# فصل دهم : انتقال به صورت جريان مستقيم فشار قوي

**استاد : دكتر رضوي**

**ارائه دهنده : مرتضي معتضديان**

**شماره دانشجويي : 872121010**

## انواع خطوط HVDC :

1. تك قطبي
2. دوقطبي
3. هم قطبي

## اجزا سيستم هاي انتقال HVDC :

**1.كنورتورها :** وظيفه تبديل جريان متناوب به جريان مستقيم وبالعكس را دارد.

**2.راكتور هموارساز :** اهداف استفاده :

الف) كاهش ولتا ژ و جريانهاي هارمونيك در خط جريان مستقيم

ب) جلوگيري ازنقص كموتاسيون در اينورتر

ج) جلوگيري از گسستگي جريان در بار كم

د) محدود كردن مقدار اوج جريان در يكسوساز طي اتصال كوتاه در خط جريان مستقيم

**3.فيلترهاي هارمونيك :** حذف يا كاهش هارمونيكهاي توليدي توسط كانورترها در هر دو طرف

4.**منابع توان راكتيو :** تامين توان راكتيو مورد نياز كنورتورها علي الخصوص در زمان حالت گذرا

**5.الكترودها :**استفاده از يك هادي با سطح بزرگ به عنوان هادي خنثي در زمين

**6. خطوط جريان مستقيم :** بجز در تعداد و فواصل مورد نياز هادي ها در ساير موارد مشابه خطوط جريان متناوب است.

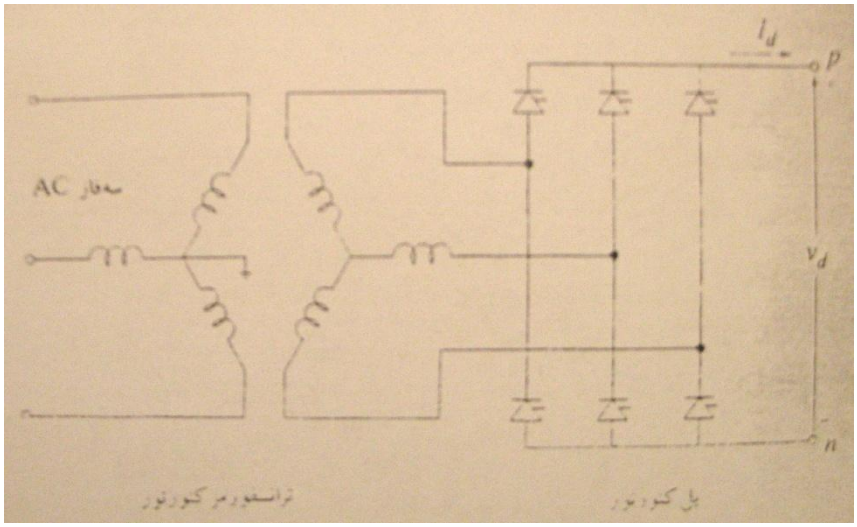
**7.كليدهاي جريان متناوب**

## معادلات عملكرد كنورتور :

**شيرها :** شيرهاي الكترونيكي عملكرد هدايت را در كنورتور به صورت كنترلي انجام ميدهند و با مواد مختلف بر حسب سطوح ولتاژ آنه خنك و عايق ميشوند مانند هوا ، آب ، روغن ،$SF_6$ و.....

**مدارهاي كنورتور :**

پل گراتز




معادلات کنورتورها:

ظرفیت ترانسفورمر $I^2_{TRMS}=$ $\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t).dt$

کونورتور

همانطور که میدانیم موج متناوب جریان خط از پالسهاي مستطيلي تشكيل شده است

$$I^2_{TRMS}= \frac{1}{\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} i^2(t).dt$$

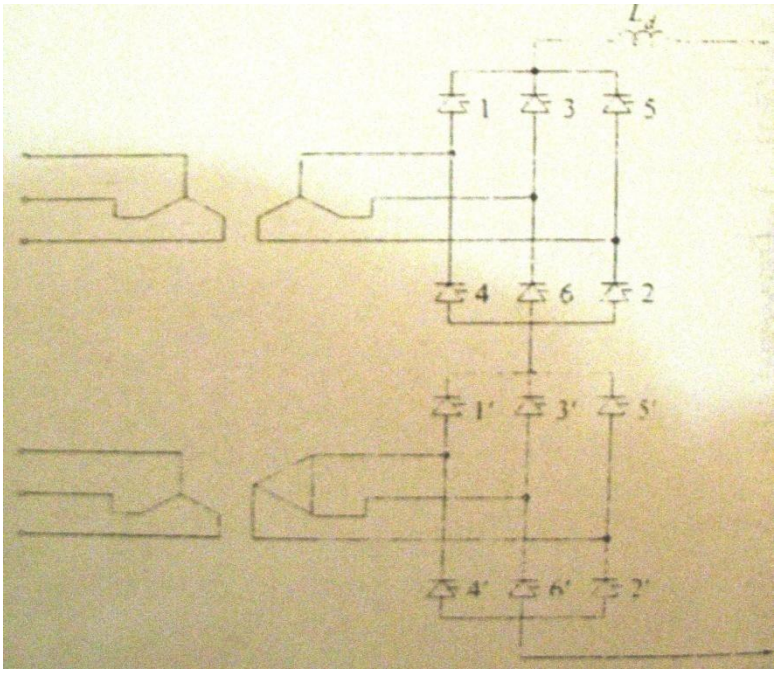
$$I^2_{TRMS}= \frac{1}{\pi}\int_{-\pi/3}^{\pi/3} i^2(t).dt = \frac{2}{3} I^2_d \longrightarrow I_{TRMS}=\sqrt{2/3}\, I_d$$

$$E_{LN}=\frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{d0}$$

ظرفیت ولت آمپر ترانسفورمر:

ظرفیت ترانسفورمر $=3E_{LN}I_{TRMS}=3\frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{d0}\sqrt{2/3}\, I_d = \frac{\pi}{3} V_{d0} I_d$

کنورتور چند پله : به منظور كسب يك ولتاژمستقيم قوي مي توان به مقدار لازم دو يا چند پل را به طور سري به هم متصل كرد




روابط بين كميتهاي جريان متناوب و جريان مستقيم در حالت چند پله :

B:تعداد پله سري $V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505\ BTE_{LL}$

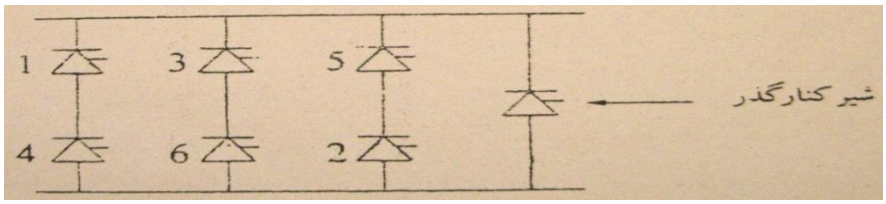
T: نسبت تبديل ترانسفورمر $V_d = V_{d0} \cos\alpha - I_d B(\frac{3}{\pi} X_C)$

كه( $I_d B(\frac{3}{\pi} X_C$ افت ولتاژ هر پل است $I_L \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} BTI_d = 0.78\ BTI_d$

عملكرد غيرعادي :

حالت معكوس هدايتي (آتش بي موقع):زماني رخ ميدهد كه ولتاژ معكوسي دوسر شير وجود داشته باشد. عواملي كه مي تواند رخداد آن را افزايش دهند عبارتند از : ولتاژ معكوس اوج زياد اضافه جريان،آهنگ شديد تغيير جريان در انتهاي هدايت ، متراكم شدن بخار جيوه بر روي آندها و آهنگ شديد افزايش ولتاژ معكوس. تاثير معكوس هدايتي آن است كه اتصالي كوتاهي را در دوسر دوفاز ثانويه ترانسفورمر كنورتور اعمال مي كند.

براي حذف حالت معكوس هدايتي جريان اتصالي به يك شير كنارگذر منحرف ميشود. شير كنارگذر معمولا"قفل است وزماني كه قرار باشد پلي كنار گذاشته شود شير كنارگذر از حالت قفل خارج ميشود. البته اين حالت در شيرهاي تريستوري اتفاق نمي افتد.

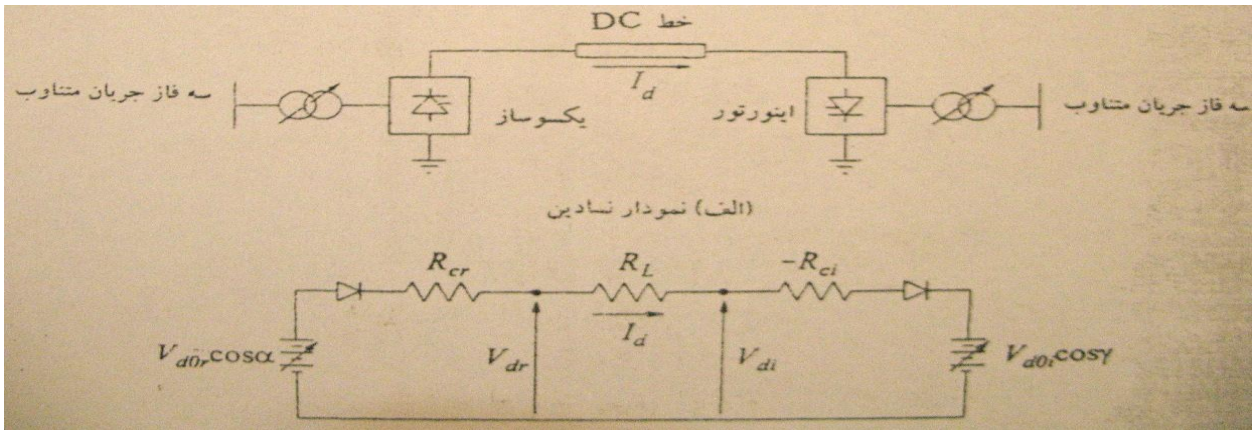



نقص كموتاسيون : عدم توانايي در تكميل كموتاسيون قبل از اينكه ولتاژكموتاسيون معكوس شود(با حاشيه كافي براي ديونيزه شدن) موسو به نقص كموتاسيون است. اين نقص به علت بد عمل كردن شير نيست بلكه به علت وضع مدار خارج از شير است. يكسوسازي فقط زماني دچار نقص كموتاسيون ميشود كه مدار آتش آن با اشكال مواجه گردد.

## كنترل سيستمهاي جريان مستقيم فشار قوي(HVDC) :

**اصول اساسي :**

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_{cr} + R_L + R_{ci}}$$




براي كنترل مي توان بر روي ولتاژهاي داخلي $V_{dor}\cos\alpha$ و $V_{doi}\cos\gamma$ مانور داد. اين كار به وسيله دريچه زاويه روشن شدن شير يا كنترل ولتاژ جريان متناوب از طريق تپ ترانسفورمر انجام گيرد.

مباني انتخاب كنترلها:

1.جلوگيري از تغييرات شديد در جريان مستقيم ناشي از تغييرات ولتاژ جريان متناوب سيستم

2.حفظ ولتاژ مستقيم در نزديكي مقدار نامي

3.حفظ ضريب توان در انتهاي خطوط فرستنده و گيرنده تاحد ممكن در مقاديربالا

4.جلوگيري از نقص كموتاسيون در اينورتورها وحالت معكوس هدايتي در يكسوسازهايي كه از شيرهاي قوس جيوه اي استفاده ميكنند.

به علت آنكه مقاومت خط و كنورتور كوچك هستند بنابراين تغييرات كوچك در $V_{dor}$ و $V_{doi}$ باعث تغييرات بزرگي در $I_d$ ميشود بنابراين اگر $\alpha$ و $\gamma$ ثابت نگهداشته شوند جريان مستقيم مي تواند در مقابل تغييرات كوچك در دامنه ولتاژ متناوب هر طرف در محدوده وسيعي تغيير نمايد.

دلايلي چند براي مقادير بالاي ضريب توان :

الف) حفظ توان نامي كنورتور تا حد ممكن در مقادير بالا براي ظرفيتهاي مشخص ولتاژ و جريان ترانسفورمر و شير

ب) كاهش تنش در شيرها

ج) حداقل سازي تلفات و ظرفيت جريان تجهيزات در سيستم جريان متناوبي كه كنورتور به آن متصل است.

د) حداقل سازي افت ولتاژ در پايانه هاي جريان متناوب درمقابل افزايش بار

ه) حداقل سازي هزينه تامين توان راكتيو كنورتورها

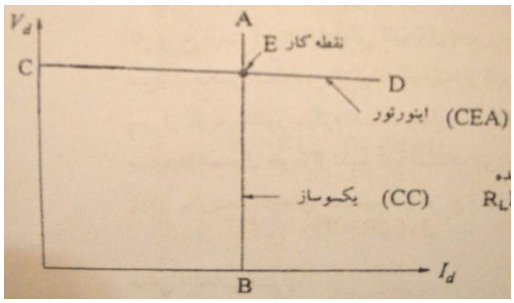
$$\cos \Phi \approx 0.5($$

$$\cos \Phi \approx 0.5($$

بنابراين براي كسب ضريب توان بالا بايد $\alpha$ براي يكسوساز و $\gamma$ براي اينورتور تا حد ممكن پايين نگهداشته شود.

مسئوليت هاي تنظيم ولتاژو جريان ، تفكيك وبه پايانه هاي جداگانه واگذار شده است. در حالت عادي كار CEA را حفظ ميكند و اينورتور با كار با زاويه خاموش شدن ثابت ((CC)) يكسوساز ، جريان ثابت

حاشيه كموتاسيون كافي را حفظ ميكند.مشخصه هاي يكسوساز و اينورتور هردو در حالت يكسوسازي اندازه گيري سده است.از اين رو مشخصه اينورتور ، افت ولتاژ دوسر خط را شامل ميشود.



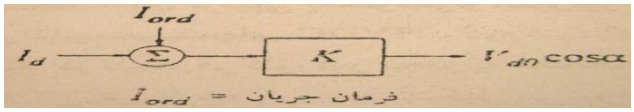

$$V_{\mathrm{d}} = \mathrm{V}_{\mathrm{doi}} \cos\gamma + (R_L + R_{ci})I_d$$

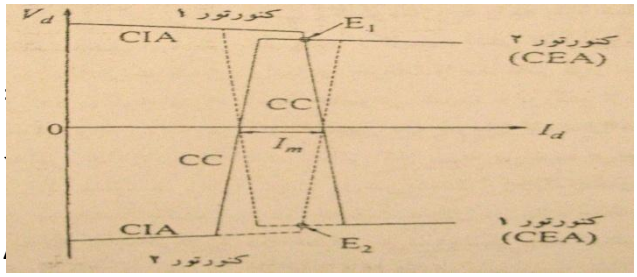
اين رابطه مشخصه اينورتور را با حفظ $\gamma$ در يك مقدار ثابت نشان ميدهد.مشخصه يكسوساز مي تواند با تنظيم فرمان جريان به طور افقي جابجا شود. اگر جريان اندازه گيري شده كمتر از مقدار فرمان باشد تنظيم كننده با كاهش $\alpha$ آتش را جلو مياندازد.

به كمك تغيير دهنده تپ ترانسفورمر مي توان مشخصه اينورتور را به سمت بالا يا پايين حركت داد.

در عمل بسته به تنظيم كننده جريان ممكن است مشخصه جريان ثابت عمودي نباشد در اين صورت با يك كنترل كننده تناسبي اين مشخصه به علت بهره محدود تنظيم كننده جريان همچنانكه نشان داده خواهد شد ورودي شيب منفي بالايي خواهد شد، بهره تنظيم كننده k داريم.

$$V_{do}\cos\alpha = k(I_{ord} - I_d)$$

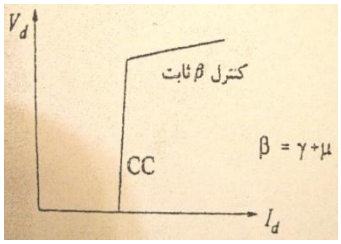



در ولتاژ عادي مشخصه كامل يكسو ساز با $F_{AB}$ تعريف مي شود. در ولتاژ كاهش يافته، اين مشخصه به صورت $F'_{A'B'}$ در مي آيد. به منظور اجتناب صفر شدن جريان و توان يكسوساز اينورتر به يك كنترل كننده جريان نيز مجهز مي شود كه در مقداري كمتر از نقطه تنظيم جريان يكسوساز تنظيم مي گردد. مشخصه كامل اينورتر با DGH نشان داده شده است كه از دو پاره خط يكي زژش و ديگري جريان ثابت تشكيل شده است. اختلاف بين فرمان جريان يكسوساز و فرمان جريان اينورتور موسوم به حاشيه جريان است كه در شكل با $I_m$ نشان داده شده است.

مشخصه هاي تركيبي يكسوساز و اينورتور

**مدلهاي ديگر كنترلي:**




كنترل بتا ($\beta$)

كنترل تغيير دهنده تپ: براي حفظ زواياي آتش كنورتور در بازه مطلوب زماني كه $\alpha$ (براي يكسوساز) يا $\gamma$ (براي اينورتر) از اين بازه بيش از چند ثانيه تجاوز كند از كنترل تغيير دهنده تپ استفاده مي شود.

**حدود جريان:**

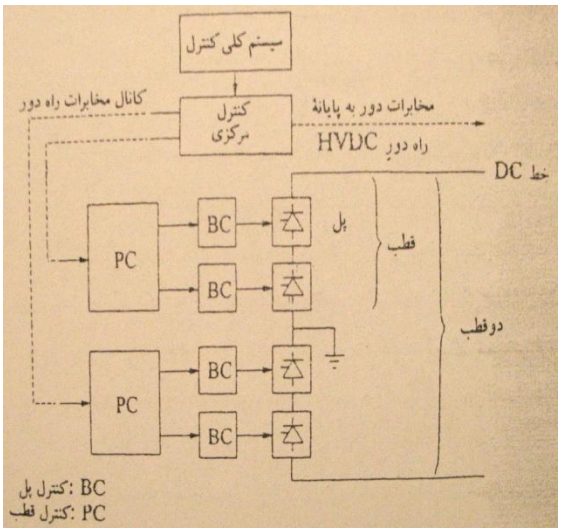
حد بالاي جريان:معمولا جريان كوتاه مدت حداكثر محدوده 1.2 تا 1.3 جريان عادي بار كامل است تا از آسيب حرارتي شيشه ها جلوگيري شود.

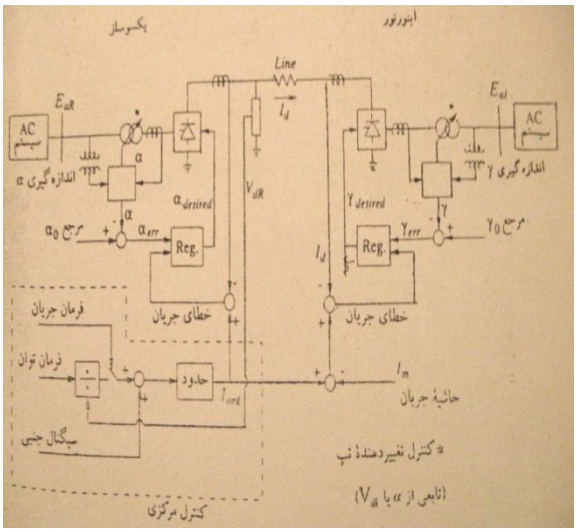
حد پايين جريان: در مقادير كم جريان ممكن است نوسانهاي كوچك موجود باعث عدم پيوستگي يا متناوب شدن آن شود. در اين صورت در يك حالت دوازده پالسي، جريان 12 بار در هر سيكل قطع مي شود

الف و ب)

حد پايين زاويه آتش: مي توان انتقال توان از يك خط جريان مستقيم را با تغيير فرمان جريان و حاشيه جريان كنترل كرد.

## پياده سازي كنترل:

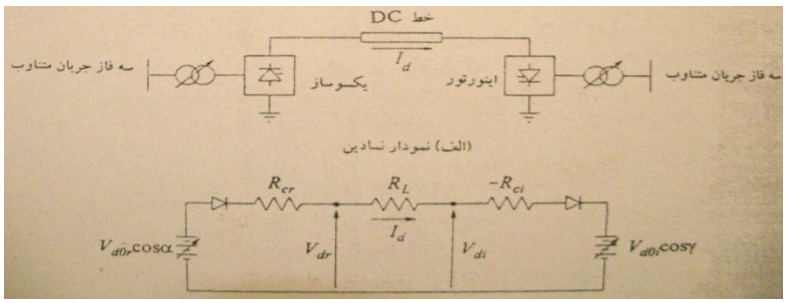



**سيستمهاي كنترل آتش كنورتور:**

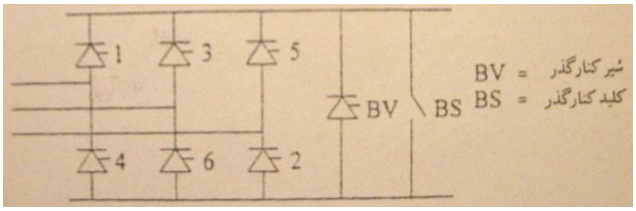
كنترل منفرد فاز (IPC) :روشي بسيار قديمي است.

كنترل همه فاصله پالس ( EPC) : در اين سيم ها در مراحلي با زمان مساوي، روشن مي شوند و زواياي روشن شدن تمام شيرها به طور مساوي عقب يا جلو انداخته مي شود به نحوي كه مد مطلوب كنترلي بدست آيد. در اين حالت فقط هماهنگ سازي غير مستقيم به ولتاژ سيستم جريان متناوب مطرح است.



بستن و كنار گذاشتن شير

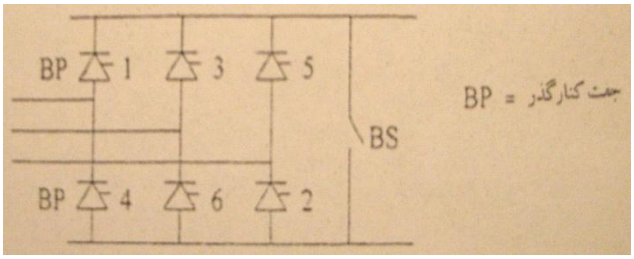
بستن شيرها از طريق قطع پالسهاي مثبت به دريچه تمام مسيرهاي يك پل عملي مي شود به علت ايجاد جرقه در هنگام بستن در نتيجه هدايت جريان متناوب بر روي خط مستقيم، لازم است زماني كه شيرها بسته هستند، پل كنار گذاشته شود.




جريان شيرها به شير كنار گذر تغيير جهات داده مي شود و به دنبال آل كليد كنار گذر بسته مي شود.

عمل جفتي كنار گذار

در كنورتورهايي كه از ترسيتور استفاده مي كنند استفاده از شير كنار گذر جداگانه به از هر پل منسوخ شده است.




## راه اندازي، توقف و معكوس كردن جهت انتقال توان

### ترتيب عادي راه اندازي

1. ممكن است اول اينورتر يا يكسو ساز راه اندازي شود. كنورتوري كه اول راه اندازي مي شود، آتش و شير هدايت را برقرار مي سازد.
2. به دنبال يك تاخير ارتباط مخابراتي، كنورتور ديگر آتش را برقرا مي كند جريان راه اندازي 0.2 تا 0.3 در مبناي واحد است.
3. بعد از اينكه راه اندازي به طور موفق اجرا شد ولتاژها بر طبق آهنگ تعديل يافته روي زاويه آتش افزايش مي يابند.
4. زماني كه جريان برقرار شد و توانست توسط يكسوساز حفظ شد، اينورتر به مد كنترلي زاويه زاويه ولتاژ و يا حاشيه مي رود.

### ترتيب عادي متوقف سازي

1) جريان و ولتاژ طي 100 تا 300 ميلي ثانيه كاهش داده مي شود. سپس يكسوساز در يا نزديك به محدود اينورتر عمل مي كند كه باعث خارج شدن تمام انرژي از سيستم مي گردد.
2) كليدهاي كنارگذر در صورت وجود بسته مي شوند

معكوس كردن جهت انتقال توان:

1. كاهش جريان به 0.1 تا 0.2 در مبناي واحد به صورت پايه اي يا موج دندان اره اي
2. كاهش يا افزايش ولتاژ از طريق تابع دندان اره اي يا نمايي و سپس يك جريان دندان اره اي به منظور رسيد به سطح مطلوب

اثر قدرت سيستم جريان متناوب بر تاثير متقابل بين سيستم جريان متناوب و جريان سيستم

نسبت اتصال كوتاه:

يت اتصال كوتاهمگاولت آمپر اتصال كوتاه مربوط به سيستم جريان متناوب

$$SCMVA = \frac{E_{oc}^2}{Z_{ch}}$$

$E_{oc}$: ولتاژ شين كموتاسيون

$Z_{ch}$ :امپدانس تونن معادل

در بررسي قدرت سيستم جريان مستقيم عامل موثر نسبت اتصال كوتاه (ESCR) است.

## توان راكتيو وقدرت سيستم جريان متناوب

بنابراين هر كنورتور توان راكتيوي را مصرف م ي كند كه با افزايش توان، افزايش مي يابد. براي جلوگيري از عبور توان راكتيو از خطوط اين توان راكتيو مورد نياز بايد در محل تامين شود.

مسائل مربوط به سيستمهاي با ESCR كم

1. اضافه ولتاژهاي قوي ديناميكي
2. ناپايداري ولتاژ
3. تشدشد هارمونيكي
4. چشمكزني غير معمول ولتاژ

**ثابت لختي**

براي عملكرد مطلوب بايد سيستم جريان متناوب داراي ميزان حداقلي از لختي نسبت به اندازه خطوط جريان مستقيم باشد. به منظور دستيابي به حداقل لختي موثر حدود 0.2 تا 0.3 ثانيه نياز است.

خشي كل سيستم جريان متناوب (مگا ولت ثانيه)ظرفيت مگا وات خط جريان مستقيم

كموتاسيون اجباري:

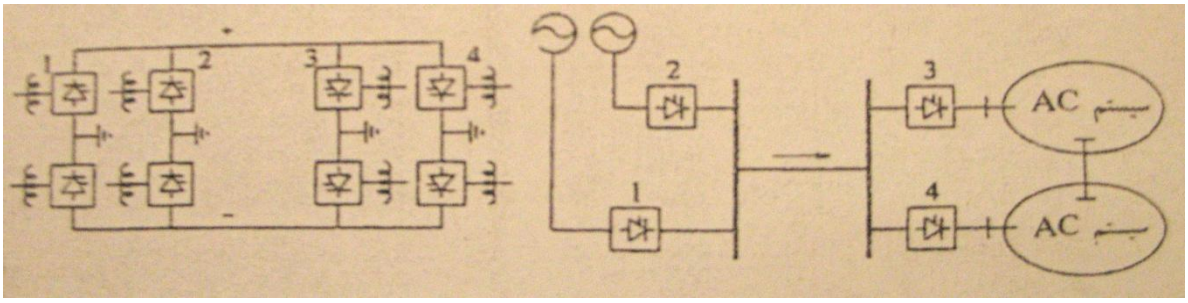
اين نوع كموتاسيون زياد مرسوم نيست و از كموتاسيون طبيعي بيشتر استفاده م يشود.

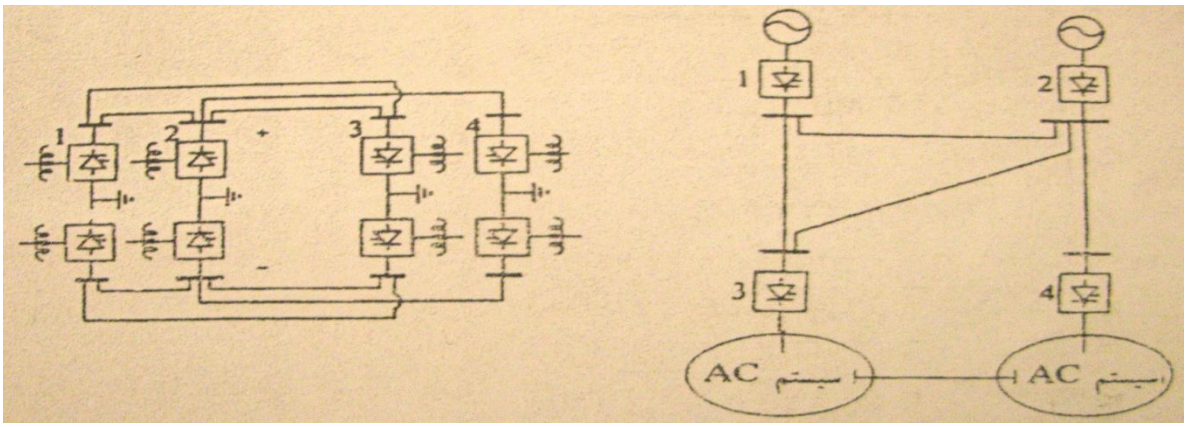
## سيستمهاي چند پايانه اي HVDC

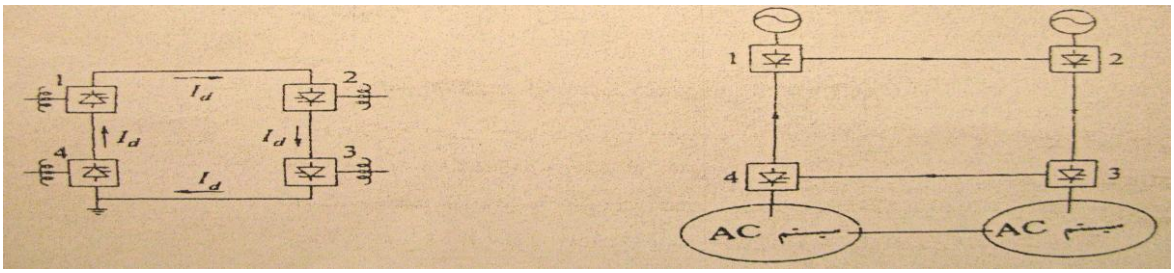
**ساختارهاي شبكه MTDC** :

طرح موازي ولتاژ ثابت

طرح سري جريان ثابت



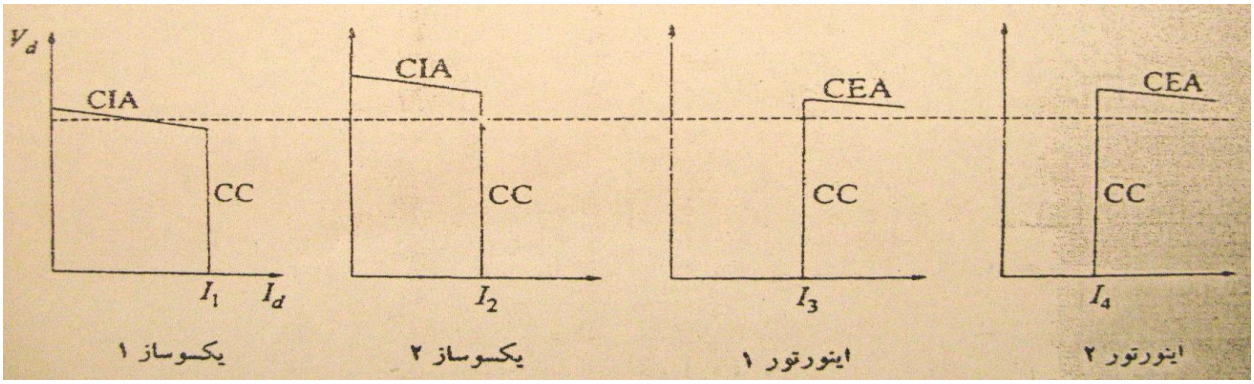






**كنترل سيستمهاي MTDC :**

سيستمهاي اتصال موازي:

در سيستم اتصال موازي يكي از پايانه ها، ولتاژ كار سيستم جريان مستقيم را فراهم نموده، تمام پايانه هاي ديگر به صورت كنترل جريان ثابت ( CC) كار مي كنند. پايانه تنظيم ولتاژ پايانه اي است كه داراري كمترين ولتاژ سقف است و ممكن است يكسو سازي با كنترل CIA يا اينورتوري با كنترل CEA باشد.

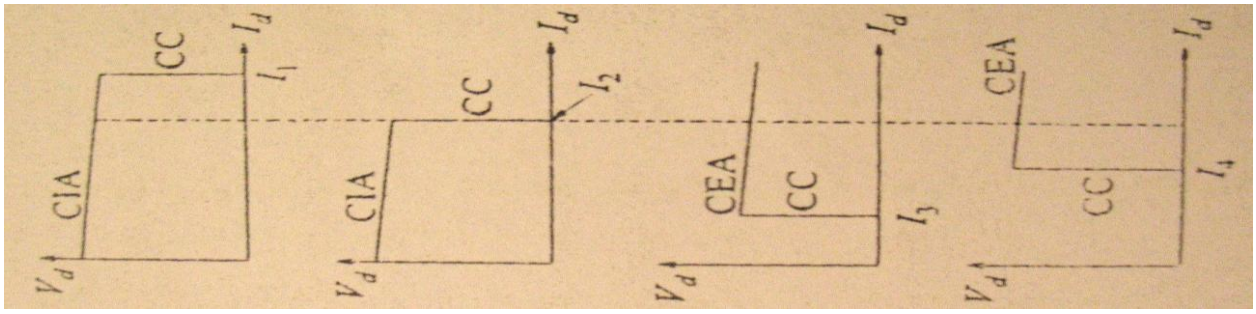



اشكالات اساسي سيستمهاي موازي MTDC عبارتند از

1. هر اغتشاشي بر روي سيستم جريان مستقيم ( خطاي خط يا نقص كموتاسيون) بر تمامي سيستم جريان مستقيم تاثير مي گذارد.
2. لازمه معكوس كردن توان در هر پايانه استفاده از عمل كليد زني مكانيكي است.
3. بستن(متوقف كردن) يك پل تنها در پست كنورتوري كه شامل دو يا مقدار بيشتري پل اتصال سري است نيازمند آن است كه كل سيستم در ولتاژ كاهش يافته كار كند يا پست تحت تاثير جدا گردد.
4. نقص كموتاسيون در يك اينورتر مي تواند جريان از ساي پايانه ها بكشد كه خود ممكن است بر اصلاح وضعيت تاثير بگذارد.

سيستمهاي اتصال سري

در سيستمهاي اتصال سري جريان توسط يك پايانه كنترل مي شود و پايانه هاي ديگر يا در كنترل زاويه ثابت($\alpha$ يا $\gamma$) كار مي كنند يا ولتاژ را تنظيم مي كنند.




اشكالات اساسي سيستمهاي سري MTDC عبارتند از:

1) از آنجا كه ولتاژ به زمين در بخشهاي گوناگون سيستم، متفاوت است هماهنگ سازي عايقي پيچيده و گران است. در بخشهاي ولتاژ كمتر، تلفات بيشتر است.
2) خطاي دائم خط باعث قطع كل سيستم مي شود.
3) قابليت انعطاف به منظور بسط در آينده محدود است.

مدلسازي سيستمهاي HVDC :

نمايش سيستمهاي جريان مستقيم نيازمند ملاحظات زير است:

1. مدل كنورتور
2. مدل خط و يا شبكه جريان مستقيم
3. واسط بين سيستمهاي جريان متناوب و جريان مستقيم
4. مدل كنترلهاي سيستم جريان مستقيم

نمايش براي حل پخش بار:

مدل كنورتور به صورت زير خلاصه مي شود:

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \mathrm{B}$$

$$\mathrm{V_d} = \mathrm{V_{do}} \cos$$

$$\mathrm{V_d} = \mathrm{V_{do}} \cos$$

$$d = \cos^{-1}\left(\frac{}{}\right.$$

$$p = V_d I_d =$$

$$Q = P \tan \varphi$$

$E_{oc}$ : ولتاژ خط به خط موثر برشين فشار قوي

T : نسبت تبديل ترانس

B: تعداد پلها به صورت سري

$X_e$ راکتانس کموتاسيون به ازاي هر پل

متغيرهاي وابسته و منتقل در حل معادلات جريان مستقيم به مدهاي کنترلي اينورتور و يکسوساز بستگي دارد. سه مد کاري به صورت زير است:

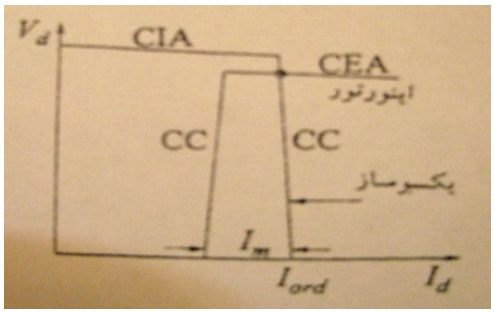
مد1: يکسوساز مد حالت کنترل CC و اينورتور مد حالت کنترل CEA

مد 2: يکسوساز مد حالت کنترل CEA و اينورتور مد حالت کنترل CC

مد 3: يکسوساز مد حالت کنترل CEA و اينورتور در حالت مشخصه اصلاح شود.

1. مد 1:

- زاويه آتش اينورتور به منظور تامين $\gamma = \gamma_{min}$ منظم مي شود.
- زاويه آتش يکسوساز به منظور تامين $I_d = I_{ord}$ تنظيم مي شود.
- تپ ترانسفورمر يکسوساز به منظور تامين $\alpha$ در بازه مطلوب تنظيم مي شود.
- تپ ترانسفورمر اينورتور به منظور تامين ولتاژ مطلوب تنظيم مي شود.



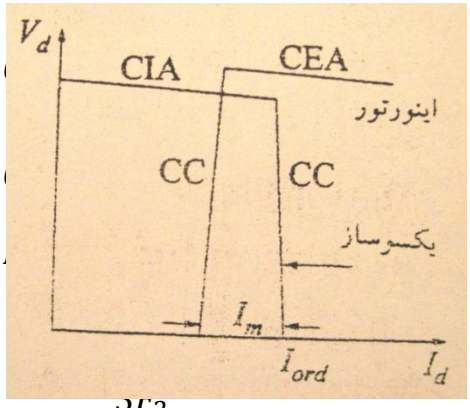
2. مد 2:

- زاويه آتش يكسوساز $\alpha = \alpha_{min}$ است.
- زاويه آتش اينورتور به منظور تامين $I_{\mathrm{d}} = \mathrm{I}_{\mathrm{ord}} - \mathrm{I}_{\mathrm{m}}$ تنظيم مي شود.
- تپ ترانسفورمر يكسوساز به منظور حداكثر سازي ولتاژ جريان مستقيم تنظيم مي شود.
- تپ ترانسفورمر اينورتور به نحوي تنظيم مي شود كه $\gamma_{\mathrm{min}}$ و $\gamma$ بوده، مصرف توان راكتيو موافق شود.

معادلات يكسوساز به صورت زير است

$$V_{\text{dor}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$$

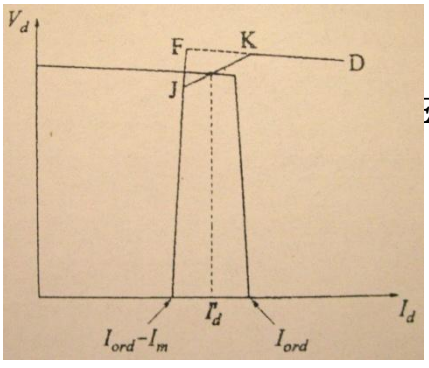
$$V_{dr} = V_{dor}\cos\alpha_{min} - \frac{3}{\pi}X_{cr}(I_{ord} - I_m)B_r$$




$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}E_{oci}B_iT_i$$

3. مد 3:

- زاویه تاخیر روشن شدن یکسوساز مساوي $\alpha_{min}$ است
- زاویه پیش روشن شدن اینورتور مساوي $\beta_{min}$ است
- $I_d = I'_d$ به گونه اي که $I_{ord} > I'_d > (I_{ord} - I_m)$ باشد.




$E_{ocr}$

$= \frac{1}{R}$

از روش زير براي تعيين مدهاي كاري و حل معادلات جريان متناوب و جريان مستقيم استفاده كرد:

1) معادلات جريان متناوب را حل كنيد و خروجيها $E_{ocr}$ و $E_{oci}$ هستند.
2) الف. معادلات جريان مستقيم مولد را حل كنيد اگر $\alpha \rangle \alpha_{min}$ باشد. شرط مد 1 ارضا شده است به گام سوم برويد.

ب.اگر $\alpha \leq \alpha_{min}$ باشد معادلات جريان مستقيم مد 2 را حل كنيد. اگر $\gamma_{min}$ و $\gamma$ باشد شرط مد 2 ارضا شده است به گام سوم برويد.

ج. اگر $\gamma \leq \gamma_{min}$ باشد معادلات مد 3 را حل كنيد.

3) $P_i$ ، $Q_i$، $P_r$ و $Q_r$ را محاسبه کنید اگر عدم تطابق بزرگتر از تلرانس باشد به گام اول برگردید و معادلات جریان متناوب را حل کنید.

4) اگر عدم تطابق کمترر از تلرانس باشد، حل تمام است.