سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

مدرس: کاظم وارثی (kzm.varesi@gmail.com)

تعداد واحد: ۳ (نظری)

پیش‌نیاز: -

هم‌نیاز: الکترونیک صنعتی

هدف: آشنایی با مبانی و ساختارهای انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر

- **مقدمه:** تعاریف و مفاهیم FACTS.
- **مبدل‌های منبع ولتاژ**
- **مبدل‌های منبع جریان**
- **جبران‌سازهای موازی استاتیک (شامل SVC و STATCOM)**
- **جبران‌سازهای سری استاتیک (شامل SSSC، TCSC، TSSC و GCSC)**
- **جبران‌سازهای ترکیبی سری و موازی (شامل IPFC و UPFC)**
- **تنظیم‌کننده‌های زاویه فاز و ولتاژ استاتیک (شامل TCPAR و TCVR)**

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ مراجع درس

[۱] دکتر احمد فریدون درافشان، آشنایی با FACTS، نشر مهندسین مشاور قدس نیرو، بهار ۱۳۸۴.

[۲] دکتر محمدرضا حقی‌فام، مهندس مهدی رسول‌زاده حقیقی، سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر AC (FACTS)، کمیته تحقیقات شرکت سهامی برق منطقه‌ای هرمزگان.

[3] R. M. Mathur, R. K. Varma, Thyristor-based FACTS Controllers, Wiley-IEEE, 2002.

[4] V. K. Sood, HVDC and FACTS Controllers, Springer, 2004.

[5] G. Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, 1999.

[6] E. Acha, FACTS Modelling and Simulation in Power Networks, Wiley, 2004.

[7] X. P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, 2nd edition, Springer, 2012.

[8] Y. H. Song, Flexible ac Transmission Systems (FACTS), IET Press, 1999.

[9] K. R. Padiyar, FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution, 2007.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❖ ارزیابی:

- پروژه: ۱۰ نمره
- پایان‌ترم: ۱۰ نمره
- حضور و غیاب: ۱ نمره (اضافی)

❖ روند پروژه:

۱. **انتخاب مقاله معتبر (چاپ شده در مجلات معتبر، ارائه شده بعد از سال ۲۰۱۵) با موضوع مورد علاقه (یک هفته)**
۲. **ارائه گزارش فارسی –صرفاً ترجمه– (دو هفته)**
۳. **تجزیه و تحلیل کامل مقاله انتخابی و روابط ارائه شده در آن و تحویل گزارش دوم (دو هفته)**
۴. **پیشنهاد ایده(های) جدید، پیاده‌سازی آن در مقاله، انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه و ارائه گزارش سوم (سه هفته، قابل تمدید تا ۵ هفته)**
۵. **آماده‌سازی مقاله برای ارائه در کنفرانس‌های معتبر نمایه شده در IEEE (دو هفته)**
۶. **ارائه شفاهی کارهای انجام گرفته، در قالب فایل پاور پوینت برای سایر اعضاء کلاس، در موعد مقرر (بر اساس زمان‌بندی تعیین شده).**

- **توجه:** هر گام از روند پروژه، دارای نمره‌بندی جداگانه می‌باشد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❖ لطفاً برای دریافت اطلاعات تکمیلی درباره این درس، به آدرس: **سایت دانشکده مهندسی برق، آموزش، دروس کارشناسی ارشد، ادوات FACTS** مراجعه بفرمایید.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS

❖ دسته‌بندی کنترل‌کننده‌های FACTS

I. کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

a. جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))
b. خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))
c. شیفت‌دهنده فاز (Phase Shifter)

II. کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

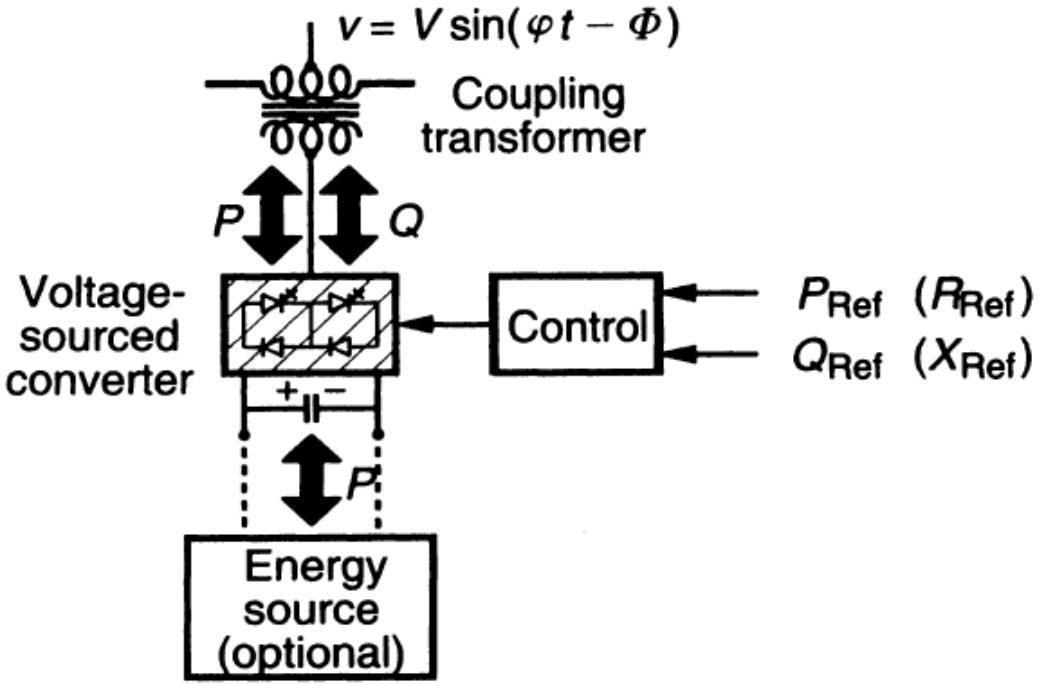
a. جبران‌گرهای سنکرون استاتیکی (Static Synchronous Compensators (STATCOM))
b. جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی (Static Synchronous Series Compensators (SSSC))
c. کنترل‌کننده یکپارچه عبور توان (Unified Power Flow Controller (UPFC))
d. کنترل‌کننده عبور توان بین‌خطی (Interline Power Flow Controller (IPFC))
e. ...

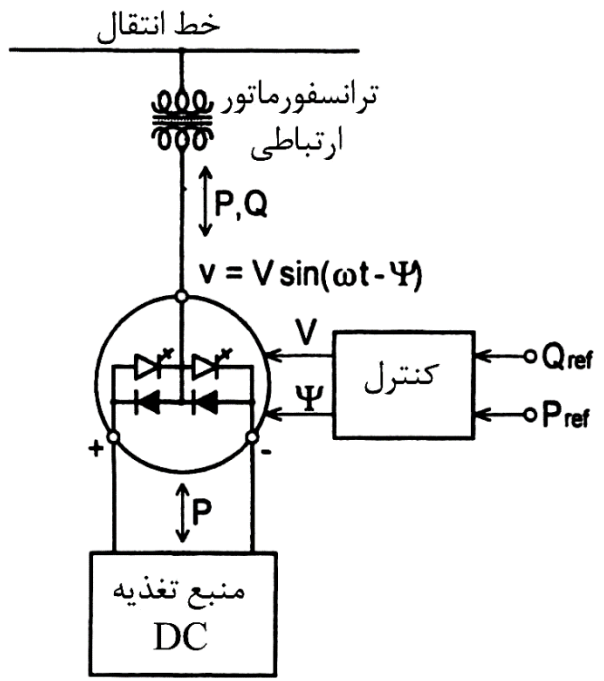
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ منبع ولتاژ سنکرون (Synchronous Voltage Source - SVS)

- این منبع متناظر با ماشین سنکرون ایده‌آل می‌باشد که قادر است دامنه و ولتاژ را در خروجی خود کنترل کنند، با این تفاوت که هیچ قسمت چرخان و در نتیجه اینرسی در آن وجود ندارد.
- پاسخ این منبع سریع و لحظه‌ای بوده و قادر است تا توان راکتیو به شبکه تزریق و یا از آن جذب نماید. در صورت اتصال به یک منبع انرژی مناسب، می‌تواند با سیستم AC به تبادل توان اکتیو نیز بپردازد.



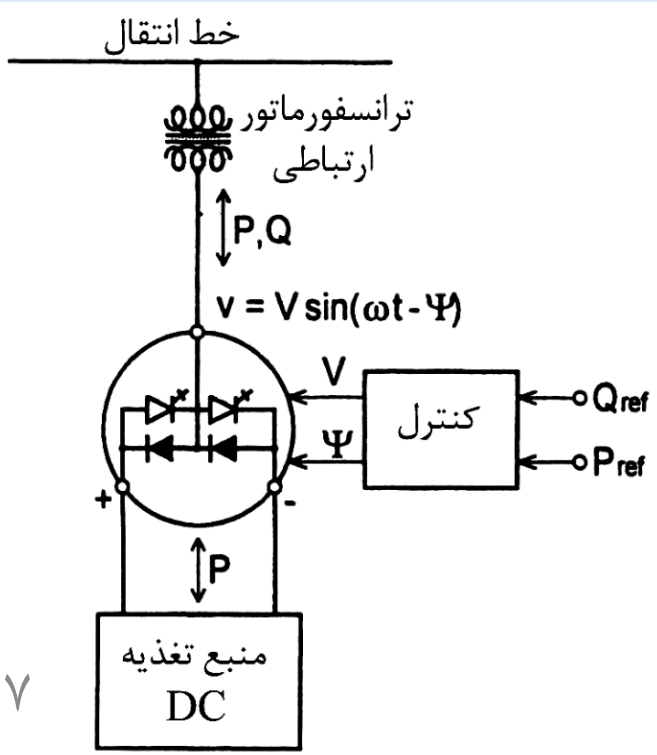


سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ منبع ولتاژ سنکرون (Synchronous Voltage Source - SVS)

- دامنه ولتاژ V و در نتیجه مقدار توان راکتیو مبادله شده با خط انتقال از طریق Q_{ref} کنترل می‌شود.
- زاویه ولتاژ ψ و در نتیجه مقدار توان اکتیو مبادله شده با خط انتقال از طریق P_{ref} کنترل می‌شود.
- اگر $P_{ref} = 0$، هیچ تبادل توان اکتیوی با شبکه صورت نمی‌پذیرد و SVS مانند یک جبرانگر سنکرون (کندانسور) تنها به تبادل توان راکتیو با شبکه می‌پردازد. در چنین حالتی نیاز به منبع DC وجود ندارد.
- در صورت حذف منبع انرژی DC می‌توان از یک خازن بجای آن استفاده نمود.
- با منبع ولتاژ سنکرون، امکان جبران خط انتقال و کنترل توان عبوری فراهم می‌گردد.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ منبع ولتاژ سنکرون (Synchronous Voltage Source - SVS)

- برخلاف جبران‌سازهای با امپدانس موازی کنترل‌شده (SVC)، جبران حاصل از SVS تا حد زیادی مستقل از متغیرهای شبکه (ولتاژ و جریان خط و زاویه) است.
- بنابراین در صورت وقوع اغتشاش‌های عمده (نظیر افت ولتاژ شدید، نوسان جریان و زاویه فاز)، به فعالیت خود ادامه می‌دهد.
- SVS یک منبع ولتاژ متناوب با خروجی سینوسی و با ورودی‌های ثابت است، که تنها در فرکانس اصلی سیستم کار می‌کند.
- از نظر تئوری، امپدانس خروجی SVS در سایر فرکانس‌ها صفر است (در عمل بدلیل اندوکتانس نشتی ترانسفورماتور کوپل‌کننده، امپدانس سلفی اندکی دارد). بنابراین، برخلاف جبران‌سازهای امپدانسی، SVS قادر به تولید مدار تشدید سری یا موازی (با شبکه انتقال) نیست.
- SVS دارای قابلیت ایجاد عبور دوطرفه توان اکتیو بین ترمینال‌های AC و DC خود است.
- می‌توان ترمینال‌های دو یا چند SVS را با هم تزویج کرده و مسیرهایی برای انتقال توان اکتیو بین شین‌های (خطوط) دلخواه بوجود آورد. با ترکیب مناسب این SVSها می‌توان یک کنترل‌کننده FACTS ساخت که قابلیت کنترل مستقل هر یک از توان‌های اکتیو و راکتیو در خطوط انتقال و همچنین متعادل‌سازی عبور توان اکتیو و راکتیو در خطوط را دارا باشد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر منبع ولتاژ سنکرون

- ❑ جبران‌گر سنکرون استاتیکی STATCOM (Static Synchronous Compensators)
- ❑ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی SSSC (Static Synchronous Series Compensators)
- ❑ کنترل‌کننده یک‌پارچه عبور توان UPFC (Unified Power Flow Controller)
- ❑ کنترل‌کننده عبور توان بین‌خطی IPFC (Inter-Line Power Flow Controller)

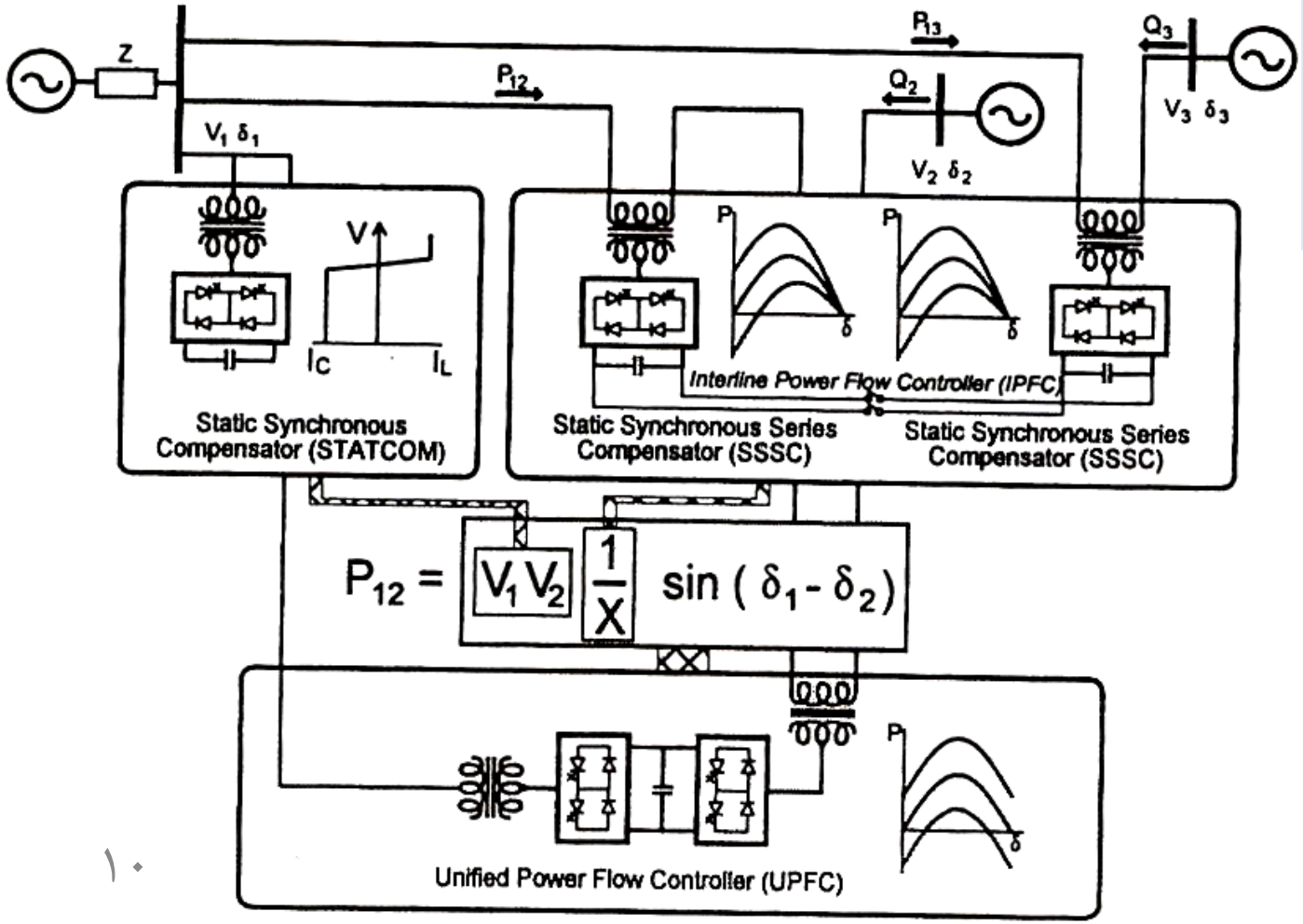
- STATCOM مانند SVC با جبران موازی، ولتاژ خط انتقال را کنترل می‌کند.
- SSSC بوسیله جبران سری، ولتاژ دو سر امپدانس سری خط انتقال و در نتیجه امپدانس مؤثر خط را کنترل می‌کند.
- UPFC می‌تواند هر سه پارامتر مؤثر خط انتقال (ولتاژ، امپدانس و زاویه) را با هم و یا بطور مستقل کنترل کند و یا بطور مستقیم توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط را کنترل کند.
- IPFC علاوه‌بر جبران‌سازی سری، می‌تواند توان اکتیو را بین خطوط عبور داده و بدین ترتیب، مدیریت توان اکتیو و راکتیو یک سیستم انتقال با چندین خط را انجام دهد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر منبع ولتاژ سنکرون

- ❑ جبران‌گر سنکرون استاتیکی STATCOM
- ❑ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی SSSC
- ❑ کنترل‌کننده یک‌پارچه عبور توان UPFC
- ❑ کنترل‌کننده عبور توان بین‌خطی IPFC

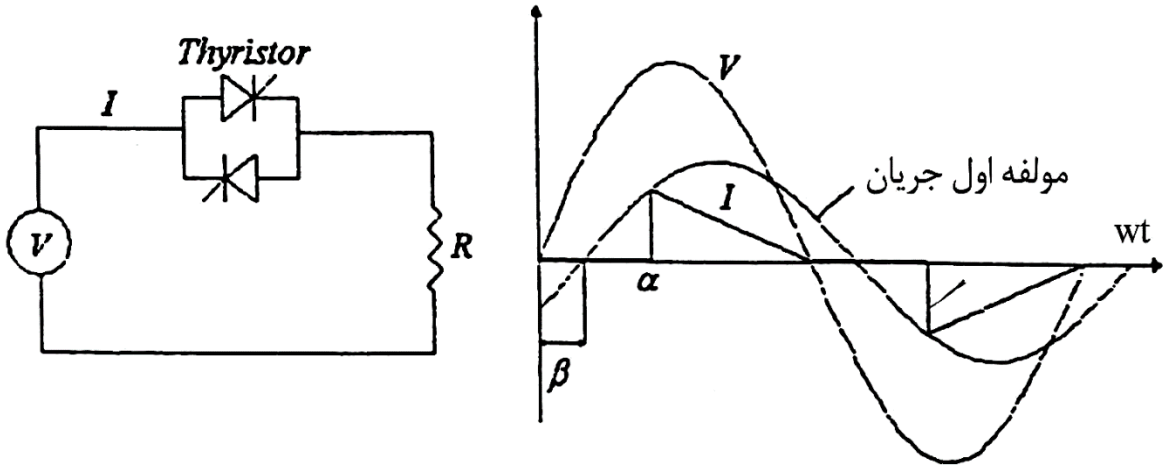


سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)

- در ساختار مبدل‌های مبتنی‌بر منبع ولتاژ، معمولاً از کلیدهای نیمه‌هادی با قابلیت روشن/خاموش شدن اجباری (مانند GTO) استفاده می‌شود.
- در مدار زیر یک منبع ولتاژ AC توسط دو تریستور موازی معکوس به بار مقاومتی متصل شده و هیچ عنصر ذخیره‌گر انرژی در مدار وجود ندارد.
- با روشن کردن تریستور در زاویه آتش $0 < \alpha < 180$، ولتاژ منبع در دو سر مقاومت قرار گرفته و شکل موج جریان I را به وجود می‌آورد. در نیم‌سیکل بعدی، تریستور موازی در زاویه $\alpha+180$ روشن شده و همین روند تکرار می‌شود.



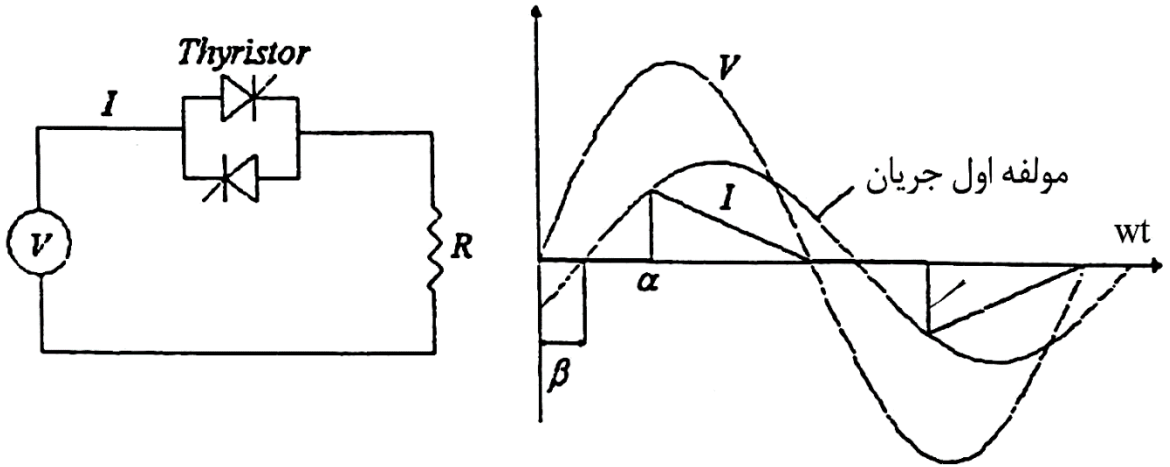
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)

- بسط فوریه شکل‌موج جریان نشان می‌دهد که مؤلفه اول آن یک موج سینوسی است که نسبت به شکل‌موج ولتاژ منبع به اندازهٔ β درجه تأخیر فاز دارد. به ازاء محدوده تغییرات زاویه آتش α، زاویه β همیشه به صورت پس‌فاز بوده و از نظر منبع، جریان مصرفی نسبت به ولتاژ منبع، همیشه پس‌فاز است.
- لذا این مدار همواره از منبع توان راکتیو جذب می‌کند، در حالی که هیچ عنصر راکتیوی در سیستم وجود ندارد.

نتیجه گیری: در مبدل‌های مبتنی‌بر کلیدهای تریستوری، زمان خاموش شدن تریستورها توسط ولتاژ و جریان شبکه تعیین شده و این مبدل ها همیشه مصرف کننده توان راکتیو در سیستم هستند



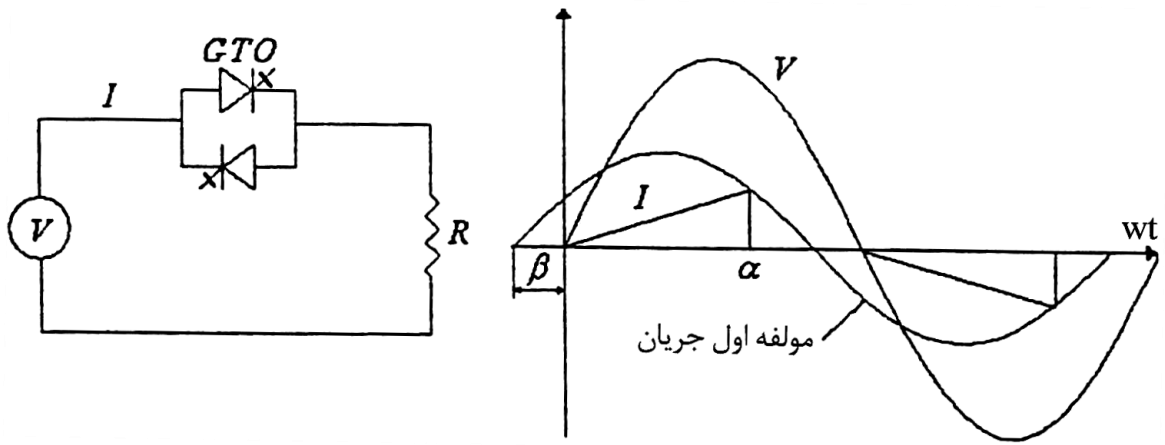
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)

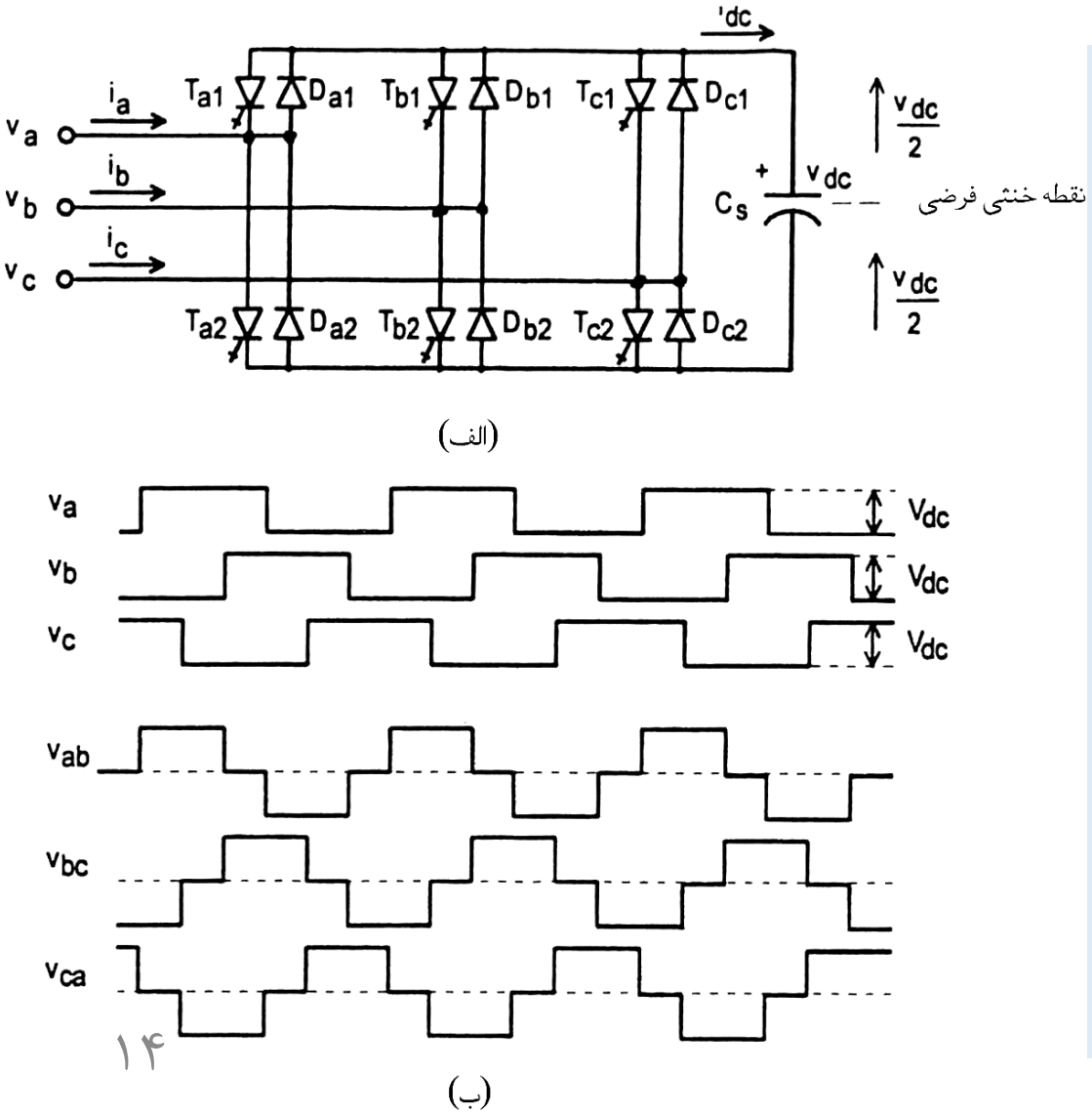
- مدار ساده زیر که در آن از GTO (تریستور با قابلیت خاموش شدن اجباری) استفاده شده، مفروض است. فرض کنید کلیدها در زمان $t=0$ روشن و در زمان $\omega t < 180$ خاموش شوند. در این صورت شکل موج ولتاژ و جریان مطابق شکل خواهد بود.
- با بسط سری فوریه جریان، مشاهده می‌شود که مؤلفه اول آن یک موج سینوسی است که با موج ولتاژ منبع به اندازه β اختلاف فاز دارد که در این حالت خاص پیش فاز است. لذا این مدار می‌تواند توان راکتیو تولید و یا مصرف نماید، بدون اینکه از هیچ عنصر ذخیره‌کننده انرژی نظیر سلف و خازن استفاده کند.

نتیجه‌گیری: مشخصه مبدل‌های منبع ولتاژ این است که بدون نیاز به عناصر ذخیره‌کننده انرژی می‌توانند توان راکتیو سلفی یا خازنی شبکه را با اعمال الگوی کلیدزنی مناسب، جبران نمایند.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)



❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)

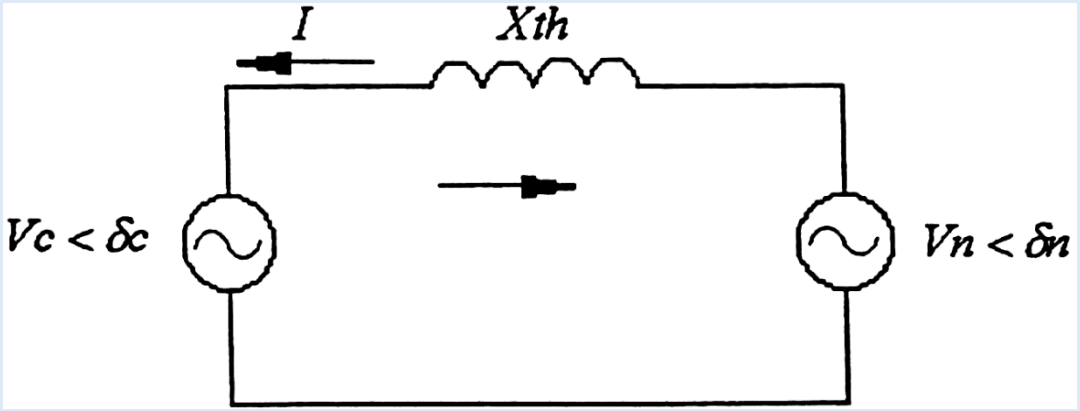
- شکل روبرو یک مبدل منبع ولتاژی ۶ پالسی (اینورتر سه‌فاز) را نشان می‌دهد. هر بازو (فاز) دارای دو کلید (یک کلید GTO و یک دیود موازی-معکوس) می‌باشد. بدین ترتیب، امکان عبور دو طرفه جریان از کلیدها فراهم می‌گردد.
- با انتخاب استراتژی کنترلی مناسب (فرمان گیت GTOها) می‌توان شکل‌موج‌های Va , Vb و Vc را مطابق با شکل روبرو ایجاد نمود.
- با در نظر گرفتن مؤلفه اول شکل‌موج‌های ولتاژ ارائه شده در شکل روبرو و ولتاژ طرف AC، می‌توان مبدل ولتاژ را با یک منبع ولتاژ مدل کرد که دامنه و فاز ولتاژ خروجی آن، توسط الگوهای کلید زنی قابل کنترل است.
- مبدل VSC می‌تواند با استفاده از یک منبع ولتاژ DC، یک شکل‌موج از ولتاژهای سه‌فاز متعادل، مطابق شکل روبرو ایجاد کند. این شکل‌موج یک شکل‌موج سه سطحی است: $Vdc+$، صفر و $-Vdc$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)

- هنگام اتصال یک VSC به شبکهٔ قدرت، مدار معادل مولفه اول ولتاژ مبدل و مدل تونن شبکه را می‌توان به صورت زیر ارائه داد:



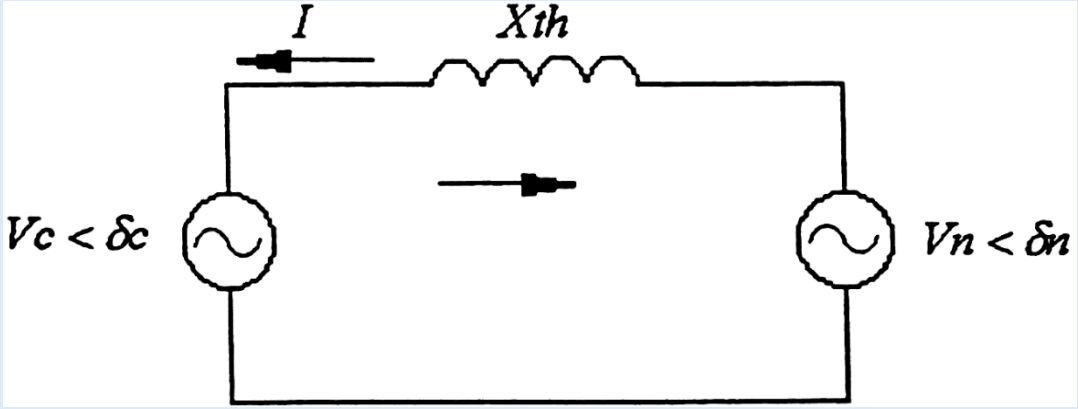
- در این شکل، Vc ولتاژ خروجی مبدل است که دامنه و فاز آن توسط شاخص‌های دامنه و فاز الگوی کلیندزنی قابل کنترل می‌باشد.
- در مدار شکل بالا، جریان I از رابطه زیر تعیین می شود :

$$I = \frac{V_n - V_C}{jX_{th}} = j\frac{V_C - V_n}{X_{th}}$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)



$$I = \frac{V_n - V_C}{jX_{th}} = j\frac{V_C - V_n}{X_{th}}$$

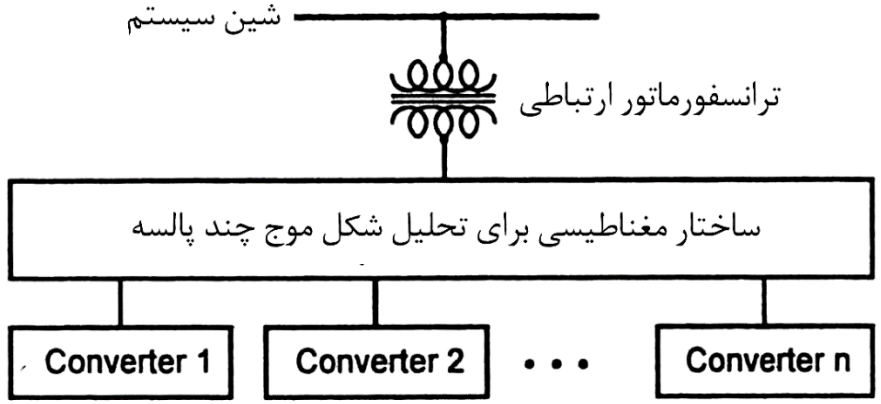
- طبق رابطهٔ بالا اگر دامنه ولتاژ خروجی VSC بزرگتر از دامنه ولتاژ شبکه Vn باشد، جریان I نسبت به ولتاژ شبکه پیش فاز خواهد بود و مبدل توان راکتیو به شبکه تزریق خواهد نمود.
- اگر دامنه ولتاژ خروجی مبدل کوچکتر از دامنه ولتاژ شبکه باشد، جریان مبدل I نسبت به ولتاژ شبکه پس فاز بوده و از شبکه توان راکتیو دریافت می‌دارد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

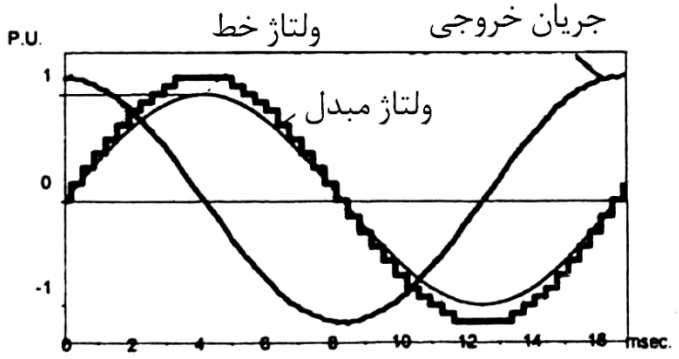
❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)

- چندین مبدل VSC می‌توانند به یک باس DC مشترک وصل شوند و هر یک می‌توانند یک شکل‌موج سه‌فاز ایجاد کنند.
- با تولید این شکل‌موج‌ها و جابجایی لحظه شروع (فازهای) آن‌ها و سپس جمع کردن شکل‌موج‌ها، یک شکل‌موج چندسطحی بدست می‌آید.
- با ترکیب تعداد مناسب این مبدل‌ها می‌توان به یک شکل‌موج تقریباً سینوسی دست یافت.
- با n مبدل سه‌سطحی می‌توان ولتاژ سینوسی $2n+1$ سطح ایجاد کرد.
- جریان خروجی ۹۰ درجه جلوتر از ولتاژ است (پیش‌فاز)، یعنی در این حالت مبدل جریان خازنی تولید و به شبکه تزریق می‌کند.
- توان راکتیو تبادلی بین کانورتر و سیستم ac را می توان با تغییر دامنه ولتاژ خروجی سه فاز کنترل نمود و با این کار توان راکتیو تبادلی تغییر می نماید.



(الف)

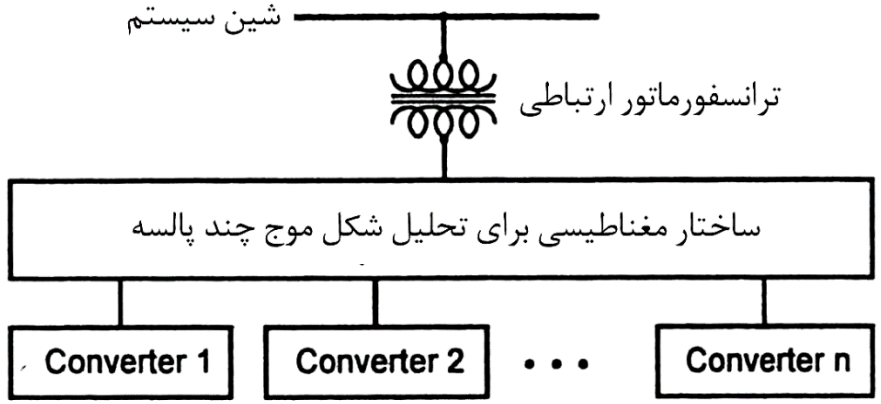


(ب)

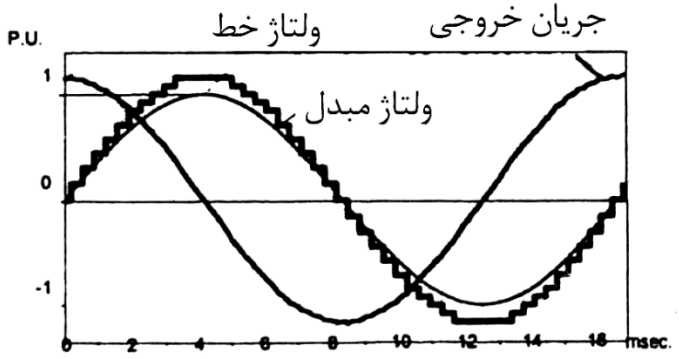
nکانورتر ۶ پالسی و شکل‌موج یک مبدل VSC ۴۸ پالسی

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)



(الف)



(ب)

n کانورتر ۶ پالسی و شکل‌موج یک مبدل VSC ۴۸ پالسی

❖ مبانی و اصول کاری مبدل‌های منبع ولتاژی (VSC)

- تبادل توان اکتیو بین مبدل و سیستم ac را می‌توان با عمل Phase shifting (جابجایی فاز) ولتاژ خروجی مبدل نسبت به ولتاژ سیستم ac کنترل نمود.
- اگر زاویه فاز ولتاژ خروجی کانورتر بیشتر از زاویه فاز ولتاژ ac باشد، مبدل از منبع ولتاژ dc (یا منبع ذخیره‌گر انرژی) توان اکتیو به سیستم می‌دهد.
- اگر تنها کنترل توان راکتیو برای مبدل مدنظر باشد، توان اکتیو تولیدی توسط منبع انرژی dc باید صفر باشد. در این صورت فقط به یک خازن dc کوچک موازی با مبدل نیاز است.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌ساز سنکرون استاتیک (STATCOM)

- در STATCOM مبدل از نوع مبدل ولتاژ است. وجود سلف در خروجی STATCOM الزامی است. اگر هدف فقط کنترل و تزریق توان راکتیو باشد، از خازن استفاده می‌شود.
- اساس عملکرد STATCOM مشابه کندانسور سنکرون است. از آنجا که در ساخت این جبران‌ساز از ادوات الکترونیک قدرت استفاده می‌شود، به آن جبران‌ساز استاتیک گفته می‌شود.
- مبدل‌های بکاررفته در این جبران‌ساز، توان راکتیو مورد نیاز را بطور محلی (در محل اتصال STATCOM به شبکه) تأمین کرده و خروجی آن بطور پیوسته قابل تنظیم می‌باشد. به همین دلیل در مواردی که ولتاژ شبکه قدرت تغییرات وسیعی داشته باشد (در حالت بروز اغتشاش یا پس از رفع خطا) از این جبران‌ساز استفاده می‌شود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مقایسه STATCOM و SVC

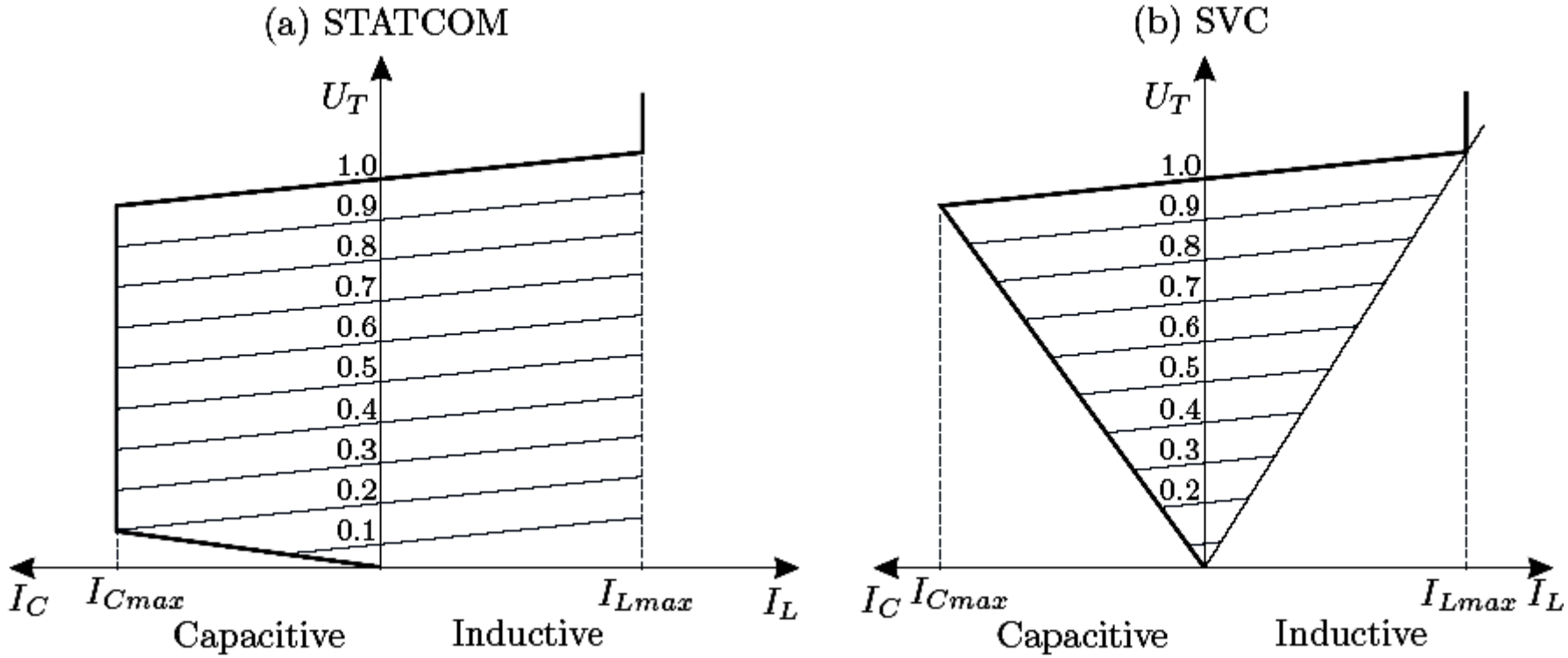
- برای مدل‌سازی SVC لازم است تا در حالت استاتیکی، در یک زاویه آتش معین مقدار راکتانس معادل را بدست آوردیم. با تغییر نقطه کار، اندازه آن و در نتیجه مدل آن تغییر می‌یابد.
- در مد امپدانس ثابت، سیگنال زاویه آتش ثابت است. در مد ولتاژ ثابت، لازم است تا ولتاژ مرجع با مقدار اندازه‌گیری شده در آن باس مقایسه شود. سپس، سیستم کنترل حلقه‌بسته زاویه آتش را طوری تغییر می‌دهد که ولتاژ تقریبا ثابت بماند. این موضوع اولاً ایده‌آل نیست، ثانیاً پاسخ آن تا حدودی کند است، ثالثاً عملکرد آن در حدود ولتاژهای نامی است.
- برای مثال، فرض می‌شود که TCR برای ایجاد ۰/۱ (پریونیت) توان راکتیو (Q=0.1 pu) در نقطه اتصال به شبکه درنظر گرفته شده باشد. اگر در حضور این راکتانس در شبکه، ولتاژ شینه (باس) از ۱به ۰/۵پریونیت کاهش یابد (V=0.5 pu)، مطابق رابطه $Q = V^2/X_{TCR}$ توان راکتیو از ۰/۱ به ۰/۰۲۵ پریونیت کاهش می‌یابد ($Q = {}^1/_4 \times 0.1 = 0.025$). این عدم توانایی مطلوب در کنترل ولتاژ در وضعیتهای گذرا و کمبود (کاهش) ولتاژ، از معایب اصلی SVC به شمار می‌آید.
- با در نظر گرفتن ولتاژ مرجع و ولتاژ دو سر SVC و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، سیگنال کنترلی جهت تغییر زاویه آتش تولید می‌شود. اما مشکل این است که با تغییر X_{TCR} مقدار جریان (i) SVC نیز تغییر می‌کند (سیستم کنترل حلقه‌بسته غیرخطی است).
- در مد کنترل جریان: در این حالت، TCR را می‌توان معادل یک منبع جریان راکتیو مدل‌سازی کرد اما باید توجه داشت که این مدل فقط در نقطه کار اعتبار دارد.
- جریان راکتیو مطلوب برابر است با $\frac{V}{X}$. برای دست‌یابی به جریان مطلوب(I_{ref})، مقدار راکتانس (X) و در نتیجه زاویه آتش (α) بدست می‌آید.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مقایسه STATCOM و SVC

- SVC و STATCOM از لحاظ قابلیت عملکرد جبران‌سازی بسیار به هم شبیه هستند، اما اصول عملکرد آنها اساساً متفاوت است.
- STATCOM به عنوان یک منبع ولتاژ سنکرون عمل می‌کند، در حالی‌که SVC به عنوان ادمیتانس راکتیو کنترل شده عمل می‌کند.
- این تفاوت باعث می‌شود STATCOM از مشخصات عملکرد بهتر و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به SVC برخوردار باشد.

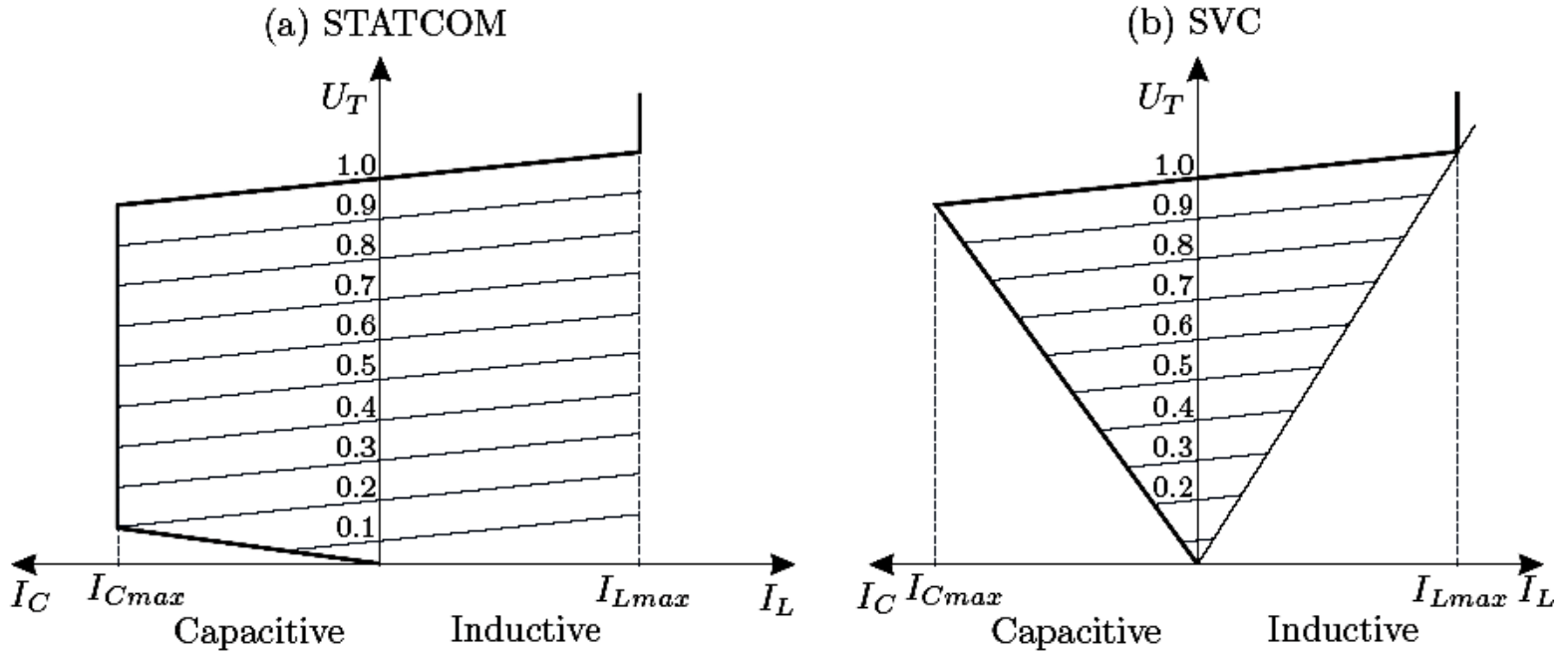


سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مقایسه STATCOM و SVC

- در محدوده عملکرد خطی مشخصه V-I، قابلیت عملکرد جبران‌سازی SVC و STATCOM مشابه است. با درنظرگرفتن محدوده عملکرد غیرخطی، STATCOM قادر است تا جریان خروجی‌اش را در محدوده حداکثر جبران‌سازی خازنی و سلفی به صورت مستقل از ولتاژ AC سیستم کنترل کند. در حالیکه حداکثر جریان جبران‌سازی قابل حصول با استفاده از SVC به صورت خطی با ولتاژ سیستم کاهش می‌یابد.
- بنابراین در تأمین ولتاژ تحت اغتشاشات بزرگ سیستم که در طی آنها ولتاژ سیستم خارج از محدوده خطی است STATCOM بسیار مؤثرتر از SVC عمل می‌کند.

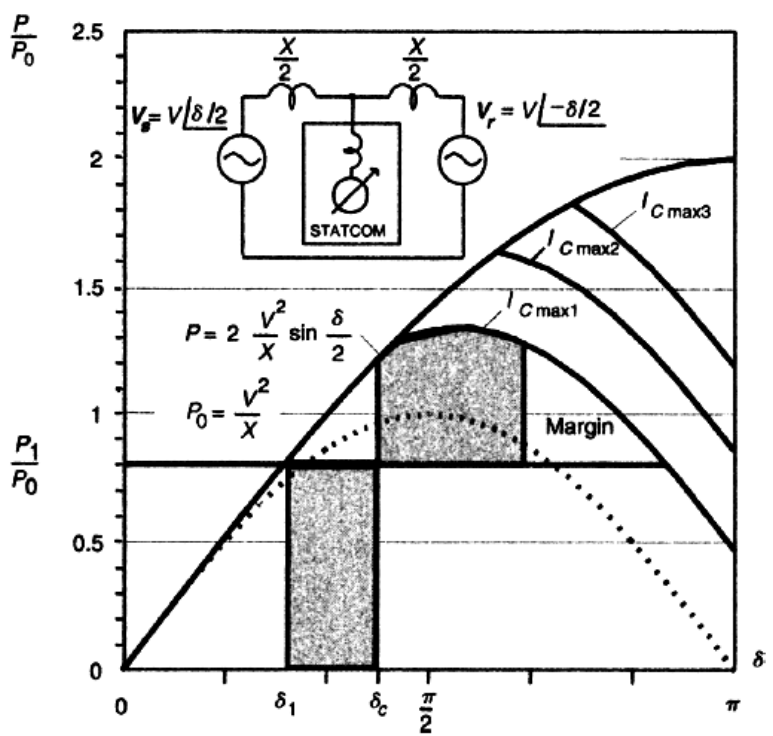


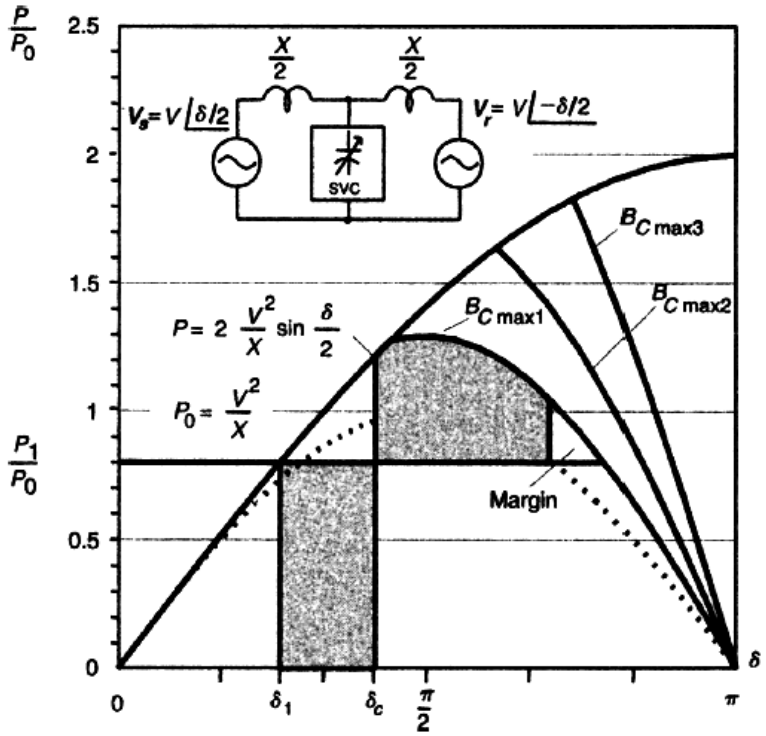
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مقایسه STATCOM و SVC

- ظرفیت هر دو جبران‌ساز SVC و STATCOM برابر در نظر گرفته شده است. در جبران‌سازی موازی، STATCOM در مقایسه با SVC توان قابل انتقال را بیشتر افزایش می‌دهد.
- به بیان دیگر، برای داشتن حاشیه پایداری معلوم، می‌توان ظرفیت STATCOM را کوچک‌تر از ظرفیت SVC در نظر گرفت.



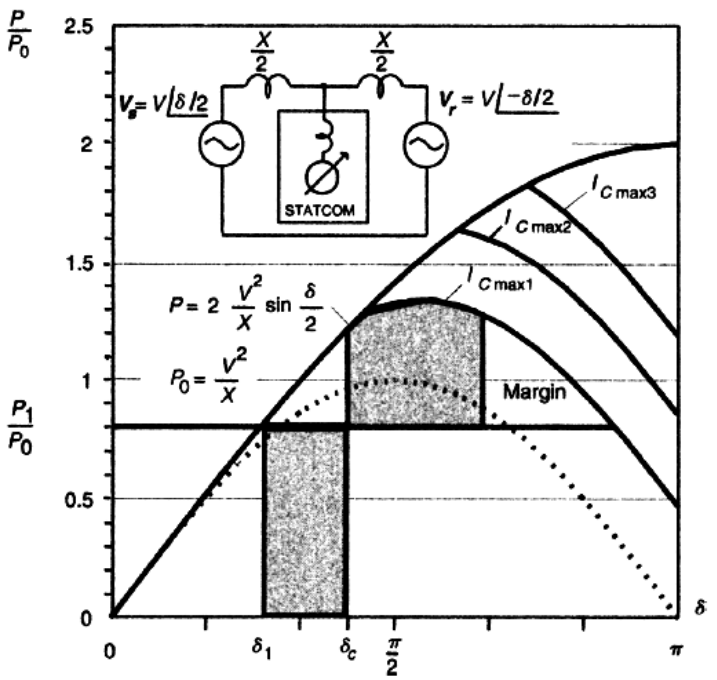


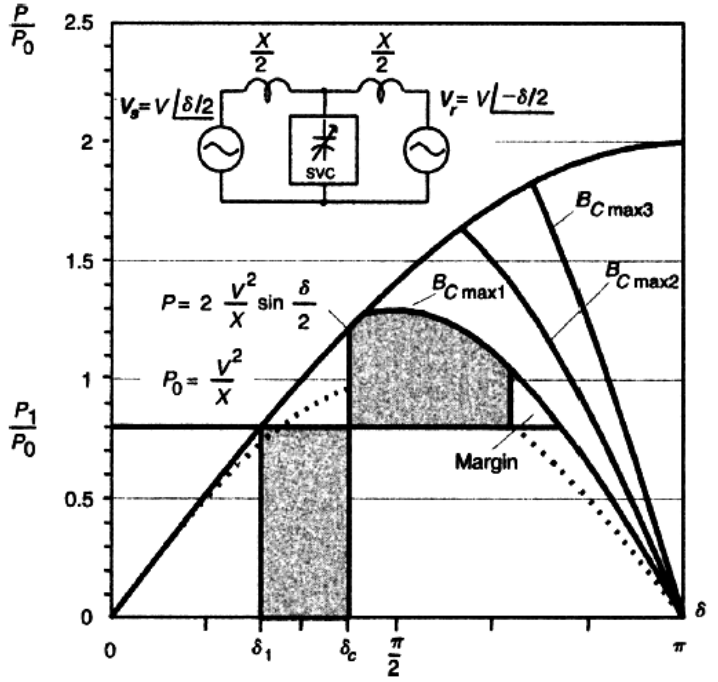
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مقایسه STATCOM و SVC

- قابلیت STATCOM در حفظ کامل جریان خروجی خازنی در شرایط ولتاژ پایین سیستم، باعث می‌شود STATCOM در حفظ پایداری گذرای سیستم بسیار مؤثرتر از SVC عمل کند.
- در مواقعی که نیاز به جبران‌سازی توان اکتیو است، STATCOM قادر است با استفاده از پایانه DC خود توان را از یک منبع ذخیره انرژی (باطری، بانک خازنی و غیره) بگیرد و از پایانه AC خود آن را به شبکه تزریق کند. در حالیکه SVC این قابلیت را ندارد.





سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مقایسه STATCOM و SVC

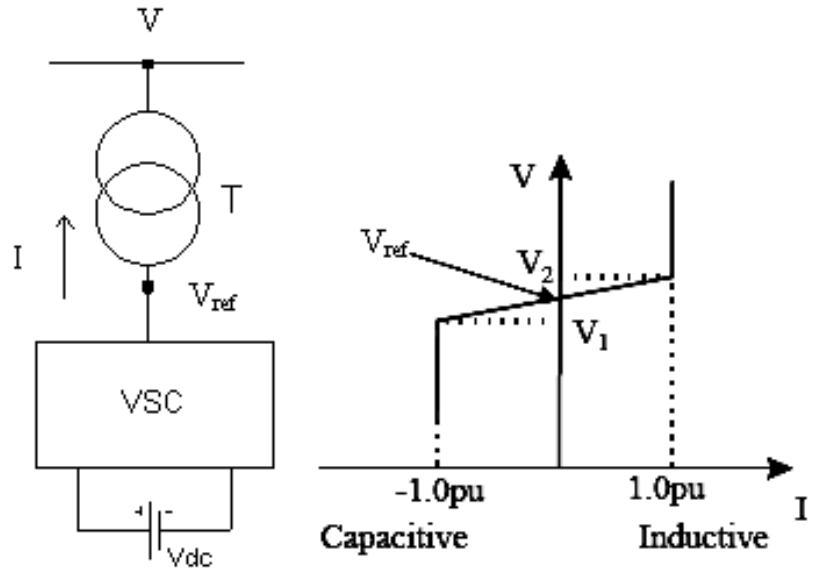
- STATCOM در ولتاژهای بالا بصورت یک منبع جریان عمل می‌کند، در حالی که SVC در ولتاژهای بالا و بصورت امپدانس متغیر کار می‌کند.
- زمان پاسخ STATCOM حدود ۱ الی ۲ سیکل است در حالی که زمان پاسخ SVC در حدود ۱ الی ۳ سیکل است. بنابراین، STATCOM از سرعت بالاتری نسبت به SVC برخوردار می‌باشد.
- فضای مورد نیاز STATCOM در حدود ۴۰٪ -۵۰٪ فضای مورد نیاز SVC می‌باشد.
- در صورتی که هزینه سرمایه‌گذاری SVC ۱۰۰٪ باشد، هزینه سرمایه‌گذاری STATCOM در حدود ۱۲۰٪-۱۵۰٪ می‌باشد.
- STATCOM قادر است تا هم توان اکتیو و هم توان راکتیو را کنترل کند، در حالی که SVC تنها قادر است تا توان راکتیو را کنترل نماید.
- در ولتاژهای بسیار پایین توانایی ایجاد جریان ثابت را ندارد و معادل یک راکتانس عمل می‌کند.

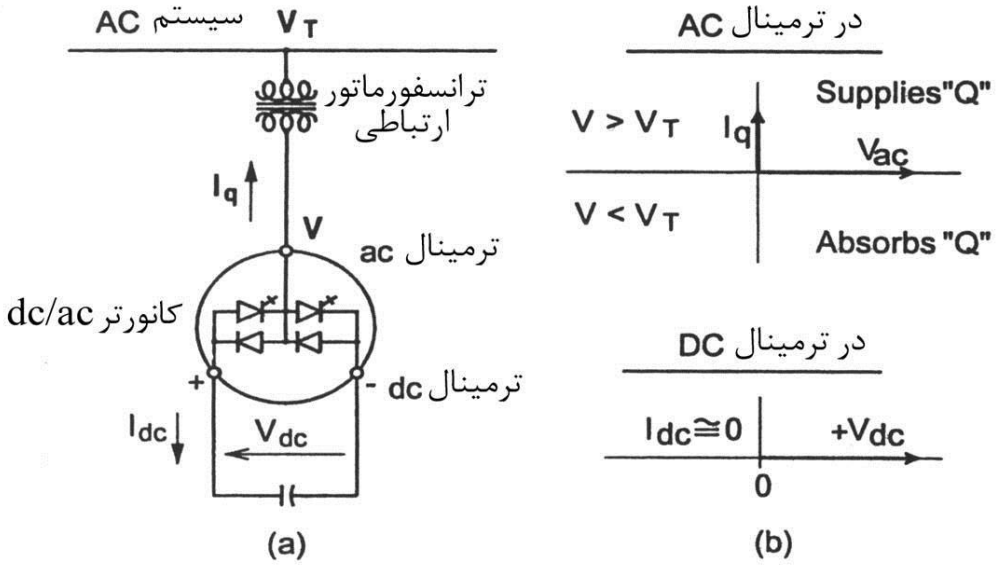
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ ویژگی‌های STATCOM

- STATCOM در ولتاژهای بالا بصورت یک منبع جریان عمل می‌کند، در حالی که SVC در ولتاژهای بالا و بصورت امپدانس متغیر کار می‌کند.
- شکل زیر طرحی از STATCOM و مشخصه V-I آنرا نشان می‌دهد. تولید یا جذب توان راکتیو توسط مبدل منبع ولتاژ (VSC) با تنظیم ولتاژ V_{ref} صورت می‌گیرد.
- اگر ولتاژ تولید STATCOM کمتر از ولتاژ سیستم باشد، STATCOM به عنوان یک بار سلفی عمل می‌کند و MVAR از سیستم جذب می‌کند.
- برای اینکه STATCOM به عنوان خازن موازی عمل کرده و MVAR به سیستم تزریق کند، باید ولتاژ آن بیشتر از ولتاژ سیستم باشد.



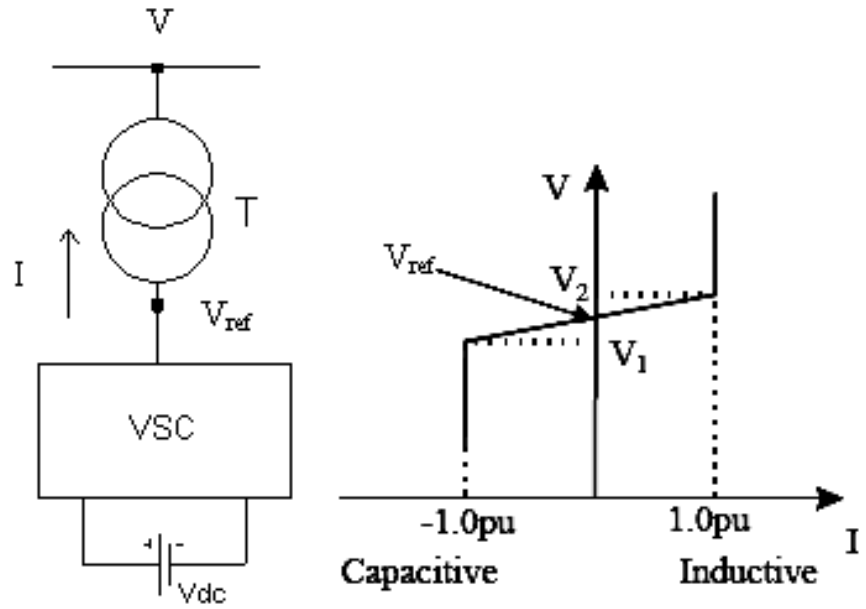


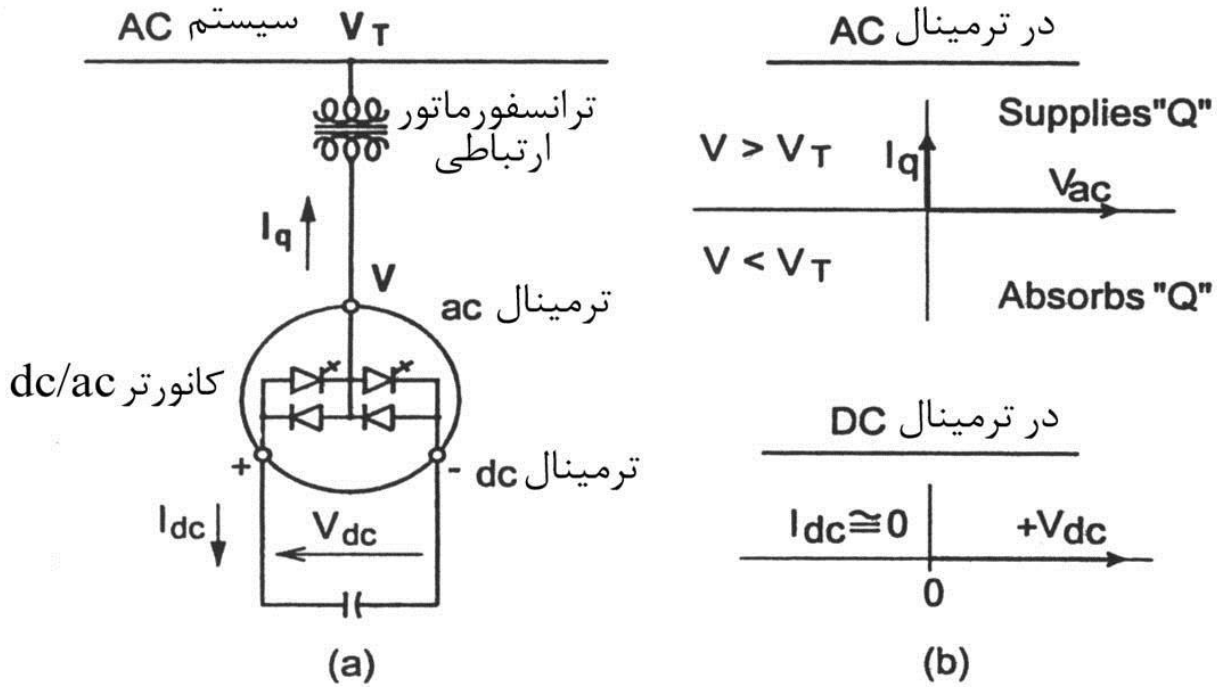
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ ویژگی‌های STATCOM

- مبدل از سیستم ac کمی توان اکتیو جذب و مصرف می‌کند تا بتواند تلفات داخلی خود را تأمین کرده و خازن را در سطح ولتاژ مورد نظر نگه دارد.
- این کار با عقب انداختن زاویه فاز ولتاژهای خروجی مبدل به مقدار کمی انجام می‌شود. همین نوع کنترل به کار می‌رود تا ولتاژ خازن را بالا و پایین ببرد و بنابراین اندازه ولتاژ خروجی مبدل را کنترل کند.



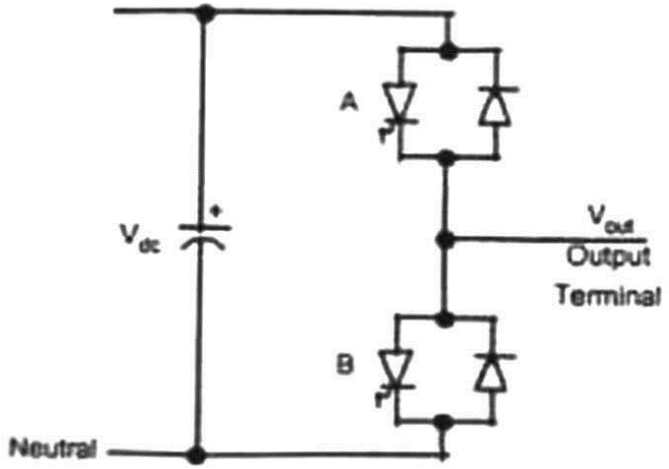


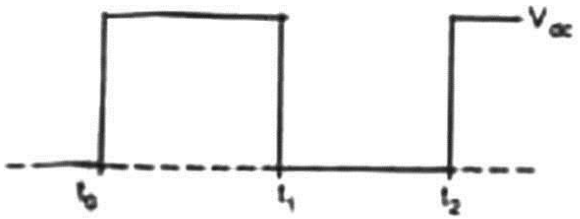
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبدل منبع ولتاژ بکار رفته در STATCOM

- مبدل بکار رفته در STATCOM یک اینورتر است که ولتاژ dc را به ولتاژ ac تبدیل می‌کند. بدین‌ترتیب، با کلیدزنی منبع ولتاژ dc، یک شکل‌موج مربعی برای ولتاژ در خروجی مبدل (طرف ac) ایجاد می‌شود که مؤلفه اصلی آن یک ولتاژ ac قابل کنترل است (با زاویه آتش).
- با توجه به اینکه کلید A هدایت می‌کند یا B، ولتاژ خروجی به سطح Vdc یا صفر تغییر خواهد کرد. در این حالت موج مربعی ولتاژ بر اثر کلیدزنی ایجاد می‌شود. مؤلفه اصلی این ولتاژ یک ولتاژ AC است که دارای دو سطح Vdc و صفر است.
- در مبدل دوسطحی زیر، ولتاژ خروجی غیرمتقارن است. با ۲ برابر کردن ظرفیت و سه سطحی کردن آن، شکل‌موجی به دست می‌آید که خروجی آن متقارن است. زوایای آتش نیز باید متقارن باشند.





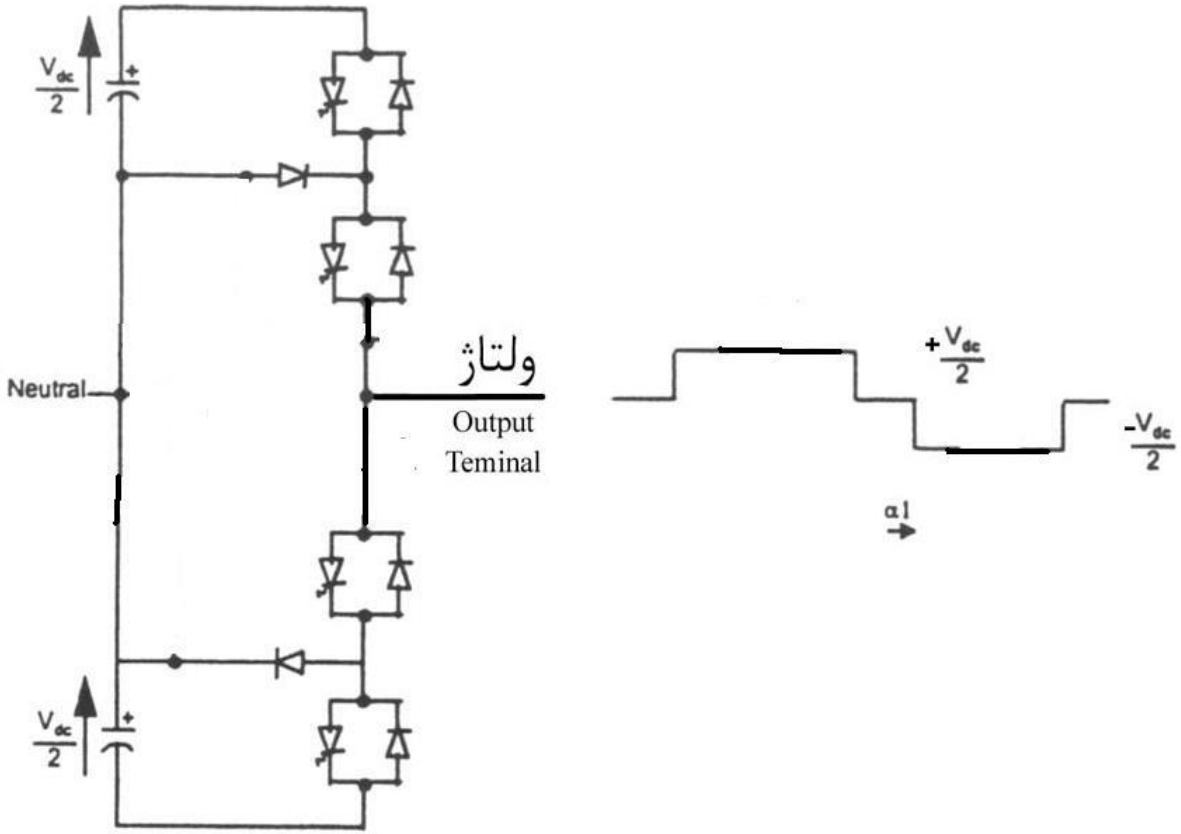
ولتاژ خروجی طرف ac

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبدل منبع ولتاژ بکار رفته در STATCOM

- با دو برابر کردن ظرفیت خازنی و استفاده از مبدل روبرو، ولتاژ سه‌سطحی متقارن در خروجی مبدل بدست می‌آید.

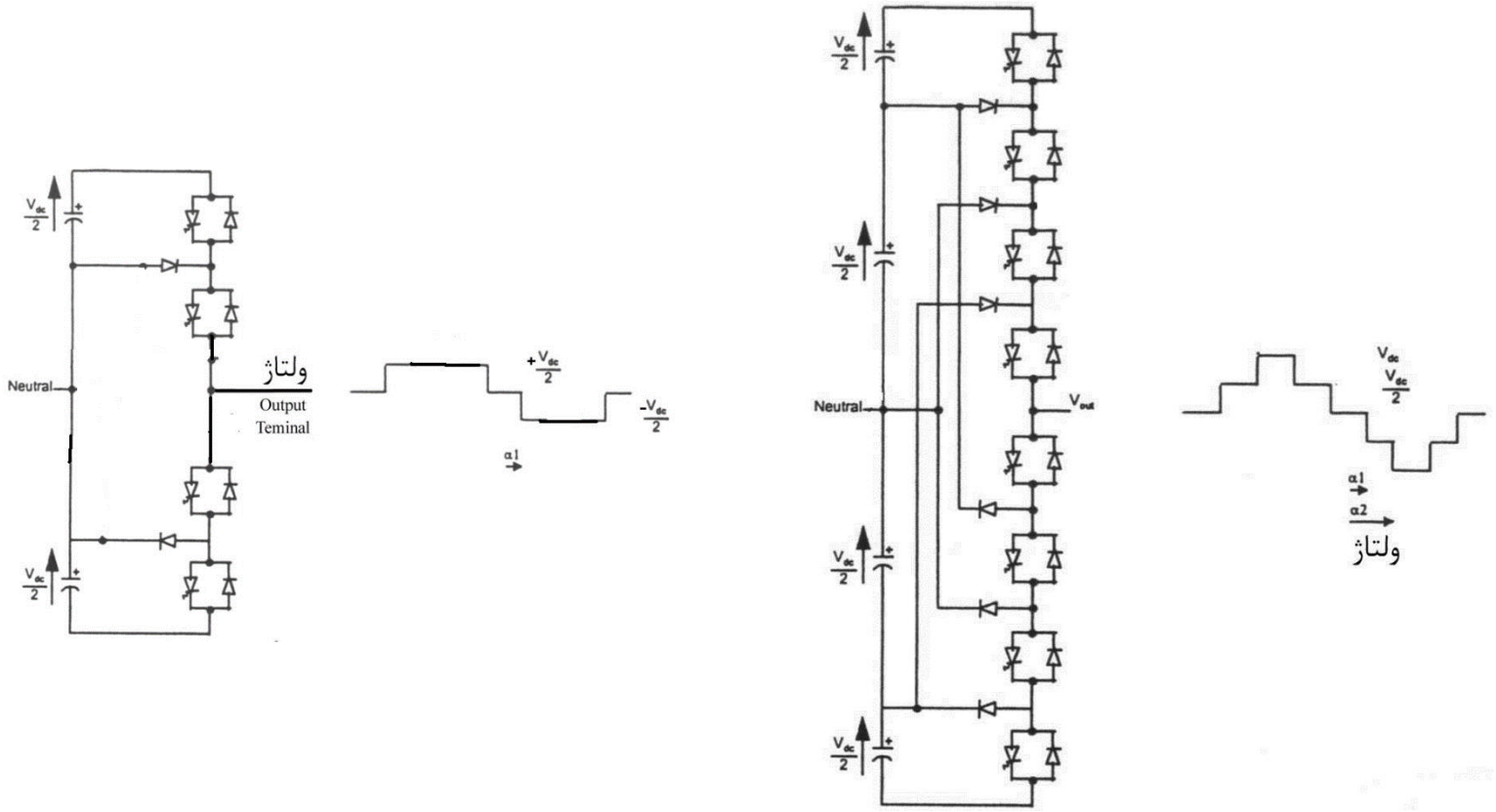


سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبدل منبع ولتاژ بکار رفته در STATCOM

- با اضافه کردن سطوح مبدل، شکل‌موج ولتاژ خروجی آن به شکل‌موج سینوسی نزدیک‌تر و محتوای هارمونیکی آن کمتر می‌شود. در این حالت نیز مؤلفه اصلی ولتاژ با کنترل زاویه آتش قابل کنترل است. شکل زیر مبدل ۵ سطحی را نشان می‌دهد.

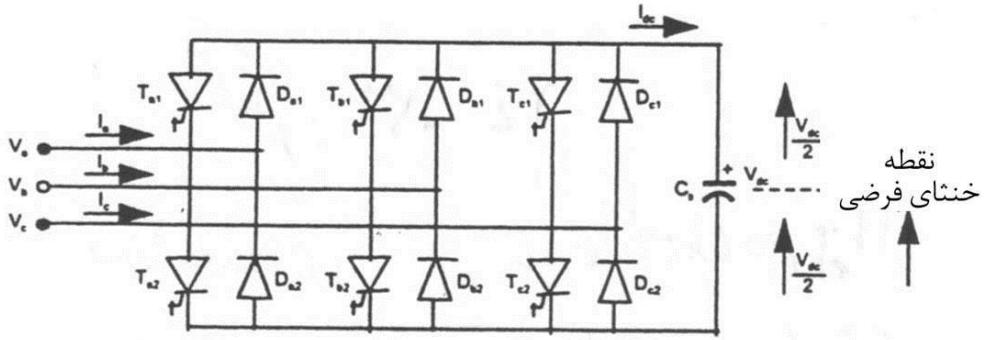


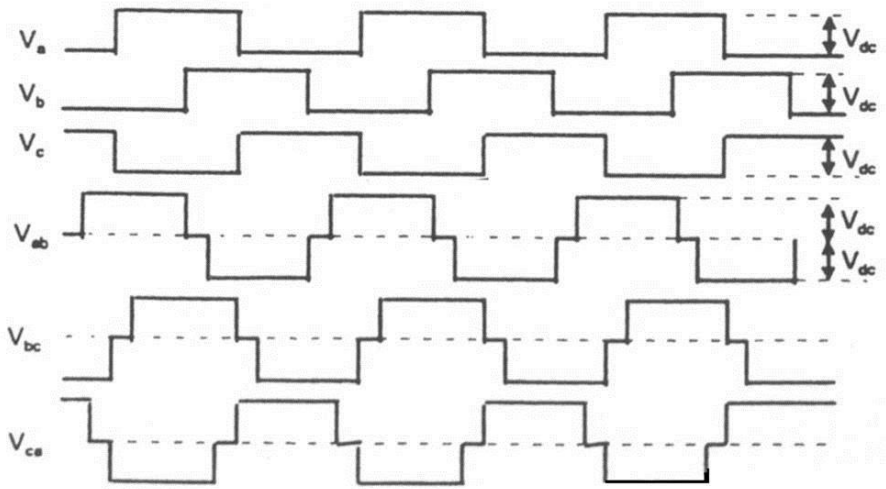
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ مبدل منبع ولتاژ بکار رفته در STATCOM

- مدار مبدل منبع ولتاژ ۳ فاز ۶ پالسی یا ۲ سطحی مطابق شکل زیر است، که در آن شکل‌موج ولتاژهای ۳ فاز نیز نشان داده شده است.





سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

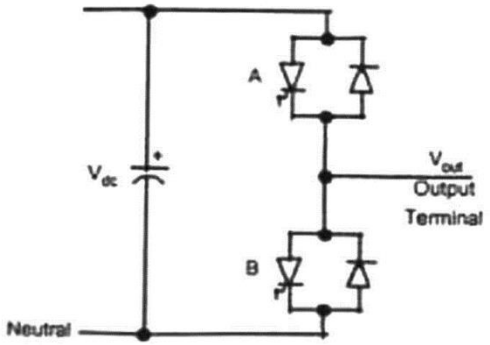
❖ راه‌کارهای کاهش هارمونیک در STATCOM

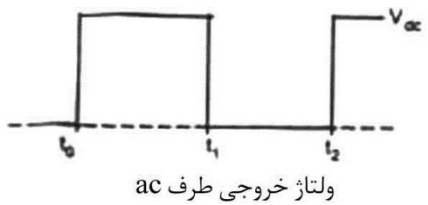
- روش های مختلفی برای کاهش هارمونیک ها وجود دارد که به شرح چند مورد آن می‌پردازیم.

۱. اتصال مثلث مبدل‌ها:

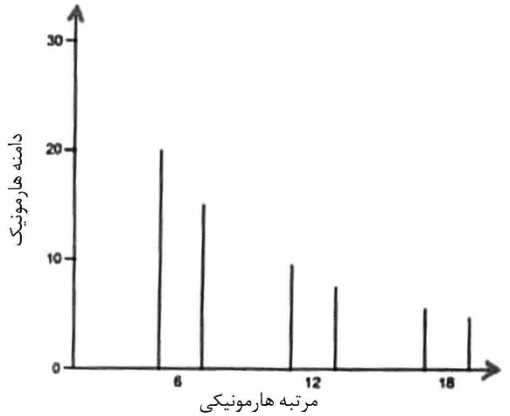
در مبدل دوسطحی، ولتاژ مربعی در خروجی ایجاد می‌شود که مؤلفه اصلی آن دارای دامنه $V_1 = \frac{4}{\pi}V_{dc}$ و هر هارمونیک آن دامنه $V_n = \frac{4}{n\pi}V_{dc}$ را دارد.

- ✓ با اتصال مثلث مبدل‌ها، هارمونیک‌های سه و ضریب سه حذف می‌شوند.
- ✓ اگر زوایای آتش اعمالی به مبدل‌ها متقارن باشند، هارمونیک‌های زوج نیز خود به خود از شکل موج خروجی حذف می‌شوند.
- ✓ طیف هارمونیکی حاصل مطابق شکل زیر است که در آن تنها هارمونیک‌های ۵ و ۷ و ۱۱ و ۱۳ و ۱۷ و ۱۹ و ... موجود می‌باشند.
- ✓ در این نمایش دامنه هارمونیک‌ها نسبت به مؤلفه اصلی سنجیده شده است و محور عمودی به ازای درصد می‌باشد.





ولتاژ خروجی طرف ac



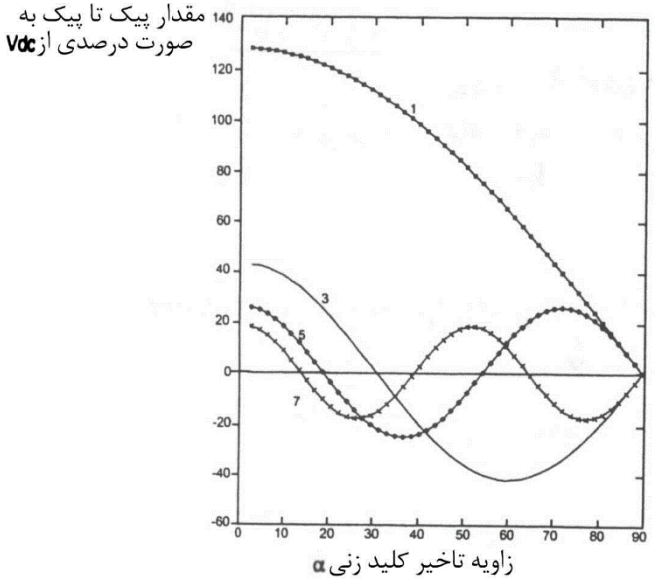
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ راه‌کارهای کاهش هارمونیک در STATCOM

۲. تغییر در تاخیر فاز سوئیچینگ:

در مبدل سه‌سطحی، چنانچه زاویه کلیدزنی قبل و بعد از قطع ولتاژ صفر را تعریف کنیم در اینصورت (Zero Voltage Crossing Point) مولفه ها عبارتند از: دامنه مؤلفه اصلی $V_1 = \frac{4}{\pi}\cos(\alpha)V_{dc}$ ، دامنه سایر هارمونیک‌ها: $V_n = \frac{4}{n\pi}\cos(n\alpha)V_{dc}$
بنابراین هر هارمونیک دلخواهی را می‌توان با انتخاب مناسب α صفر نمود. مثلا برای حذف هارمونیک سوم باید $\alpha = 30°$ قرار گیرد یا برای حذف هارمونیک پنجم باید $\alpha = 18°$ قرار گیرد. درشکل زیر تغییرات مولفه‌های هارمونیکی بر حسب زاویه نشان داده شده است.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

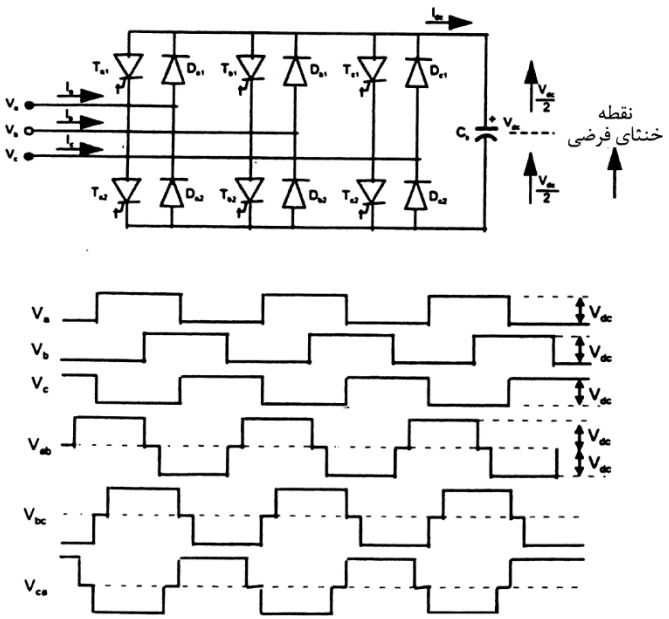
❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

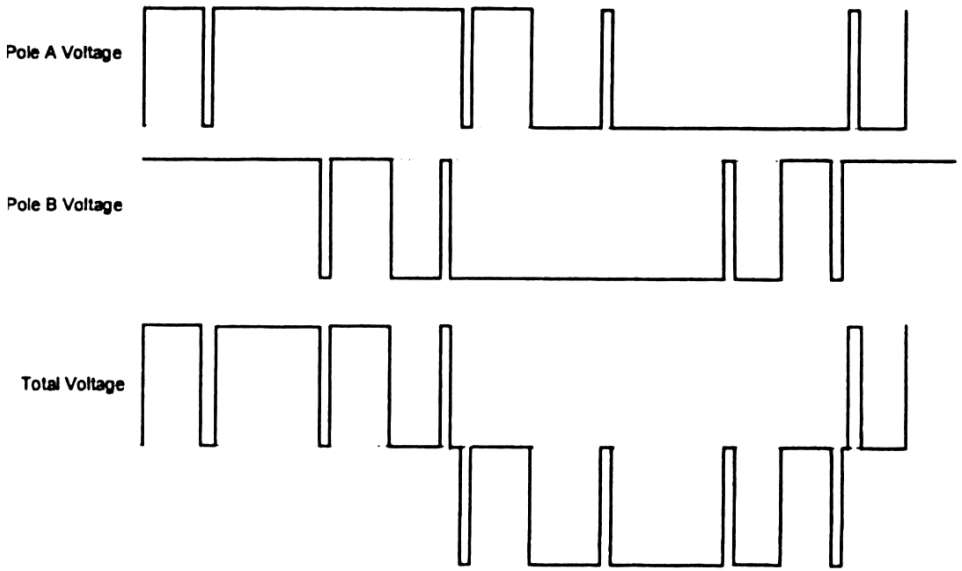
❖ راه‌کارهای کاهش هارمونیک در STATCOM

۳. مدولاسیون پهنای پالس (PWM):

این روش، روش مناسبی برای کنترل هارمونیک‌هاست. GTOها در این حالت به ترتیب در هر نیم سیکل روشن وخاموش شده و لحظات کلیدزنی پشت سر هم طوری انتخاب می‌شود که هدف مطلوب که حذف هارمونیک‌های مورد نظر است، تأمین گردد.

با پیاده‌سازی این روش روی مبدل ۳ فاز ۶ پالسی داریم:



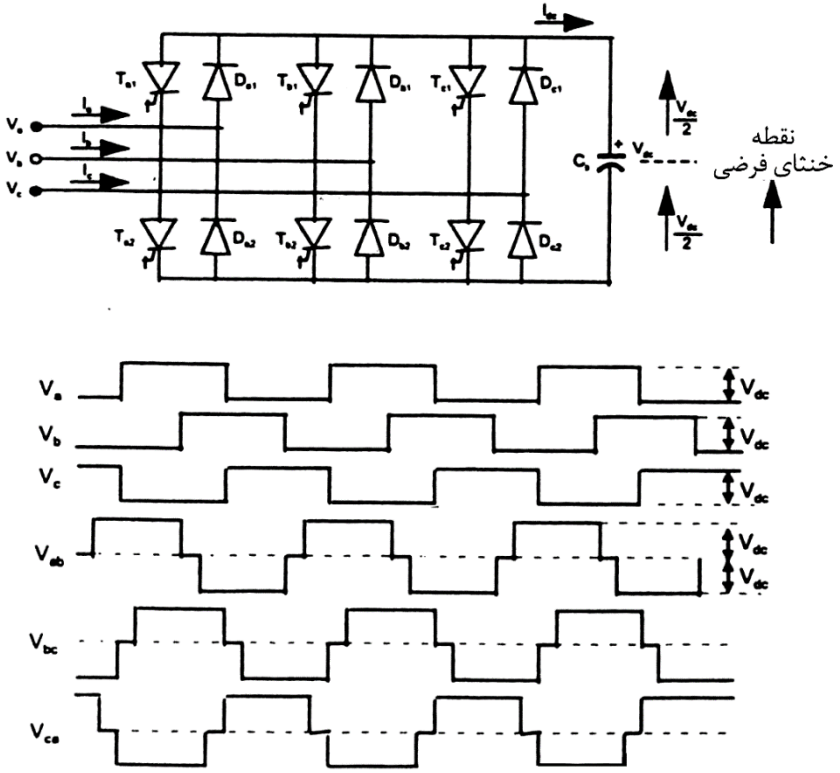


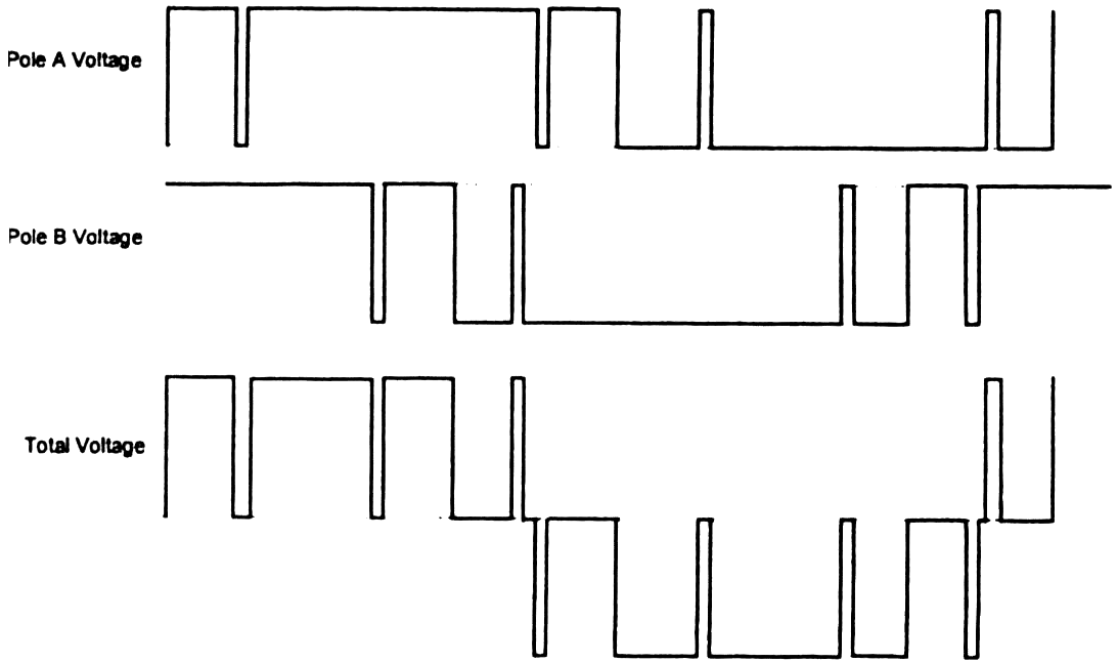
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ راه‌کارهای کاهش هارمونیک در STATCOM

- اشکال این روش (PWM) آن است که با افزایش تعداد کلیدزنی‌ها, هارمونیک اصلی نیز کاهش می‌یابد.
- علت نام‌گذاری این روش این است که در واقع با کلیدزنی GTOها مدت زمان تداوم پالس و یا به عبارتی پهنای پالس قابل تنظیم است.





روش PWM برای حذف هارمونیک های ۵ و ۷

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

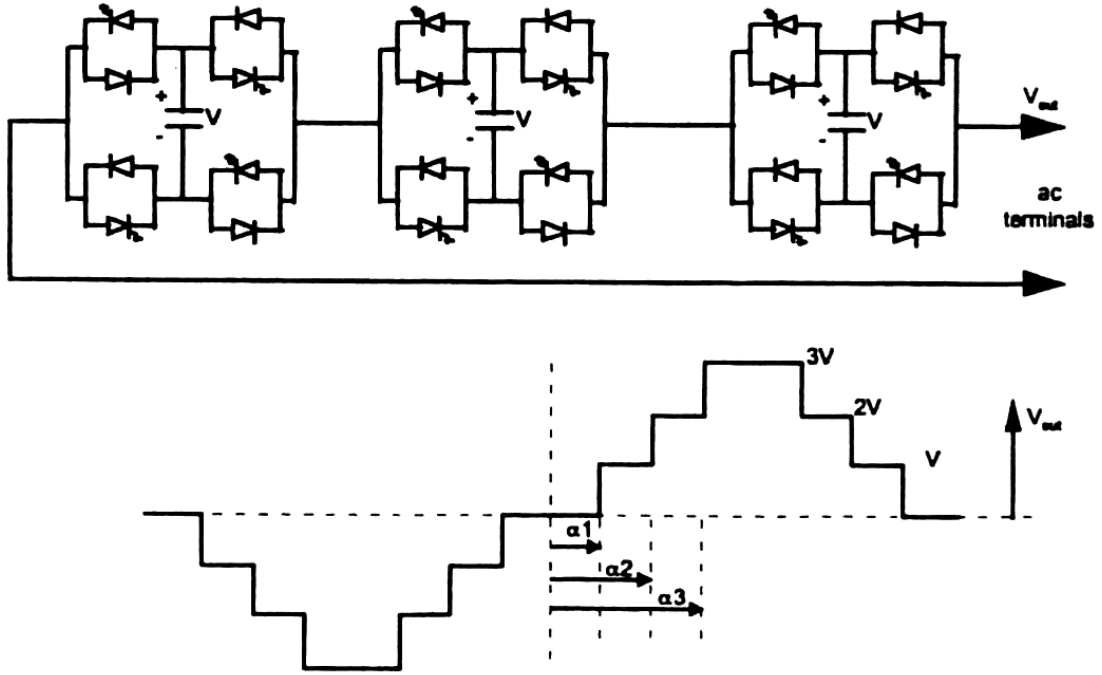
❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ راه‌کارهای کاهش هارمونیک در STATCOM

۴. ساختارهای چندسطحی

هر چه تعداد سطوح ولتاژ خروجی مبدل بیشتر شود (یعنی تعداد پالس‌ها افزایش یابد)، شکل‌موج منحنی خروجی ولتاژ به سینوسی نزدیک تر بوده هارمونیک ها کمتر می شوند.

قبلاً مبدل‌های سه سطحی (۴ پالسی) و پنج سطحی (۸ پالسی) نشان داده شد. در شکل زیر نیز یک مبدل ۱۲پالسی نشان داده شده است.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ تلفات STATCOM

شکل زیر نشان می دهد که با افزایش جریان به حالت های پیش فاز و پس فاز تلفات افزایش می یابد. بنابراین هرچه STATCOM بخواهد حالت خازنی بیشتر یا سلفی بیشتر برود تلفات آن افزایش می یابد.