سیستم های قدرت

انعطاف پذیر (FACTS)

دکتر توکلی بینا

PowerEn.ir

PowerEn.ir

بسمه الله

سیستم‌های قدرت انعطاف پذیری

جلسه‌ی اول ۹۴/۱۱/۲۳

1. Definitions of flexible system ; a classification scheme for flexible system.

* General description on various controllers.
* Converters and energy storages.
* Multilevel converters for high-power high-voltage structures.
* Switching modulation.

2. Basic Controllers (STATCOM, UPFC)

* Harmonic analysis and frequency response
* dq-modeling of statcom (static composeter)

POWEREN.IR

Subject
Date
POWEREN.IR
PowerEn.ir

* Control of statcom using dq-mode
* Design of statcom
* Typical applications

3. Instantaneous modeling of statcom (time-domain)

* Modeling background on averaging technique.
* Dc-averaging and Ac-averaging.
* Control of statcom using averaging technique.

References:

- Flexible AC transmission systems, IET.
- Understanding FACTS, Concepts and technology of FACTS, IEEE.

IEEE definitions

1. Flexibility of power electric transmission

The ability to accomodate change in electric transmission

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

systems or operating conditions while maintaining sufficient steady state and transient margins.

توانایی برای مجاز به تغییرات سیستم، باعث می‌شود بتوانیم آن تغییرات را بهتر مدیریت کنیم و در نهایت سیستم را از آن محدوده فراتر نرود.

2. FACTS (Flexible AC Transmission systems)

AC transmission systems incorporating power electronics based and other static controllers to enhance controllability and increase power transfer capability.

3. FACTS Controllers

A power electronics-based system or other static equipment to provide control of one or more AC transmission parameters.

حوزه عملکرد از خطوط انتقال به توزیع، حتی تولید... تغییر در هم باعث نوسان power sys. می‌شود.

transmission در تعاریف فوق.

POWEREN.IR

Subject
Date
POWEREN.IR
PowerEn.ir

Controllers → Shunt
Series
Combined

Shunt Controllers

POWEREN.IR

- ✓ BESS : Battery energy storage system
- ✓ SSC : Static Synchronous Compensator.
- SSG : " " Generator.
- SVC : " VAR Compensator.
- SVG : " " Generator/Absorber.
- ✓ SMES : Super conducting magnetic energy storage.
- TCBR : Thyristor-Controlled braking resistor.
- TCR : " " reactor.
- TSC : " switched-capacitor.
- TSR : " " -reactor.

POWEREN.IR
P4PCO

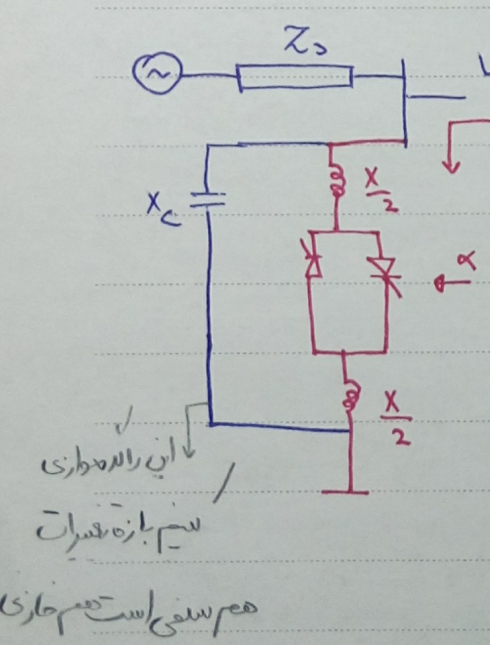
PowerEn.ir

- SVS : Static VAR systems.
- VCS : Var Compensating systems.

✓ : با GTO کنترل می‌شوند و در توان پایین mosfet . خروجی با اعوجاج است.

○ : سوئیچ‌های تریستوری دارند. کنترل پذیری بالایی ندارند، فقط در بخش AC کار می‌کنند.

TCR



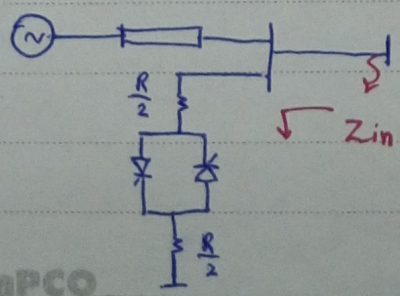
با تغییر زاویه آتش، مقدار توان راکتیو کنترل می‌شود

(مقدار x را تغییر می‌دهیم)

TCR → SVC با اضافه کردن خازن

این را لامصبا می‌خوان هم بازه تغییرات هم سنگی است هم خازی

TCBR



قبل از خاموشی است. هنگام وقوع خطا R در مقابل ترانزیستور ظاهر می‌شود

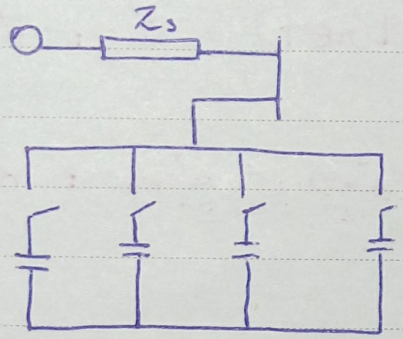
بخش قابل توجهی از بار را حذف می‌کند Pm - Pe ↓ کم افزایش یافت

POWEREN.IR
PdPCO

PowerEn.ir

ژنراتور دور برمیدارد، می‌توانیم بار مصنوعی بگذاریم تا ژنراتور دور شدید برندارد.

TSC



مثل بانک خازنی

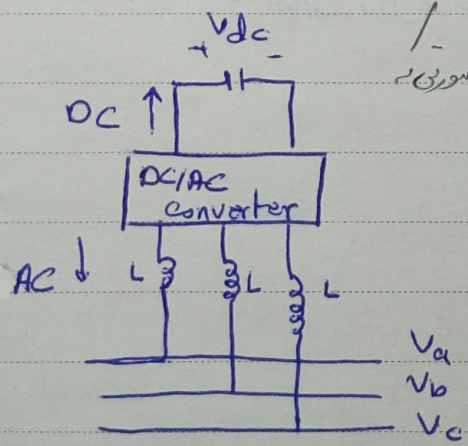
switch ها نیستیم همیشه روشن و خاموش شدن دارند، نیاز به کنترل پذیری

جبرانی ندارند

مهم‌ترین مشکل کنترل‌شده‌های تریستوری، حجم و وزن بالای آن‌هاست. در کنترل‌های تریستوری ما ترانس‌ها

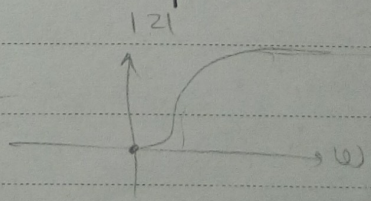
توسعه پایین تولید می‌شود ← نیاز به فیلتر.

SSC (STATCom : STATIC Compensator)



انعطاف‌پذیری به این نرم‌افزار قابل اجراست. در TCR انعطاف‌پذیری به صورتی نیست

ما می‌خواهیم نیست باید صبر کنیم جریان صفر شود تا تریستور خاموش شود.

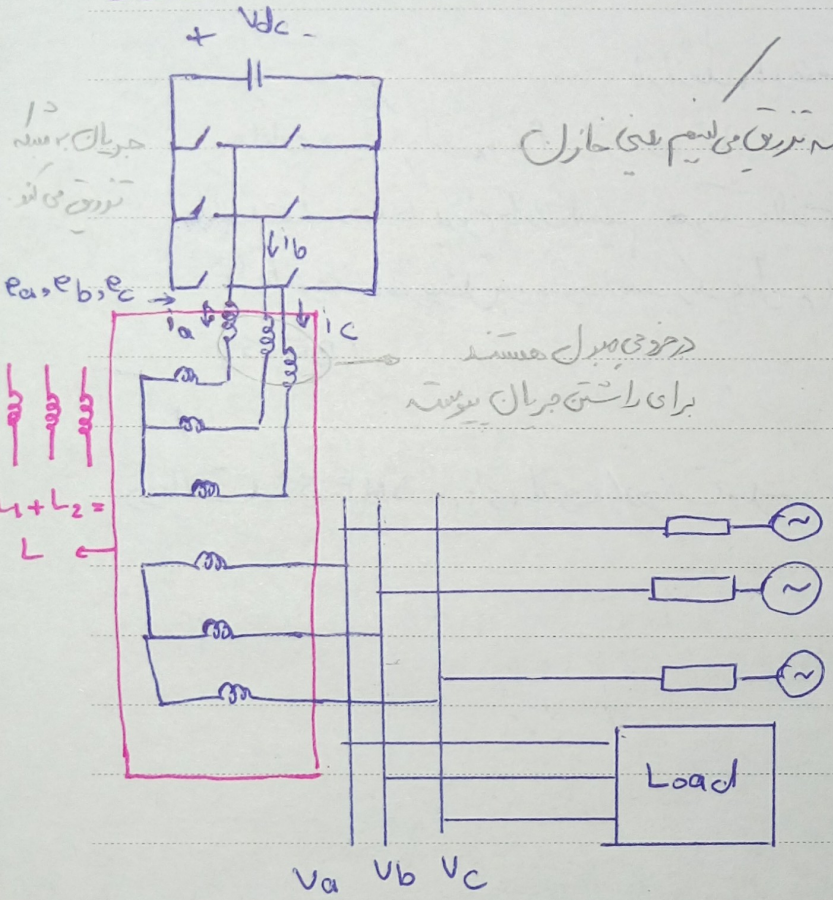


POWEREN.IR

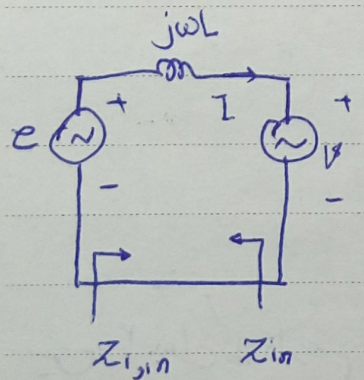
PowerEn.ir

جلسه‌ی دوم ۹۶/۱۱/۳۰

SSC



اگر کنترل e به اندازه کافی بزرگ باشد، جریان به سمت بردن می‌کشیم یعنی خازن داخل تولید می‌کنیم و برعکس آن را خازن تولید کردیم.



توسط سوئیچ‌ها کنترل می‌شود.

$e = AV$ ← Gain (حقیقی)

$$I = \frac{e - V}{j\omega L}$$

$$I = \frac{(A-1)V}{j\omega L}$$

$$Z_{in} = \frac{-V}{I} = \frac{-j\omega L}{A-1}$$

$\frac{e}{I}$ نسبت به سمت داخل = ...

$$Z_{in} = \frac{j\omega L}{1-A}$$

$A > 1 \rightarrow e > V$

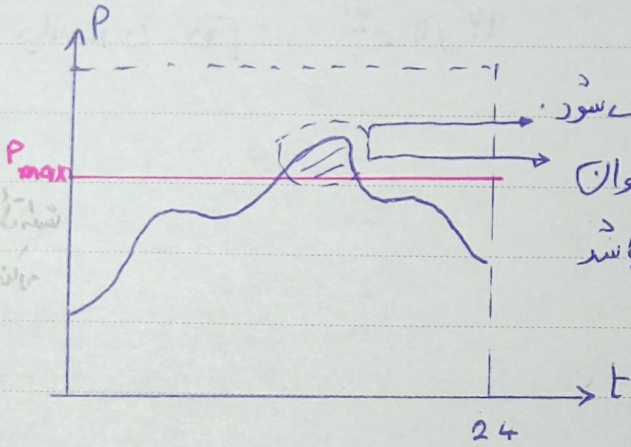
$A < 1 \rightarrow e < V$

$A = 1 \rightarrow$ Boot strap

جریان عبور نمی‌کند.

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir



بار از شبکه باید خدمت شود.

ساعاتی هست که از Pmax فراتر می رود توان، می توان از یک باتری جایگزین خازن کنیم. هر وقت لازم باشد P از باتری به بار منتقل می شود (مسیر یک طرفه)

(BESS)

در حالت SMES به جای باتری، در حالت نرمال super Conductor قرار می دهیم.

(باتری در ساعاتی که نیاز نیست شارژ باید شود، یعنی از منبع به باتری توان منتقل شود و در زمانی که ساعت پیک از max بیشتر است باید بتواند توان منتقل کند).

منتقل BESS، STATCOM می است اما کنش dc در stat com می خازن کوچک ولی BESS

از باتری استفاده می کند. از لحاظ ساختاری کیه. تفاوت با BESS این است که برای ذخیره سازی انرژی

میدان الکتریکی در نظر گرفته می شود اما BESS میدان مغناطیسی در نظر است.

پس ۲ مدل داریم:

۱. سلف ها خازن ها ماتریسور

✓ ۲. سوئیچ و مبدل (یا منبع dc داریم یا خازن).

برای کنش dc توازن را کنیو در نظر نمی گیرند.

POWEREN.IR

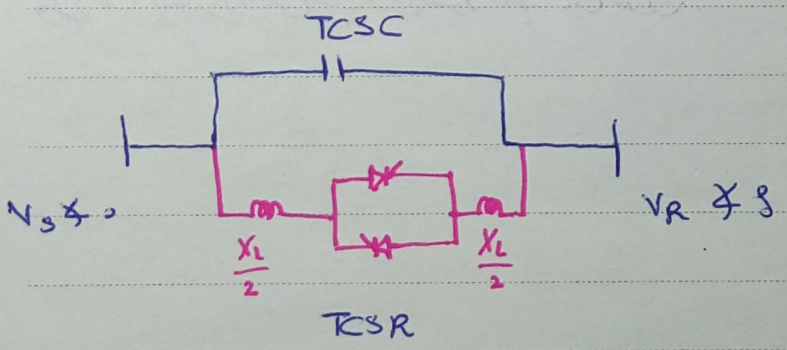
PowerEn.ir

Series Connected Controllers

SSSC : static synchronous series compensator.

- TCSC : Thyristor - controlled series capacitor.
- TCSR : " " " reactor.
- TSSC : " - switched " capacitor.
- TSSR : " " " reactor.
- (TCSC)* : " - controlled " capacitor.

} سه تای دیگر به صورت ac طراحی شده.

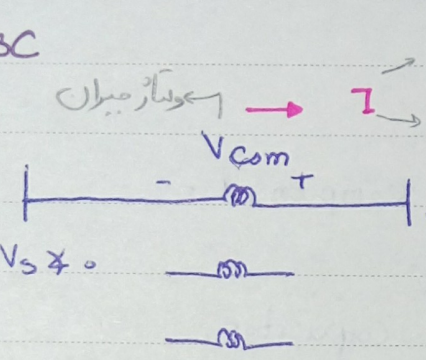


تفاوت این حالت با حالت موازی در ساختار نیست، در کنترل آن هاست (تفاوت در طراحی سلف و خازن). با اضافه کردن خازن موازی به TCSR و TCSC می‌رسیم.

POWEREN.IR

PowerEn.ir

SSSC



از شبکه می گیرد

کنترل نمیشه

بود این جریان

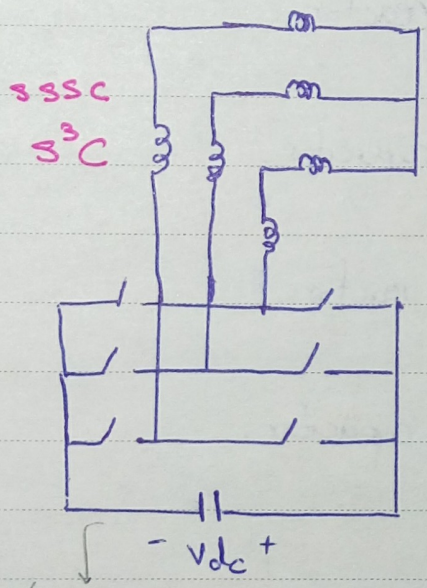
نا میرود

چون مقاومت ترانس

تقریبی میشه

در امپدانس ماشینیت

- جریانی داریم می خواهیم ولتاژ کنترل کنیم



ولتاژ جبران و I عمود باشند همی سلف و خازن تولید می کند.

- شبکه قدرت از سری شدن وسیله ای امتناع می کند چون

وارد سیستم داخلی شبکه می شود با سری شدن.

صرفی هست نه

ولتاژی وترتیق

می کند (دوتا ان

حالت قبلی)

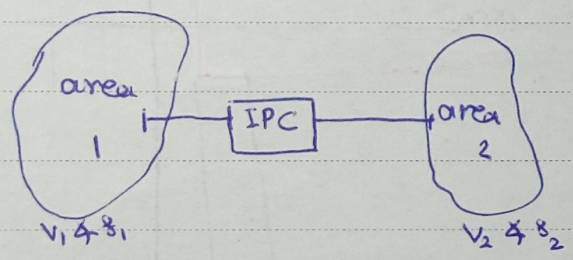
POWEREN.IR

PowerEn.ir

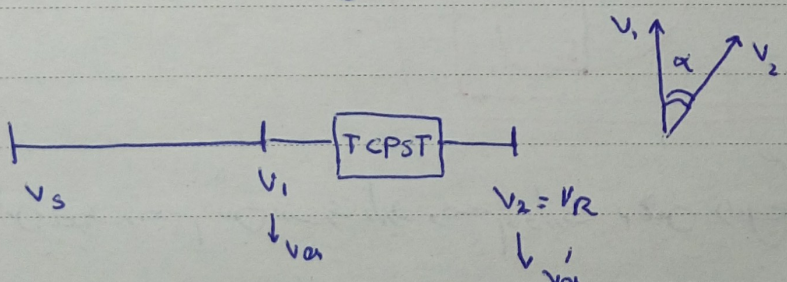
جلسه‌ی سوم ۹۴،۱۲،۰۵

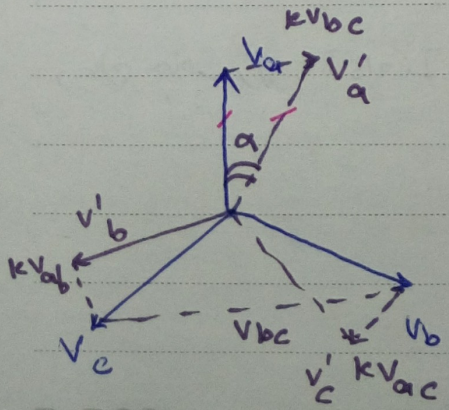
Combined Controllers

- IPC : Interphase Power Controller
- TCPST : Thyristor-controlled phase-shift Transformer
- UPFC : Unified Power Flow Controller



$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2)$ $\frac{\partial P}{\partial \delta}$.اشتقاق بگیرید



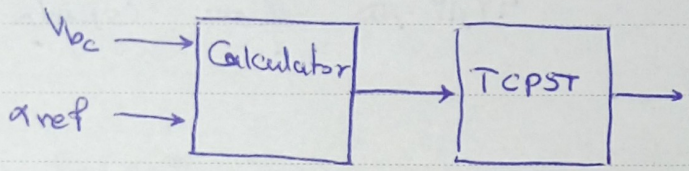


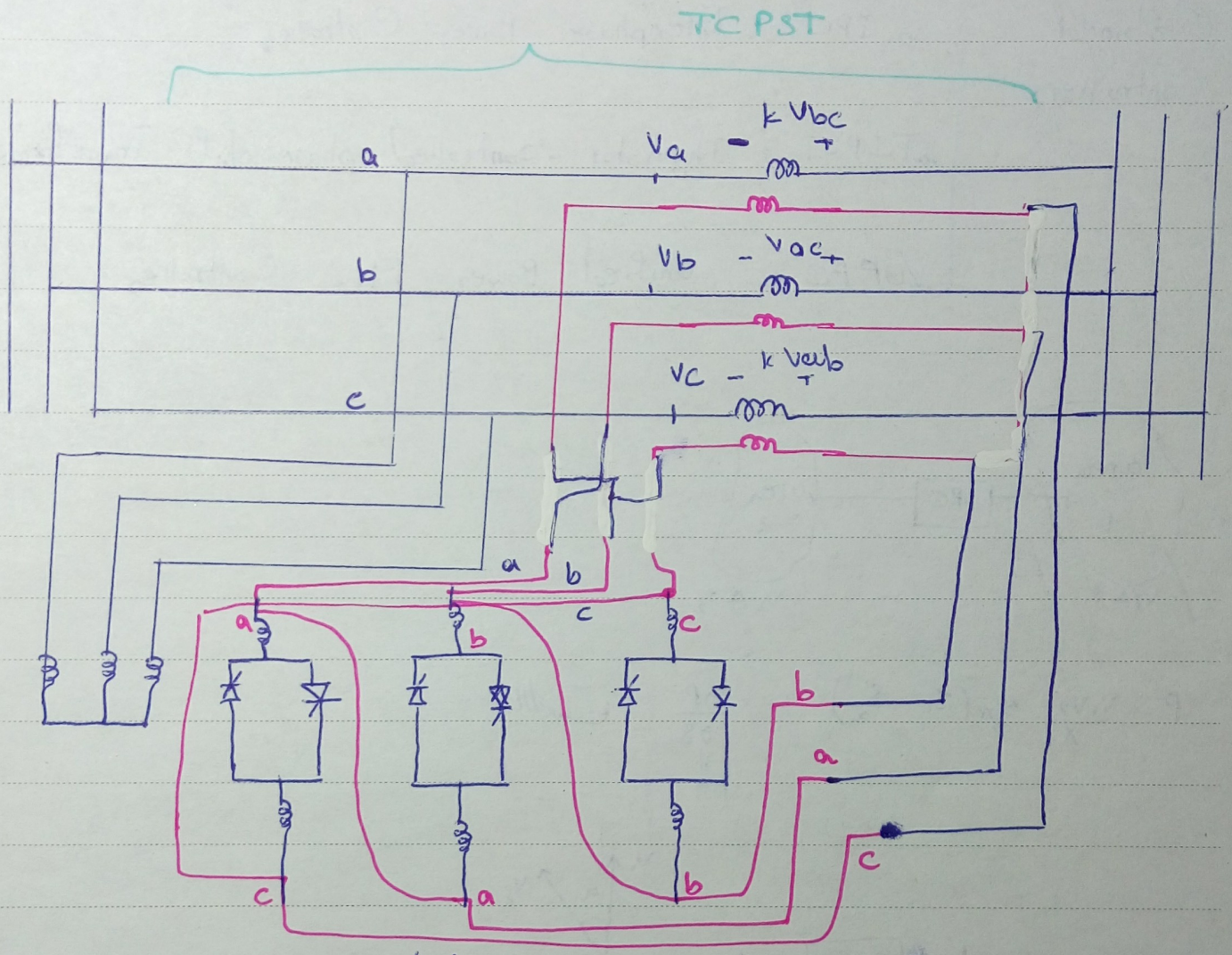
$V_a + kV_{bc} = V'_a$

اول زاویه‌ی V_a را مشخص کنید.

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir





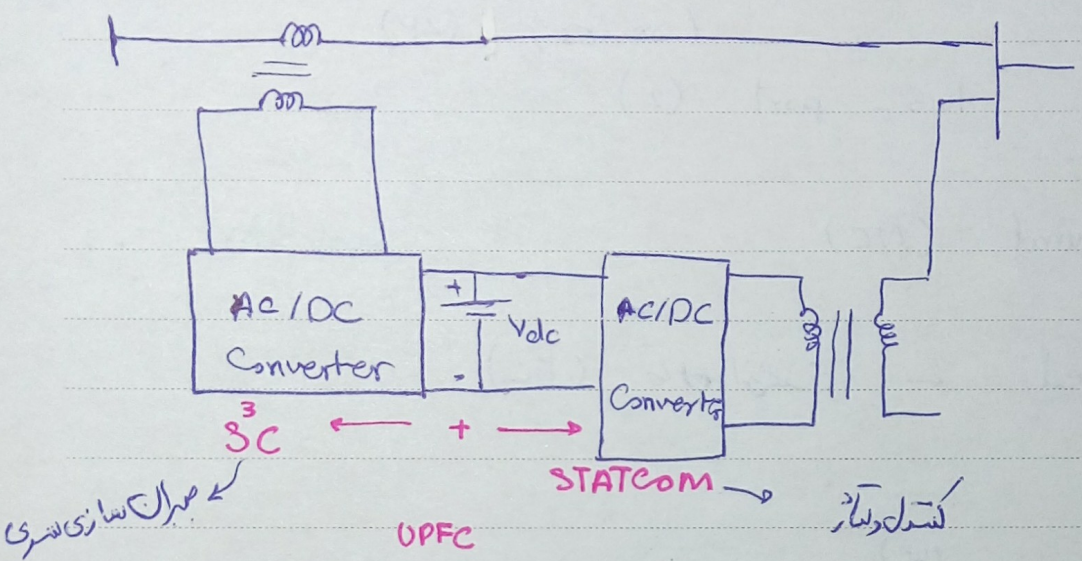
این مجموعه هم نشت سری دارد و هم موازی به همین دلیل به آن سری گفته می‌شود.

در حال حاضر از IGBT جای تریستور استفاده می‌شود.

POWEREN.IR

PowerEn.ir

UPFC



Classification of Controllers

1. Connection
2. Commutation نوع کموتاسیون
3. Switching frequency
4. Energy Storage
5. DC - Link

1. Connection

سری، موازی، ترکیبی

POWEREN.IR

PowerEn.ir

AC-port
- Single-port (shunt) (1P)
- " (series) (2P)
- two-port (2)

2. Commutation
- Natural (NC)
- Forced ← خاموش‌شدنی (FC)

3. Switching Freq.
- Low-Freq. (LF) → دیود ← تریستور
- Medium-Freq. (MF) → GTO
- High-Freq (HF) → IGBT

$3^K <$, $3^K >$ ... → فرکانس سوئیچینگ دارد

(در سطح توزیع)

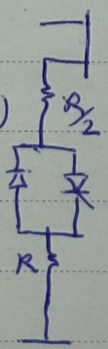
e.g $N = \frac{E}{S} f$ — جلسه‌ی چهارم ۹۴،۱۲،۷

$S = 100\ MVA$

$E = 25MJ \rightarrow E' = 15MJ$, $N = \frac{10}{100} \times 50 = 5$ cycle

4. Energy Storage
- zero Energy Storage (ZES)
- Capacitor Energy Storage (CES) TCBR
- Battery " " (BES)
- External Energy Storage (EES)

(مثل دیزل ژنراتور)



$\frac{E}{\text{زمان}} f = N.S$

$P = \frac{E}{\tau}$

POWEREN.IR
P4PCO

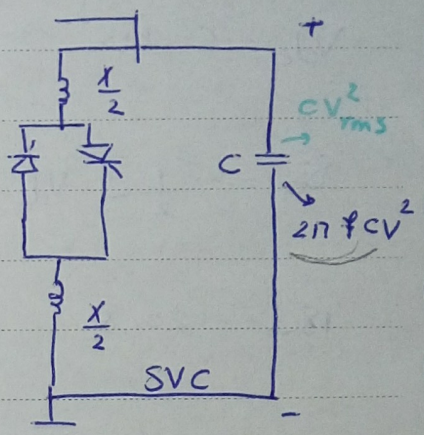
PowerEn.ir

ωCV^2 $\quad \frac{KI_{rms}^2}{\frac{LW}{2\pi f}}$ $\quad f = \frac{1}{2\pi}$

$N = \frac{CV^2}{2\pi f CV^2}$ $\quad f = \frac{1}{2\pi}$

$= 0.16$ cycle

$S = \frac{V^2}{\frac{1}{j\omega C}} = \omega CV^2 \quad KI^2$

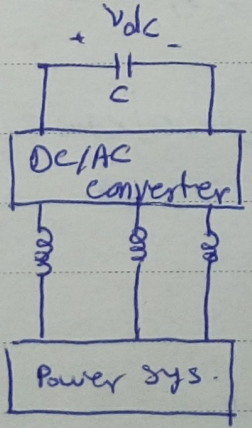


خازن حداکثر 0.16 سیکل می‌تواند توان دهد.

دوره سلف هم همینطور. یعنی این جبران ساز فقط تا این حد می‌تواند را عمل کند یا هر چیز دیگری.

حالت ZES به کندانسورهای غیر AC هم تعمیم می‌یابد چون هیچ انرژی ندارد هم‌زمان کلیه‌ی انرژی خازن 0.16 سیکل باقی می‌ماند در حالتی.

خازن در حالت DC : CES



e.g: $S = 100$ MVA (توان جبران ساز) , $f = 60$ Hz

under transient condition : 125 MVA for 10 cycles

$E = 125 \times \frac{10}{60} = 20.8$ MJ انرژی تغذیه شده در یک سیکل

POWEREN.IR

PowerEn.ir

$V_{dc} = 6\ kV$

$E_c = \frac{1}{2} C V_{dc}^2 = 18C\ MJ$

$18C = 20.8 \rightarrow C = 1.16\ F$

در حالت AC اصلا ضرورت خازنی کارایی نبود ولی در سیستم DC با عبور ضرورت به خواسته خود رسیم.

$67.08^{MJ} - 47.25^{MJ}$

ما بیدرای ولتاژ خازن قید نکردیم، مثلا از $5\ kV$ کمتر نشود.

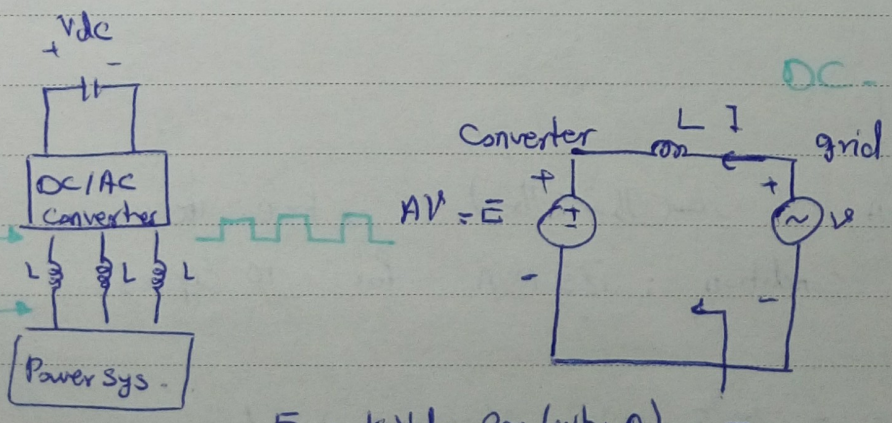
$E = \frac{1}{2} C (6^2 - 5^2) = 5.5C$

$5.5C = 20.8 \rightarrow C = 3.78\ F$

اگر توان راکتیو نخواهیم جابجا کنیم، ضرورت خاصی ندارد چون DC است و با هر ضرری صفر $1nF$ هم توان راکتیو منتقل می‌شود.

- عدم تعادل فیزی برای نوسان در سیستم DC است با داشتن هارمونیک نمی‌شود.

5. DC - Link



POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

I حالت داریم: یکی حالت ضعیفی که کنترل به دیافراگم است AC بیاید سمت کنترل بخش DC است

$\sqrt{2}\,V_{ac} = V_{dc}$

یکی حالتی که با ضرب توان کلیسوولتاژ DC بالا می‌رود و به تبع آن E زیاد می‌شود.

$$I = \frac{V-E}{j\omega L} = \frac{V-AV}{j\omega L}$$

$$\frac{V}{I} = Z_{in}(j\omega) = \frac{j\omega L}{1-A}$$

A می‌تواند کمتر یا بیشتر از ۱ باشد:

$A<1$ حالت مثبتی داشته

$A>1$ صرف انرژی

$A>1 \quad Z_{in}<0 \quad$ Capacitive

$A<1 \quad Z_{in}>0 \quad$ inductive

$A=0 \rightarrow$ کنترل از دست می‌رود، فقط بخش AC داریم.

$I \perp E$, $I \perp V$ } $Q = VI$ مدار فقط توان راکتیو مصرف می‌کند

$$= \frac{V^2}{\omega L}(1-A)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \frac{-V^2}{\omega L}$$

V, P دست ما نیست و عامل مؤثر L است.

$$\Delta Q = \frac{-V^2}{X}\Delta A$$

برای حفظ تغییرات کمتر (ΔA) بزرگ، X بزرگ نیاز است.

(A) کوچک، X کوچک ... این خوبه ← روش بهینه‌تر این است

POWEREN.IR

PowerEn.ir

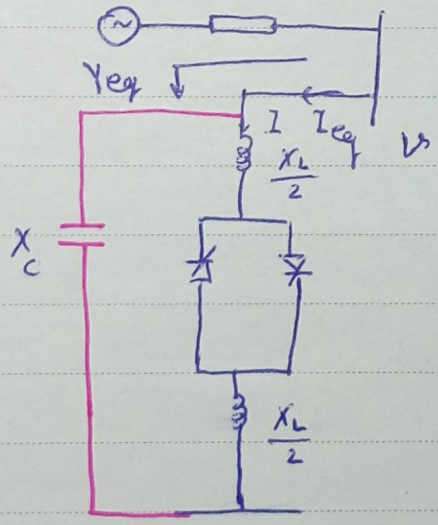
وی اگر X کوچک باشد به‌عنوان فیلتر این نوع خاصیت فیلتر شدن کم می‌شود. و یا اگر منبع خطای خرد دهد

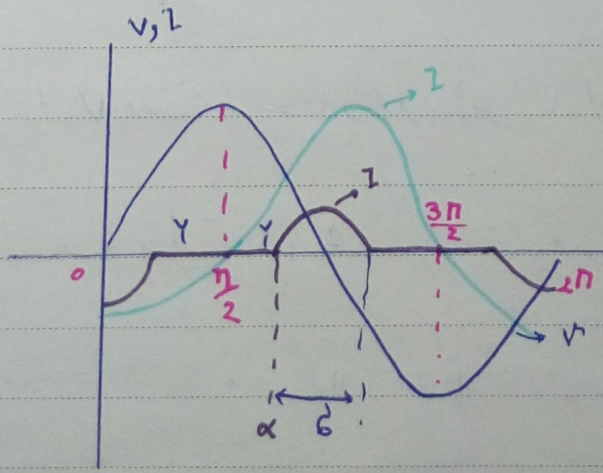
یا X کوچک، جریان خطای بزرگ تولید می‌کند.

X بزرگ جریان خطای کمتری دارد، فیلتر بهتری است و اشکال آن تغییر این در مصرف‌کننده می‌بزرگ

و صرف توان راکتیو است یعنی تلفات سیستم زیاد افزایش است.

جلسه‌ی پنجم ۹۶،۱۲،۱۳





$V(t) = V_m \sin \omega t$

$\alpha = \frac{\pi}{2}$

α

محدوده‌ی α تا π می‌تواند بود چون

شرایط π جریان نمی‌شنارد.

POWEREN.IR

PowerEn.ir

کمتر از $\frac{\pi}{2}$ هم تنظیم موج تقارن خود را از دست می‌دهد.

$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$

$$I(t) = \begin{cases} \frac{V_m}{X_L}\left(\cos(-\omega t) + \cos\alpha\right) & \begin{cases} \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \delta \\ 2\pi - \frac{\delta}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \\ 0 \leq \omega t \leq \frac{\delta}{2} \end{cases} \\ 0 & \begin{cases} \frac{\delta}{2} \leq \omega t \leq \alpha \\ \alpha + \delta \leq \omega t \leq 2\pi - \frac{\delta}{2} \end{cases} \end{cases}$$

$$2\gamma + \frac{\delta}{2} = \alpha$$

$$2\gamma + \delta = \pi$$

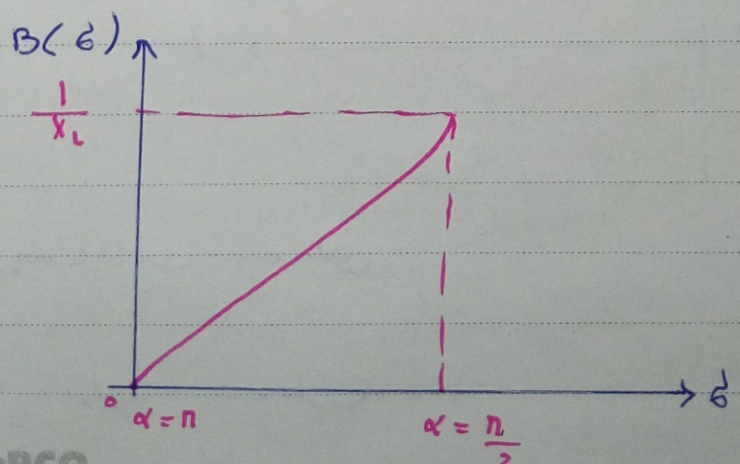
$$\frac{\delta}{2} = \pi - \alpha \longrightarrow \boxed{\delta = 2\pi - 2\alpha}$$

هدایت

$$I_1 = \frac{\delta - \sin\delta}{\pi X_L} \quad \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

مقادیر مؤثر جریان سری فوریه

$$B(\delta) = \frac{I_1}{\frac{V_m}{\sqrt{2}}} = \frac{\delta - \sin\delta}{\pi X_L}$$



POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

مشکل SVC ، تولید هارمونیک های توسعه پایین و داشتن فیلترهای بزرگ است.

اثر نداشتن خازن

SVC

TCR

$Y_{eq} = \frac{I_{eq}}{V} = -jB(\alpha) + j\omega C$

$B \in [a,b]$ ثابت jd

e.g.

$Y_{eq}\ e^{-j[a-d,\ b-d]}$

$a=1,\ b=2$

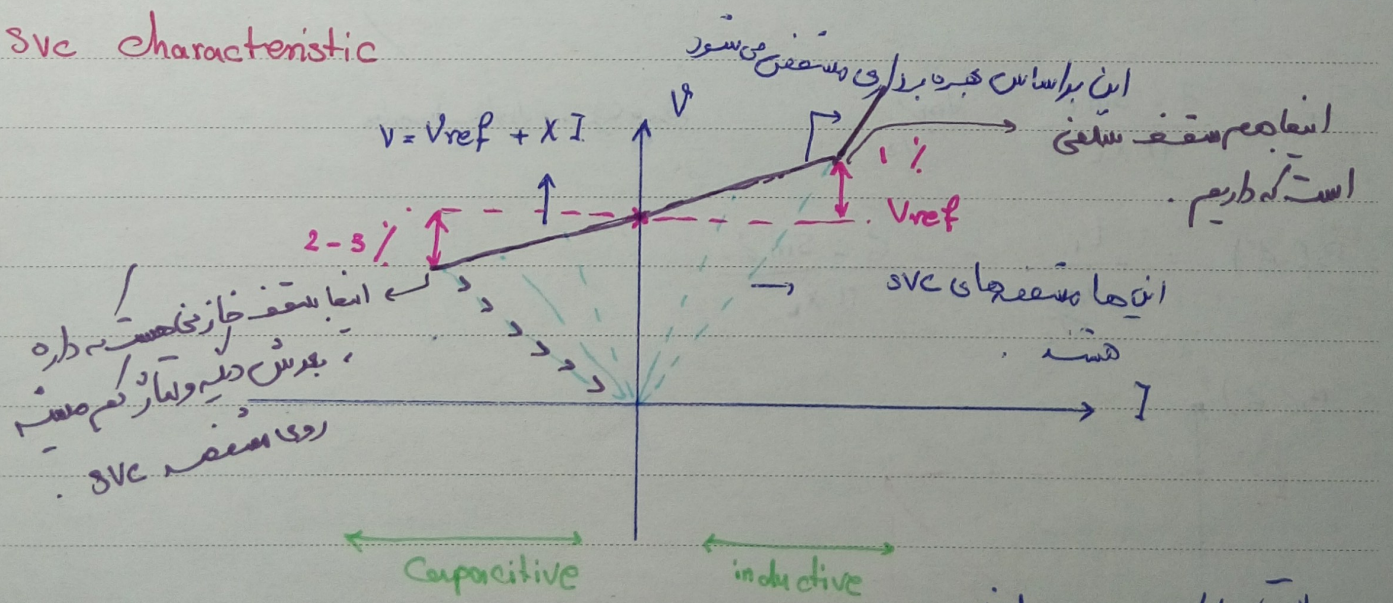
$Y_{eq} \in -j[1-d,\ 2-d]$

if $d = 1.5$

$Y_{eq} \in -j[-0.5,\ 0.5]$

تغییرات می تواند در حوزه ی شلفی و خازنی باشد.

SVC characteristic



انتهای مشخصه شلفی است که داریم.

انتهای مشخصه خازنی حدود ۲ تا ۳ درصد بعد از دیپ ولتاژ نرم می شود روی مشخصه SVC.

این ها مشخصه های SVC هستند.

در حالت مجاری ← شلفی

برای ← خازن

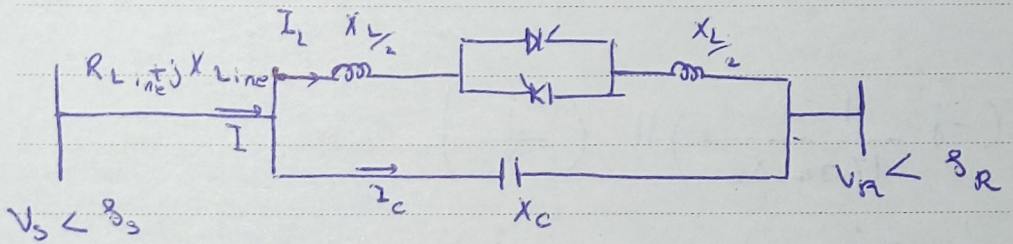
I_{eq}, Y_{eq}, V_{eq}

POWEREN.IR

PowerEn.ir

NC ← SVC

بدون مواری
فرکانس کلیدزنی در سطح بالا
zero energ storeage
no dc - Link



1. Blocking Mode

$\alpha = \pi \quad , \quad \delta = 0$

حالتی که هیچ سلفی در مدار نیست.

$$I = I_C = \frac{V_S \angle \delta_S - V_R \angle \delta_R}{R_{Line} + jX_{Line} - jX_C}$$

→ X خازن شده، توان انتقالی

2. By pass mode

$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad , \quad \delta = \pi$

بیشترین سلف مدار

$$I = \frac{V_S \angle \delta_S - V_R \angle \delta_R}{R_{Line} + jX_{Line} + (-jX_C \parallel jX_L)}$$

POWEREN.IR

PowerEn.ir

3. Vernier operation mode

$\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \quad , \quad 0 < \delta < \pi$

$\left(-j \frac{6 \cdot \sin\delta}{\pi X_L}\right) \| \left(\frac{j}{X_C}\right)$

POWEREN.IR

e.g. $\delta = \frac{\pi}{3} \quad \left(-j \frac{1}{17.34\, X_L}\right) \| \left(\frac{j}{X_C}\right)$

$\delta = \frac{\pi}{2} \quad \left(\frac{-j}{5.5\, X_L}\right) \| \left(\frac{j}{X_C}\right)$

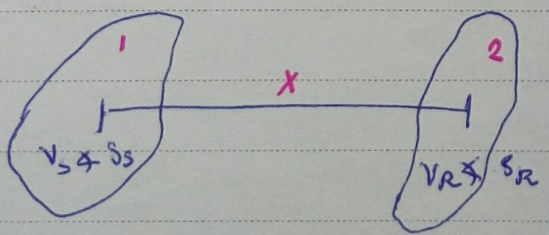
$\delta = \frac{2\pi}{3} \quad \left(\frac{-j}{2.56\, X_L}\right) \| \left(\frac{j}{X_C}\right)$

$\delta = \frac{3\pi}{4} \quad \left(\frac{-j}{1.9\, X_L}\right) \| \left(\frac{j}{X_C}\right)$

1S , NS , LF , ZE S , NDC

تنها تفاوت این سری است، عملی‌تر و ارزی بود.

جلسه‌ی ششم ۹۶,۱۲,۱۴



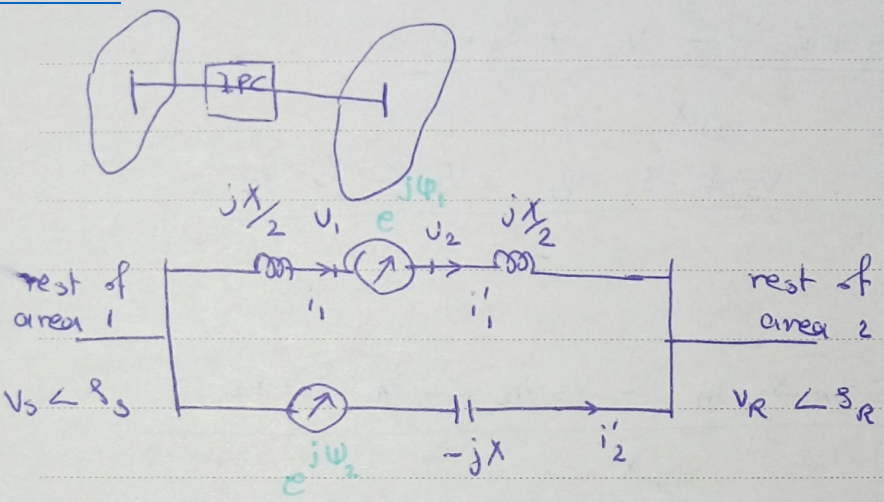
$P = \frac{V_S V_R}{X} \sin(\delta_S - \delta_R)$

$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{V_S V_R}{X} \cos\delta$

$\Delta P = \frac{V_S V_R}{X} \cos\delta \, \Delta\delta$

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir



* دقت کنید که همه چیز با واحد پریونیت است.

$$V_R \angle \delta_R \; (i'_1 + i'_2)^* = P_R + jQ_R$$

phase shifter $\Rightarrow$ $U_1 i_1^* = U_2 i_2'^*$

ماننده ترانسفورمر است

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{i_2'^*}{i_1^*} = e^{j\psi_1}$$

$$\begin{cases} U_1 = U_2 e^{j\psi_1} \\ i'_1 = \frac{1}{i_t} e^{j\psi_1} \end{cases} \Rightarrow i_1 = i'_1 e^{j\psi_1}$$

$$U_2 = \left[V_S \angle \delta_S - j\frac{X}{2} i_1 \right] e^{j\psi_1} = j\frac{X}{2} i'_1 + V_R \angle \delta_R$$

$$U_2 = V_S \angle \delta_S + \psi_1 - j\frac{X}{2} i'_1 = j\frac{X}{2} i'_1 + V_R \angle \delta_R$$

$$\begin{cases} i'_1 = \dfrac{V_S \angle \delta_S + \psi_1 - V_R \angle \delta_R}{jX} \\ i'_2 = \dfrac{V_S \angle \delta_S + \psi_2 - V_R \angle \delta_R}{-jX} \end{cases}$$

POWEREN.IR

PowerEn.ir

$$i' = i_1' + i_2' = \frac{V_S \angle \delta_S + \psi_1 - V_S \angle \delta_S + \psi_2}{jX}$$

$$P_R + jQ_R = V_R \angle \delta_R \cdot \frac{V_S \angle -\delta_S - \psi_1 - V_S \angle -\delta_S - \psi_2}{-jX}$$

$$= \frac{V_S V_R \angle \overbrace{\delta_R - \delta_S}^{\delta} - \psi_1 - V_S V_R \angle \overbrace{\delta_R - \delta_S}^{\delta} - \psi_2}{-jX}$$

$$\begin{cases} P_R = -\frac{V_R V_S}{X}\left[\sin(\delta - \psi_1) - \sin(\delta - \psi_2)\right] \\ Q_R = \frac{V_S V_R}{X}\left[\cos(\delta - \psi_1) - \cos(\delta - \psi_2)\right] \end{cases}$$

$$P_R = -2\frac{V_R V_S}{X}\sin\left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{2}\right)\cos\left(\delta - \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}\right)$$

$$Q_R = -2\frac{V_R V_S}{X}\sin\left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{2}\right)\sin\left(\delta - \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}\right)$$

$$P_R = P_{max}\cos\left(\delta - \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}\right)$$

$$P_{max} = -\frac{2V_S V_R}{X}\sin\left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{2}\right)$$

$$\frac{\partial P_R}{\partial \delta} = -P_{max}\sin\left(\delta - \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}\right)$$

$$\Delta P_R = -P_{max}\sin\left(\delta - \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}\right)\Delta\delta \longrightarrow \text{حساسیت } P \text{ به } \delta$$

POWEREN.IR

PowerEn.ir

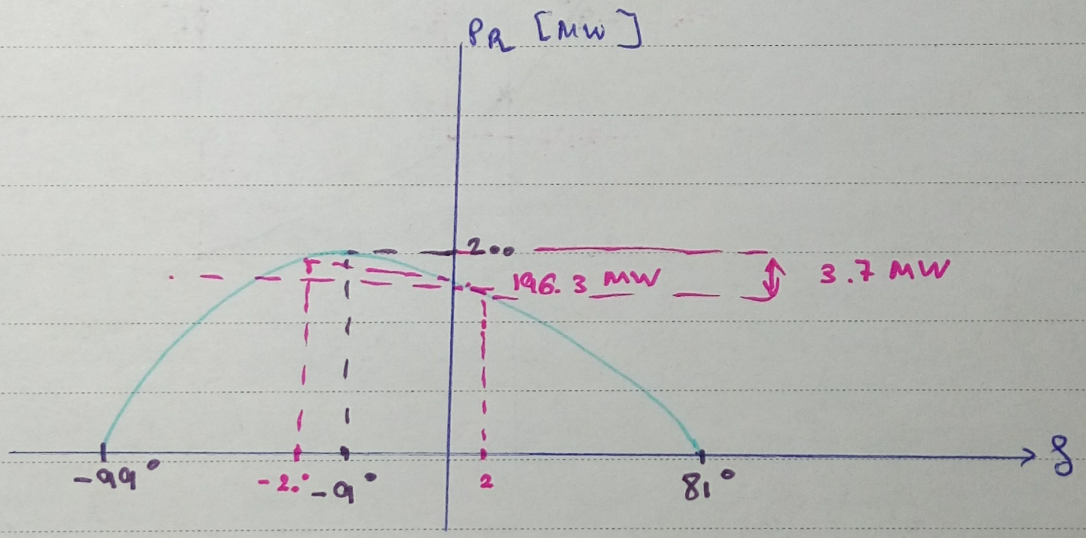
Ex) $\varphi_1 = -18^\circ$, $\varphi_2 = 0$

$$\frac{V_S V_R}{X} = 1278.5 \text{ MW}$$

$$P_{max} = \frac{-2 V_S V_R}{X} \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) = 200 \text{ MW}$$

$$P_R = 200 \cos(\delta + 9^\circ)$$

$$Q_R = -200 \sin(\delta + 9^\circ)$$



$\delta \in [2^\circ, -20^\circ]$

$$P_R\Big|_{\delta = 2^\circ} = 200 \cos 11^\circ = 196.3 \text{ MW}$$

$$P_R\Big|_{\delta = -2^\circ} = 200 \cos 11^\circ = 196.3 \text{ MW}$$

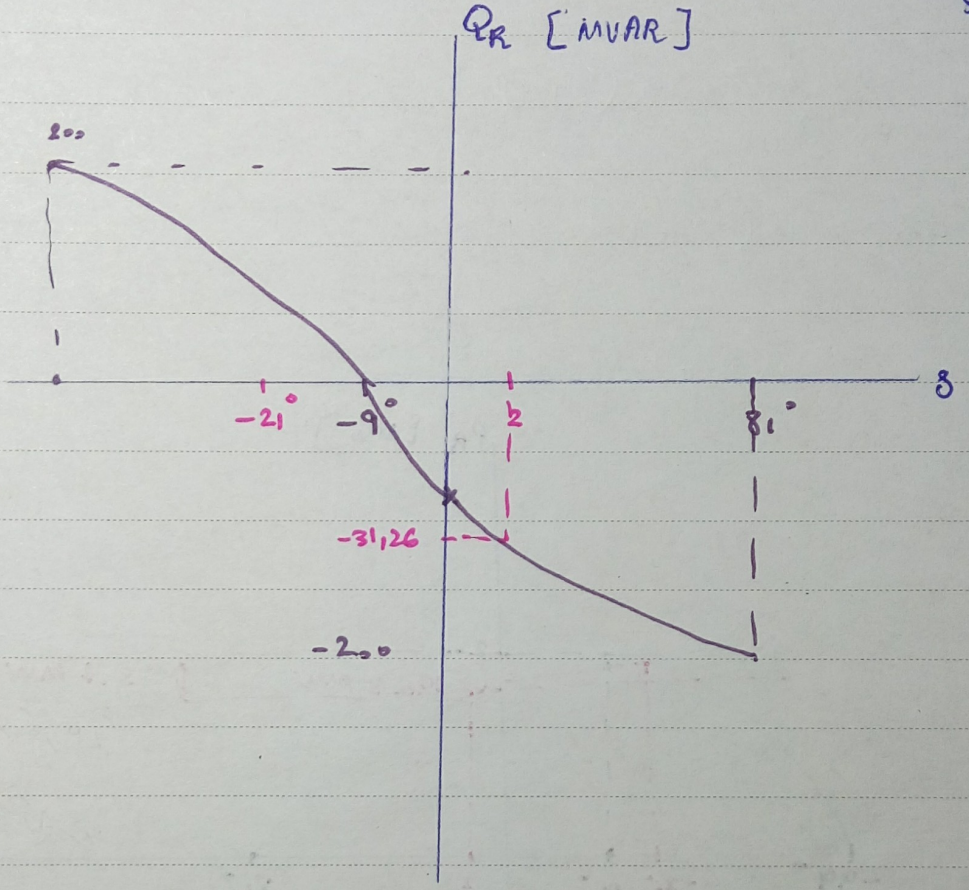
$\frac{200 - 196.3}{200} \times 100 = 1.85$ ٪ تغییرات توان داریم. حول یک حدالشد ± ٪ (توان نامی)

POWEREN.IR

PowerEn.ir

خاصیت X ها، تبدیل سینوس به کسینوس در P است.

" phase shifter، کاهش P_{max} و کنترل توان انتقالی است.



کنترل توان راکتیو از دست رفته، به صورت محلی باید جبران سازی داریم

$$i' = \frac{V_s}{jX} e^{j\delta_s} \left[e^{-j\psi_1} - e^{+j\psi_2} \right]$$

کنترل جریان توسط دو فنر شفیر مثل

کنترل است.

2 port ، NE ، مرکز یابی ، zero energ storage ، no-DC Link

(ریستوری)

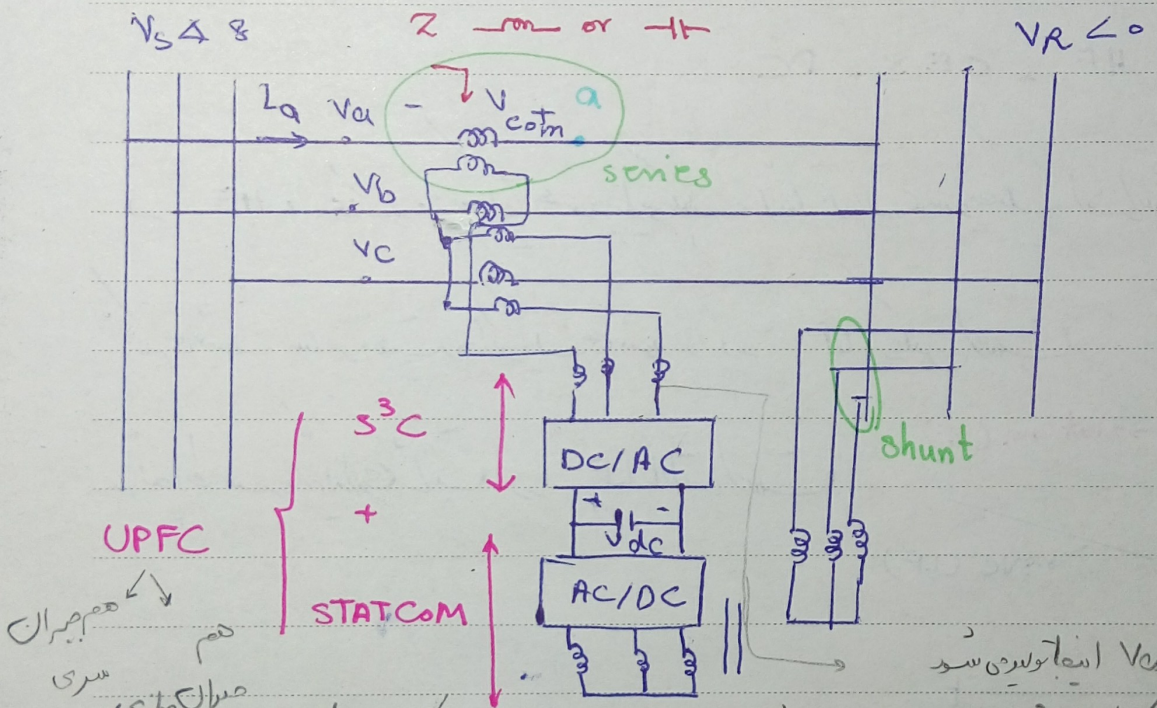
POWEREN.IR

PowerEn.ir

کنترل‌کننده‌های ترنسیوری منعطف‌کننده سیستم‌های قدرت

جلسه‌ی هفتم ۹۶/۱۲/۱۹

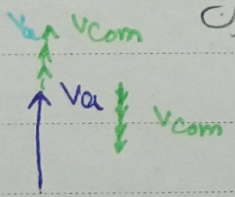
UPFC (Unified power flow Controller)



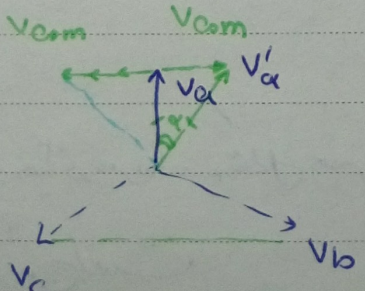
ولتاژ V_{com} اینجا تولید می‌شود

ممکنه هریک از حالت‌های 1، 2، 3 باشد. در حالت 1 و 2 باید انرژی تبادل داشته باشد، در حالت 3 چون سلف و خازن است انرژی نمی‌خواهیم

اولین کاربرد: تنظیم‌کننده‌ی ولتاژ



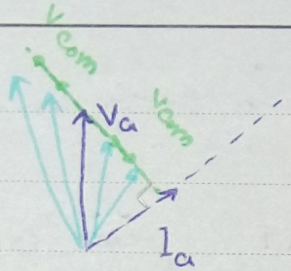
- Voltage regulator -



Phase shift Controller 2

POWEREN.IR
PqPCO

PowerEn.ir



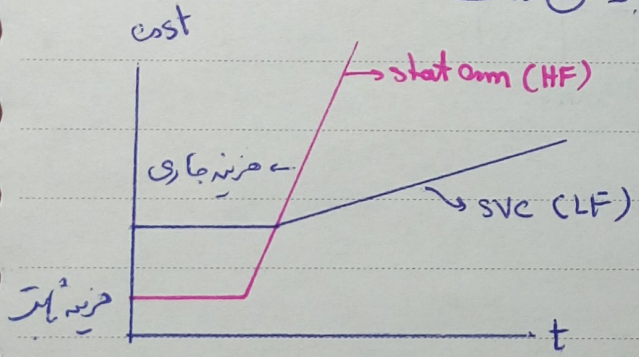
3 ایجاد دینامیکی بصورت برداری عمود است ← بایاس یا خازن

کنترل توان.

4 Reactive power Compensator (جبران سازی)

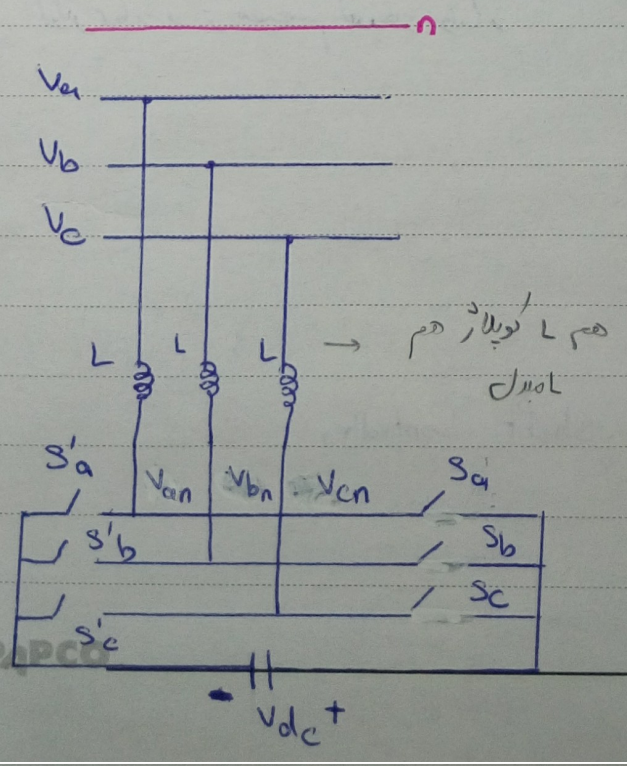
2 port - FC - HF - CES - DC

در HF ، عملکردها بصورت ایده‌آل عمل می‌کند ، اما تلفات سوئیچینگ افزایش می‌یابد. راندمان کم می‌شود. سایز فیلترها کوچک می‌شود. در LF برعکس است.



به لحاظ سرمایه‌گذاری ثابت در LF بالاتر است.

$$V_{dc}\left(S_a(t) - S_b(t)\right) = V_{ab}$$



سوئیچ‌ها در هر شاخه عکس هم هستند و در هر زمان یکی روشن است.

POWEREN.IR

PowerEn.ir

$$S_a(t) \triangleq \begin{cases} 1 & S_a: on \;,\; S'_a = off \\ 0 \\ -1 & S_a: off \;,\; S'_a: on \end{cases}$$

$$S_b(t) \triangleq \{ \quad \text{..} \quad -1$$

$$S_c(t) \triangleq \{ \quad \text{..} \quad -1$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a(t) \\ S_b(t) \\ S_c(t) \end{bmatrix}$$

V_{dc} , $-V_{dc}$, 0 → وتاز خطوط یکی از این ۳ حالت اند.

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$$

$$V_{ab} - V_{ca} = 2V_{an} - \overbrace{V_{bn} - V_{cn}}^{V_{an}} = 3V_{an}$$

$$\begin{cases} V_{an} = \dfrac{V_{ab} - V_{ca}}{3} \\ V_{bn} = \dfrac{V_{bc} - V_{ab}}{3} \\ V_{cn} = \dfrac{V_{ca} - V_{bc}}{3} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

$$S_a(t) \triangleq \begin{cases} 1 & S_a : on \;,\; S'_a = off \\ 0 \text{ or } -1 & S_a : off \;,\; S'_a : on \end{cases}$$

$$S_b(t) \triangleq \{ \;\; \text{..} \;\; -1$$

$$S_c(t) \triangleq \{ \;\; \text{..} \;\; -1$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a(t) \\ S_b(t) \\ S_c(t) \end{bmatrix}$$

V_{dc} , $-V_{dc}$, 0 → وتاز خطوط یکی از این ۳ حالت اند.

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$$

$$V_{ab} - V_{ca} = 2V_{an} - \overbrace{V_{bn} - V_{cn}}^{V_{an}} = 3V_{an}$$

$$\begin{cases} V_{an} = \dfrac{V_{ab} - V_{ca}}{3} \\ V_{bn} = \dfrac{V_{bc} - V_{ab}}{3} \\ V_{cn} = \dfrac{V_{ca} - V_{bc}}{3} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

POWEREN.IR

PowerEn.ir

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a(t) \\ S_b(t) \\ S_c(t) \end{bmatrix}$$

ولتاژ فاز → $\frac{V_{dc}}{3}, \frac{2V_{dc}}{3}, 0, -\frac{V_{dc}}{3}, -\frac{2V_{dc}}{3}$

روشی می توید اینورتر سه سطحی، براساس ولتاژ خط هست. براساس فاز نیست است

$$V_{an} = \frac{V_{dc}}{3} \left[2S_a - S_b - S_c \right]$$

$\frac{1}{3}V_{dc}$

$-\frac{2}{3}V_{dc}$

جلسه‌ی هشتم 96,12,21

اصل نیستم به استاد

هدف ← چگونه مدولاسیون کنیم که مثلاً V_{an} = $V_m \sin \omega t$ شود

مدولاسیون: تنظیم کلیدزنی‌ها و فاصله‌ی بین کلیدزنی

Modulation

V_{an} ref → modulation

شاخص‌های مدولاسیون مناسب و قدرت

1. Utilization Factor

هرچه بیشتر، بهتر

$$\frac{V_{LL-max}}{V_{dc}} = M$$

V_{LL-max} → با این کلیدزنی

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

2. Linearity of modulation

رفتن از صفر تا ماکزیمم (ضریب استفاده) را به صورت خطی تقسیم کنیم.

$V_{an} = m V_{dc} \sin \omega t$ $\quad 0 \le m \le 1$

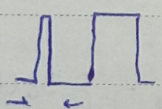
3. Low THD

هرچه عرض پالس‌ها بیشتر، THD بهتر (از نظر هارمونیک) و برای ساخت سینوسی.

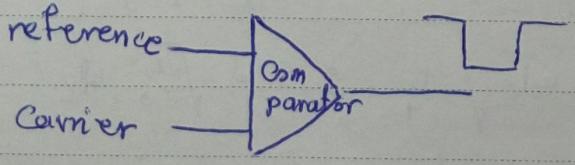
4. Low switching Losses

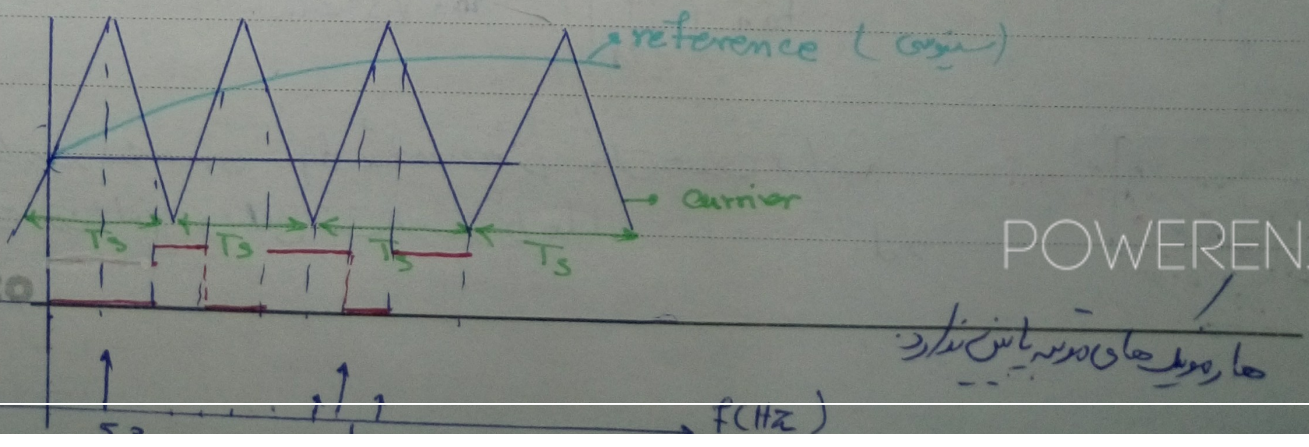
5. Correct operation of switches

مثلاً اگر مدولاسیونی عرض‌های پالس باریک داشت و از زمان روشن، خاموش شدن کلید کم باشد، امکان پذیر نیست.



EX) 1. SPWM





POWEREN.IR

هارمونیک‌های مدوله پالس ندارند.

PowerEn.ir

2. SVM (space vector modulation)

				V_d	V_q	$\sqrt{V_d^2 + V_q^2}$	$\tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right)$
V_1	1	1	1	0	0	0	-
V_2	1	1	0	$\frac{\sqrt{2}V_{dc}}{2\sqrt{3}}$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$	60°
V_3	1	0	1				
V_4	1	0	0				
V_5	0	1	1				
V_6	0	1	0				
V_7	0	0	1				
V_8	0	0	0	0	0	0	-

بردارهای غیرفعال

بردارهای غیرفعال

تغییرهای حالت : ۲ سلف و یک خازن

تبدیل abc / dq

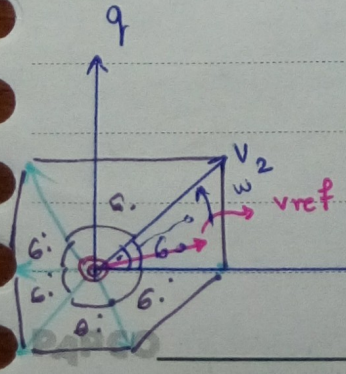
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a(t) \\ S_b(t) \\ S_c(t) \end{bmatrix}$$

e.g : (1 1 0) $\quad V_2 = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

$$|V_2| = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4}} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$$

$$\tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) = \tan^{-1}\sqrt{3} = 60^\circ$$



هر ۱ بردار در صفحه‌ی dq نشان داده می‌شود. مکان هندسی تغییرات کامپلکس بردی این ۶ ضلعی است (سر بردارها).

POWEREN.IR

PowerEn.ir

$$\begin{bmatrix} V_{an-ref} \\ V_{bn-ref} \\ V_{cn-ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos\omega t \\ V_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ V_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{dref} \\ V_{qref} \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos\omega t \\ -\sin\omega t \end{bmatrix}$$

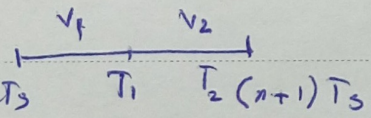
هدف برنامه کوردن بردار ref است.

با دو بردار مستقل، Vref را می‌سازیم.

$$V_{ref} = d_1 V_1 + d_2 V_2$$

$0 \le d_1 \le 1$ $\quad$ $0 \le d_2 \le 1$

با بردارهای دیگر هم می‌توان Vref را ساخت اما بردارهایی که Vref را احاطه کردند می‌سازیم، بهتر است.



در یکی از پریودهای سوئیچینگ، V_1 روشن و در یکی دیگر

V_2 روشن است.

$$T_s V_{ref} = T_1 V_1 + T_2 V_2$$

$$V_{ref} = \frac{T_1}{T_s} V_1 + \frac{T_2}{T_s} V_2$$

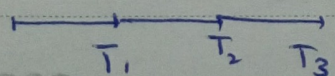
$\frac{T_1}{T_s} = d_1$ $\quad$ $\frac{T_2}{T_s} = d_2$

تصویر شود روی d_1, d_2

$$d_1 + d_2 = 1$$

اگر $d_1 + d_2$ یک نشد، بردار صفر را فاصله‌ای باقی مانده می‌گذاریم.

$$d_1 + d_2 + d_3 = 1$$



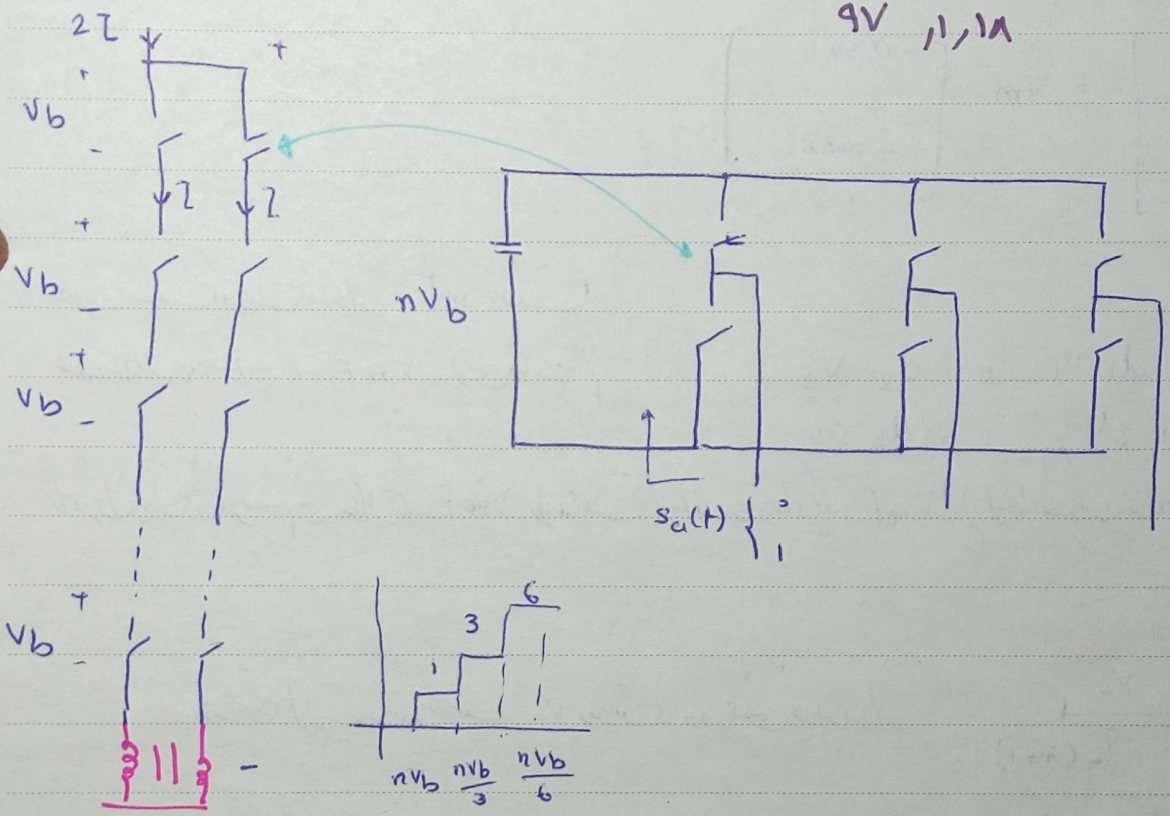
POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

d ها مجهول اند.

۳ـ مجهول و ۳ معادله داریم.

جایگزینی ضعیف ۹V ۱,۱,۱۸



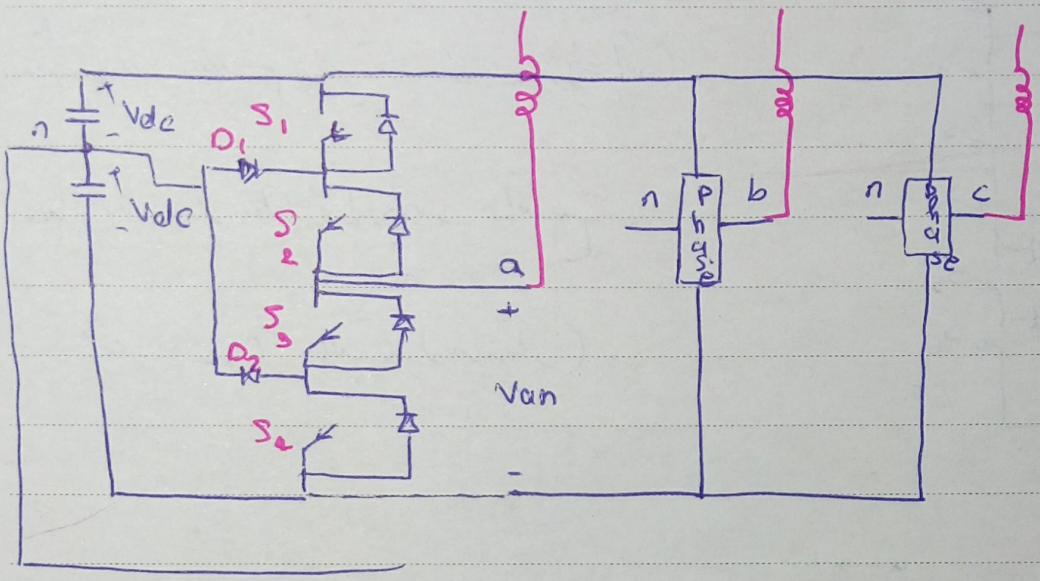
Multilevel Converters

- Diode clamped
- Capacitor clamped
- Modular multilevel

POWEREN.IR

PowerEn.ir

Three Level : Diode clamped



1) $S_1 = 1$, $S_2 = 1$, $S_3 = 0$, $S_4 = 0$ $\quad V_{an} = V_{dc}$

2) $S_2 = 1$, $S_3 = 1$, $S_1 = 0$, $S_4 = 0$ $\quad V_{an} = 0$

3) $S_3 = 1$, $S_4 = 1$, $S_1 = 0$, $S_2 = 0$ $\quad V_{an} = -V_{dc}$

← در حالت سه فاز، $27 = 3^3$ حالت سوئیچ داریم که هشت ترکیب، حالت بردار ها را

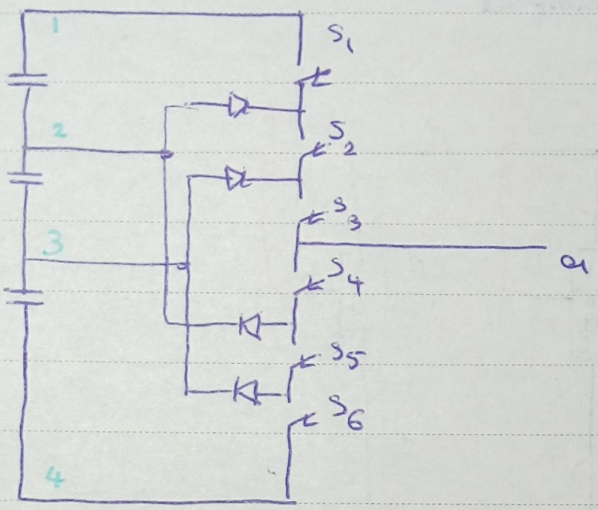
تعیین می کنند و اضافات شیرو داریم.

دیودها باعث ایجاد سلف های پراکندگی شود ولی از ایرادات مدار چند است reverse recovery

POWEREN.IR

PowerEn.ir

حالت 4 سطحی



۱- تعداد صفرها و یک‌ها (باید تعداد خازن‌ها زوج باشد)

بنابراین سه خازن یکسان باید داشته باشیم.

$4^3 = 64$ حالت (سه خازن)

1) $S_1, S_2, S_3 = 1$, $S_4, S_5, S_6 = 0$ $\quad a \rightarrow 1$

2) $S_2, S_3, S_4 = 1$, $S_1, S_5, S_6 = 0$ $\quad a \rightarrow 2$

3) $S_3, S_4, S_5 = 1$, $S_1, S_2, S_6 = 0$ $\quad a \rightarrow 3$

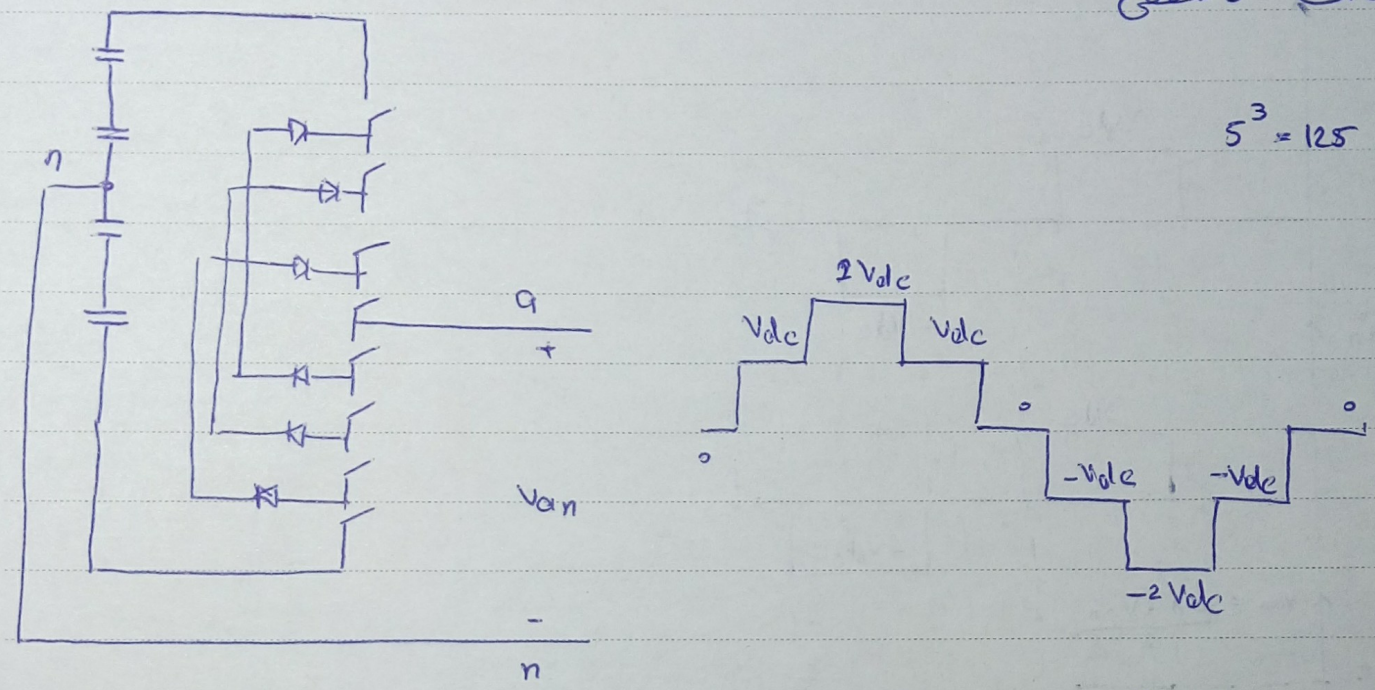
4) $S_4, S_5, S_6 = 1$, $S_1, S_2, S_3 = 0$ $\quad a \rightarrow 4$

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

حالت 5 سطحی

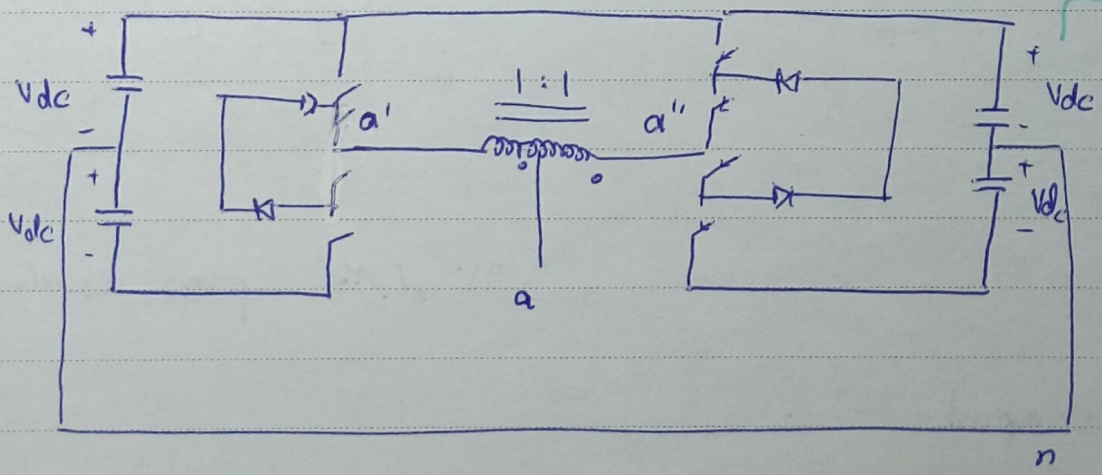
$5^3 = 125$



در این حالت تعداد دیود کلمپ ها نسبت به سطوح کمتر است.

سه دو سطحی را به هم وصل کردیم

راه خلاصی از clamping

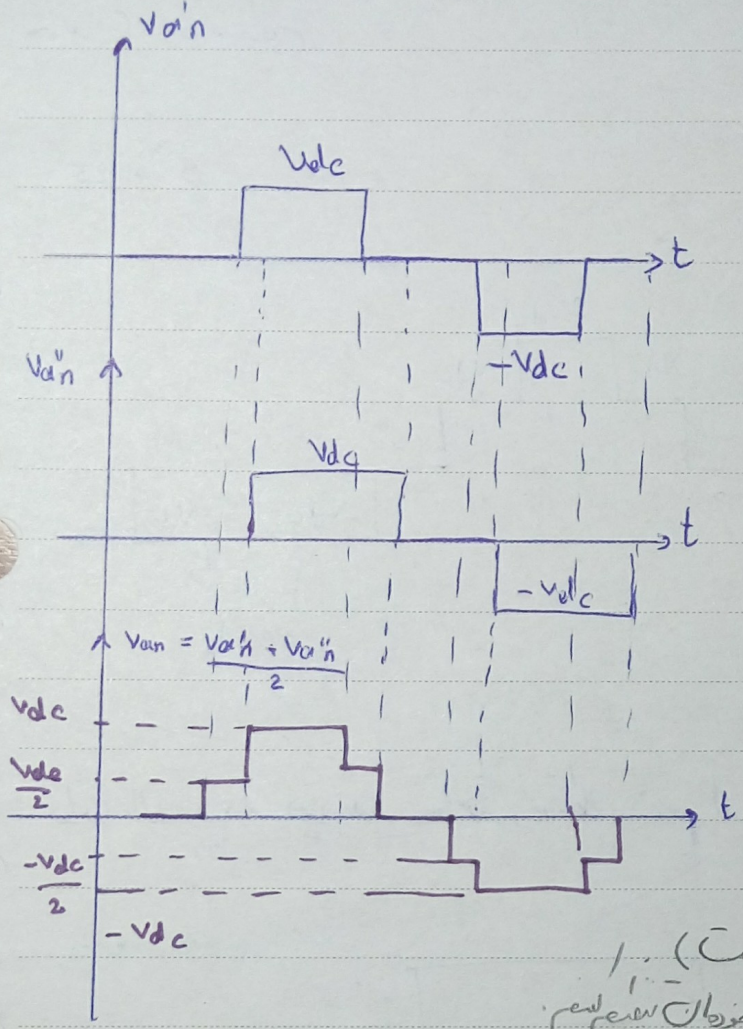


$V_{an} - V_{a'n} = V_{a''n} - V_{an}$ (نسبت بدل !)

$$V_{an} = \frac{V_{a'n} + V_{a''n}}{2}$$

POWEREN.IR

PowerEn.ir

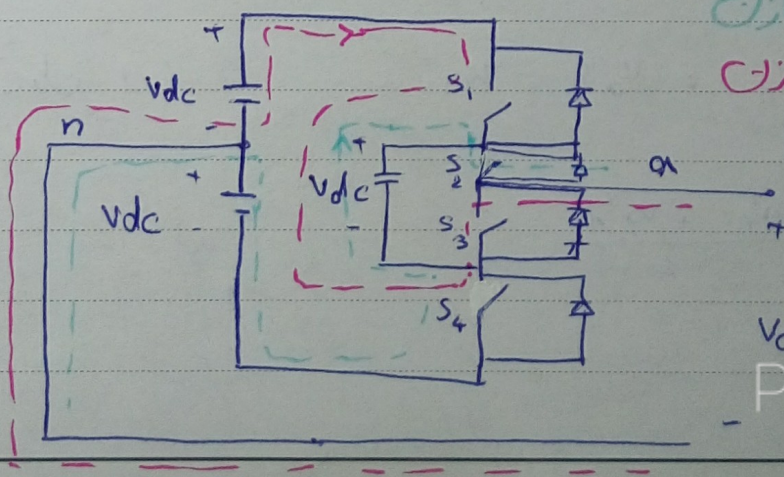


با تعداد clamping کمتر ← 5 سطح تولید میشود . (فاصله هر فاز با سطح است)
سعی را می توانیم جوری بسازیم

جلسه ی دهم ۹۷/۱/۲۰

Capacitor clamped

Three level



خازن شارژ ---
خازن شارژ ---

POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

1. S_1, S_2 : on ; S_3, S_4 : off — $V_{an} = V_{dc}$

S_1, S_4 باهم نمی توانند روشن شوند (حلقه خازنی).

2. S_3, S_4 : on ; S_1, S_2 : off — $V_{an} = -V_{dc}$

S_2, S_3 هم به دلیل اتصال کوتاه شدن خازن نمی توانند روشن شوند.

(S_1, S_4) (S_2, S_3)

همزمان نمی توانند روشن باشند

3. S_2, S_4 : on ; S_1, S_3 : off — $V_{an} = 0$

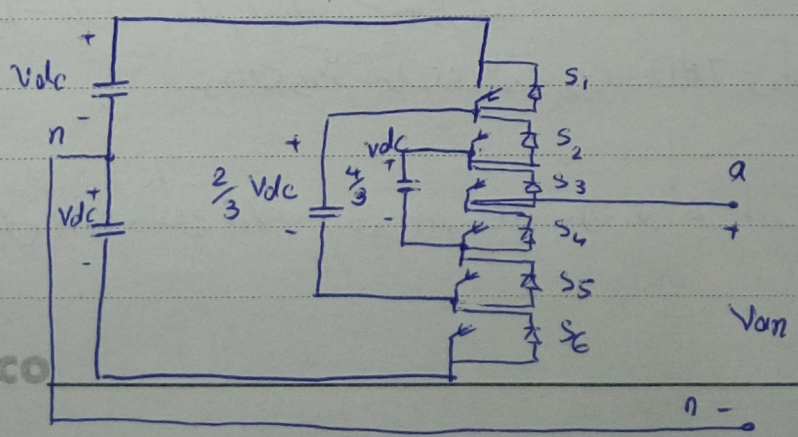
4. S_1, S_3 : on ; S_2, S_4 : off — $V_{an} = 0$

POWEREN.IR

دو حالت 3 و 4 که یک خروجی دارند برای حفظ تعادل خازن ها در اثر ولتاژ خازن هم شود، شارژ و دشارژ اضافه شده بود دشارژ را انتخاب می کنیم. (redundant)

$N = \frac{\text{تعداد سوئیچ ها}}{2}$

$N = \frac{6}{2} = 3$



POWEREN.IR
PAPCO

PowerEn.ir

8 حالت کلیدزنی $2^3 = 8$ (S_1, S_6) (S_5, S_2) (S_3, S_4)

(S_1, S_6)	(S_2, S_5)	(S_3, S_4)	V_{an}
1	1	1	V_{dc}
1	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$ *
1	0	1	$\frac{5}{3} V_{dc}$
1	0	0	$\frac{1}{3} V_{dc}$ * *
0	1	1	$-\frac{1}{3} V_{dc}$ *
0	1	0	$-\frac{5}{3} V_{dc}$
0	0	1	$\frac{1}{3} V_{dc}$ *
0	0	0	$-V_{dc}$

$\pm V_{dc}$, $\pm \frac{1}{3} V_{dc}$, $\pm \frac{5}{3} V_{dc}$

redundent * *

ولتاژ خازن ها را می‌توان هر چه انتخاب کرد، ممکن است تعداد حالات ها کاهش یابد.

نحوه ی یافتن ولتاژ از بیرون به داخل:

$k = 1, 2, \dots, N-1 \longrightarrow \frac{2 V_{dc}}{N} k$

مشکل بیشتر به شارژ نگه داشتن خازن ها

نوسان ولتاژ خازن ها تأثیر بدی THD و ولتاژ خروجی n .

در عمل اگر 3 سطحی بخواهیم همان diode clamp خوب است.

POWEREN.IR

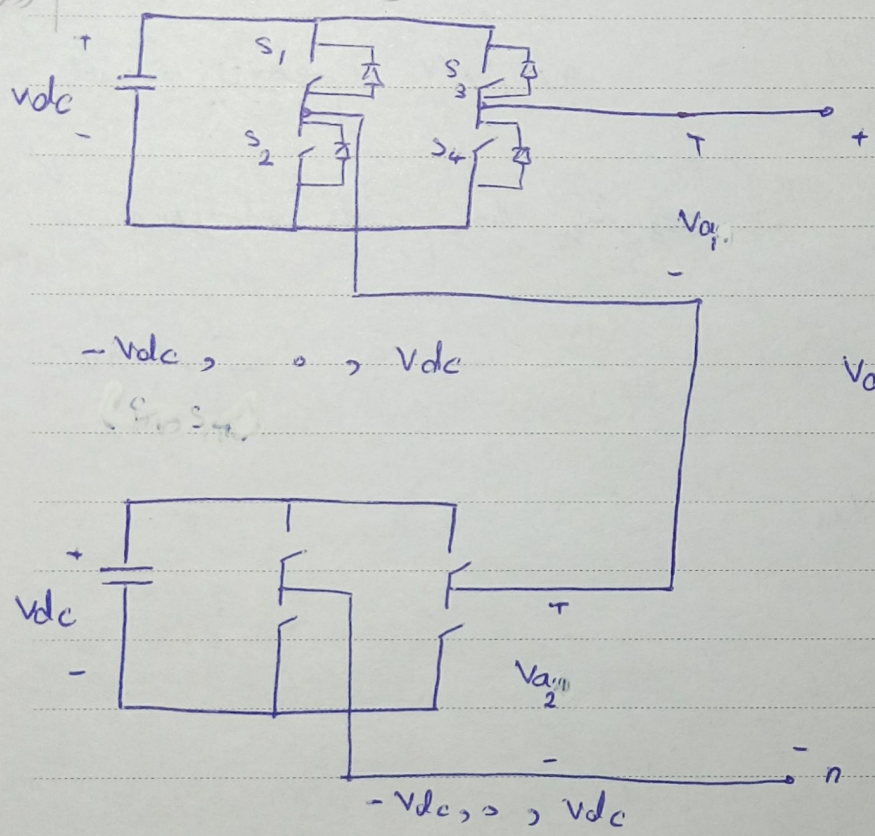
PowerEn.ir

Modular Multilevel Converters

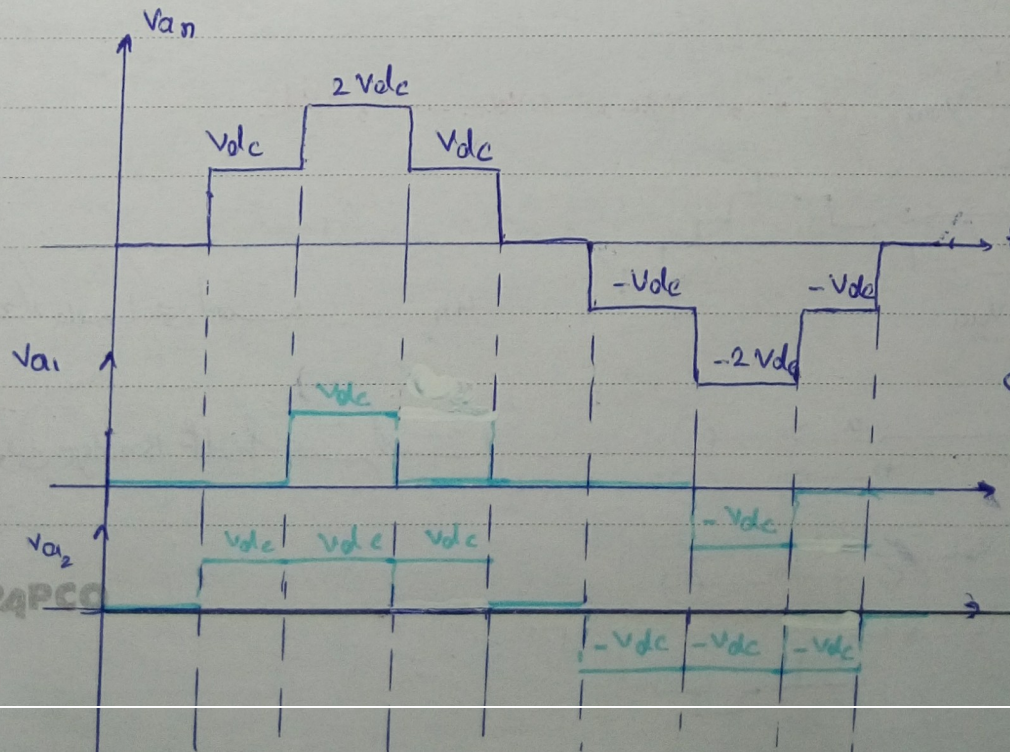
کاربرد HVDC

Full - Bridge

ترکیب دو یاک به صورت دنباله سلی



$V_{an} = V_{a1} + V_{a2}$



به طاقه کمترین تعداد کلیدزنی در این سلی دست کردیم

POWEREN.IR

PowerEn.ir

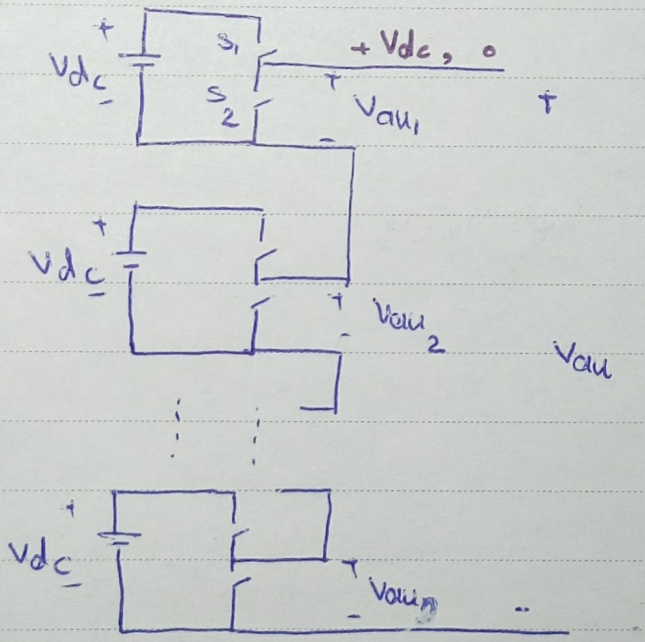
← در هر ماژول مرکانس مکندی یابی داریم اما مرکانس معادل بدست آمده متشکل از هر ماژول است ولی در عمل از این مرکانس مکندی استفاده نمی‌کنیم.

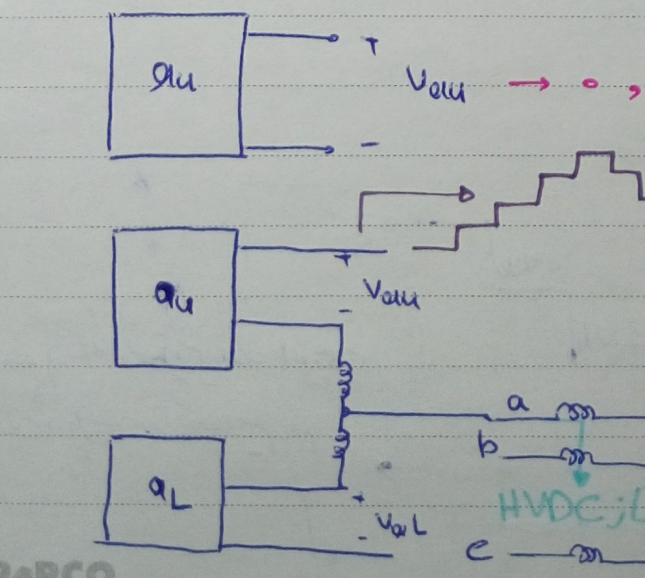
← هر چه تعداد ماژول ها بیشتر، مرکانس مکندی یابی تر داریم.

جلسه‌ی یازدهم ۹V ،۱،۲۷

اگر n سلول داشته باشیم، حداکثر ولتاژ خروجی

nV_{dc} است.





تعداد کلیدها $4n$ است.

ولی half bridge بهتر است.

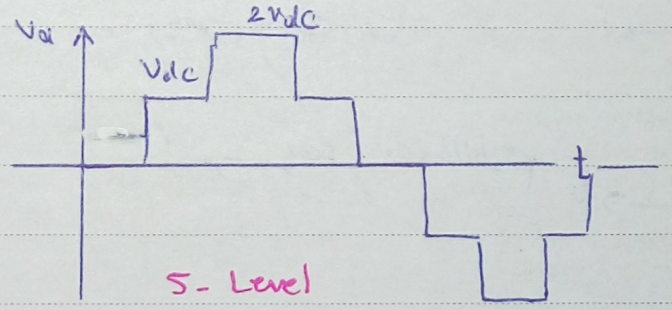
POWEREN.IR

PowerEn.ir

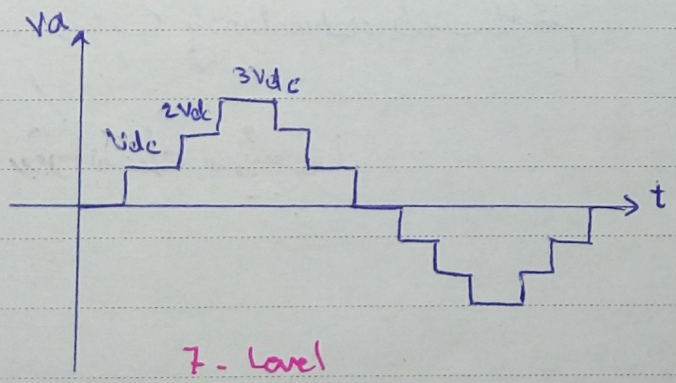
هم AC/DC و هم DC/AC کاربرد دارد.

منابع DC ورودی برابر باشند ← متقارن
نباشند ← نامتقارن

Symetrical (n=2 , Vdc , Vdc)

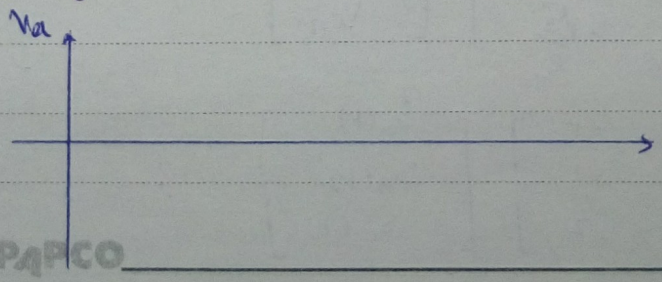


Asymmetrical (n=2 , Vdc, 2Vdc) Binary



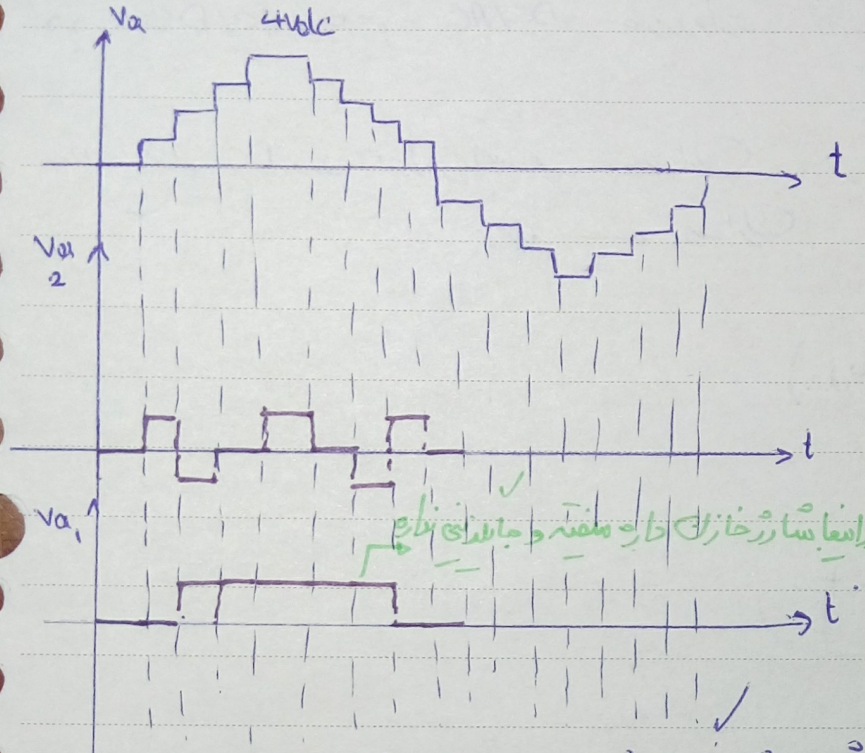
هرچه ولتاژ dc را افزایش دهیم، ماژول‌ها دیگر یکسان نیستند، از لحاظ تعمیر و نگهداری، ...

Asymmetrical (n=2, Vdc, 3Vdc) Trinary



POWEREN.IR

PowerEn.ir



← مزایای طبیعی پایین

← مزایای سوئیچینگ حدودی مالاطم

در اینجا شارژ خازن دارد تغذیه و جابجایی دارد

خیلی دقیق خازن را نمی‌توان روی مقدار مشخص شده داشت، این موارد مهم است در برنامه سازی.

باید حالت redundancy داشته باشیم.

روش کنترل سوئیچ‌ها

$(2^3)^n$

cell

n-Level

e.g. $n = 3$

این سه فاز باید چجوری بشه؟ هر پله ۳ حالت داره؟

SVM :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad 1$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a(t) \\ S_b(t) \\ S_c(t) \end{bmatrix} \quad 2$$

POWEREN.IR

PowerEn.ir

$$S_j(t) = \begin{cases} 0 \\ 1 \\ 2 \end{cases} \quad (\text{دلخواه}) \qquad j = a, b, c$$

خروجی‌های هر فاز است

$3^3 = 27$ حالت طبیعی

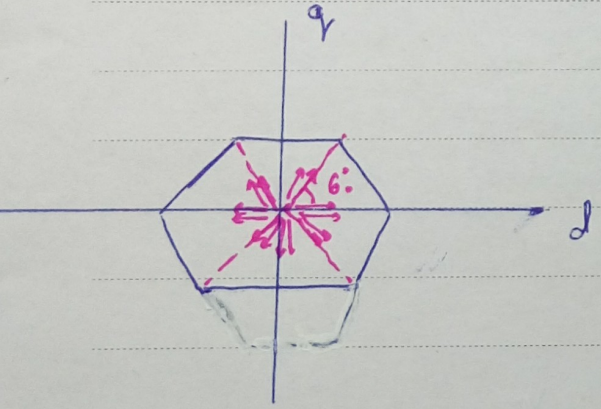
* Small Vectors (12 vectors)

e.g. a فاز b فاز c فاز

$1, 1, 0$ ($S_a(t)$, $S_b(t)$, $S_c(t)$)

$$\xrightarrow{1,2} \bar{V} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$|\bar{V}| = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}, \quad \angle \bar{V} = 60^\circ$$



در هر راستا 2 بردار، کلاً 12 بردار

* medium Vectors (6 Vectors)

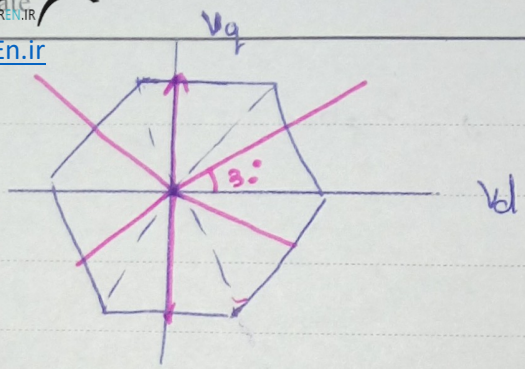
e.g. $2, 1, 0$

$$\xrightarrow{1,2} \bar{V} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$|\bar{V}| = \sqrt{2}\, V_{dc}, \quad \angle \bar{V} = 30^\circ$$

POWEREN.IR

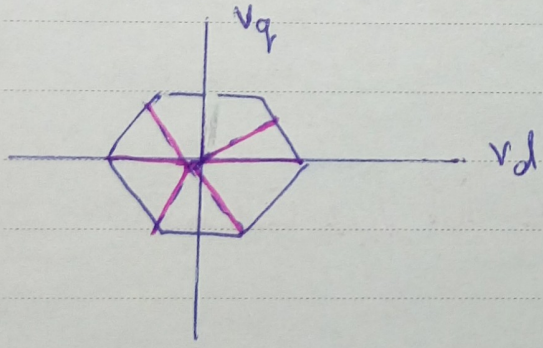
PowerEn.ir



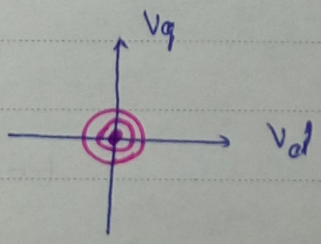
* Long Vectors (6 vectors)

eg. 2, 2, 0 $\xrightarrow{1,2}$ $\bar{v} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix}$

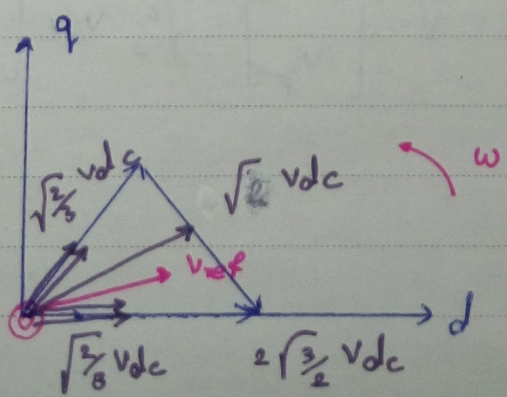
$|\bar{v}| = 2\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$, $\angle \bar{v} = 60°$



* 0, 0, 0
1, 1, 1 $\xrightarrow{1,2}$ $\bar{v} = 0$
2, 2, 2



جابه‌جایی دهانه‌ی ۲ و ۴V



POWEREN.IR

PowerEn.ir

$V_{refa} = V_m \cos \omega t$

$V_{refb} = V_m \cos(\omega t - 120^\circ)$

$V_{refc} = V_m \cos(\omega t + 120^\circ)$

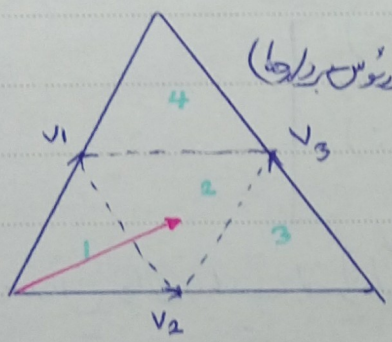
توان ثابت

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}_{ref} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{refa} \\ V_{refb} \\ V_{refc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix}$$

← هر دو بردار مستقل خطی تولید V_{ref} را ایجاد کرد.

باید سعی کنیم رأس بردار V_{ref} در داخل مثلث متساوی‌الاضلاع (مثلث ساخته شده از بردارها) حرکت کند.



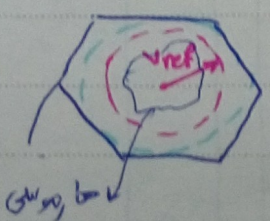
$$T V_{ref} = T_1 V_1 + T_2 V_2 + T_3 V_3$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3$$

روش زیاد است این یکی کمترین حالت است.

$|V_{ref}|$ ثابت و همان هندسه‌ای که در SVM داشتیم را داریم.

داریم:



حداکثر شعاع حلقه V_{ref} است $\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$

POWEREN.IR

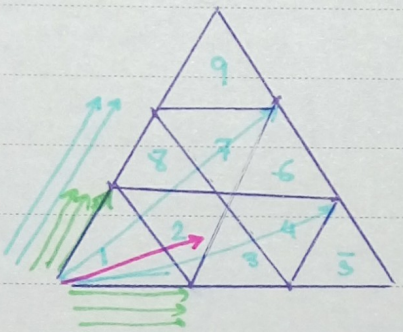
Subject
Date
POWEREN.IR
PowerEn.ir

در SPWM حداکثر ولتاژ تولیدی $\sqrt{2}\,V_{dc}$ است.

$$\frac{SVM_{max}}{SPWM_{max}} = \frac{2\sqrt{2}/3}{\sqrt{2}} = 1.1547$$

SVM از این جهت نسبت به SPWM برتری دارد. (15٪ بیشتر تولید می‌کند)

4 سطحی:



در اینجا resolution بالاتر و THD کمتر می‌شود

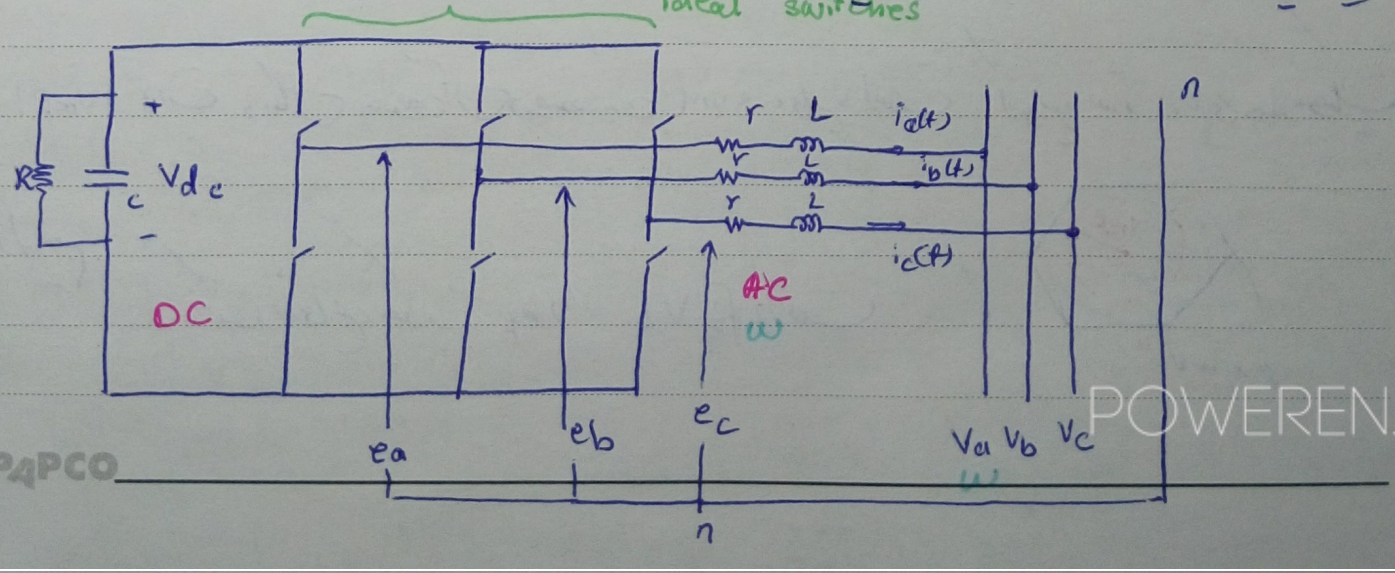
Modeling STATCOM in dq-plan transform

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

تبدیل پارک

این تبدیل زمانی قابلیت اجرا دارد که مدل‌های کوتاه برای ما مهم نباشد چون باید بلد باشیم

یک سیکل (20 ms) بلد باشد تا این تبدیل کامل شود. در حالت گذرا نمی‌شود این روش.



POWEREN.IR
P4PCO

PowerEn.ir

$$X(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ V_{dc}(t) \end{bmatrix}$$

متغیرهای حالت

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}$$

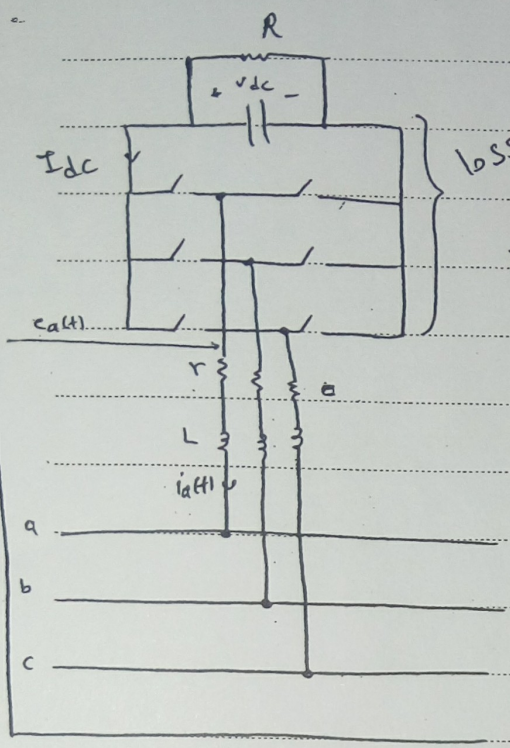
$$\left(\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a - V_a(t) \\ e_b - V_b(t) \\ e_c - V_c(t) \end{bmatrix} - \frac{r}{L} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \right) \times T$$

$$\frac{d}{dt} \left(T \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \right) = \underbrace{T \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}}_{\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}} + \underbrace{\frac{dT}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}}_{\begin{bmatrix} -\omega i_q \\ \omega i_d \end{bmatrix}}$$

$$\frac{dT}{dt} = \omega \begin{bmatrix} -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \\ \cos\omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \cancel{\frac{d}{dt}} \begin{bmatrix} -\omega i_q \\ \omega i_d \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d(t) - V_d(t) \\ e_q(t) - V_q(t) \end{bmatrix} - \frac{r}{L} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix}$$

POWEREN.IR
POWEREN.IR



AC , DC تلفات در بخش R ، r ، L

از تلفات سوئیچینگ صرف نظر شده است.

$$x(t) = \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ v_{dc}(t) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} e_a(t)-v_a(t) \\ e_b(t)-v_b(t) \\ e_c(t)-v_c(t) \end{bmatrix} - \frac{r}{L}\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}$$

اعمال تبدیل T

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega i_q(t) \\ \omega i_d(t) \end{bmatrix} =$$

(معادله حالت برحسب زمان)

$$\frac{1}{L}T\begin{bmatrix} e_a(t)-v_a(t) \\ e_b(t)-v_b(t) \\ e_c(t)-v_c(t) \end{bmatrix} - \frac{r}{L}\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix}$$

اختلاف فاز α ⟷ بزرگی کنترلی

$$\begin{cases} v_a(t) = V_m \cos(\omega t+\theta) \\ v_b(t) = V_m \cos(\omega t-120+\theta) \\ v_c(t) = V_m \cos(\omega t+120+\theta) \end{cases} , \quad \begin{cases} e_a(t) = KV_{dc}\cos(\omega t+\theta+\alpha) \\ e_b(t) = KV_{dc}\cos(\omega t-120+\theta+\alpha) \\ e_c(t) = KV_{dc}\cos(\omega t+120+\theta+\alpha) \end{cases}$$

maximum mginitude ($m=1$)

$$\frac{1}{L}T\begin{bmatrix} e_a(t)-v_a(t) \\ e_b(t)-v_b(t) \\ e_c(t)-v_c(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{L}T\begin{bmatrix} KV_{dc}\cos(\omega t+\theta+\alpha)-V_m\cos(\omega t+\theta) \\ \text{...} \quad +120 \quad \text{...} \quad +120 \\ \text{...} \quad -120 \quad \text{...} \quad -120 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{L}T\begin{bmatrix} \overbrace{(KV_{dc}\cos(\theta+\alpha)-V_m\cos\theta)}^{A}\cos\omega t - \overbrace{(KV_{dc}\sin(\theta+\alpha)-V_m\sin\theta)}^{B}\sin\omega t \\ A\cos(\omega t-120) \quad - \quad B\sin(\omega t-120) \\ A\cos(\omega t+120) \quad - \quad B\sin(\omega t+120) \end{bmatrix}$$

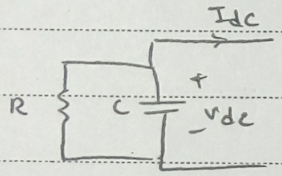
POWEREN.IR

PowerEn.ir

$$= \frac{1}{L}\begin{bmatrix} A\left(\underbrace{\cos^2\omega t + \cos^2(\omega t-120) + \cos^2(\omega t+120)}_{3/2} - B\left(\sin(\omega t)\cos(\omega t) + \sin(\omega t-120)\cos(\omega t-120) + \sin(\omega t+120)\cos(\omega t+120)\right)\right. \\ A\left(\sin(\omega t)\cos(\omega t) + \sin(\omega t-120)\cos(\omega t-120) + \sin(\omega t+120)\cos(\omega t+120)\right) - B\left(\underbrace{\sin^2(\omega t) + \sin^2(\omega t-120) + \sin^2(\omega t+120)}_{3/2}\right) \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{L}\begin{bmatrix} 3/2\,A \\ -3/2\,B \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{-r}{L}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega\begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{3}{2L}\begin{bmatrix} kV_{dc}\cos(\theta+\alpha) - V_m\cos(\theta) \\ -kV_{dc}\sin(\theta+\alpha) + V_m\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (I)$$



خروجی DC :

$$C\frac{dV_{dc}(t)}{dt} + \frac{V_{dc}(t)}{R} + I_{dc}(t) = 0$$

$$P_{dc} = V_{dc}(t)\,I_{dc}(t)$$

e

با توجه به اینکه مبدل تلفات ندارد، داریم:

$$P_{dc} = e_d(t)\,i_d(t) + e_q(t)\,i_q(t)$$

$e_d(t) = \frac{3}{2}kV_{dc}\cos(\theta+\alpha)$, $e_q(t) = -3/2\,kV_{dc}\sin(\theta+\alpha)$

$$\rightarrow I_{dc}(t) = \frac{3}{2}k\cos(\theta+\alpha)\,i_d(t) - \frac{3}{2}k\sin(\theta+\alpha)\,i_q(t)$$

$$\rightarrow \frac{d}{dt}V_{dc}(t) = \frac{-V_{dc}(t)}{RL} - \frac{3}{2}k\cos(\theta+\alpha)\,i_d(t) + \frac{3}{2}k\sin(\theta+\alpha)\,i_q(t) \quad (II)$$

معادلات (I) و (II) ← مشتق متغیرهای حالت / بنابراین می‌نویسیم:

P4PCO
POWEREN.IR
POWEREN.IR

Subject
Date
POWEREN.IR
PowerEn.ir

ورودی اختیاری (برای اغتشاش)

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ v_{dc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{L} & \omega & \frac{3}{2L}K\cos(\alpha+\theta) \\ -\omega & \frac{-r}{L} & -\frac{3}{2}K\sin(\theta+\alpha) \\ -\frac{3}{2C}K\cos(\theta+\alpha) & \frac{3}{2C}K\sin(\theta+\alpha) & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ v_{dc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-3}{2L}V_m\cos(\theta) \\ \frac{3}{2L}V_m\sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

معادلات حالت غیرخطی است. (بر حسب پارامتر α) ($\sqrt{\frac{2}{3}}$ برای تعادل توان حتماً استفاده شود)

برای این که بتوان این روابط را تعمیم داد، مختص حالت خاصی نباشد، از پریونیت استفاده می‌شود.

$$V_{base}, i_{base}, Z_{base} \rightarrow r' = \frac{r}{Z_{base}}, \quad L' = \frac{L\omega}{Z_{base}}, \quad C' = \frac{1/C\omega}{Z_{base}}, \quad R' = \frac{R}{Z_{base}}$$

برای جمله اول پریونیت به عنوان نمونه بیان می‌شود:

$$\frac{d}{dt}\frac{i_d}{i_{base}} = \frac{-r}{L}\cdot\frac{i_d(t)}{i_{base}} + \omega\frac{i_q(t)}{i_{base}} + \frac{3}{2L}K\cos(\theta+\alpha)\frac{v_{dc}}{i_{base}} - \frac{3}{2L}V_m\cos\theta\frac{1}{i_{base}}$$

($r \to r'Z_{base}$, $\frac{L}{\omega} \to \frac{L'Z_{base}}{\omega}$, $v_{dc} \to \frac{v_{dc}}{V_{base}}$, $V_m \to \frac{V_m}{V_{base}}$)

$$\frac{d}{dt}i'_d = -\frac{r'}{L'}\omega i'_d(t) + i'_q(t) + \frac{3\omega K}{2L'}\cos(\theta+\alpha)v'_{dc}(t) - \frac{3\omega}{2L'}V'_m\cos\theta$$

$$\rightarrow \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i'_d(t) \\ i'_q(t) \\ v'_{dc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r'}{L'}\omega & \omega & \frac{3\omega}{2L'}K\cos(\theta+\alpha) \\ -\omega & -\frac{r'}{L'}\omega & -\frac{3\omega}{2L'}K\sin(\theta+\alpha) \\ -\frac{3}{2}C'\omega K\cos(\omega t) & \frac{3}{2}C'\omega K\sin(\theta+\alpha) & -\frac{C'\omega}{R'} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i'_d(t) \\ i'_q(t) \\ v'_{dc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3\omega}{2L'}V'_m\cos\theta \\ \frac{3\omega}{2L'}V'_m\sin\theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

PAPCO
POWEREN.IR

Subject 97.2.8
Date
PowerEn.ir

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i'_d(t) \\ i'_q(t) \\ v'_{dc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r'}{L'}w & w & \frac{3kw}{2L'}\cos(\theta+\alpha) \\ -w & -\frac{r'}{L'}w & \frac{3kw}{2L'}\sin(\theta+\alpha) \\ -\frac{3}{2}kc'w\cos(\theta+\alpha) & -\frac{3}{2}kc'w\sin(\theta+\alpha) & -\frac{c'w}{R'} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i'_d(t) \\ i'_q(t) \\ v'_{dc}(t) \end{bmatrix} - \frac{3w}{2L}\begin{bmatrix} v'_m\cos\theta \\ v'_m\sin\theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

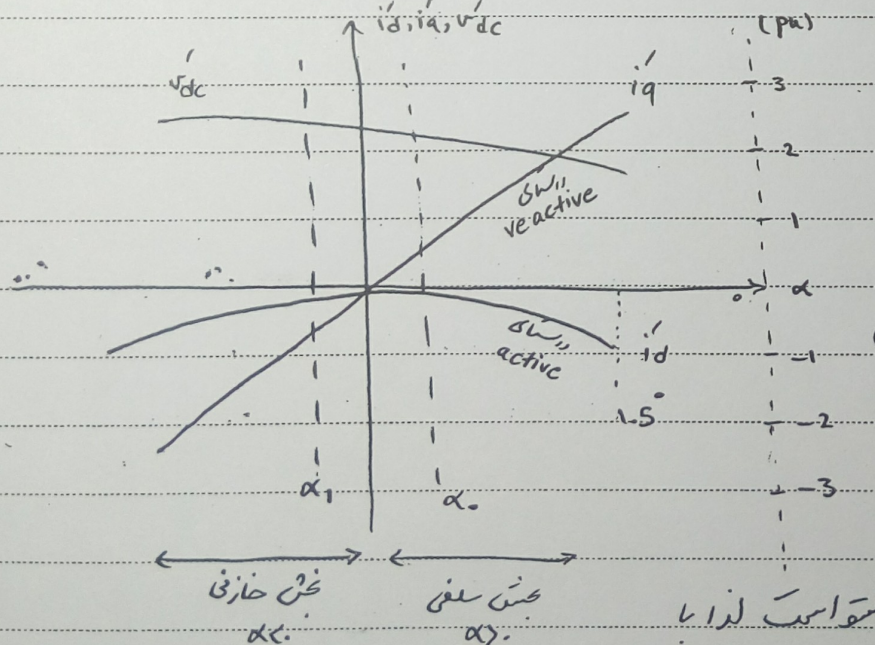
$$\dot{x} = f(x,u) + \dots$$

↳ تابعی از تغییرات α

$\alpha = \alpha_0 \xrightarrow{\text{معادلات}\ ①} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \\ v'_{dc} \end{bmatrix}_{\alpha=\alpha_0}$ $\quad$ $\alpha = \alpha_1 \xrightarrow{\text{معادلات}\ ①} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \\ v'_{dc} \end{bmatrix}_{\alpha=\alpha_1}$ $\rightarrow$ بدست آوردن پاسخ ها

در حالت دائمی.

✓ برای نقاط مختلف تغییرات پارامتر کنترلی (α)، پاسخ های حالت دائمی را بدین ترتیب بدست می آوریم.



در فاصله تغییرات خطی کم α،

مثلاً از (-1.5) تا (1.5) درجه،

حدود ۲ تا ۳ پریونیت در راستای q (راکتیو)

تغییرات بدست میاریم.

هدف در این جبران کننده، تزریق توان راکتیو است لذا با

تغییرات خطی کوچک α، می توانیم ۲ تا ۳ پریونیت در حدودی توان راکتیو به شبکه متصل و یا جذب کنیم.

POWEREN.IR

Subject
Date
POWEREN.IR
PowerEn.ir

✓ با کنترل تغییرات α از یک بازه منفی تا مثبت ، می‌توانیم هم شرایط سلفی و هم خازنی ایجاد کنیم.

✓ بخش مربوط به active ، خنثی کوچک است زیرا هدف جایی راکتو است و منفی برایم در بخش dc به کار خواهد آمد تا خنثی شود و فقط یک خازن دارم. این میزان کم به دلیل مقاومت حلبی است نه در مدل در نظر گرفته‌ام

(تلفات مدل) و به معنای مطرح است. (تلفات کوچک مورد نظر است و چون بیشتر از این است)

✓ مدل ما عامل توکید توان راکتو نیست و عامل توکید توان راکتو است.

✓ $\frac{dv}{dt}$ در بخش سلفی کمتر از بخش خازنی است. بنابراین $iq<0$ به معنای تولید توان راکتو است نه

در عمل بسیگی اختلاف فاز π یا $-\pi$ می‌باشد.

✓ عموما مدل ، تغییرات $\frac{dv}{dt}$ ... نسبت و به حالت گذرا ربطی ندارد و نقاط حالت دائمی است (نقطه کار است)

(در واقع از کنار هم قرار گرفتن نقاط کار حالت دائمی است به ایجاد می‌شود)

✓ یعنی اگر بخواهیم از نقطه کار α_0 به α_1 برویم ، مثلا α_0 تا α_1 طی می‌شود تغییرات لزومی وجود دارد به دیده می‌شود

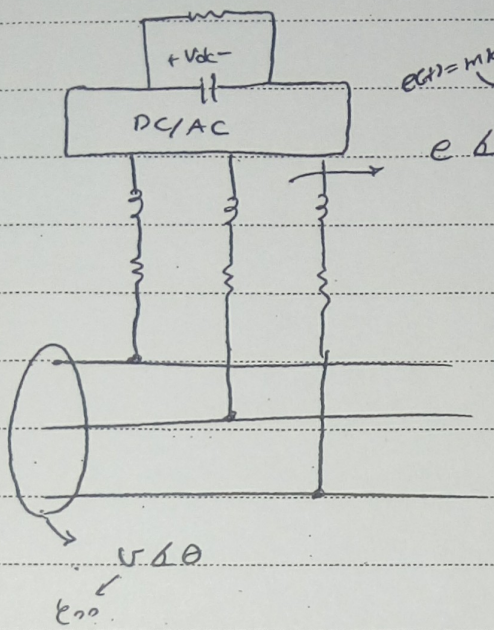
✓ در فاصله‌های تغییرات α ، $\frac{dv}{dt}$ ... تغییرات خطی تقریبا دارند به به ما کمک می‌کند شرایط لزوم خطی را حفظ کنیم.

همانست نسبت به تغییرات α خنثی بالاست مثلا در ۳ درصد ، می‌خواهیم ± 3 تغییر ایجاد کنیم. mvar

POWEREN.IR

Subject
Date
PowerEn.ir

(اختلاف بین جوشی مدل و شبکه ← α)



آی بخواهیم جریان فقط راکتیو باشد باید هم باز باشد

هم باید عکس باشد یعنی تا e هم راستا باشد و چون

α زاویه کوچکی است ← اکثریت جریان راکتیو است.

چون α کوچک است، سبب می‌شود که صدا تلفات را حل کنیم

و بیشتر جریان راکتیو است. اختلاف فاز بین e و V تقریباً صفر است.

در این مدل، ما به اختلاف فاز اهمیت داده و با آن کنترل می‌کنیم، ممکن است به جای آن از ضریب اندازه

و تکنیک (modulation index) استفاده کنیم.

اگر $\alpha = 0$ و مدل فقط دیودی بود ← ولتاژ DC حوالی تا $E_{max} = 5.6$ شارژ می‌شد. "کاها" دیود می‌شد به ولتاژ

طرف ضعیف 4_{00} است و ولتاژ خازن 8_{00} (ضعیف) است! $4_{00} \rightarrow 8_{00}$ ؟ باید اختلاف فاز را طوری

تنظیم کند که بتواند مدتها انرژی (توان اکتیو) از شبکه جذب کند و به محض افت ولتاژ از 8_{00} دوباره جذب کند. در واقع مدل

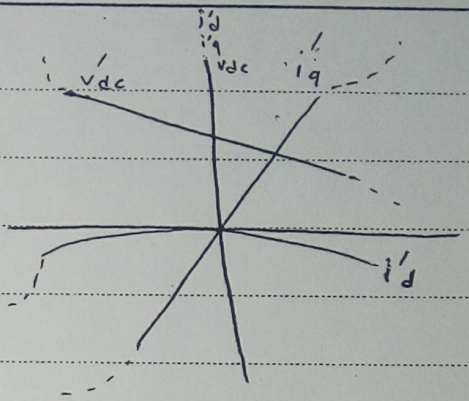
نقش اساسی در هدف ما دارد. مثلاً هدف این است که V_{dc} بالا بود ← افزایش e (α KVdc).

آخر هم دیتم و مؤلفه صفر ← باید با آن کنترلی (اندازه) هم لحاظ کرد.

POWEREN.IR

Subject
POWEREN.IR
Date 97.2.10
PowerEn.ir

$$X = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} \quad \dot{X} = M(\alpha)X + B(\alpha)V$$



معادلات غیرخطی ← محاسبه و ره حل احتیاج نیست
بنابراین با خطی سازی می‌توان به حرف رسید

"u" → $\begin{cases} \dot{x} = f(x,u) \\ y = h(x,u) \end{cases}$ x^*, u^* نقطه کار

روابط لازم برای خطی سازی

$$\begin{cases} \Delta x = x - x^* \\ \Delta y = y - y^* = y - h(x^*,u^*) \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta \dot{y} = C\Delta x + D\Delta u \\ \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \end{cases}$$

$$A = \left[\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}\right]_{x^*,u^*} \quad B = \left[\frac{\partial f(x,u)}{\partial u}\right]_{x^*,u^*}$$

$$C = \left[\frac{\partial h(x,u)}{\partial x}\right]_{x^*,u^*} \quad D = \left[\frac{\partial h(x,u)}{\partial u}\right]_{x^*,u^*}$$

فرض شود می خواهیم خطی سازی کنیم:

$$\begin{cases} \dot{X} = M(\alpha)X + B(\alpha)V \\ y = X \end{cases}$$

$$A = \left[\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}\right]_{x^*,u^*} = \left[M(\alpha)\right]_{u^*=\alpha^*} = M(\alpha^*)$$

$$B = \left[\frac{\partial f(x,u)}{\partial u}\right]_{x^*,u^*} = \dots$$

P4PCO
POWEREN.IR

Subject
Date
PowerEn.ir

$$C = \left[\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}\right]_{x^*,u^*} = 1 \quad , \quad D = \left[\frac{\partial h(x,u)}{\partial u}\right]_{x^*,u^*} = 0$$

ماتریس A ، مقدار کمیته است و تابعی از پارامترهای دیگر سیستم نیز است، بنابراین خطی سازی صورت گرفته است.

$$\det\left(\lambda I - M(\alpha^*)\right) = 0$$

$$M(\alpha^*) = \begin{bmatrix} \frac{-r'}{L'}\omega & \omega & \frac{3}{2}\frac{wk}{L'}\cos(\alpha^*+\theta) \\ -\omega & \frac{-r'}{L'}\omega & \frac{-3}{2}\frac{wk}{L'}\sin(\alpha^*+\theta) \\ \frac{-3}{2}kwc'\cos(\alpha^*+\theta) & \frac{-3}{2}kwc'\sin(\alpha^*+\theta) & \frac{-c'}{R'}\omega \end{bmatrix}$$

$$\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0$$

$$a_1 = \frac{2r'w}{L'} + \frac{wc'}{R'}$$

$$a_2 = \frac{r'w}{L'}\left(\frac{r'w}{L'} + \frac{2wc'}{R'}\right) + w^2 + \frac{3}{2}\frac{k^2w^2c'}{L'}$$

$$a_3 = \frac{w^3c'}{R'}\left(1 + \frac{r'^2}{L'^2}\right) + \frac{3}{2}\frac{k^2w^3c'r'}{L'^2}$$

تابعی از α^* (نقطه کار) نیست.

بنابراین مقادیر ویژه λ_1 ، λ_2 ، λ_3 تابعی از α^* نیستند و با تغییر α^* ، تغییری نمی کنند. بنابراین در تمامی نقاط کار، پایداری سیستم (به شرطی که خطی سازی صورت گیرد) و مقادیر ویژه هم پایدار باشد.

STATCOM

هر سیستمی را می توان خطی کرد ولی در اینجا صدای سیستم به خطی می شود و مقادیر ویژه هم تابعی به نقاط کار ندارند.

POWEREN.IR

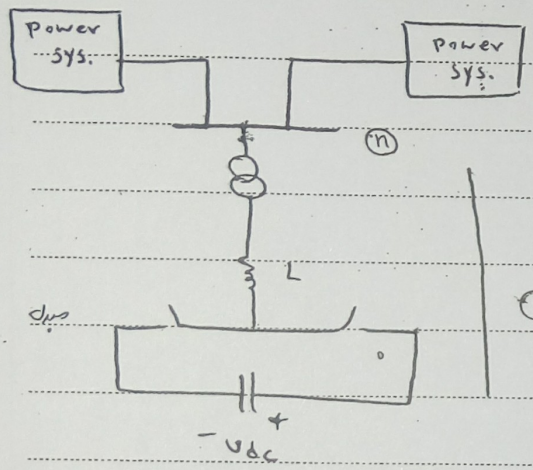
فیزیک حالت :

Ex. $\frac{Lw}{z_{base}} = L' = 0.15^{p.u.}$, $r' = 0.01^{p.u.}$

$C' = 0.88^{p.u.}$, $R' = \frac{400}{\pi}$, $k = \frac{4}{\pi}$, $\omega = 120\pi$

$\rightarrow a_1, a_2, a_3 = \ldots \rightarrow \lambda_1 = -23.8 \quad \lambda_{2,3} = -15.4 \mp j\,1473$

② $\rightarrow X(w, \delta)$



① $Y\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{pmatrix}$

① خود مدل ، STATCOM ، یک سری معادلات حالت دارد.

② تقریبا نیز معادلات حالت خودرا دارد ، روابط حوزی

③ (بخش بار) نیز در تجمع بصورت ایستا است.

③ $z(|v|, \delta)$

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, z) \\ \dot{y} = g(y, z) \rightarrow \text{بین مدل تجمع شده} \\ h(x, y, z) = 0 \end{cases}$$

POWEREN.IR
POWEREN.IR

PowerEn.ir

Subject

Date 97.2.15

۳ دسته متغیر حالت در نظر:

X (Generators (δ, ω))

Y (STATCOM)

Z Voltages (phase & magnitude)

$\dot{X} = f(x,z)$ $\quad \dot{y} = g(y,z)$ $\quad o = h(x,y,z)$

خطی سازی معادلات حالت در نقطه کار:

STATC. یک STATC. دو

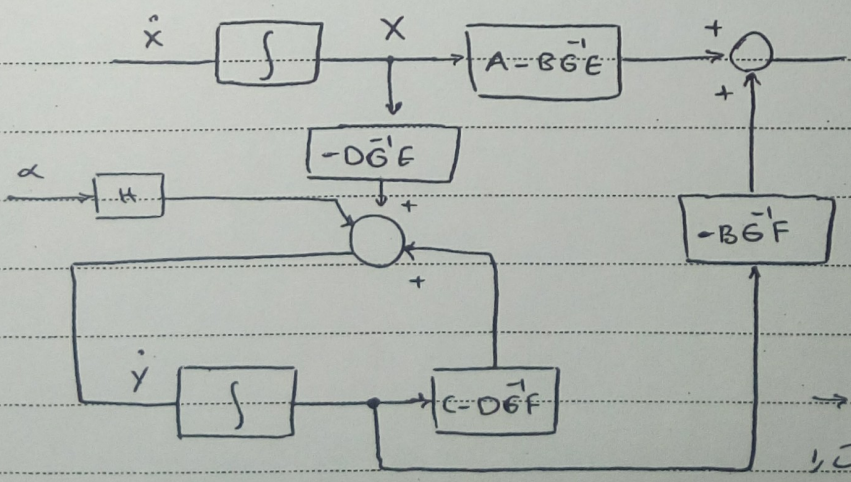
$\alpha = \alpha_1$, $\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2]$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & o & B \\ o & C & D \\ E & F & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o \\ H \\ o \end{bmatrix} \alpha$$

$$Ex + Fy + Gz = o \rightarrow z = -\bar{G}(Ex + Fy)$$

کاهش مرتبه دینامیک:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - B\bar{G}E & -B\bar{G}F \\ -D\bar{G}E & C - D\bar{G}F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o \\ H \end{bmatrix} \alpha$$



→ open loop

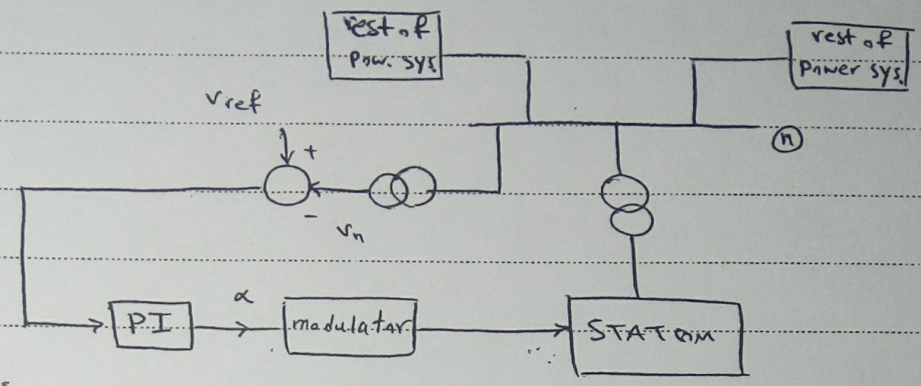
فقط معادلات حالت را

نشان می دهد.

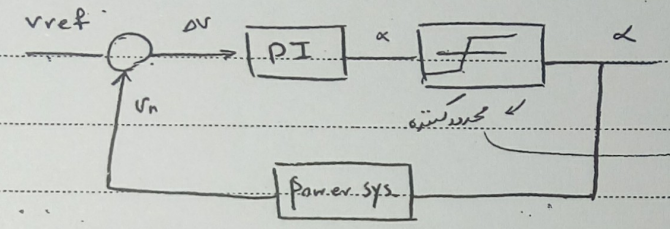
POWEREN.IR

P4PCO

Subject
Date
POWEREN.IR
PowerEn.ir

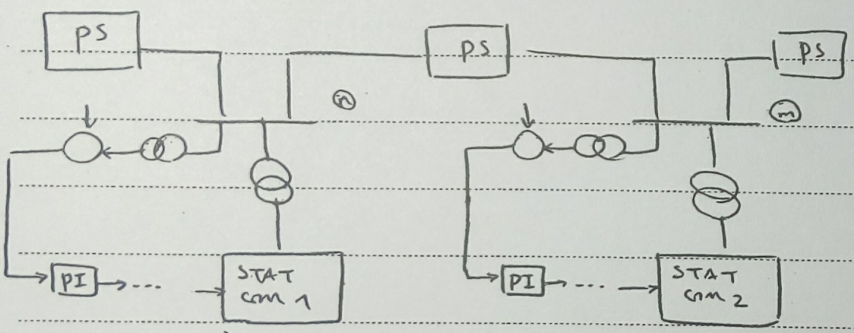


۱. ورودی حدی PI با هم متناسب
درشته باشند.
۲. محدوده عملکرد مشخص باشد.



چون رابطه خطی با
ایجاد کردیم، PI بر حسب عل
خواهد کرد.

با فرض ۲ STATCOM داریم:



97.2.17

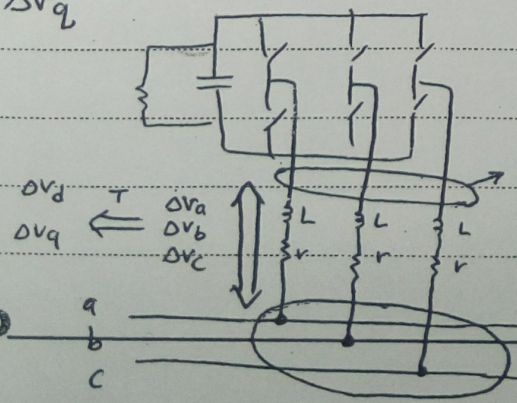
$$L\frac{di_d}{dt} + Ri_d = L\omega i_q + K\cos(\theta+\alpha)V_{dc} - V_m\cos\theta$$

ΔV_d

ست ΔV_d با ωi_q مناسب،
که در راستای i_d است.

$$L\frac{di_q}{dt} + Ri_q = -L\omega i_d + K\sin(\theta+\alpha)V_{dc} - V_m\sin\theta$$

ΔV_q



$$\begin{cases} e_d = v_d + \Delta v_d \\ e_q = v_q + \Delta v_q \end{cases}$$

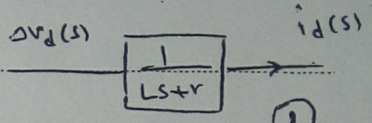
PAPCO

POWEREN.IR

۵۳

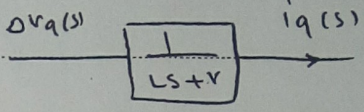
Subject
Date
PowerEn.ir

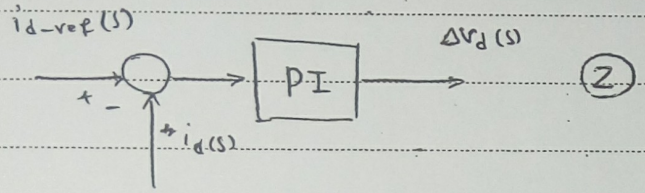
$$\Delta v_d(s) = (Ls+r)\, i_d(s) \rightarrow i_d(s) = \frac{\Delta v_d(s)}{Ls+r}$$



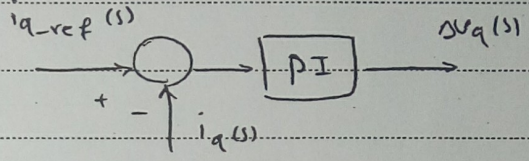
(1)

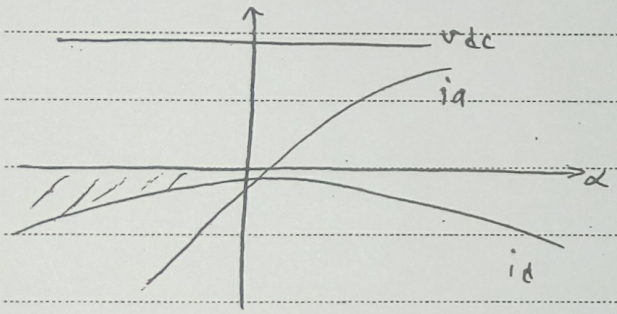
$$\Delta v_q(s) = (Ls+r)\, i_q(s) \rightarrow i_q(s) = \frac{\Delta v_q(s)}{Ls+r}$$

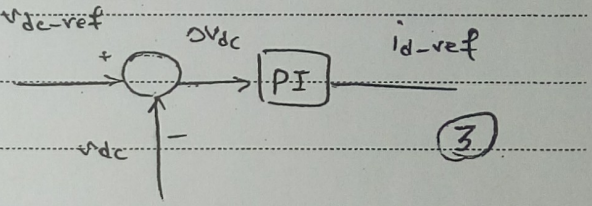




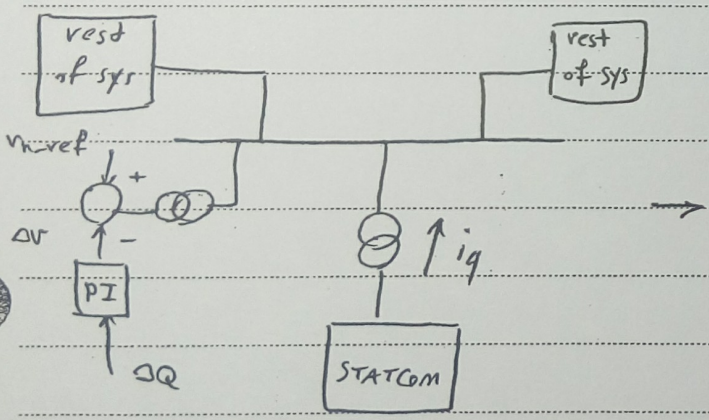
(2)

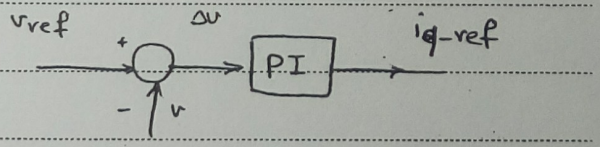






(3)





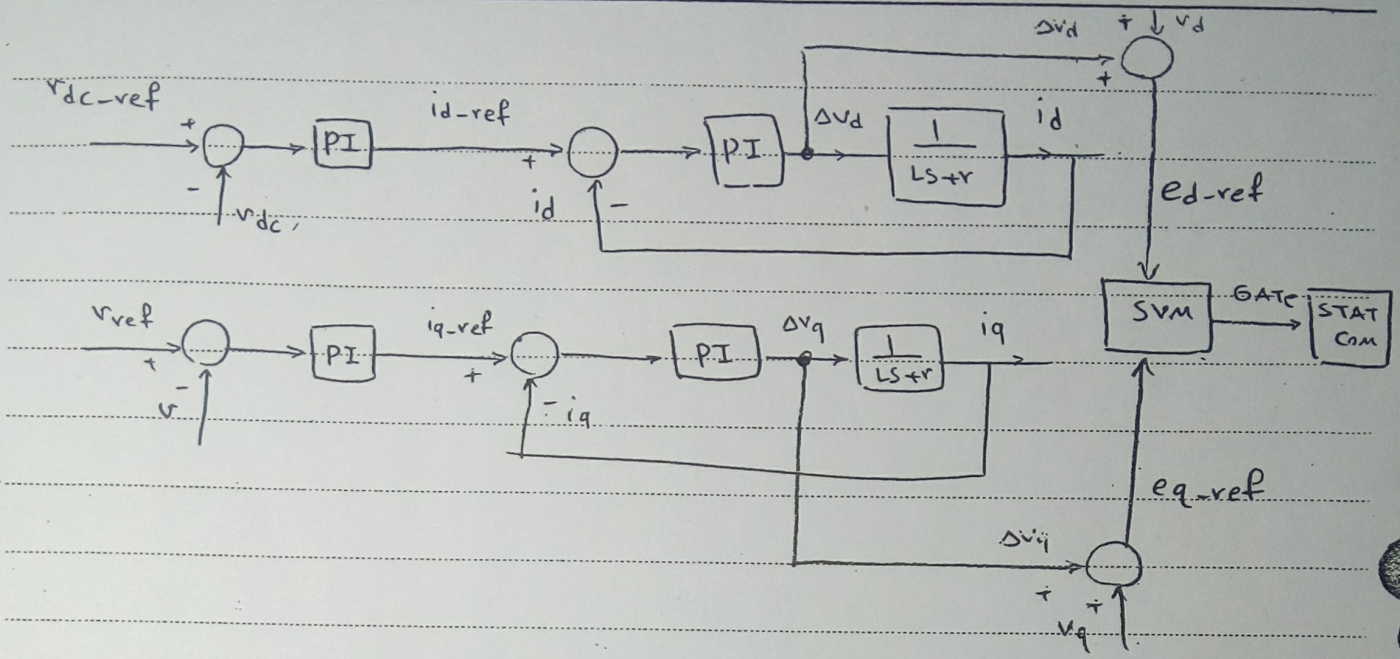
(4)

(۱)، (۲)، (۳) از مدل جبران ساز ذیست آمده است ولی (۴) از ارتباط با شبکه.

سازگاری در نظر داریم:

PAPCO
POWEREN.IR

Subject
Date
PowerEn.ir

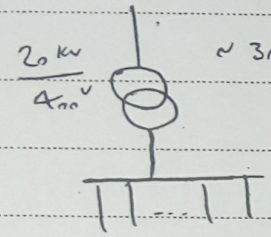


POWEREN.IR

Subject
Date
PowerEn.ir

Modelling → Control

↳ Designing a controller ✓



S_{sc} → سطح اتصال کوتاه

(تقریباً حدود توان پیت است)

(مثلاً حدود 4-5 MVA است)

۱۰ تا ۱۲ فیدر

POWEREN.IR

POWEREN.IR

PowerEn.ir

Subject

Date 97.2.28

$\Delta V = \Delta V_R + j\cancel{\Delta V_X} \simeq \Delta V_R$ ← برای شبکه $\frac{X}{R}$

خصوصیات زیر را در نظر می گیریم:

۱. $\frac{X}{R}$ (big) → $\Delta P \rightarrow \Delta V$: ΔP تأثیری روی ΔQ ندارد.

۲. current unbalance → ΔQ ✓ نامتعادلی تأثیری روی ΔQ ندارد، ΔQ از حالت متعادلی تشأت می گیرد.

✓ استاندارد IEC برای تغییرات ولتاژ مطابق بوده است ←

IEC : [-2.5% , 2.5%] normal

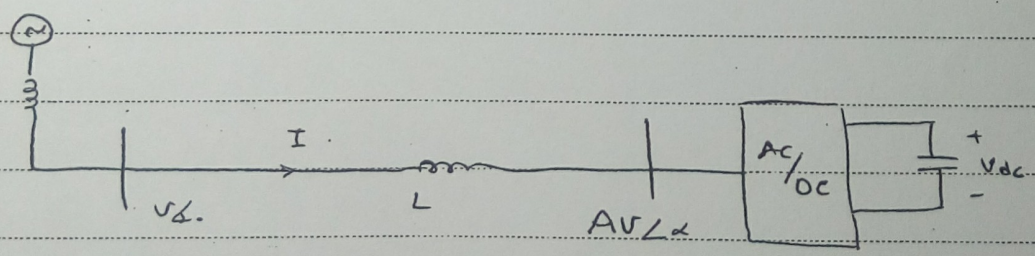
[-10% , 5%] abnormal

خازنی / سلفی

بنابراین با 7.5% جبران سازی ولتاژ می توان از حالت غیر نرمال به نرمال رسید.

$\Delta Q_{required} \simeq S_{sc} * 7.5\%$ e.g. $S_{sc} = 5$ MVA

$\Delta Q_{required} = \frac{5000 \times 7.5}{100} = 375$ KVAr



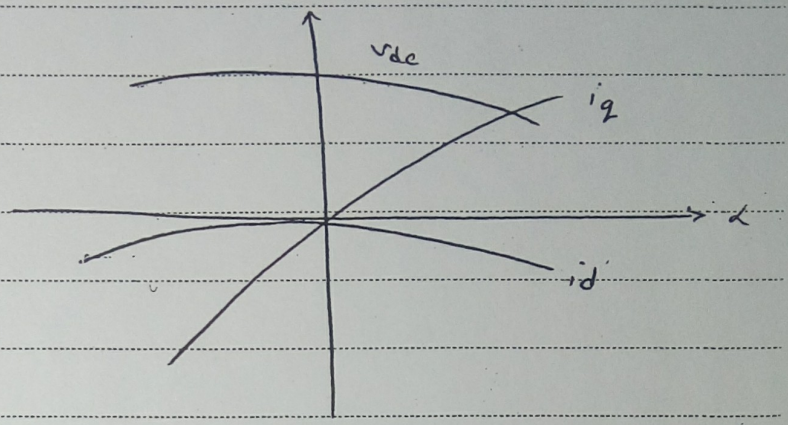
$I = \frac{V\angle 0 - AV\angle\alpha}{j\omega L}$ $\quad P + jQ = VI^* = \frac{V^2 - AV^2\angle -\alpha}{-j\omega L}$

POWEREN.IR

P4PCO

Subject
Date
PowerEn.ir

$$\begin{cases} P = -\dfrac{AV^2}{\omega L}\sin\alpha \\ Q = \dfrac{V^2}{\omega L}(1 - A\cos\alpha) \end{cases}$$



$\alpha \in [-\alpha_c, \alpha_L]$

$\begin{cases} 0 < \alpha < \alpha_L & \text{inductive} \\ -\alpha_c < \alpha < 0 & \text{capacitive} \end{cases}$

1) inductive $\alpha < \alpha_L$ $\quad Q > 0 \ (i_q > 0)$ $\quad P < 0 \ (i_d < 0)$ (توان ثابت)

$$P = -\frac{A_{min} V^2}{\omega L}\sin\alpha_L \qquad A_{min} < A < 1$$

$$Q = \frac{V^2}{\omega L}(1 - A_{min}\cos\alpha_L)$$

$$\frac{-P}{Q} = \frac{A_{min}\sin\alpha_L}{1 - A_{min}\cos\alpha_L} > 0 \qquad \text{فرض: } \frac{-P}{Q} = \tan(\gamma)$$

$$\frac{-P}{Q A_{min}} = \sin\alpha_L - \underbrace{\frac{P}{Q}}_{\tan\gamma}\cos\alpha_L = \frac{\sin(\alpha_L + \gamma)}{\cos\gamma}$$

تفاوت (تفاوت استوجب شده از شبکه برای تبدیل)

$$\sin(\alpha_L + \gamma) = \frac{-P}{Q A_{min}}\cos\gamma$$

$$\therefore \alpha_L = \sin^{-1}\left[\frac{-P}{Q A_{min}}\cos\gamma\right] - \gamma$$

ابتدا حاصل شود ← ملاحظات کلاسی

بر حسب P و Q

$$= \sin^{-1}\left[\frac{-P}{\sqrt{P^2+Q^2}\, A_{min}}\right] - \gamma$$

$$L = \frac{A_{min} V^2}{\omega P}\sin\alpha_L$$

P4PCO
POWEREN.IR
POWEREN.IR

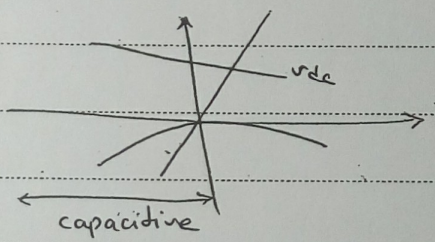
PowerEn.ir

1. Inductive $(\alpha_L > 0, P < 0, Q > 0)$ $\quad A \in [A_{min}, 1]$

$$\alpha_L = -\gamma + \sin^{-1}\left[\frac{-P}{\sqrt{P^2+Q^2}\, A_{min}}\right]$$

$$\begin{cases} P = \dfrac{-A_{min} V^2}{\omega L} \sin(\alpha_L) \qquad \gamma = \tan^{-1}\left[\dfrac{-P}{Q}\right] \\ Q = \dfrac{V^2}{\omega L}\left(1 - A_{min}\cos(\alpha_L)\right) \qquad \text{or } L_1 = \dfrac{-A_{min} V^2}{\omega P}\sin(\alpha_L) \end{cases}$$

2. capacitive $(\alpha_L < 0, P < 0, Q < 0)$ $\quad A \in [1, A_{max}]$



$$\begin{cases} P = \dfrac{A_{max} V^2}{\omega L} \sin(\alpha_C) \\ Q = \dfrac{V^2}{\omega L}\left(1 - A_{max}\cos(\alpha_C)\right) \end{cases}$$

$$\frac{P}{Q} = \frac{A_{max}\sin(\alpha_C)}{1 - A_{max}\cos(\alpha_C)}, \quad \frac{P}{Q} = \tan\gamma$$

$$\frac{P}{Q_{max}} = \frac{P}{Q}\cos(\alpha_C) + \sin(\alpha_C)$$

$$\sin(\gamma + \alpha_C) = \frac{P}{Q A_{max}}\cos\gamma \quad \therefore \begin{cases} \alpha_C = -\gamma + \sin^{-1}\left[\dfrac{-P}{\sqrt{P^2+Q^2}\, A_{max}}\right] \\ L_2 = \dfrac{A_{max} V^2}{\omega P}\sin(\alpha_C) \end{cases}$$

در حالت کلی بهتر است: سلفی، خازنی

POWEREN.IR

POWEREN.IR
PowerEn.ir

Subject

Date

وقتی می‌خواهیم حسنای توانی داریم، باید L کوچکتر انتخاب شود، حدسی است ولی در الکترونیک قدرت نه همینه

پس است، L برابر انتخاب می‌شود بنابراین: $L = \min [L_1, L_2]$

در اینجا A_{min} ، A_{max} فرض شده است و به α_L ، α_C بستگی دارد که این‌گونه است و عکس این‌باشد، این

L برحسب مقادیر ماکزیمم آمده است.

Example: $P = -40^{KW}$ ، $Q = \pm 500^{KVAR}$

$V = 400^{V}$ $A \in [0.8, 1.2]$ ، $f = 50^{Hz}$

1/ Inductive: $\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{40}{500}\right) = 4.57^\circ$

$$\alpha_L = -4.57^\circ + \sin^{-1}\left[\frac{40}{\sqrt{40^2+500^2}\times 0.8}\right] = 1.15^\circ$$

2/ capacitive:

$$\alpha_C = -4.57^\circ + \sin^{-1}\left(\frac{40}{\sqrt{500^2+40^2}\times 1.2}\right) = -0.76^\circ$$

$$L_1 = \frac{0.8\times 400^2}{100\pi\times 40}\times \sin(1.15^\circ) = 199\,\mu H.$$

$$L_2 = \frac{1.2\times 400^2}{100\pi\times 40}\times \sin(0.76^\circ) = 202^{\mu H}$$

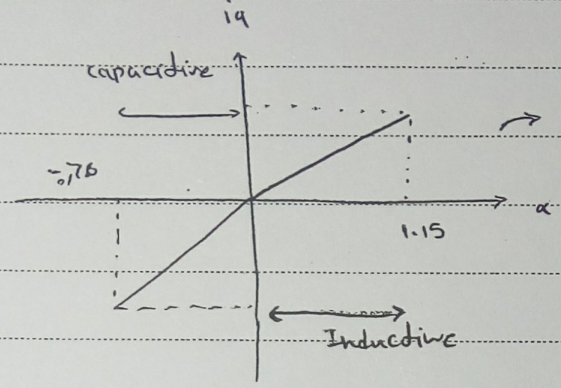
$\hookrightarrow L \simeq 200^{\mu H}$ ✓ چون gain حدودیت است، L_1، L_2 به هم نزدیک هستند.

(حجم خازن بالاتر و L کوچکتر)

POWEREN.IR

Subject
Date
PowerEn.ir

با این که Amin ، Aman نسبت به یک ، قرینه هستند ، اما α_L ، α_C قرینه نیستند



شیب ۲ خط برابر نیست.

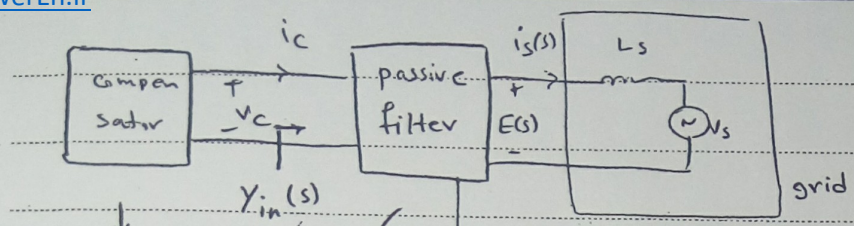
if $S = 500^{KVA} \rightarrow I = \frac{500}{\sqrt{3} \times 440} \simeq 730^{A}$

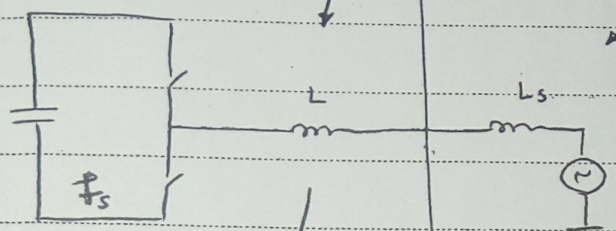
730^{A} باید از طریق سوئیچ ها عبور کند ، با توجه به جریان مجاز سوئیچ ها ، تعداد اسنوری هایی که باید موازی کنیم بدست می آید. مثلا اگر 200^{A} باشد ، ۴ اسنوری باید موازی کرد.

POWEREN.IR

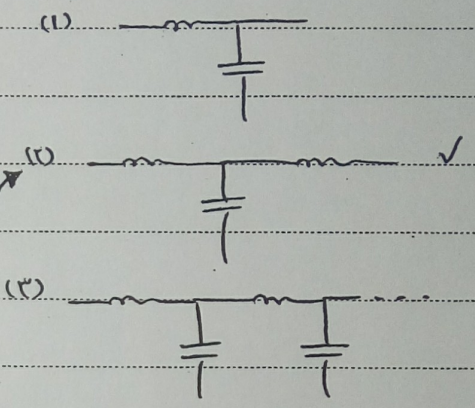
PowerEn.ir

Subject: 97.3.5





filter :



$$\begin{bmatrix} 1 & L_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{pmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{pmatrix}$$

$$Y_{in}(s) = \frac{i_c(s)}{V_c(s)} = \frac{1}{(L+L_s)s}$$

هم ترتیب

$$\begin{bmatrix} 1+L_1Cs^2 & s(L_1+L_2+L_1L_2Cs^2) \\ Cs & 1+L_2Cs^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & L_1s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Cs & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & L_2s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

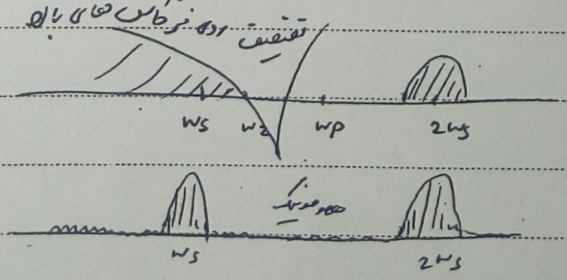
(*)

$$Y_{in}(s) = \frac{K(s^2+w_z^2)}{s(s^2+w_p^2)} = \frac{1+s^2/w_z^2}{s\left(\frac{s^2}{Kw_z^2}+\frac{w_p^2}{Kw_z^2}\right)}$$

افزودن ۲ صفر در اطراف f_s

e.g. if $f_s = 2050^{Hz}$, $f_z = 2100^{Hz}$ or 2150^{Hz}

✓ جریسته خود را مانند یک تابع سینوسی بیان کرده و با یک روش ریاضی (دوربین عکاسی) به صورت (۲) خواهیم رسید.



$$Y_{in}(s) = \frac{i_c(s)}{V_c(s)} = \frac{C(s)E(s)+D(s)i_s(s)}{A(s)E(s)+B(s)i_s(s)} = \frac{C(s)L_s s + D(s)}{A(s)L_s s + B(s)}$$

POWEREN.IR

Subject
Date
POWEREN.IR
PowerEn.ir

$$Y_{in}(s) = \frac{1 + C(L_s+L_2)s^2}{s(L_1C(L_s+L_2)s^2 + L_1+L_2+L_s)} \quad (**)$$

$$\frac{*}{**} \rightarrow \begin{cases} C(L_s+L_2) = \frac{1}{w_2^2} \\ L_1C(L_s+L_2) = \frac{1}{kw_2^2} \\ L_1+L_2+L_s = \frac{w_p^2}{kw_2^2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} L_1 = 1/k \\ L_2 = \frac{w_p^2 - w_2^2}{kw_2^2} - L_s \\ C = \frac{k}{w_p^2 - w_2^2} \end{cases}$$

97.3.7

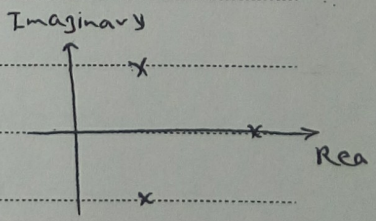
D.C - Capacitor

1. linearize dq-model

$s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0$ $\quad a_1, a_2, a_3 \rightarrow$ functions of L', C', r', R'

$C' \in [C'_{min}, C'_{max}]$

for each $C' \in [C'_{min}, C'_{max}]$ $\rightarrow$ $s_{1,2}$ complex, s_3 real



example :

$L' = 1.442$ p.u.

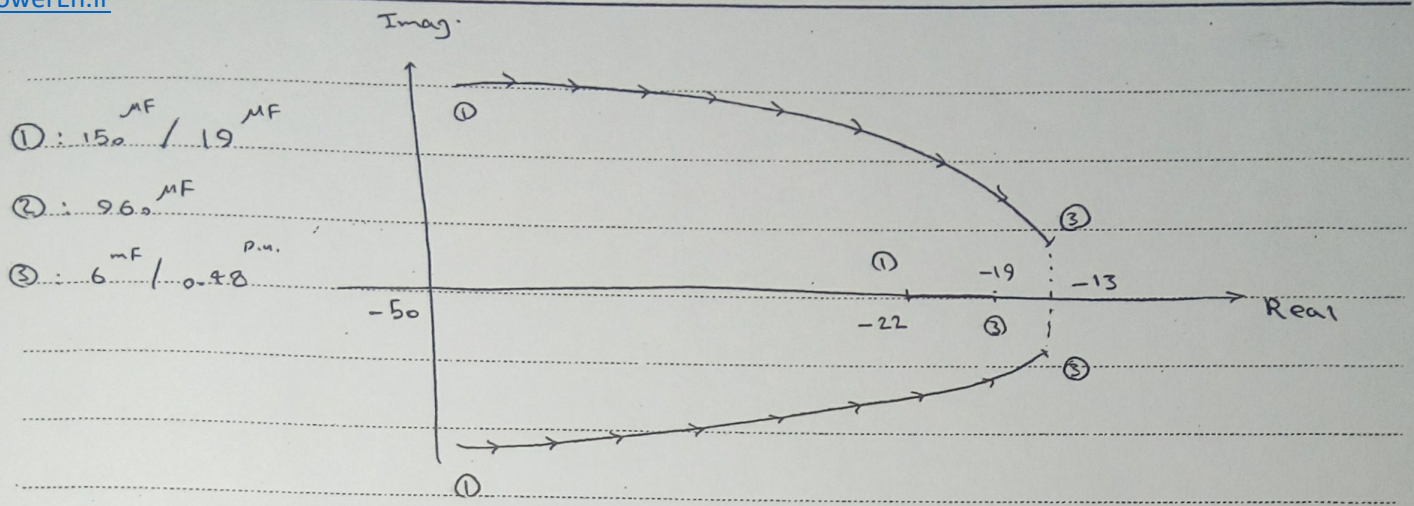
$r' = 0.02$ p.u. $\rightarrow C \in [150\ \mu F, 6000\ \mu F] \xrightarrow{Z_b = \frac{400}{360}} C' \in [19\ \text{p.u.}, 0.48\ \text{p.u.}]$

$R' = 90$ p.u. $\quad \omega_b = 2\pi \times 60$

POWEREN.IR

P4PCO

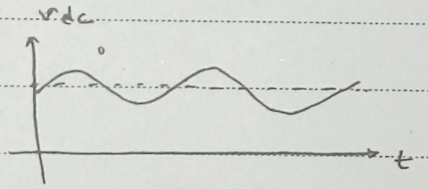
PowerEn.ir



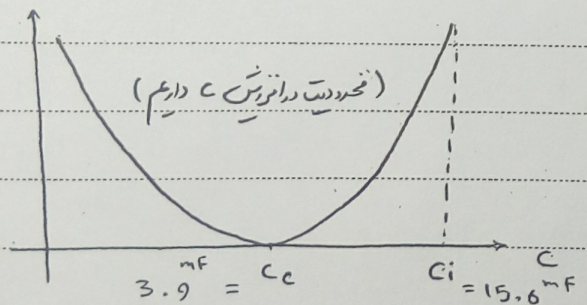
② negative sequence component:

هر خطیت خارجی بروز کند، اثر مولفه منفی بخش ac بروی بخش dc کمتر خواهد بود.

(مولفه منفی، بولتاژ 100 Hz در بخش dc ایجاد می‌کند)



effect of negative sequence

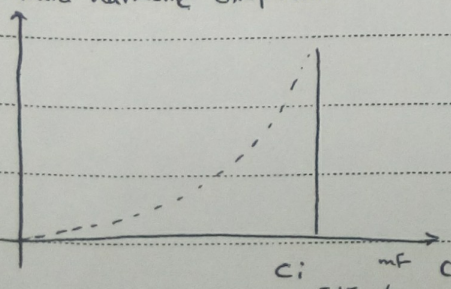


$$C_c = \frac{K^2}{8 L \omega_b} \quad , \quad C_i = \frac{K^2}{2 L \omega_b^2}$$

③ Third harmonic component → (در حالت معمولا" متعادل مولفه صفر است)

هر خطیت خارجی کند، نفوذ جریان مولفه صفر بیشتر می‌شود.

Third harmonic component



if, $K = \frac{4}{\pi}$

PAPCO
POWEREN.IR

Subject
Date
PowerEn.ir

a. (با دستان مفهوم می‌شود)

e.g. $P_{loss} = 20^{kw}$ $\quad Q = 250^{kVAr}$

"اگر خود جبران ساز بخواهد آنرا جبران کند
را شبکه تأمین نکند."

$200^{kw} \xrightarrow{5^{ms}} 100^{j}$

(مثلاً در 5^{ms} بخواهد تأمین کند)

$100^{j} = \frac{1}{2} C V_{dc_0}^2 \rightarrow C = 800^{\mu F}$

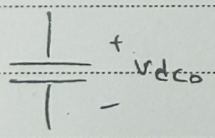
بنابراین در حالت گذرایی ایجاد شود، جبران ساز در 5^{ms} بخواهد تأمین کند، بعد این صرف ولتاژ V_{dc_0} به صفر

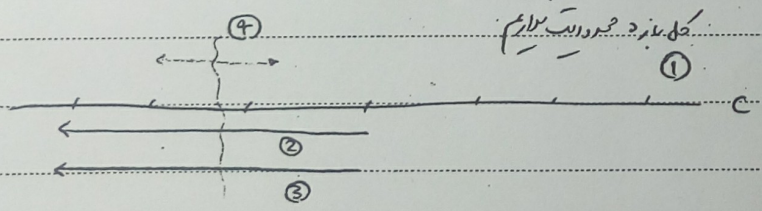
خواهد رسید. لذا با ولتاژ خازن به تدریج کاسته می‌شود تا به صفر برسد:

$100^{j} = \frac{1}{2} C (V_{dc_0}^2 - V_{dc_1}^2)$

5^{ms} ↙ ↘ 350

$\rightarrow C = 1.57^{mF}$





POWEREN.IR
POWEREN.IR
P4PCO