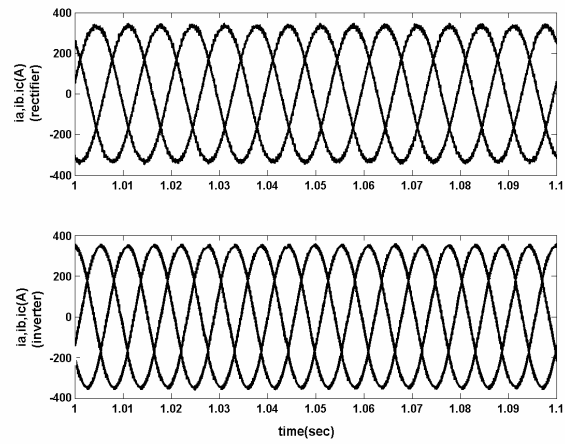
جدول ۳: پارامترهای مدار شبیه‌سازی شده.

۲۰ kV	ولتاژ DC خروجی
۱۰ kV	ولتاژ مؤثر فاز به فاز در هر دو ایستگاه
۵۰ Hz	فرکانس ولتاژ یکسوکننده
۶۰ Hz	فرکانس ولتاژ اینورتر
۵۰ kHz	فرکانس نمونه‌برداری
۵ kHz	فرکانس متوسط کلیدزنی
۳٫۵ mH	مقدار سلف خط
۴۷۰ uF	مقدار خازن متصل به مبدل‌ها
۰٫۱ Ω	مقدار مقاومت معادل خط DC

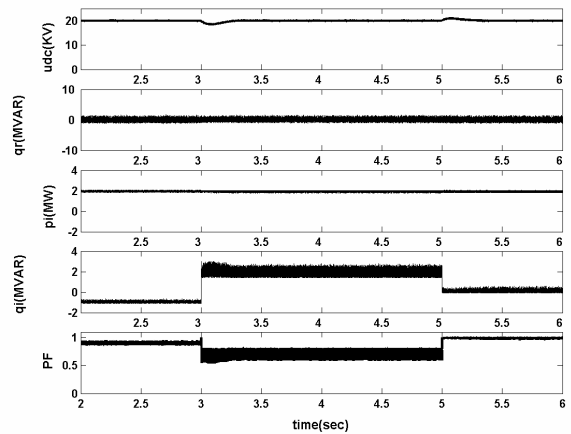
شکل ۱۰ جریان‌های سه‌فاز یکسوکننده و اینورتر را در حالت پایدار نشان می‌دهد. فرکانس ولتاژ ورودی یکسوکننده ۵۰ Hz و فرکانس ولتاژ خروجی سمت اینورتر ۶۰ Hz انتخاب شده است. در حالت پایدار، یکسوکننده و اینورتر اعوجاجی بر روی جریان‌های خروجی یکدیگر وارد نمی‌کنند.

سیستم HVDC - VSC تحت توان اکتیو مرجع ثابت در سمت اینورتر و با تغییر پله‌ای در توان راکتیو مرجع در سمت اینورتر آزمایش شده است. در شکل ۱۱ مقدار تقریب زده شده توان راکتیو سمت یکسوکننده و ولتاژ DC خروجی و همچنین توان اکتیو و راکتیو و مقدار ضریب قدرت سمت اینورتر ترسیم شده است. توان راکتیو مرجع یکسوکننده برای داشتن ضریب قدرت واحد، صفر قرار داده شده است. تغییر بسیار زیاد توان راکتیو اینورتر تأثیر چندانی در ولتاژ DC ندارد و مقدار ولتاژ در نهایت به مقدار پایدار ۲۰ kV می‌رسد. بنابراین این نوع کنترل کننده برای مستهلک کردن نوسانات سیستم و پیشرفت پایداری سیستم مؤثر است. همچنین این تغییرات نمی‌تواند در توان اکتیو و راکتیو سمت یکسوکننده اثرگذار باشد.

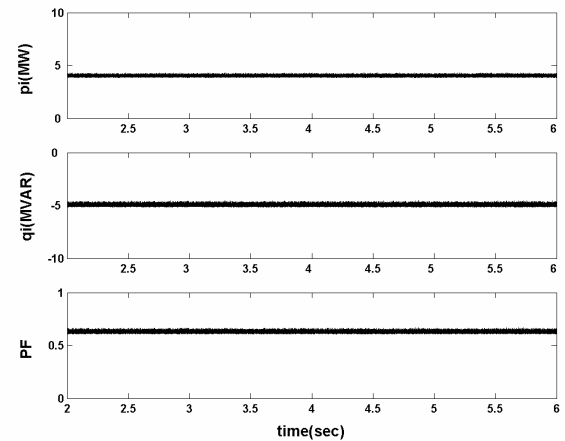
در حالت بعد توان اکتیو و راکتیو مرجع سمت اینورتر را ثابت در نظر می‌گیریم و با تغییر پله‌ای توان راکتیو مرجع در سمت یکسوکننده، سیستم HVDC - VSC را آزمایش می‌کنیم. در شکل ۱۲ مقدار تخمین زده شده توان اکتیو، راکتیو و مقدار ضریب قدرت سمت اینورتر و در شکل ۱۳ مقدار تخمین زده شده توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ DC خروجی سمت یکسوکننده ترسیم شده است. تغییر بسیار شدید توان راکتیو سمت یکسوکننده هیچ تأثیری بر روی توان‌های اکتیو و راکتیو سمت اینورتر نداشته است. به این ترتیب این روش کنترل برای مستهلک کردن نوسانات واردشده به شبکه بسیار مناسب است.



شکل ۱۰: جریان‌های سه‌فاز یکسوکننده و اینورتر در حالت پایدار.



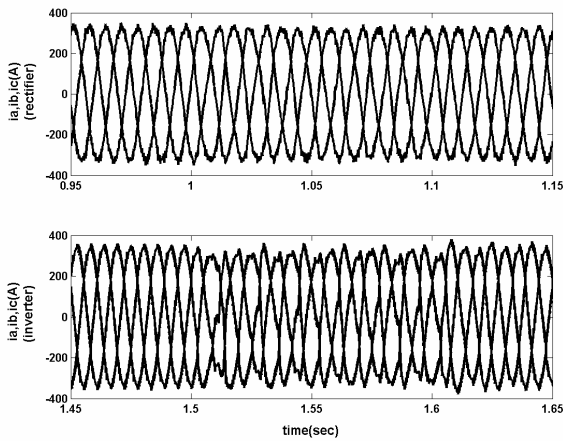
شکل ۱۱: ولتاژ DC و توان راکتیو یکسوکننده و توان اکتیو، راکتیو و ضریب قدرت اینورتر در حالت توان اکتیو مرجع ثابت در سمت اینورتر.



شکل ۱۲: توان اکتیو و راکتیو و مقدار ضریب قدرت سمت اینورتر در حالت توان اکتیو و راکتیو مرجع ثابت در سمت اینورتر.

جریان‌های اینورتر به ازای تغییرات پله‌ای توان اکتیو و راکتیو مرجع اینورتر ترسیم شده است. مقدار توان اکتیو مرجع اینورتر از ۳٫۵ MW به ۱ MW و سپس به ۱ MW و توان راکتیو مرجع از ۲ MVAR به ۲ MVAR و سپس به صفر تغییر یافته است.

توان راکتیو مرجع یکسوکننده برای داشتن ضریب قدرت واحد، صفر قرار داده شده است. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است تقریباً ضریب قدرت واحد را در یکسوکننده خواهیم داشت و همچنین ولتاژ DC خروجی با ضریبان نسبتاً کم و تقریباً صاف به دست می‌آید.



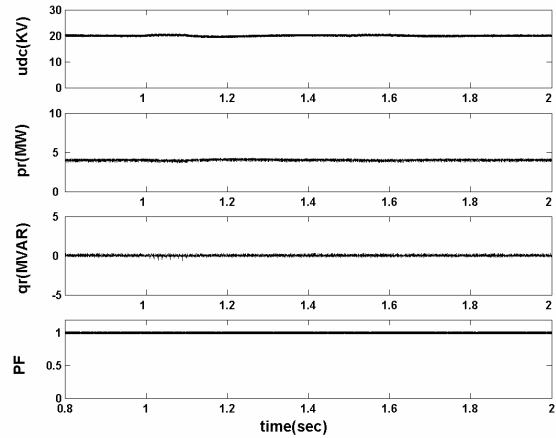
شکل ۱۶: جریان‌های سه‌فاز یکسوکننده و اینورتر در حالت منابع نامتقارن.

پایداری مطلوب، وقتی که جهت توان معکوس می‌شود مناسب است. پاسخ دینامیکی مطلوب، حفظ کیفیت توان در هنگام تغییر ناگهانی توان‌های اکتیو و راکتیو و به دست آوردن ضریب قدرت واحد در سمت یکسوکننده از مزایای این روش است.

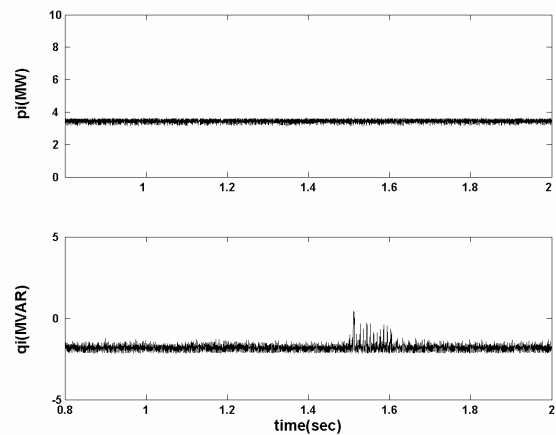
به منظور اقتصادی‌بودن طرح، سادگی و جداسازی مدار قدرت و فرمان در این روش کنترلی، سنسور ولتاژ خط حذف شده است. بنابراین مقدار ولتاژ خط توسط شار مجازی تخمین زده می‌شود. تخمین دقیق ولتاژ خط وابسته به اطلاع دقیق از مقدار سلف خط می‌باشد. اگر فرض کنیم که سیستم HVDC به یک خط بی‌نهایت وصل باشد مقدار سلف خط همان مقدار راکتور و یا مقدار فیلتر ورودی است که کاملاً مشخص است. اما اگر سیستم HVDC به یک شبکه با اندوکتانس بزرگ متصل باشد این روش کنترلی با خطا همراه خواهد شد. معایب دیگر این روش شامل فرکانس سوئیچینگ متغیر و لزوم استفاده از یک مبدل A/D و میکروپروسسور سریع می‌باشد.

مراجع

- [1] R. Grunbaum, "Enhancing of power quality and availability in distribution systems by means of voltage source converters," in *Proc. Conf. IEE2001*, vol. 2, pp. 482:1-5, Jun. 2001.
- [2] G. Asplund, "Application of HVDC Light to power system enhancement," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 4, pp. 2498-2503, Jan. 2000.
- [3] G. B. Zhang, Z. Xu, and G. Z. Wang, "Steady state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system," *Proceedings of the CSEE*, vol. 1, no. 22, pp. 17-22, 2002.
- [4] Q. Chen, G. Tang, and M. Hu, "Steady-state model and controller design of a VSC-HVDC converter based on dq0-axis," *Automation of Electrical Power Systems*, vol. 16, no. 28, pp. 61-66, 2004.
- [5] G. Asplund, K. Eriksson, and K. Svensson, "HVDC Light-DC transmission based on voltage sourced converters," in *Proc. CIGRE SC14 Colloguium*, pp. 1-8, South Africa, 1997.
- [6] Z. Q. Hu, C. X. Mao, and J. M. Lu, "Application of an optimal control strategy to a new type of HVDC system based on voltage source converters," *Power System Technology*, vol. 10, no. 28, pp. 38-41, May 2004.
- [7] H. Zhaoqing, M. Chengxiong, L. Jiming, and C. Man, "Genetic algorithm based control for VSC HVDC," in *Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition*, pp. 1-8, 2005.
- [8] G. Zhang, and Z. Xu, "Steady-state model for VSC based HVDC and its controller design," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 1085-1090, 2001.
- [9] B. T. Ooi, and X. Wang, "Boost-type PWM HVDC transmission system," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1557-1563, Oct. 1991.
- [10] G. I. Li, S. Ruan, L. Peng, Y. Sun, and X. Li, "A novel nonlinear control for stability improvement in HVDC Light system," in *Proc.*



شکل ۱۴: ولتاژ خروجی، توان اکتیو و راکتیو و ضریب قدرت خروجی یکسوکننده در حالت منابع نامتقارن.



شکل ۱۵: توان اکتیو و راکتیو خروجی اینورتر در حالت منابع نامتقارن.

اثر نامتعادلی بر روی سیستم VSC - HVDC را با اعمال ولتاژ خط به صورت زیر بررسی می‌کنیم

$$\begin{aligned}
 u_{La} &= U_{Lm} \times \sin(\omega t) \\
 u_{Lb} &= \gamma_{25} \times U_{Lm} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\
 u_{Lc} &= \gamma_{185} \times U_{Lm} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned} \tag{26}$$

نامتعادلی ولتاژ خط در زمان ۱ تا ۱/۱ ثانیه برای ایستگاه یکسوکننده و در زمان ۱/۵ تا ۱/۶ ثانیه برای ایستگاه اینورتر اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۴ مقدار تخمین زده شده توان اکتیو، راکتیو، ضریب قدرت و مقدار ولتاژ DC خروجی یکسوکننده و در شکل ۱۵ مقدار تخمین زده شده توان اکتیو و راکتیو اینورتر و در شکل ۱۶ جریان‌های اینورتر و یکسوکننده ترسیم شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است نامتعادلی منابع ولتاژ در سمت یکسوکننده و اینورتر اثری بر روی توان‌های اکتیو و راکتیو سمت یکسوکننده و اینورتر و ولتاژ خروجی سمت یکسوکننده ندارد. به این ترتیب این سیستم کنترل در برابر اغتشاشات خط مقاوم می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که با اعمال روش پیشنهادی جدید برای یک سیستم VSC - HVDC که بین دو شبکه توزیع با فرکانس‌های مختلف نصب شده است می‌توان توان‌های اکتیو و راکتیو را کنترل کرد. این روش کنترل برای مستهلک کردن نوسانات سیستم و به دست آوردن

سید ادیب ابریشمی‌فر تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۶۸، ۷۱ و ۸۰ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و هم‌اکنون عضو هیأت علمی دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. وی در طی سال‌های ۸۰-۶۸ در دانشگاه‌های علم و صنعت، سیستان و بلوچستان و شهید بهشتی در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی برق مشغول تدریس بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ و الکترونیک قدرت.

ابراهیم عبیری جهرمی در سال ۱۳۷۱ مدرک کارشناسی مهندسی الکترونیک خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۷۵ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک خود را از دانشگاه شیراز دریافت نمود. از سال ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۰ نام‌برده به عنوان کارشناس ارشد سیستم‌های الکترونیکی در وزارت نیرو به کار مشغول بود و پس از آن به دوره دکتری مهندسی الکترونیک در دانشگاه علم و صنعت ایران وارد شد و در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق - الکترونیک گردید. ایشان از سال ۱۳۸۶ در دانشکده مهندسی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی شیراز مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان الکترونیک قدرت و طراحی مدارات مجتمع می‌باشد.

IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 1, pp. 837-845, June. 2005.

- [11] A. Rahmati, A. Abrishamifar, and E. Abiri, "Direct power control of an HVDC system based on VSCs," in *Proc. IEEE Int. Conf on Industrial Technology*, vol. 2, pp. 2984-2989, Dec. 2006.
- [12] M. Malinowski, *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*, Ph.D. dissertation, Inst. Control Ind. Electron., Warsaw Univ. Technol., Warsaw, Poland, 2001.
- [13] B. H. Kwon, and J. H. Lim, "A line-voltage-sensorless synchronous rectifier," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 14, no. 5, pp. 966-972, Sep. 1999.
- [14] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi, "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 34, no. 3, pp. 473-479, May/June 1998.
- [15] M. Malinowski, P. Kazmierkowski, and M. Trzynadlowski, "A Comparative study of control techniques for PWM rectifiers in ac adjustable speed drives," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1390-1396, Nov. 2003.
- [16] P. Rodriguez, J. Bergas, and L. Sainz, "Synchronous double reference frame PLL applied to a unified power quality conditioner," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power Syst.*, vol. 2, pp. 614-619, Oct. 2002.

عبدالرضا رحمتی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی در سال ۱۳۵۷ در دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی الکترونیک و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری الکترونیک قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۹ در دانشگاه برادفورد انگلستان به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. نام‌برده مسئولیت معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده برق در سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۷۱ را به عهده داشته است. ایشان از سال ۱۳۷۵ تاکنون عضو انجمن برق و فناوری (MIET) و عضو انجمن مهندسين خیره [Chartered Electrical Engineer (Ceng)] انگلستان بوده است. نام‌برده از ماه سپتامبر ۲۰۰۴ تا مه ۲۰۰۵ میلادی به عنوان استاد مدعو در انستیتوی تکنولوژی ایلینوی (IIT) به تدریس و تحقیق اشتغال داشته است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مبدل‌ها، کنترل دور موتورها و منابع تغذیه بدون وقفه.

Archive