

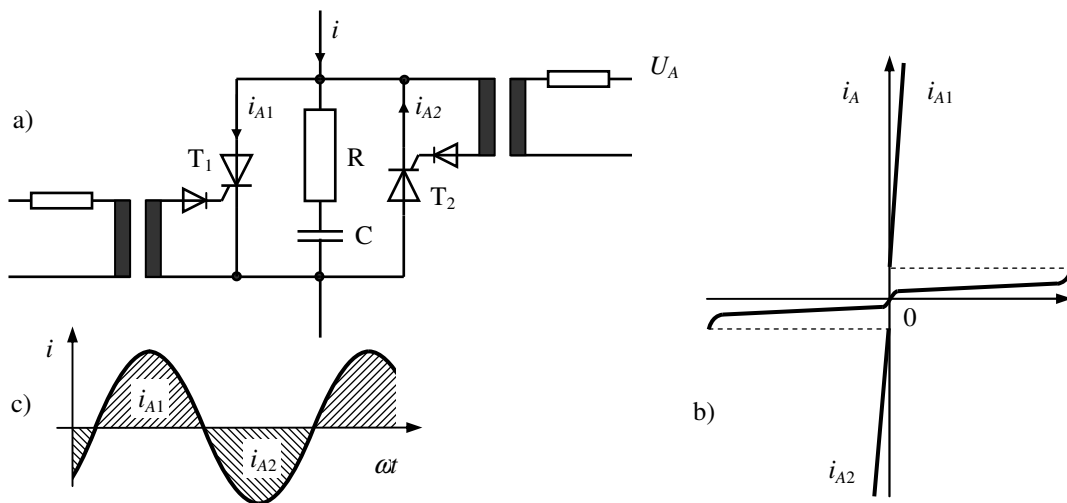
5 TIRISTORSKA STIKALA IN NASTAVLJALNIKI

Za vklopjanje in izklopjanje elektriških tokokrogov lahko namesto mehanskih uporabimo tudi polprevodniška (elektronska) stikala. Za velike izklopne moči prihajajo v poštev predvsem tiristorji. Vendar lahko tiristor v funkciji stikala uporabimo le v izmeničnih tokokrogih, kjer prehaja izmenični tok v vsaki polperiodi skozi vrednost nič in omogoča, da se tiristor na koncu vsake polperiode toka avtomatično sam izklopi. Vklapljammo pa tiristor seveda s prožilnim impulzom. Če naj bo tiristorsko stikalo stalno vklopljeno, moramo tiristorju, v vsaki polperiodi vedno znova dovajati prožilni impulz preko IKN. Ker pa mora teči v izmeničnem tokokrogu tok v obeh smereh, moramo tiristorsko stikalo sestaviti iz dveh protiparalelno vezanih tiristorjev. Lahko pa uporabimo tudi triac (sl.5.1 in sl.5.2). Za razliko od mehanskih stikal lahko pri polprevodniških stikalih preko krmilnega impulza zelo natančno izberemo trenutek vklopa. To omogoča najboljši vklop in nastavljanje (krmiljenje) velikosti napetosti oz. toka in moči.

5.1 Tiristorsko stikalo v izmeničnih tokokrogih

Tiristorska stikala uporabljamo namesto mehanskih stikal za vklopjanje in izklopjanje izmeničnih tokokrogov. Slika 5.1 kaže ustrezno protiparalelno vezavo dveh tiristorjev, vključno z impulznima transformatorjema in zaščitnim RC-členom. Prednosti takšnega polprevodniškega stikala v primerjavi z mehanskim so:

1. se ne obrablja,
2. življenjska doba je praktično neomejena,
3. učinek vklopa lahko poljubno izbiramo in natančno izvedemo in
4. izklop stikala se zgodi vedno v naravnem trenutku, ko gre izmenični tok skozi vrednost nič in ni električnega obloka.



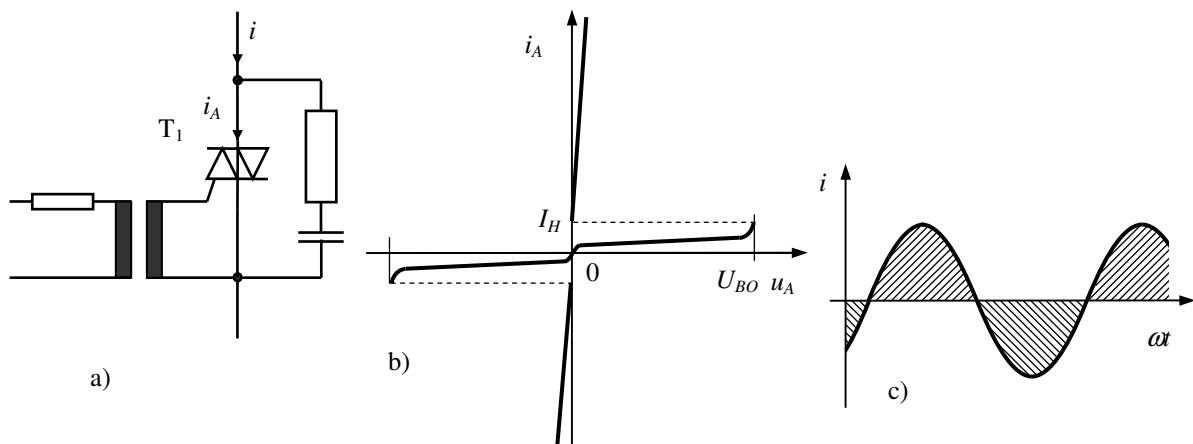
Slika 5.1: Tiristorsko stikalo: (a) protiparalelna vezava dveh tiristorjev, (b) statična karakteristika, (c) izmenični tok

Slabosti pa so:

1. v prevodni smeri imamo padec napetosti približno 1,5 V,
2. toplotne izgube, kar zahteva tudi hlajenje,
3. v izklopljenem stanju teče še vedno nek majhen tok (inverzni tok nekaj mA) in stikalo potencialno (galvansko) ne ločuje; če hočemo potencialno ločitev, moramo uporabiti dodatni mehanski prekinjevalnik (npr. ločilno stikalo) in
4. cena je nekoliko višja.

Čeprav imamo na voljo tiristorje za zaporne napetosti nekaj kV in za maksimalno dopustne trajne toke prek 1 kA, kar daje fiktivno moč prek 1 MVA, smemo zaradi varnosti v praksi izkoristiti le majhen del te moči.

Slika 5.2 kaže triac v vlogi polprevodniškega stikala. Krmiljenje je enostavnejše kot pri vezju s sl. 5.1. Vendar izdelujejo zaenkrat triace le za majhne moči in zmorejo direktno vklopiti v omrežje 380 V le toke do največ 100 A.



Slika 5.2: Triac kot polprevodniško stikalo v izmeničnem tokokrogu: (a) vezje, (b) statična karakteristika, (c) izmenični tok

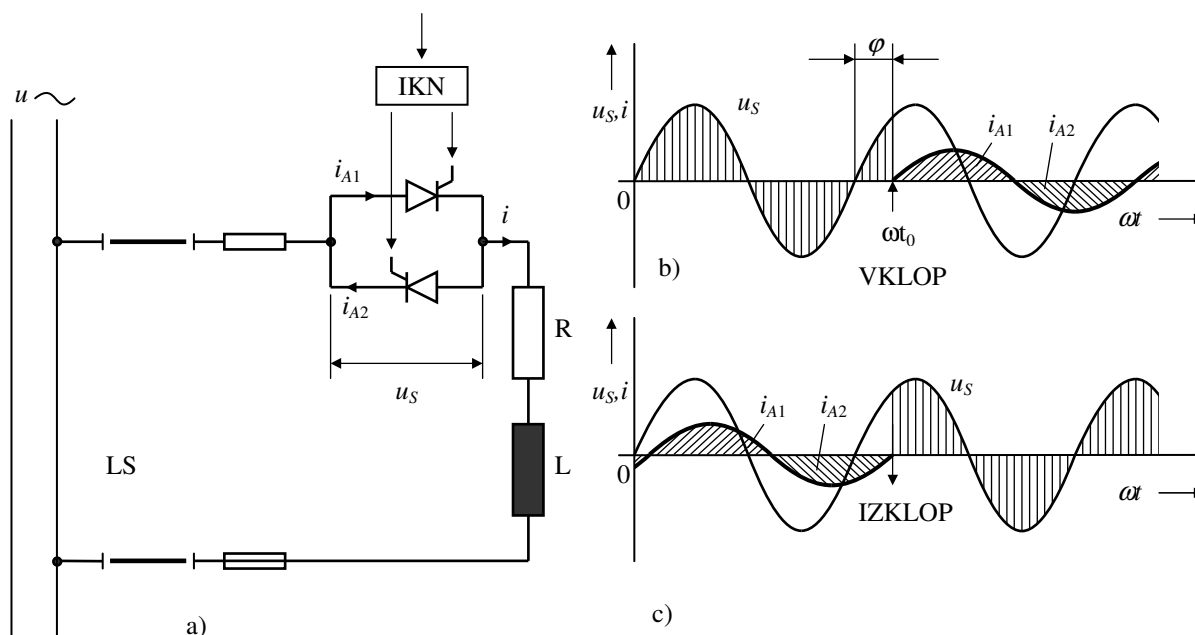
Zaradi napetostnega padca v prevodni smeri povzroča ventilski tok izgube prevajanja p_T . Videli smo, da je srednja izgubna moč na tiristorju odvisna tako od aritmetične srednje vrednosti ventilskega toka, kakor tudi od njegove efektivne vrednosti. Zato moramo pri dimenzioniranju tiristorskega stikala upoštevati tudi **obliko** toka.

Slika 5.3 kaže potek napetosti in tokov pri vklopu in izklopu tokokroga s tiristorskim stikalom. Ker je breme ohmsko-induktivno, zaostaja tok za napetostjo za električni kot:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

Če hočemo vklapljati tokokrog tako, da ne bo nikakega prehodnega pojava, moramo pripeljati tiristorju prožilni impulz v trenutku, ko naj bi tok i_{A1} oz. i_{A2} , v stacionarnem stanju prehajal skozi vrednost nič (sl.5.3.b). Če pa vklopimo v poljubnem drugem trenutku, se pojavi neka enosmerna prehodna komponenta toka, ki nato v odvisnosti od stopnje dušenja izgine v nekaj polperiodah. V tem primeru je tok podan z enačbo:

$$i_A(t) = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\omega t_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \omega t_0)} \right]$$

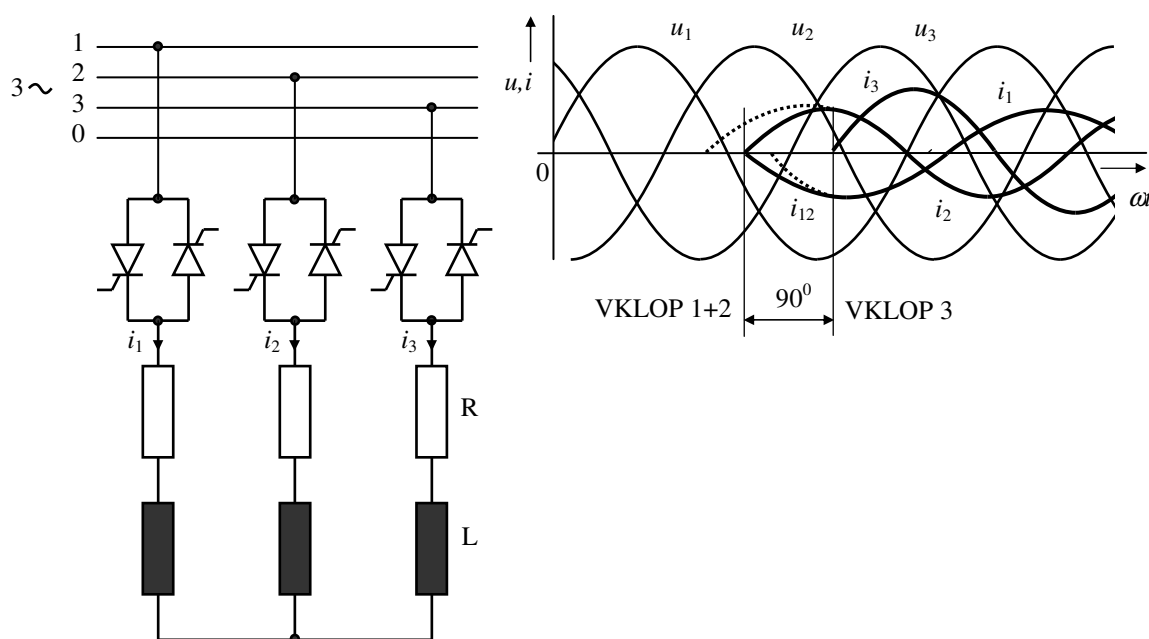


Slika 5.3: Vklapljanje in izklapljanje izmeničnega tokokroga s tiristorskim stikalom: (a) vezje, (b) vklop, (c) izklop

Tok i_A je ob vklopu sestavljen iz dveh delov: iz trajnega sinusnega toka ter iz nekega enosmernegega toka, ki ima največjo amplitudo v trenutku vklopa in nato po eksponentni funkciji upada s časovno konstanto $\tau = L/R$ proti vrednosti nič. Kot

vidimo, je ta enosmerna komponenta toka nič le ob pogoju, da je $\sin(\omega t_0 - \varphi) = 0$, kar pomeni, da moramo vklopiti v trenutku $t_0 = \varphi/\omega$, torej tedaj, ko začenja trajna sinusna komponenta toka iz vrednosti nič. Fizikalno gledano prihaja do tega pojava zato, ker zaradi induktivnosti L tok ob vklopu tiristorja nikoli ne more hipoma poskočiti na svojo stacionarno vrednost, temveč mora nujno začeti iz vrednosti nič. K temu problemu se bomo še povrnili.

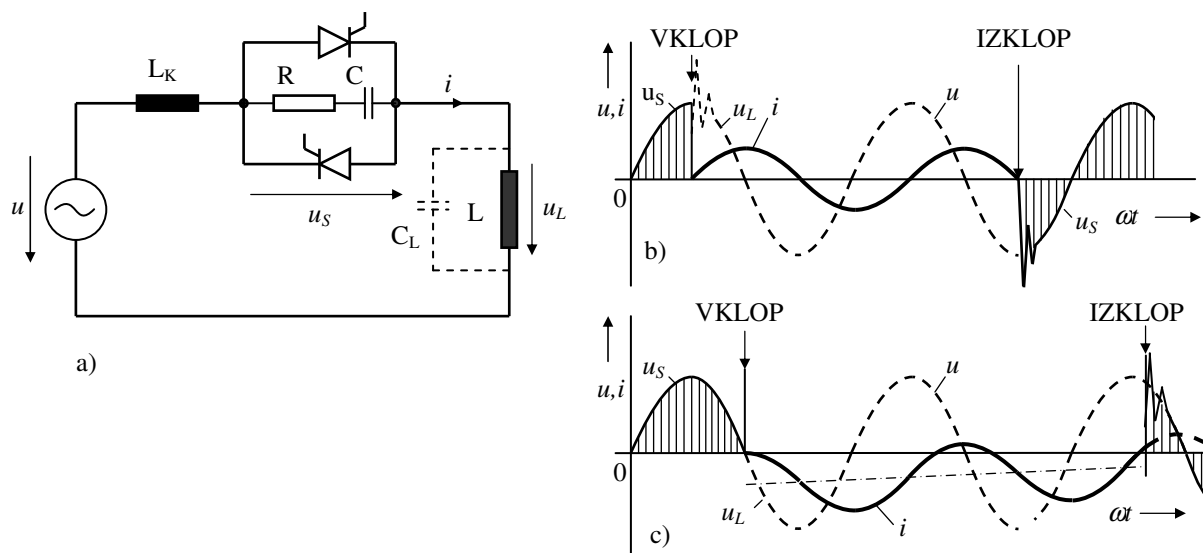
Izklop tiristorskega stikala pa dosežemo preprosto tako, da prenehamo tiristorja prožiti: zatečen tok teče v tisti polperiodi še tako dolgo, dokler naravno ne postane nič. Slika 5.4 kaže tiristorsko stikalo za simetrični trifazni ohmsko-induktivni porabnik. Enako kot pri enofaznem stikalu na sl. 5.3 si prizadevamo tudi sedaj vklapljati trifazno stikalo tako, da se ob vklopu ne bo pojavljala enosmerna izravnalna komponenta toka. To dosežemo tako, da pripeljemo prožilna impulza najprej samo dvema fazama hkrati (fazi 1 in 2 na sl. 5.4), čez 90° el. pa še fazi 3, pri čemer ustreza ta trenutek proženja faze 3 trenutku naravnega prehoda stacionarnega faznega toka i_3 skozi vrednost nič. Izklopimo pa tiristorsko stikalo spet tako, da prenehamo tiristorjem dovajati prožilne impulze: tok ene faze teče še tako dolgo, dokler ne postane nič in preneha, toka v ostalih dveh fazah pa tečeta še 90° el. in nato prav tako prenehata teči.



Slika 5.4: Vklapljanje trifaznega RL-porabnika s tiristorskimi stikali: (a) vezje, (b) potek napetosti in tokov

5.2 Vklop induktivnosti s tiristorskim stikalom

V prejšnjem poglavju smo obravnavali problematiko vklopa mešanega ohmsko-induktivnega bremena (sl. 93). Tokrat analizirajmo podrobneje problematiko vklopa čiste induktivnosti L s tiristorskim stikalom!

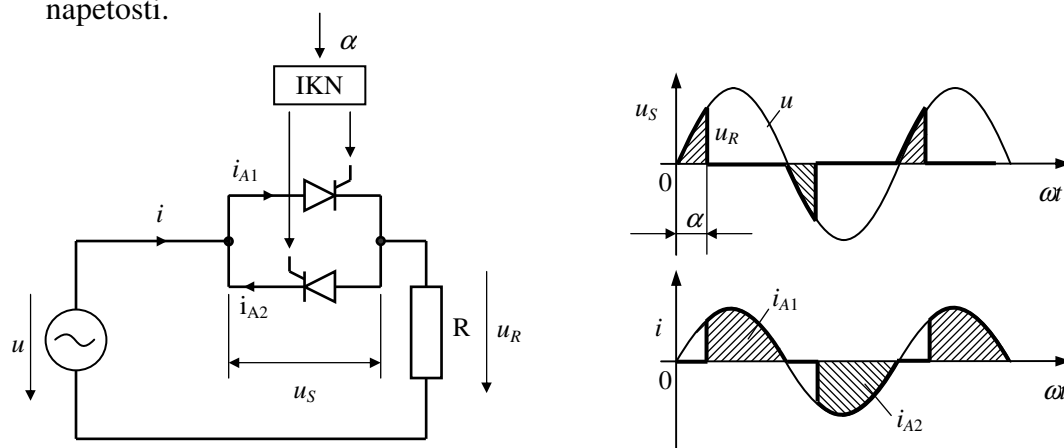


Slika 5.5: Vklop induktivnosti s tiristorskim stikalom: (a) vezje, (b) vklop brez izravnalnega toka, (c) vklop z izravnalnim tokom

V vezju na sl.5.5.a je narisan tudi vedno prisoten zaščitni RC-člen, označena pa je tudi parazitna kapacitivnost C_L , ki realno obstaja med ovoji dušilke L . V kvazistacionarnem stanju teče v tokokrogu sinusni tok i , ki zaostaja za gonilno sinusno napetostjo u za električni kot 90° . Le če vklopimo tiristorjsko stikalo, tj. enega od protiparalelnih tiristorjev, v trenutku, ki ustreza prehodu jalovega toka skozi vrednost nič (sl.5.5.b), dobimo vklop brez prehodnega pojava: sinusni tok začne iz svoje »naravne« vrednosti nič. Ta najugodnejši trenutek vklopa induktivnega bremena ustreza trenutku, ko ima sinusna gonilna napetost maksimalno vrednost. Izklop toka i pa dosežemo, kot vedno doslej tako, da prenehamo tiristorjema dovajati prožilne impulze. Na sl. 5.5.b je z vertikalno šrafuro označena napetost u_s na ventilih: ob vklopu dobimo neko kratkotrajno superponirano srednje frekvenčno nihanje, ki se prišteva napetosti u_L na induktivnosti. Njena krožna frekvenca je približno $1/\sqrt{L_K C_K}$, amplituda pa doseže največ temensko vrednost gonilne sinusne napetosti $\sqrt{2} U$. Tudi pri izklopu (sl.5.5.c) se pojavi neko srednje frekvenčno superponirano nihanje, ki se prišteva k napetosti u_s na izklopljenem tiristorju. Njena krožna frekvenca je približno $1/\sqrt{(L + L_K)C}$, njeno amplitudo pa duši upornost R .

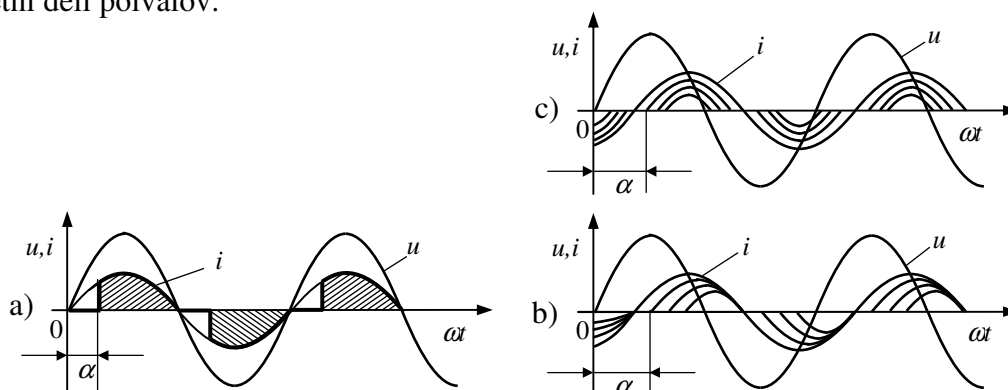
5.3 Tiristorski nastavljalniki za izmenični tok

Možnost, ki jo nudi tiristorsko stikalo da ga lahko s prožilnim impulzom vklopimo v različnih trenutkih glede na njegovo sinusno blokirno napetost, lahko izkoristimo za t.i. **fazno krmiljenje**. Slika 5.6 kaže razmere, če je breme ohmsko. S spreminjanjem velikosti zakasnitve proženja glede na začetek pozitivnega oz. negativnega sinusnega polvala gonilne napetosti, tj. s spreminjanjem velikosti krmilnega kota α , lahko krmilimo (spreminjamo) velikost napetosti na bremenu R in s tem tudi velikosti toka i . Napetost na bremenu (nešrafirani del u na sl. 5.6.b) je del (izrez) sinusoidne gonilne napetosti.



Slika 5.6: Krmiljenje enofaznega izmeničnega toka s tiristorskim nastavljalnikom: a) vezje, b) potek napetosti in toka pri ohmskem bremenu

In ker je breme ohmsko, je take oblike tudi tok i . Krmilni kot α lahko spreminjamo od 0 do 180° el. Pri kotu $\alpha=0$ ni »izreza« in sta napetost na bremenu in tok maksimalna. Pri največjem izkrmiljenju $\alpha=180^\circ$ el. po postaneta napetost in tok nič. To kaže tudi sl. 5.7.a: pri različno velikih krmilnih kotih α se iz sinusoide »izrezujejo« večji ali manjši začetni deli polvalov.



Slika 5.7: Poteki napetosti in tokov v vezju s sl. 5.6.a v odvisnosti od različno velikih krmilnih kotov α pri različnih bremenih: a) ohmsko breme, b) mešano ohmsko-induktivno breme, c) induktivno breme

Razmere se zelo spremenijo, če breme ni ohmsko. Na sl. 5.7.b in c so prikazane oblike toka za nekaj različnih vrednosti krmilnega kota α za mešano ohmsko-induktivno oz. za čisto induktivno breme.

Pri **induktivnem** bremenu je tok $i(t)$ podan z enačbo:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

| | |
|-------------------------|--|
| $U \dots$ | efektivna vrednost gonilne sinusne napetosti |
| $\omega = 2\pi f \dots$ | krožna frekvenca |
| $f = 1/T \dots$ | frekvenca gonilne sinusne napetosti |
| $T \dots$ | perioda gonilne sinusne napetosti |

Ta enačba velja za območje krmilnega kota $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ el. Tok $i(t)$ je torej sestavljen iz sinusnega toka, zmanjšanega za nek **konstantni** del, ki je tem večji, čim večji je kot α . Kakor vsak induktivni tok zaostaja tudi ta tok za sinusno napetostjo za 90° el., zato je tudi krmilno območje za krmilni kot α takšno. Potemtakem so na sl. 5.7.c narisani toki le »kape« ali vršički neke sinusne krivulje. Ti vršički postajajo manjši, če se povečuje krmilni kot α od 90° proti 180° el. ne glede na velikost kota α pa so ti »induktivni« toki, kot vidimo, vedno premaknjeni glede na sinusno napetost U za -90° el. Med tokovnimi vršički nastopajo breztokovni odseki: tok je prekinjevan (trgan).

Matematično bolj zamotane razmere dobimo, če je breme mešano, npr. **ohmsko-induktivno** (sl. 5.7 b). Tedaj velja za tok $i(t)$ enačba:

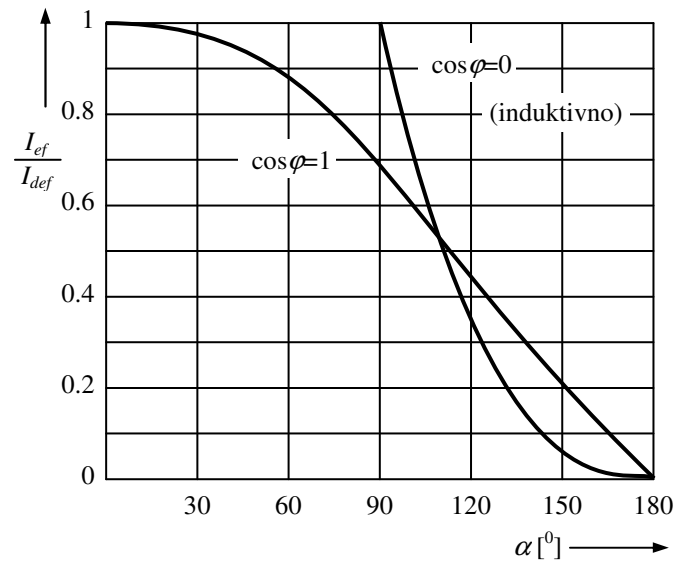
$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} \right]$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

Tok $i(t)$ ni več sinusen, niti ni del sinusoide, temveč ga sestavljata neka sinusna in enosmerna komponenta, ki upada eksponencialno s časovno konstanto:

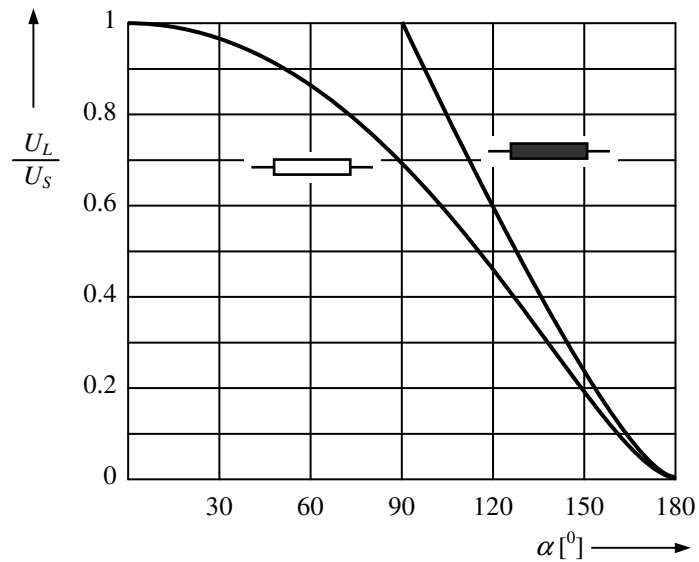
$$\omega = \frac{L}{R}$$

Slika 5.8 kaže, kako se spreminja efektivna vrednost nesinusnega toka i pri ohmskem ($\cos \varphi = 1$) in induktivnem ($\cos \varphi = 0$) bremenu v odvisnosti od krmilnega kota α . Ponovno vidimo, da je krmilno območje pri ohmskem bremenu $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ el., pri induktivnem pa $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ el..



Slika 5.8: Krmilna karakteristika izmeničnega tiristorskega nastavljalnika toka

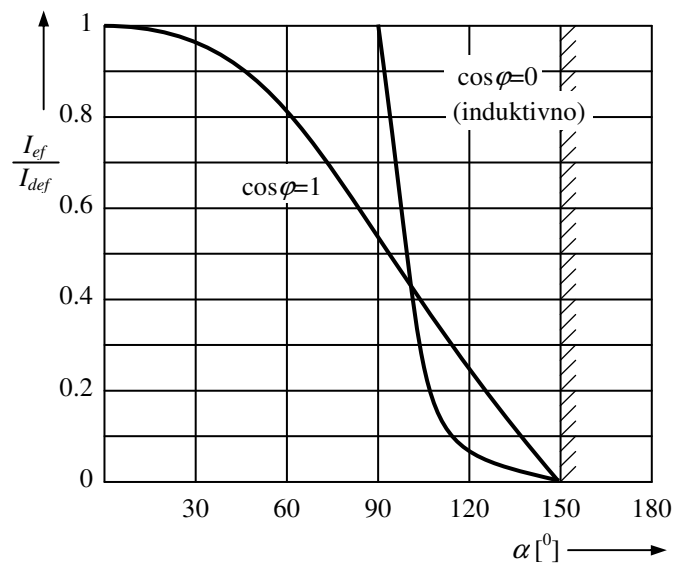
Slika 5.9 kaže velikost efektivne vrednosti izhodne napetosti na ohmskem oz. induktivnem bremenu v odvisnosti od krmilnega kota α .



Slika 5.9: Krmilna karakteristika izmeničnega tiristorskega nastavljalnika s sl.5.6: U_L -efektivna vrednost napetosti na bremenu (R ali L) v odvisnosti od krmilnega kota α ; U_S – efektivna vrednost gonilne sinusne napetosti

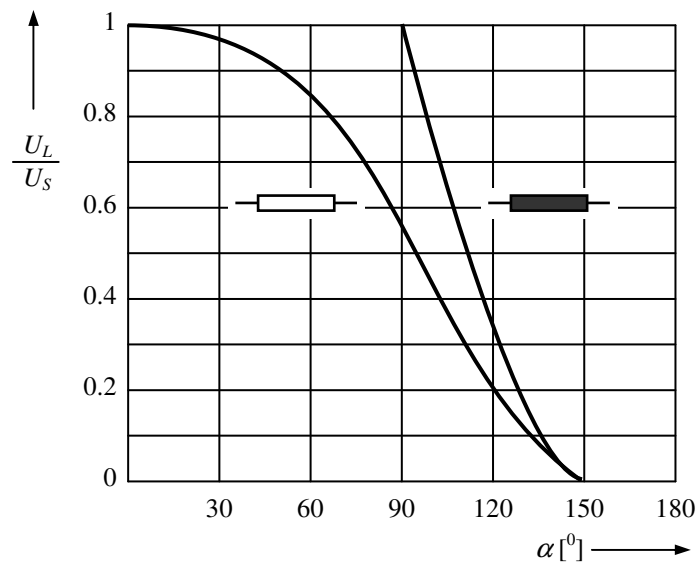
5.3.1 Trifazni tiristorski nastavljalnik

Tudi v trifaznih sistemih lahko uporabimo tiristorska stikala za krmiljenje toka i oz. napetosti u na bremenu. Podobno kot pri enofaznem primeru lahko tudi pri trifaznem analiziramo razmere in napišemo ustrezne enačbe, vendar so razmere precej bolj zamotane in rezultati nepregledni. Slika 5.10 kaže statično karakteristiko za breme. Vidimo, da je krmilno območje pri ohmskem bremenu $0 \leq \alpha \leq 150^\circ$ el., pri induktivnem pa $90 \leq \alpha \leq 150^\circ$ el.



Slika 5.10: Krmilna karakteristika za tok za trifazni nastavljalnik: I_{ef} -efektivna vrednost bremenskega toka, I_{0ef} -največja efektivna vrednost bremenskega toka pri krmilnem kotu $\alpha = 0$ (za ohmsko breme) oz. $\alpha = 90^\circ$ el. (za induktivno breme).

Slika 5.11 kaže krmilno karakteristiko za napetost za trifazni tiristorski nastavljalnik.



Slika 5.11: Krmilna karakteristika za napetost za trifazni tiristorski nastavljalnik v vezavi zvezda brez ničlovoda: U_L - efektivna vrednost napetosti na bremenu; U_S - efektivna vrednost gonilne sinusne napetosti