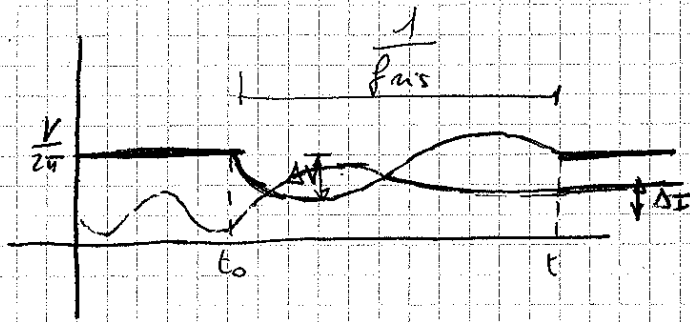
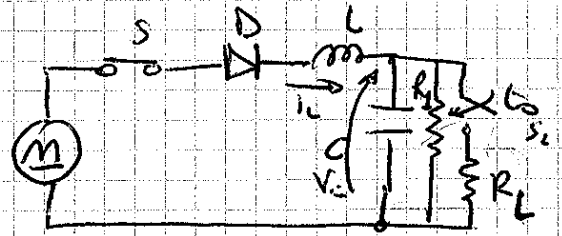


## Passo di commutazione



$$\Delta V \leq \sqrt{\frac{L}{C}} \Delta I$$

È sempre meglio avere  $f_{as}$  alte



La resistenza  $R_L$  deve essere inserita per sicurezza.

Si può approssimare l'aggiunta di  $R_L$  all'app. di un generatore di contro  $\Delta I$ .

## DIODI CONTROLLATI (Triac o Silicon controlled Rectifier)

permettono di realizzare comportamenti da diodi definendo il modo in cui chiuderli. Come l'SCR si chiude a comando e si apre come un diodo. (Si potrebbe anche aprire a comando).



La corrente di potenza passa per A-K

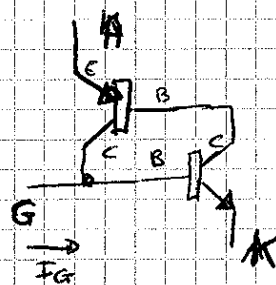
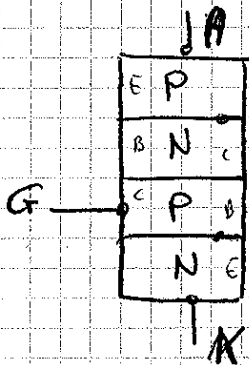
Il segnale per G-K

Questo componente è stato studiato

Si comporta come 3 diodi, due a polarità uguale e uno a polarità inversa

Possiamo individuare 2 tipi PNP e NPN

(2 transistor).



Se  $V_{AK} > 0$

Transistor in polarizzazione attiva.

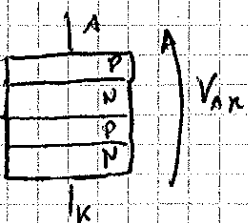
In senso corrente in G.

Il transistor PNP si accende e conduce.

Di conseguenza si accende e conduce anche

il PNP, il sistema diventa un cortocircuito

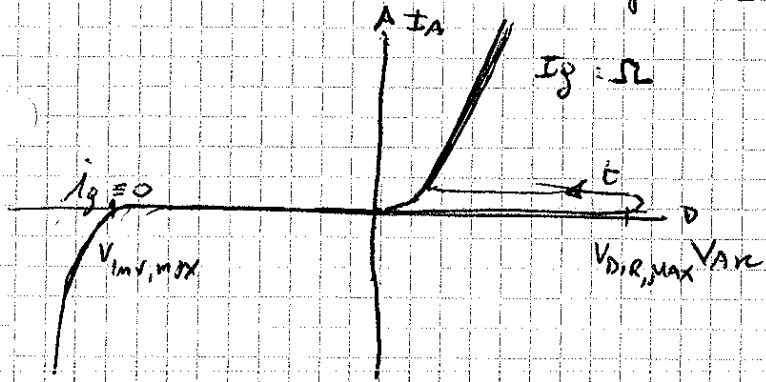
Quindi se  $V_{AK} > 0$  è sufficiente un impulso  $I_G$  per accendere il sistema.



Se  $V_{AK} < 0$  a sono 2 giunzioni

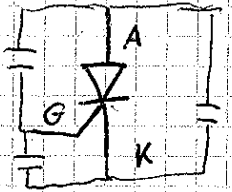
polarizzate inversamente non si accende mai ed accende.

Esistono anche altri modi per accendere l'SCR



$V_{DR, MAX}$  è pericoloso solo perché se superata l'SCR si chiude.

Terzo fenomeno chiusura SCR



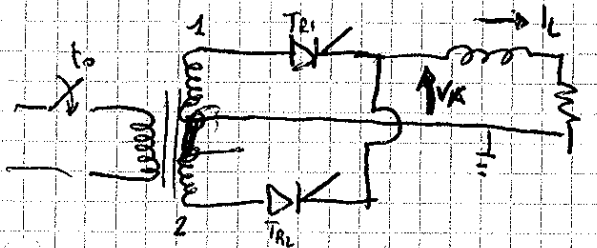
capacità parassita  $V_{AK}$

Posso fare un verso corrente nel gate attraverso la capacità parassita. Devo fare  $\frac{dV_{AK}}{dt}$  molto grande

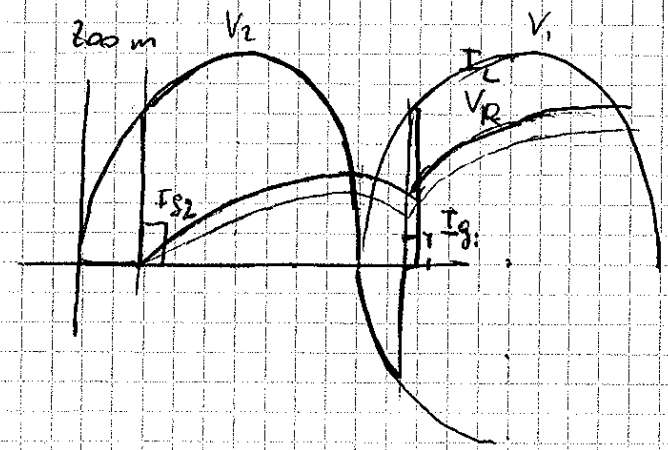
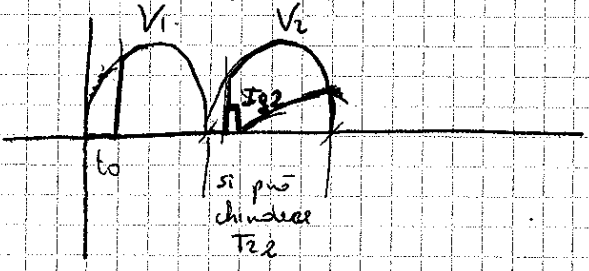
Ricapitolando:

- 1)  $V_{AK} > 0$  e impulso su gate ← BUONO
- 2)  $V_{AK}$  BREAK DOWN DIRETTO ( $V_{AK} > V_{DR, max}$ )
- 3)  $V_{AK} > 0$  e  $\frac{dV_{AK}}{dt} \gg \phi_{IM}$  } NON DIPENDONO dalle mie intenzioni.

PARZIALIZZAZIONE



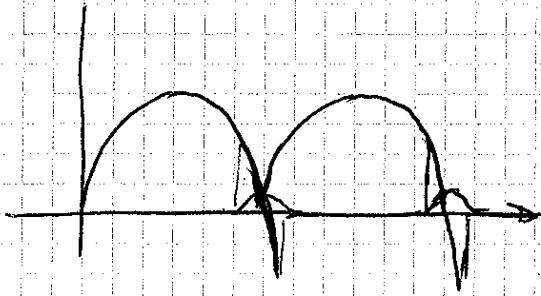
ci sarà un circuito che decide di chiudere l'SCR



Nel momento in cui ho l'imp.  $I_{g1}$  accende la storia cosa che eccedere nei diodi

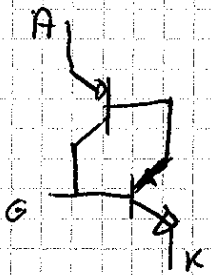


Con un SCR si può controllare la tensione sul carico come si vede indipendentemente dalle resistenze. (Si controlla  $I_t$  o  $V_u$ ).



Con un sistema SCR si può regolare la corrente o la tensione indipendentemente dal carico.

Perché SCR si apre se  $I_g \rightarrow 0$ ?



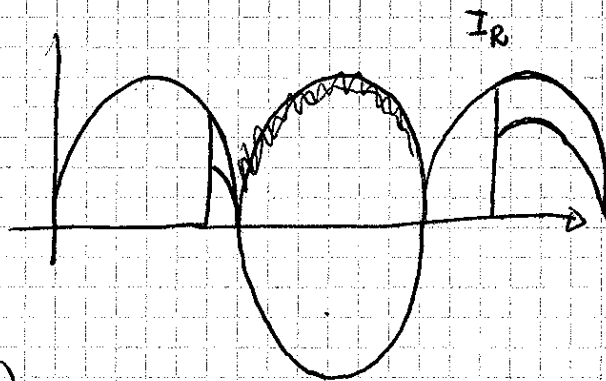
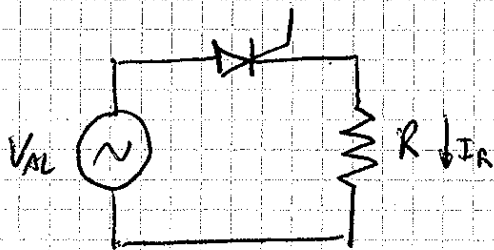
Se  $I_A \rightarrow 0$  non ci sarà abbastanza corrente su G per fare un nodo di unaga aperto.

Esistono 2 livelli di corrente critiche

- 1) Garantisce chiusura da po impulso di gate
- 2) Garantisce chiusura se  $I_A > 0$

- 1) si chiama corrente di LATCHING ( $\sim 100 \text{ mA}$ )
- 2) " " corrente di HOLDING ( $\sim 100 \text{ mA}$ )

La corrente di Latching è  $>$  delle corrente di holding.



Diodi controllati (SCR):

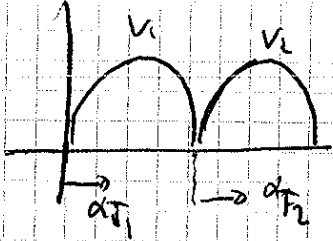
- è possibile una regolazione
- è necessario  $I_g$  (G-K) (sicuramente pericoloso e va ISOLATO)
- è necessario sapere quando impulsare perché  $V_{AK} > 0$ . Quindi devo fare delle misure sul sistema

Ora la rete il convertitore necessita di un impulsatore (firing circuit) e di uno sfasatore (cristallo di quarzo o rete a fase) l'impulso con l'onda. Allo sfasatore servono delle misure per poter controllare.

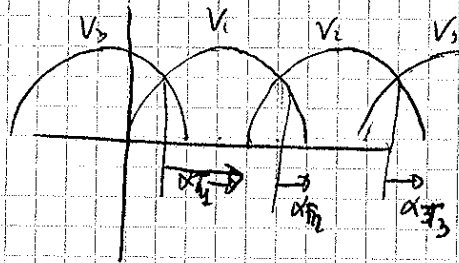
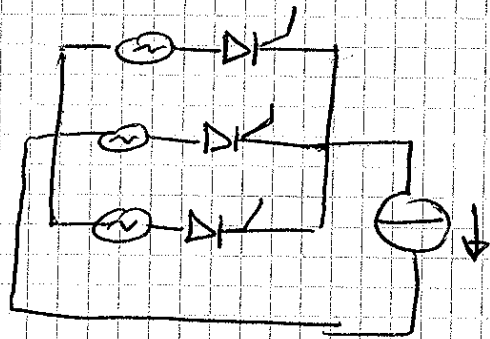


$\alpha$  è l'angolo di ritardo dell'impulso.  $\alpha$  si esprime in gradi (da 0 a 360)

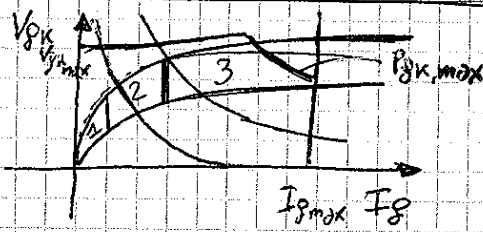
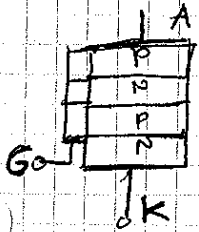
$\alpha$  non è l'angolo per cui la tensione di una fase è  $> 0$ , ma l'angolo per cui  $V_{AK} > 0$ . L'angolo  $\alpha$  non si comincia a contare nello stesso punto



S.O. Trifase:



Il CIRCUITO GK nel SCR



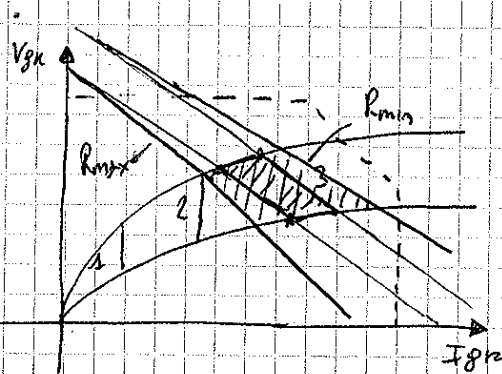
Famiglia delle g. unidirezionali  
Isa potenza

Limiti

- 1) Zona di certa non accensione
- 2) Zona di incerta accensione
- 3) Zona di certa accensione.

Le tre zone tipicamente dipendono dalla temperatura. In particolare all'aumentare della temperatura la zona 3 cresce.

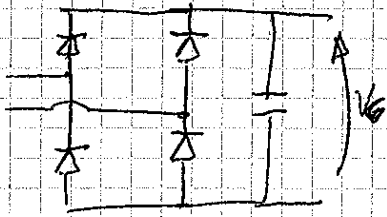
Il circuito più semplice è



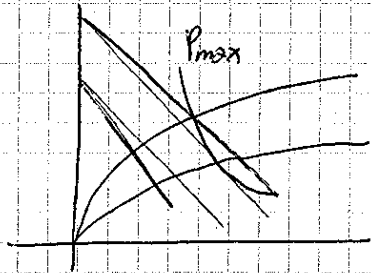
Devo cercare di piazzarmi nelle zone di certa accensione.

Se la tensione non è costante bisogna che la tensione stia in zona 3 all'interno dei limiti. Lo stesso discorso vale per la resistenza.

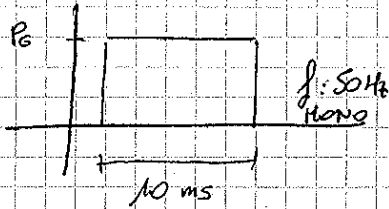
Il generatore può anche essere fatto con un raddrizzatore su carico capacitivo



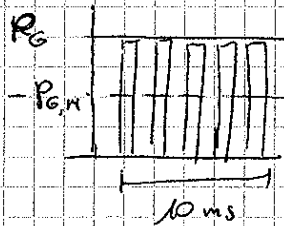
La corrente di funzionamento è dell'ordine degli AMPERE. e la tensione dell'ordine dei volt.



Si può capire che si intersechi le curve di Pmax. Per queste condizioni si può stare per un certo tempo. Si può quindi realizzare un impulso



Se  $P_G > P_{max}$  non si può fornire un impulso così lungo.

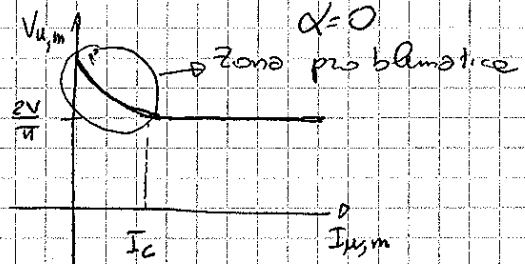
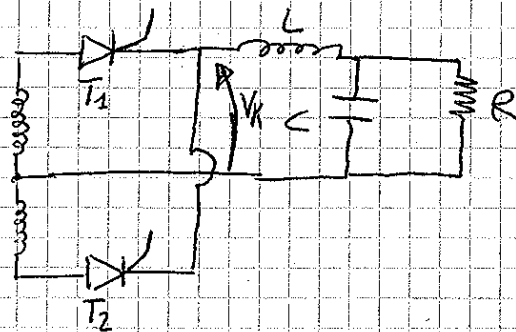


Si possono però fare un treno d'impulsi tali da  $P_m < P_{max}$ . Oppure un unico impulso piccolo della retroazione dell'SCR

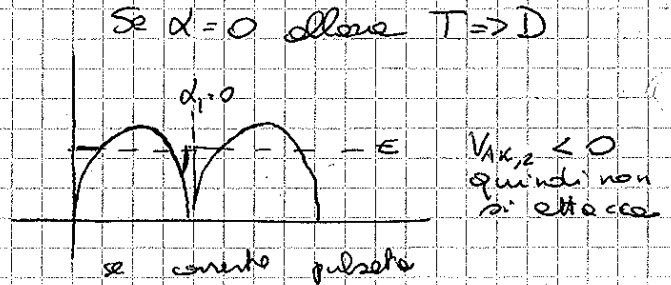
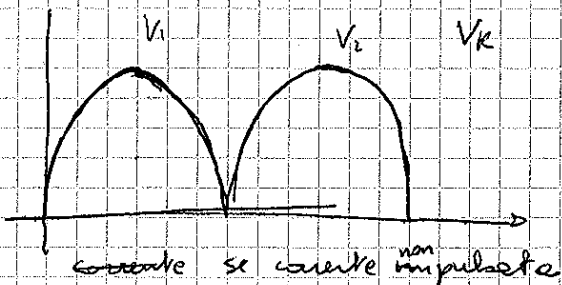
Perché fare impulsi lunghi?

Perché affinché il sistema si comporti come voglio la  $V_{AK} > 0$

Esempio:



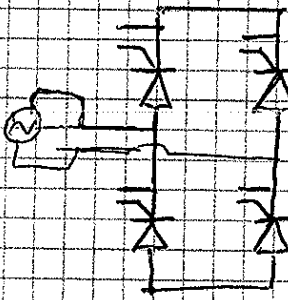
Proviamo a impulsive ed  $\alpha=0$  con un solo impulso



Se voglio che il transistor si comporti come un diodo devo fornire un impulso lungo un periodo o due un treno di impulsi

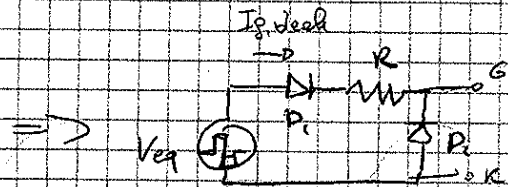
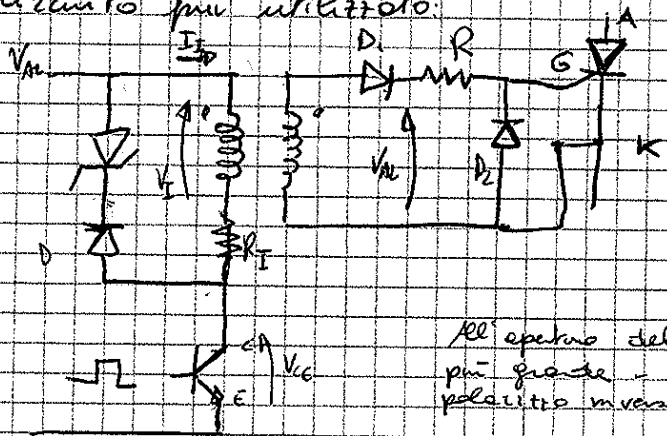
Perché utilizzare il treno di impulsi?

Problema legato all'ISOLAMENTO



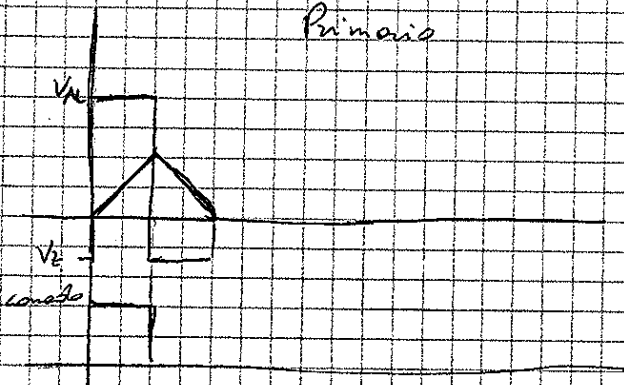
Devo avere 4 circuiti impulsatori isolati tra loro. Altrimenti rischio di avere comportamenti indesiderati.

Circuito più utilizzato:

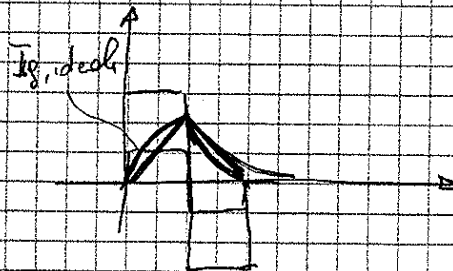
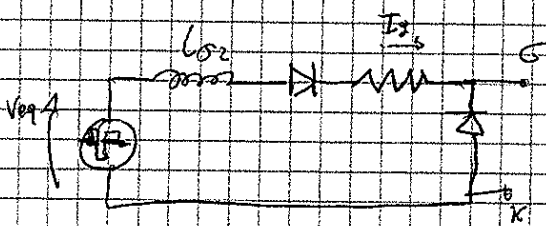


Alapertura del transistor la  $V_C$  diventa sempre più grande. Questo  $V_C > V_{CE}$   $D_1$  si chiude e polarizza invertinge lo zero la corrente

Primario



Se  $V_{eq} > 0$  parte corrente in  $D_1$ , questo diventa  $V_C$   $D_1$  si apre e smetto di dare corrente al gate (Comp. ideale). In realtà si ha un circuito equiv. un po' diverso



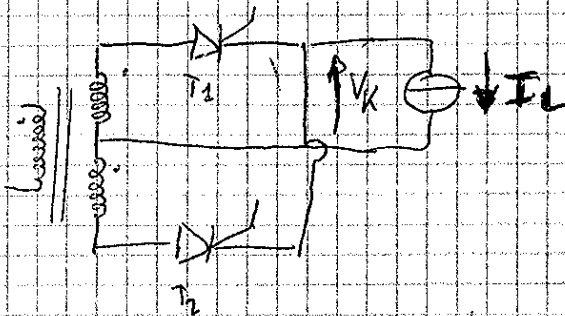
bisogna cercare di ridurre  $L_{02}$  il più possibile. Si possono fare  $L_{02}$  piccoli, ma non si possono sostenere impulsi lunghi



RIASSUMIAMO su SCR:

- 1)  $V_{AK} > 0 \Rightarrow$  sfiorata ( $\alpha$ )
- 2) circ. impulsato ISOLATO
- 3) Tre impulsi (correnti pulsite)
- 4) Controlla  $V_{u,m}$
- 5) Limiti ( $I_{L,m}$ ;  $V_{u,max}$ ;  $V_{pr,max}$ )

Analisi del rettificatore controfase

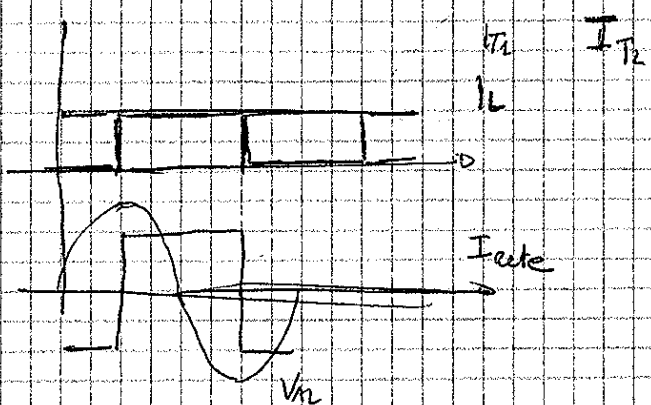
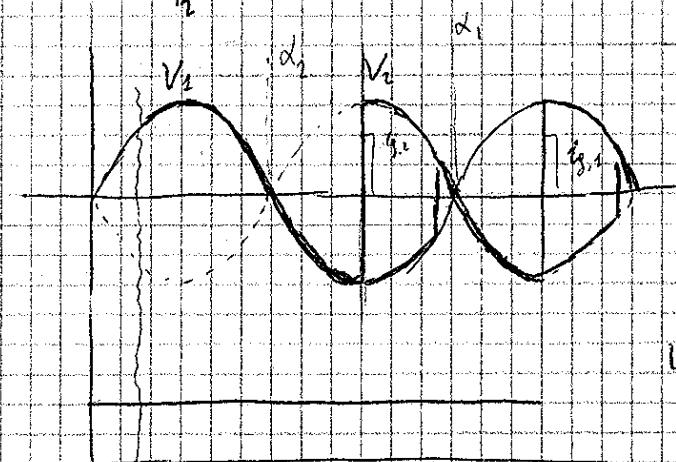
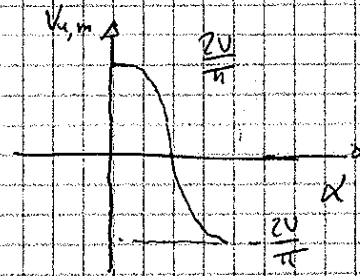


$I_L$ : corrente di carico  
 filtro in serie di rete induttivo.

$$V_{K,m} = V_{u,m}$$

$$V_{K,m} \approx V_{u,m} = 0$$

$$V_{K,m} \approx V_{u,m} = \frac{2U}{\sqrt{2}} \cos \alpha$$



$I_{carico}$  sfasata rispetto a  $V_A$

$$\alpha = 90^\circ \quad \left. \begin{matrix} V_{u,m} = 0 \\ I_{u,m} = I_L \end{matrix} \right\} P_{a,m} = 0$$

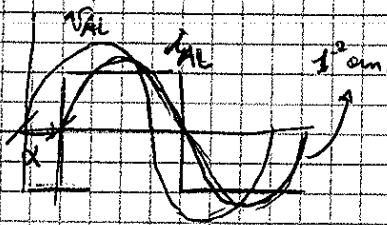
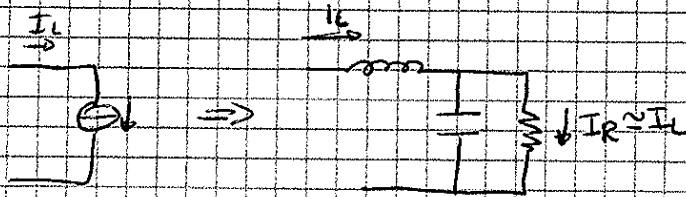
$$P_{AL} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{ce}(t) \cdot i_{T1}(t) dt = 0$$

È bene avere  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$

Con questo convertitore si possono avere potenze attive in rete sia positive che negative.

Quindi posso avere

$$\left. \begin{aligned} V_{r,m} &= \frac{2V}{\pi} \\ I_{r,m} &= I_L \cos \alpha \end{aligned} \right\} P_{r,m} = I_L \cdot \frac{2V}{\pi} \cdot \cos \alpha$$



$$P_{rL} = V_{eff} I_{eff} \cos \varphi \quad \cos \varphi = \cos \alpha$$

Valori efficaci della 1ª armonica

$$I_{r,1,eff} = \frac{I_L}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

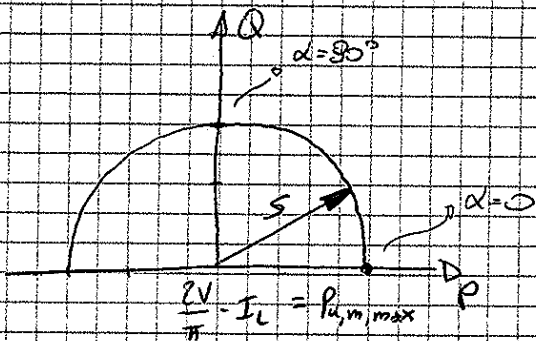
$$V_{eff} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

$$P_{rL} = \frac{V}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2 I_L}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \alpha = \frac{2V}{\pi} I_L \cos \alpha$$

Esiste anche una Q

$$Q_{rL} = \frac{2V}{\pi} I_L \sin \alpha$$

Con i diodi non si aveva potenza reattiva!! in particolare per  $P_{rL} = 0$  si ha  $Q_{rL} \max$



$$S = A_w = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S = \frac{2V}{\pi} \cdot I_L$$

Potenza distortante

$$A_{tot} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

$$A_{tot} = V_{eff} \cdot I_{eff}$$

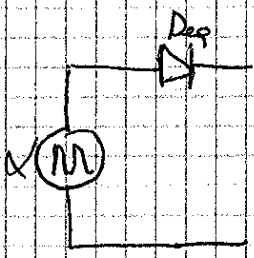
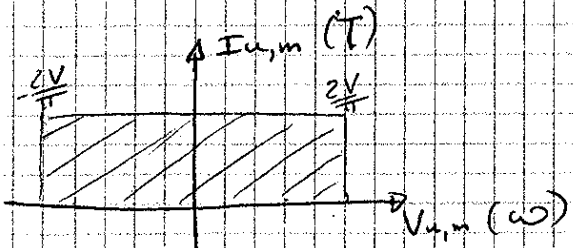
$$D^2 = A_{tot}^2 - A_w^2$$

$$A_{tot} = \frac{V}{\sqrt{2}} \cdot I_L$$

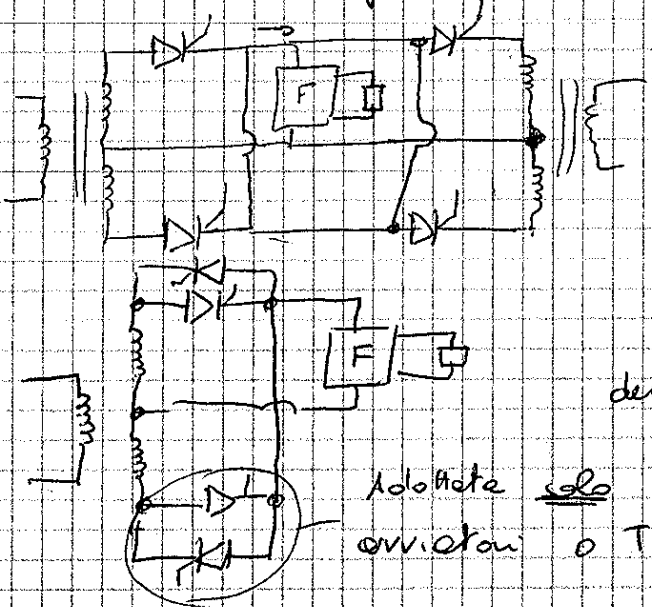
$$D = \sqrt{\left(\frac{V}{\sqrt{2}} I_L\right)^2 - \left(\frac{2V}{\pi} \cdot I_L\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2}} (V \cdot I_L) = \frac{2V}{\pi} I_L \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1}$$

D è costante ed è indipendente da  $\alpha$





Come faccio a comandare a 4 quadranti?



Adottata solo per  
inverter o TRIAC

Dei transistor ne posso  
funzionare solo 2 per volta.  
Quando un transistor è attivo,  
l'altro è spento. Posso adda-  
re i due transistor solo  
sistemi di questo genere sono  
detti inverter.

Così realizzo un ponte a 4 quadranti.

Un convertitore a 4 quadranti necessario per l'alimentazione dei  
motori DC. I 4 quadr. corrisp. ai 4 quad.  $\omega, T$  (velocità,  
coppia).

# ANALISI CONVERTITORI con SCR

Abbiamo i seguenti utenti:

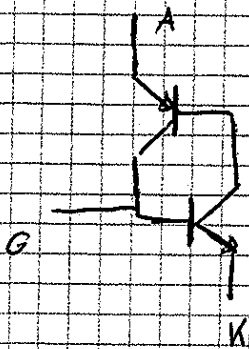
- Potenza  $\rightarrow$  Rete - Carico
- comando  $\rightarrow$  Impulsatori o driver (stere con impub., no red. cu. per regolamento)
- controllo

Impulsatori forniscono direzione al gate quando voglio accendere l'SCR in modo isolato. (da treno di impulsi)

(GTO: gate turn off: tiristore che può essere acceso o spento a comando).

(IGCT: insulated gate commutated thyristor: gate realizzato con giunzione mosfet)

## GTO



Se porta via corrente del gate il sistema non può più autosostenersi e si spegne.

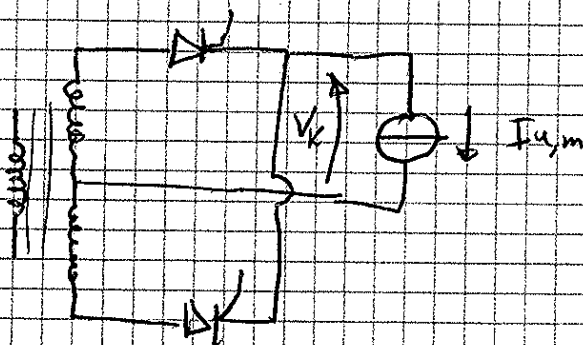
Problema: deve assorbire più del 70% della corrente erogata. Il gate è molto più grande rispetto a quello dell'SCR.

Discussione simile per IGCT.

## Tecniche per SCR

Perché il filtro è quasi sempre induttivo facciamo l'analisi: a regime sostituendo al carico un generatore di corrente non pulsato.

## CONTROFASE SCR

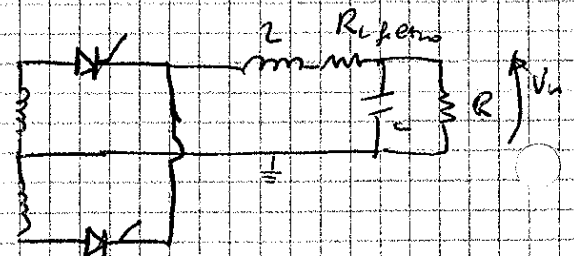
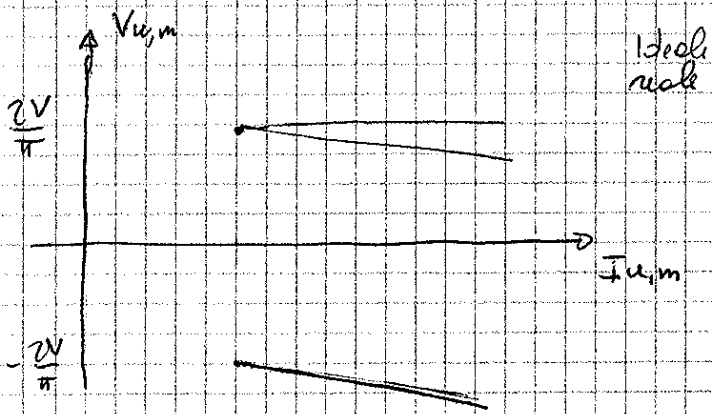


$V_k(t)$  è legato a  $V_{u,m}$

$$V_{u,m} = \frac{2V}{\pi} \cos \alpha$$

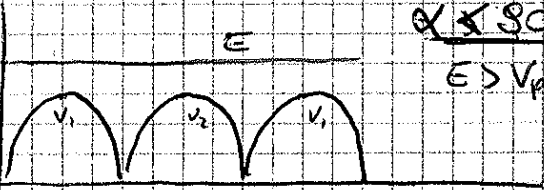
$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 \rightarrow$  \* Simmetrico a due semiole.



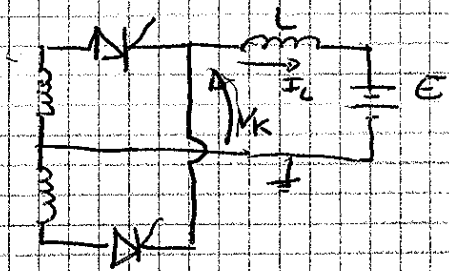


Costruiamo la funzione opposta (addebi e regone con qualche di tens.)

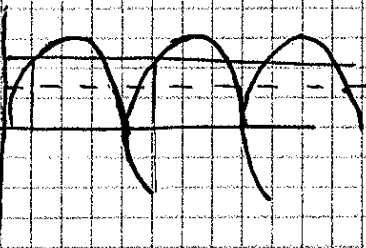
$\alpha > 90^\circ$   
 $\alpha < 90^\circ$   $I_L = 0$   
 $E > V_{pk}$



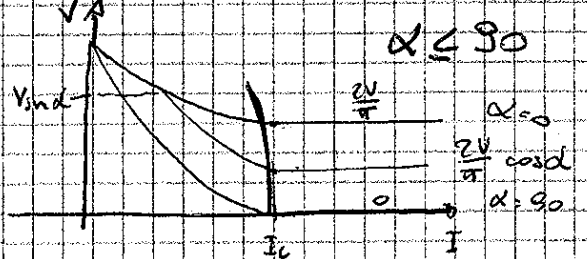
non succede nulla



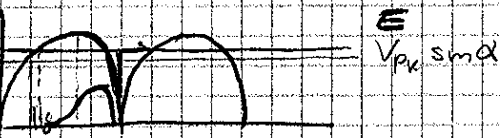
$V_{pk} > E > \frac{2V}{\pi} \cos \alpha$   
 $E < \frac{2V}{\pi} \cos \alpha$



Se  $E = V_{pk} \Rightarrow I_L = 0$



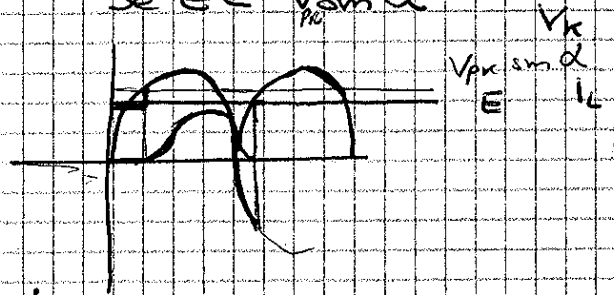
Se  $E > V_{pk} \sin \alpha$



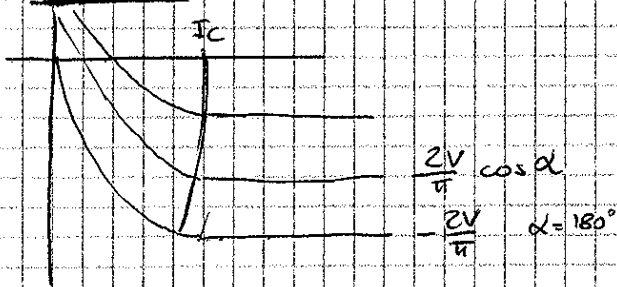
do tiene di impulsi al gate!!  
 Se no non si chiude

Per  $\alpha = 0$  si comporta come diodo

Se  $E < V_{pk} \sin \alpha$



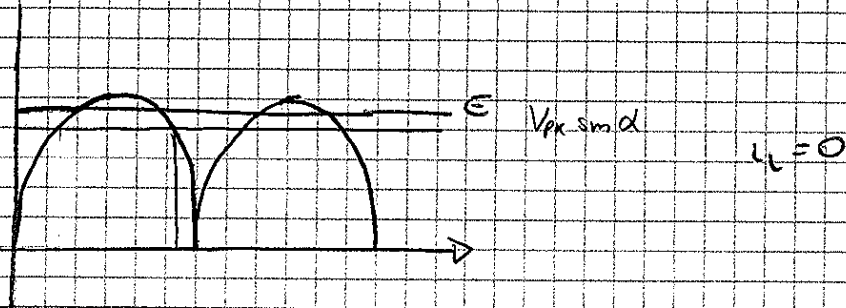
$\alpha > 90^\circ$





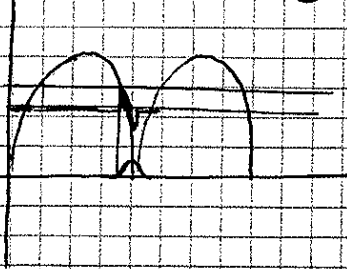
CASO 1:

$$E > V_{pk} \sin \alpha$$

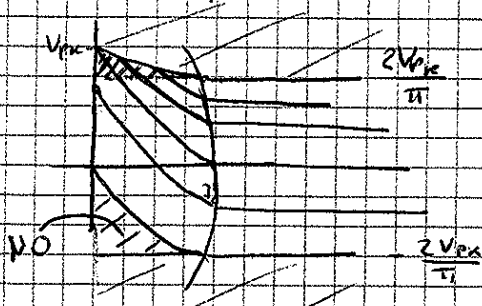


CASO 2

$$E < V_{pk} \sin \alpha$$



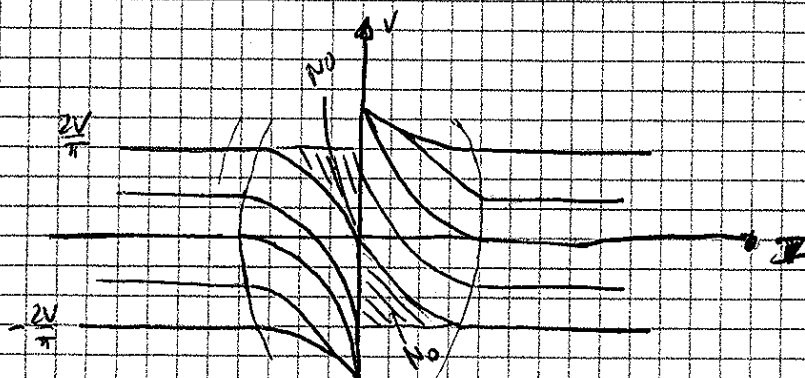
La corrente critica ha un comportamento particolare e raggiunge il max per  $\alpha = 0$



Oss: non possiamo coprire tutto il piano del 1°-4° quadrante, Ma non sono raggiungibili particolari fette (rosse) Ho guadagnato un pezzo (vede)

Controllo  $\alpha$  è difficile!! Se la corrente non pulisce basta un piccolissimo variaz di  $\alpha$  per cambiare tantissimo la corrente. Se la corrente pulisce allora per cambiare di poco la corrente devo avere grandi variazioni di  $\alpha$ .

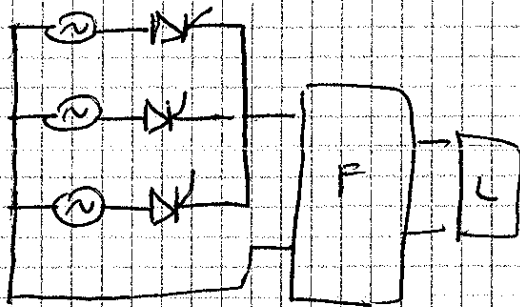
Conversione a 4 quadranti



Ampli. rano altre strutture.

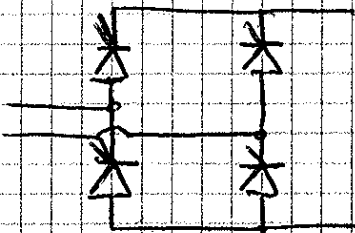
La struttura remanda 3φ ha  $\epsilon^{comp}$  analogo a quella del catodoforo.

$$V_{u,m} = \frac{3V_A}{2\pi} \cos \alpha$$



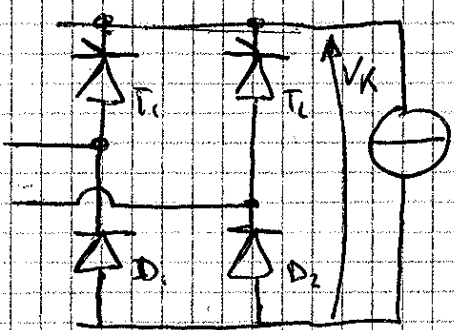
Ponti: < semi controllati (50% diodo, 50% SCR)  
 < totali controllati (solo SCR)

PONTE MONOFASE SEMI CONTROLLATO



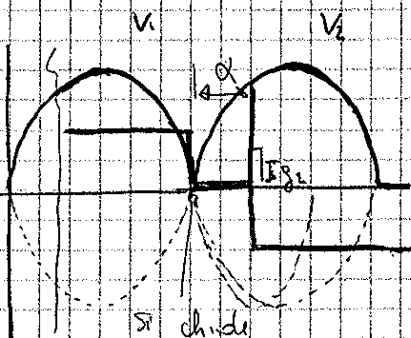
- COMB. 1 solo su
- COMB. 2 solo giù
- COMB. 3 steme gamba

Combinazione 1



filtro induttivo assimilabile ad un generatore di corrente non

$I_u$  pulsante



Inrete

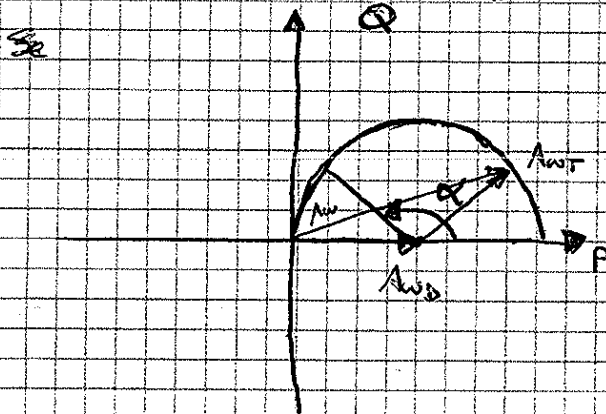
si chiude D1, parte re la corrente di di chiuder  
 T1, parte chiuso finché c'è corrente  
 T1 rimane aperto fino a che non si impalca.



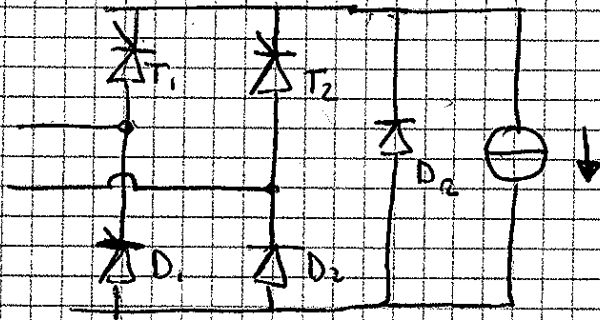
Se  $\alpha = 0$   $V_{u,m} = \frac{2V}{\pi}$   $I_{RMS,AL} = I_L$

Se  $\alpha = 180^\circ$   $V_{u,m} = 0$   $I_{RMS,AL} = 0 \Rightarrow P=Q=A=A_{TOT} = 0$

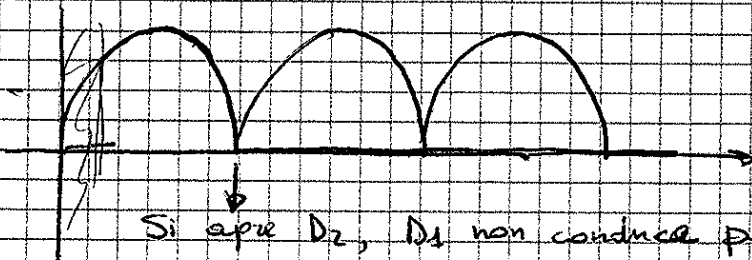
In generale  $V_{u,m} = \frac{V}{\pi} (\cos \alpha + 1)$



Aggiungiamo il diodo di ricircolo (Per ridurre le perdite del sistema)



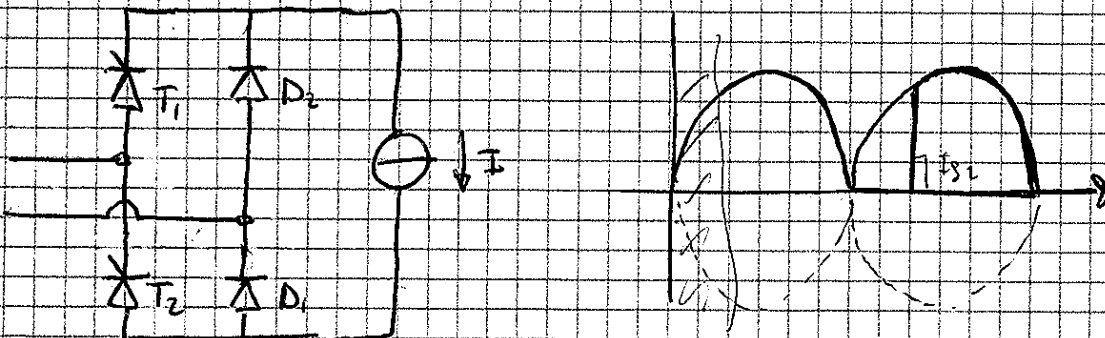
Nel caso pec.  
Se smetto di impulsare  
il triac non smette  
di condurre mai.  
Con il diodo di ricircolo  
il triac smette di condurre



Si apre  $D_2$ ,  $D_1$  non conduce perché si mette a condurre  $D_2$  e di conseguenza si apre il triac  $T_1$

Combinazione 2 simile alla 1

Combinazione 3



Il diodo  $D_2$  spegne il triac  $T_1$ , lo cmq lo <sup>converte</sup> ~~peo~~  
che passa attraverso due diodi in serie

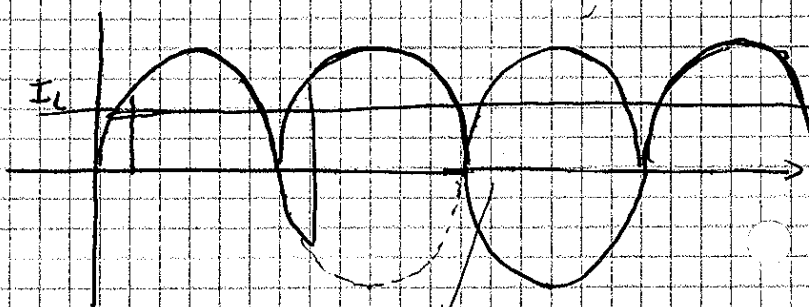
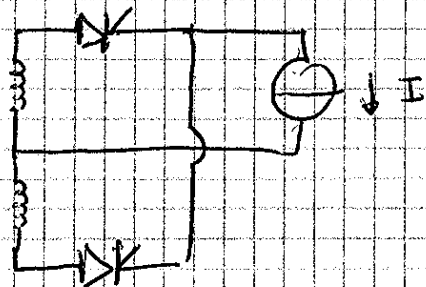


Se metto di impulso e come avere il diodo di marcia  
 volte  $D_1$  e  $D_2$  con  $\alpha \neq 0$  vedono che  $I_{mD_1} > I_{mT}$ . Quindi i  
 diodi dissipano di più rispetto ai 2 transistor.

## LIMITI CONVERTITORI SCR

- limiti di funzionamento
- perdita di controllo (se si rompe un filo esatto di impulso  
 cosa succede?)

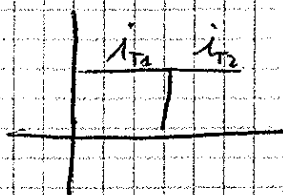
Controfase con perdita di controllo



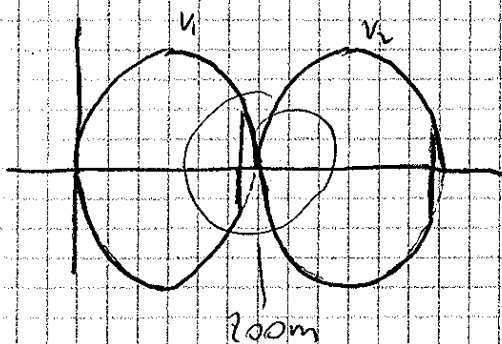
Si rompe qualcosa per  
 cui non posso più  
 impulsionare

La perdita di controllo nei semi controllati si risolve con il  
 diodo di marcia (o di Free Wheeling), nei controfase a semionde 3 $\phi$   
 non c'è una soluzione. Idem per i totali controllati.

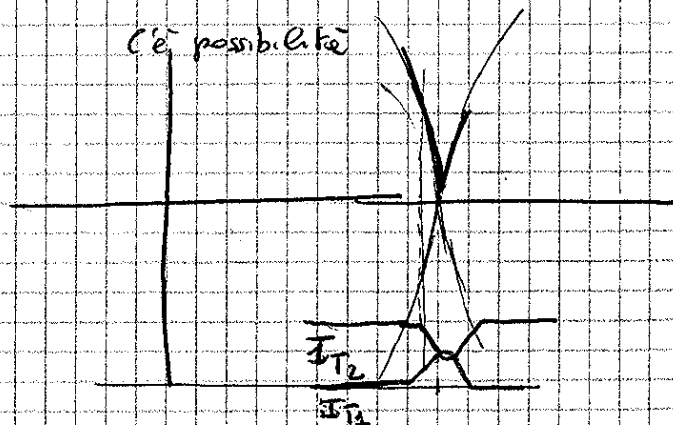
Si può avere la perdita di controllo anche in commutazione



Analizziamo il controfase con  $\alpha \rightarrow 180^\circ$



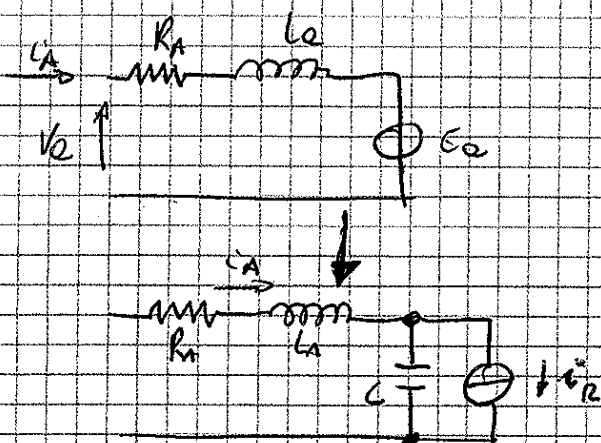
C'è possibilità



Se si supera un certo angolo limite non si riesce più a  
 commutare!!!!

# EQUIVALENTE MOTORE DC (circuito LC)

- $e(t) = K_V \phi \omega_c(t)$
- $T_{em}(t) = K_T \phi i_A(t)$
- $V_A(t) = R_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} + e(t)$
- $T_{em} - T_L = J \ddot{\omega}$



ipotesi: • Trascurabili R\_k e L\_k  
•  $\phi = \text{cost.}$

$$V_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + K_V \omega \quad K_V = k_v \phi$$

$$K_T (i_A - i_2) = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_T}{J} (i_A - i_2) \Rightarrow \omega = \omega_0 + \frac{K_T}{J} \int (i_A - i_2) dt$$

$$V_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + k_v \omega_0 + \frac{K_T K_V}{J} \int (i_A - i_2) dt$$

resistenza costante x integrale di una corrente  
condensatore ( $V = \frac{1}{C} \int i_c dt$ )

$$\boxed{i_2 = \frac{T_L}{K_T} ; C = \frac{J}{K_V K_T}}$$

Il prodotto LC deve essere correlato con la 1<sup>a</sup> armonica di disturbo.

- Nel PFC  $\rightarrow 2 \omega_c$  rete
- SFC  $\rightarrow 3 \omega_c$  rete
- TFC  $\rightarrow 6 \omega_c$  rete

ma la armonica di risonanza nelle correnti dell'induttore.



Il motore DC naturalmente genera la corrente. Quando questo non basta si aggiunge un'induttanza esterna.

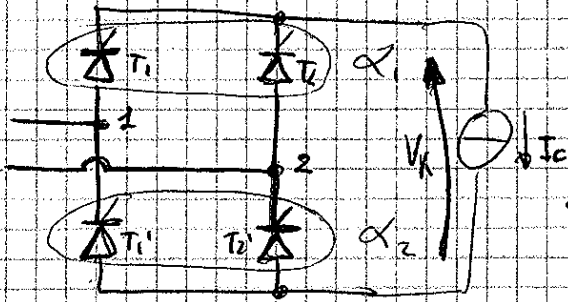
L'aggiunta di  $R_A$  comporta una cosa del genere



Per correnti piccole l'effetto di  $R_A$  è trascurabile.

I ponti totali controllati vengono usati solo per motori di grandi dimensioni.

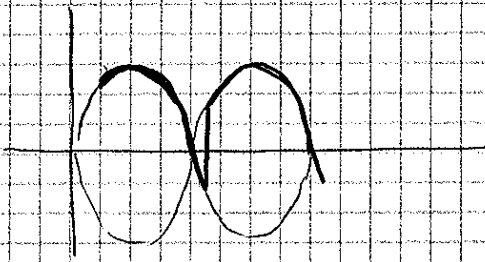
### PONTE TOTALI CONTROLLATO MONOFASE



Per avere simmetria è importante che venga impulsato con stesso angolo  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  in base

Se  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$   
 $\hookrightarrow$  PTK Monofase  $\Rightarrow$  CF controllato

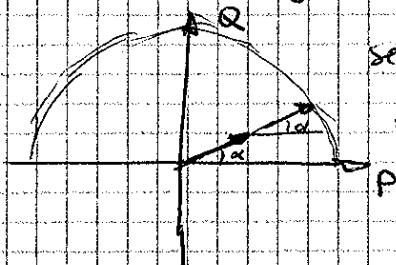
Il diodo deve reggere  $2V$



Si può anche fare  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  mantenendo la simmetria tra 1° e 2° semionde

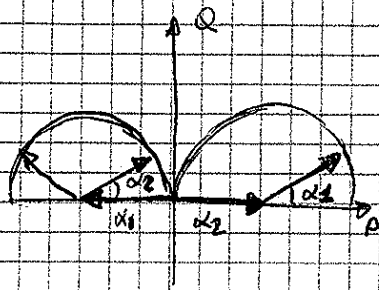
$$V_{k,m} = \frac{V}{\pi} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$

Se  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  ho lo svantaggio che è più difficile gestire ai due angoli. Ma ho anche numerosi vantaggi:



Se  $\alpha_1 = \alpha_2$  comportamento simile al semiconduttore controllato  
 $D = \cos \alpha$



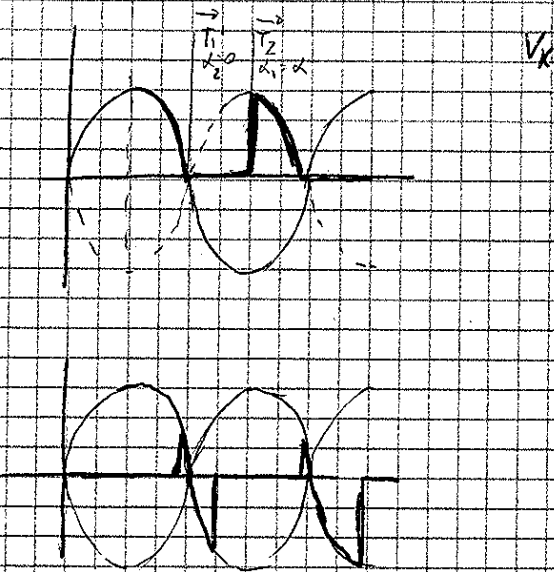


- La  $Q$  massima richiesta alla rete è massima.

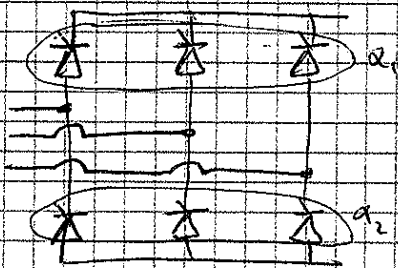
- La  $D$  viene come nel semi controllato

Se  $\alpha_1 \neq \alpha_2$       $\alpha_1 = \alpha$       $P_{u,m} > 0$   
                               $\alpha_2 = 0$       $P_{u,m} > 0$

$$V_{u,m} = \frac{V}{\pi} (\cos \alpha + 1)$$



### PONTE TRIFASE TOTALI CONTROLLATO

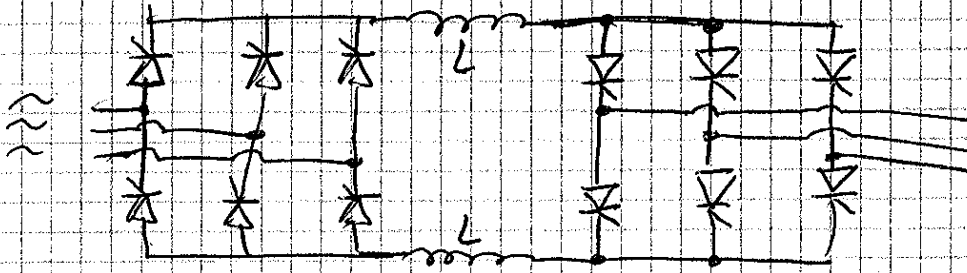


Si potrebbe usare  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , ma non si fa quasi mai perché troppo complicato.

Sui convertitori abbiamo sempre impostato che il carico fosse essere alimentato ad un generatore di corrente. Come vero per i convertitori VSI (a se alimentati in tensione). Esistono CSI (el. in corrente) che sono in disuso.

Un CSI è composto da 2 convertitori. (Un VSI tipico è un P.T.C., due induttori e a valle un P.T.C.)

costante in modo duale)



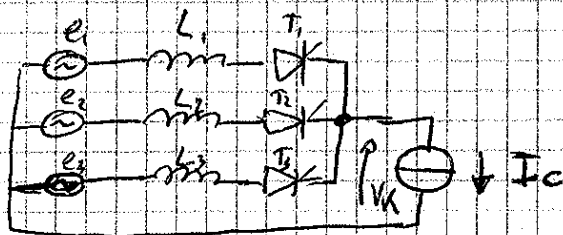
Tipico carico trifase: grossi motori sincroni.

Esiste un angolo limite di commutazione

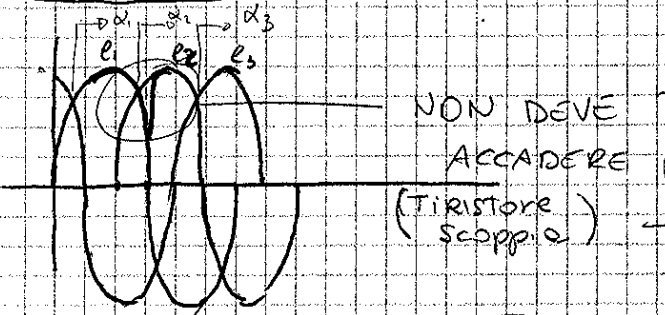
$\alpha = \pi$  non è possibile sempre.

Commutazione:

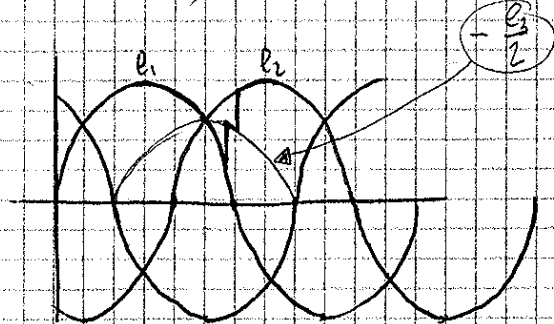
condiziona il periodo di lavoro



NB: c'è L perché  $\frac{di_T}{dt}$  deve essere limitata (come SCR).



per questo si inserisce L durante lo scambio  $T_{21} - T_{32}$



$$\begin{cases} e_1(t) = v_k(t) + v_{L1}(t) \\ e_2(t) = v_k(t) + v_{L2}(t) \\ e_1(t) = v_k(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} \\ e_2(t) = v_k(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} \\ e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \\ i_1 + i_2 + i_3 = I_c \end{cases}$$

Tiristore 3 aperto

All'istante 0  $\Rightarrow i_1 = I_c$   
 $i_2 = 0$

Somma le 2 equazioni e moltiplo  $L_1 = L_2 = L$

$$2v_k(t) + 2L \frac{di}{dt} = e_1 + e_2$$

Poiché  $i_3 = 0$   $\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} = \frac{dI_c}{dt} = 0$   $\rightarrow$  nell'angolo è nulla nelle restanti varia & poco



$$V_K = \frac{e_1 + e_2}{2} = -\frac{e_3}{2}$$

COMMUTAZIONE TR<sub>1</sub> - TR<sub>2</sub>

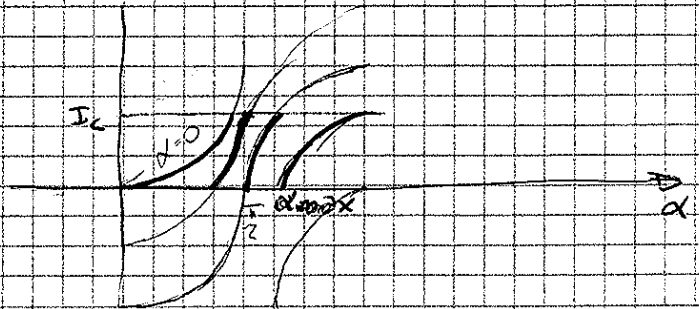
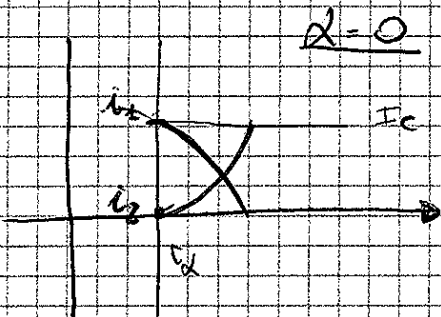
$$\begin{cases} e_1(t) = \frac{e_1(t) + e_2(t)}{2} + L \frac{di_1}{dt} \\ e_2(t) = \frac{e_1(t) + e_2(t)}{2} - L \frac{di_2}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \left(\frac{e_1}{2} - \frac{e_2}{2}\right) \frac{1}{L} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{1}{2L} (e_1 - e_2) \end{cases}$$

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{di_2}{dt}$$

$$i_1 = i_{10} + \frac{1}{2L} \int_T (e_1 - e_2) dt = i_{10} + \frac{1}{2L} \int_{t_0}^t V_{12} dt =$$

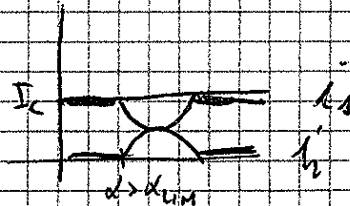
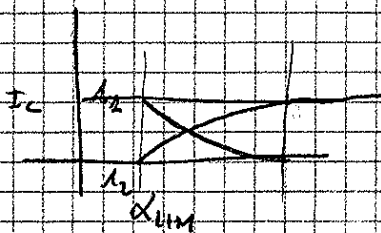
$$= I_c + \frac{V_A}{2L\omega} (\cos(\omega t) - \cos(\omega t_0)) \quad \text{valore tra } t_0 \text{ e } t_0 + \text{commute}$$

$$V_{12} = -V_A \sin(\omega t) \quad i_2 = 0 + \frac{V_A}{2L\omega} (\cos(\omega t) - \cos(\omega t_0))$$



Se  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  ho il massimo forzamento di corrente ed lo  $I_c$  max  
derivata  $\frac{di_2}{dt} \Big|_{\max} = \frac{V_A}{2L}$   $\leftarrow$  così posso definire  $L$  e  $\omega$  limite

Se  $\alpha > \frac{\pi}{2}$  la derivata diminuisce. Per  $\alpha = \pi$  non si commuta mai. Si commuta <sup>esige</sup> per quell'angolo tale che  $I_c$  commutabile me  $t_0$  e  $I_c$



$$i_2 \Big|_{\omega t = \pi} = I_c \quad I_c = \frac{V_A}{2L\omega} (\cos(\alpha_{lim}) + 1)$$

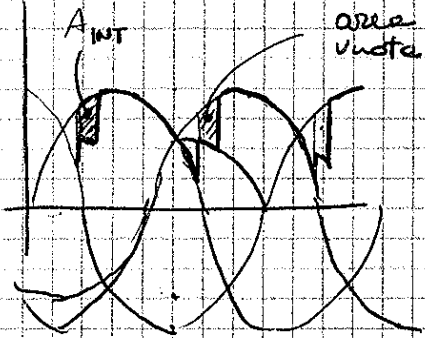
$$\cos(\alpha_{lim}) = \frac{I_c 2L\omega}{V_A} - 1$$

$\alpha_{lim}$  dipende da  $I_c$ . Se  $I_c = 0$   $\alpha_{lim} = \pi$

Un inverter deve limitare  $\alpha$ . Caso più banale  $\alpha_{lim} = \text{cost.}$

Un numero tipico  $\alpha_{lim} \approx 150^\circ$

### Tombino alla commutazione



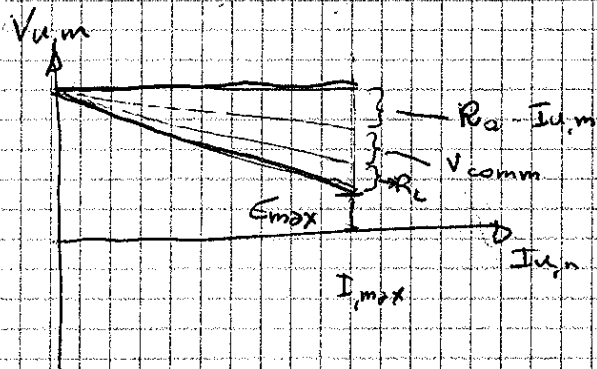
Quindi  $V_{u,m} < V_{u,m \text{ ideale}} = K \cos \alpha$

Nel semiciclo trifase  $K = \frac{3V_0}{2\pi}$

Il tempo di commutazione dipende da  $I_c$

In generale la perdita di tensione

$$V_{comm} = \Delta V = \frac{N \cdot A_{INT}}{T}$$



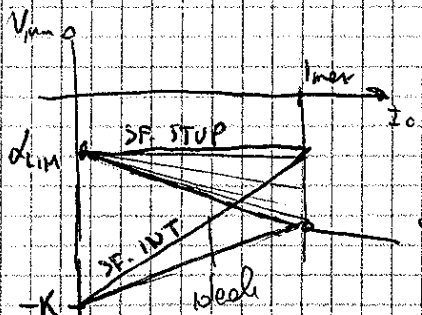
La differenza di tensione è uguale a quella sull'induttanza.

$$i_c = \frac{1}{L} \int_{t_d}^{t_p} V_L dt$$

(area sotto la curva  $V_L$ )  
 uguale di a  
 induttanza,  $A_{INT}$

$$\Rightarrow I_c = \frac{1}{L} A_{INT} \Rightarrow A_{INT} = I_c L$$

$$V_{comm} = \frac{N I_c L}{T} = \frac{N \omega L}{2\pi} I_c$$



$$V_{u,m} = K \cos \alpha - R I_c$$

questo punto può anche essere sotto  $-K$