

Jurgec Nikola 0036479818	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA	Siječanj, 2017
	UČINSKA ELEKTRONIKA	
	TIRISTORSKI USMJERIVAČKI SPOJEVI Zadatak broj 2	

1. Uvod

1.1. Cilj vježbe

Simuliranje ponašanja jednofaznih i trofaznih tiristorskih usmjerivačkih spojeva primjenom simulacijskog paketa Simplorer.

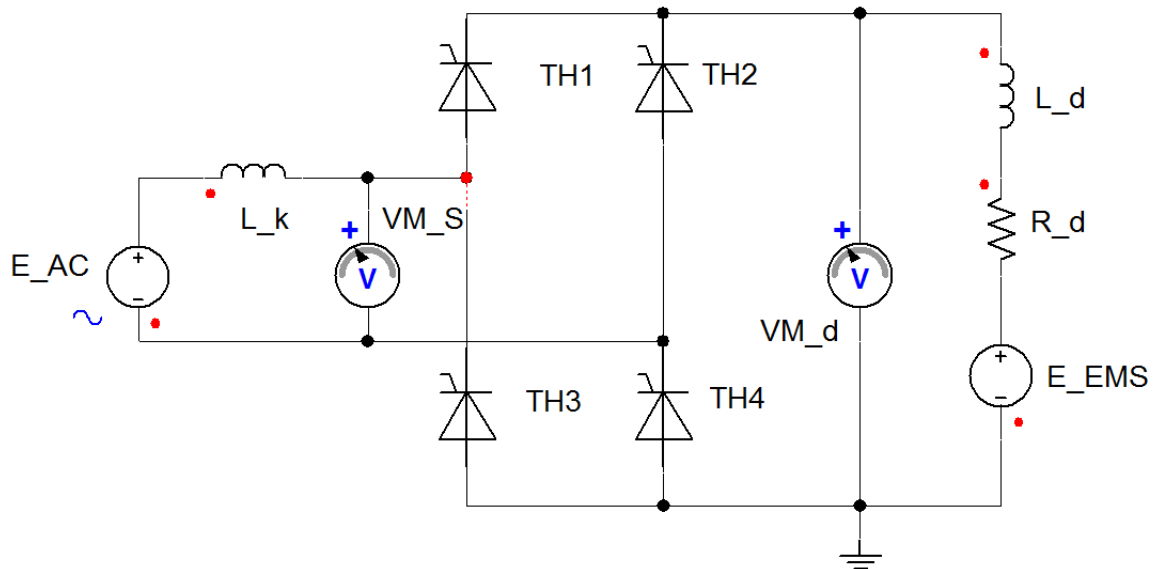
1.2. Opis vježbe

Vježba se sastoji u simuliranju električnog ponašanja tiristorskih usmjerivačkih spojeva u jednofaznom mosnom spoju i trofaznom spoju sa srednjom točkom. Simuliraju se spojevi opterećeni induktivnim trošilom i elektromotornom silom. Snimaju se valni oblici napona i struje na trošilu, napona i struje na tiristorima i struje kroz naponski izvor. Posebno se razmatra ispravljački i izmjenjivački način rada ovih spojeva. Na početku se simulira ponašanje idealnih usmjerivačkih spojeva, tj. spojeva bez komutacijskog induktiviteta. Nakon simulacije idealnih usmjerivačkih tiristorskih spojeva promatra se utjecaj komutacijskog induktiviteta na ponašanje promatranog spoja.

Druga komponenta vježbe je rad u laboratoriju učinske elektronike gdje se provode mjerenja na stvarnom usmjerivaču u jednofaznom mosnom spoju s pasivnim, omsko-induktivnim trošilom.

2. TIRISTORSKI USMJERIVAČ U JEDNOFAZNOM MOSNOM SPOJU

2.1. Idealni tiristorski usmjerivač



Slika 2.1: Shema ispravljača opterećenog radno-induktivnim trošilom

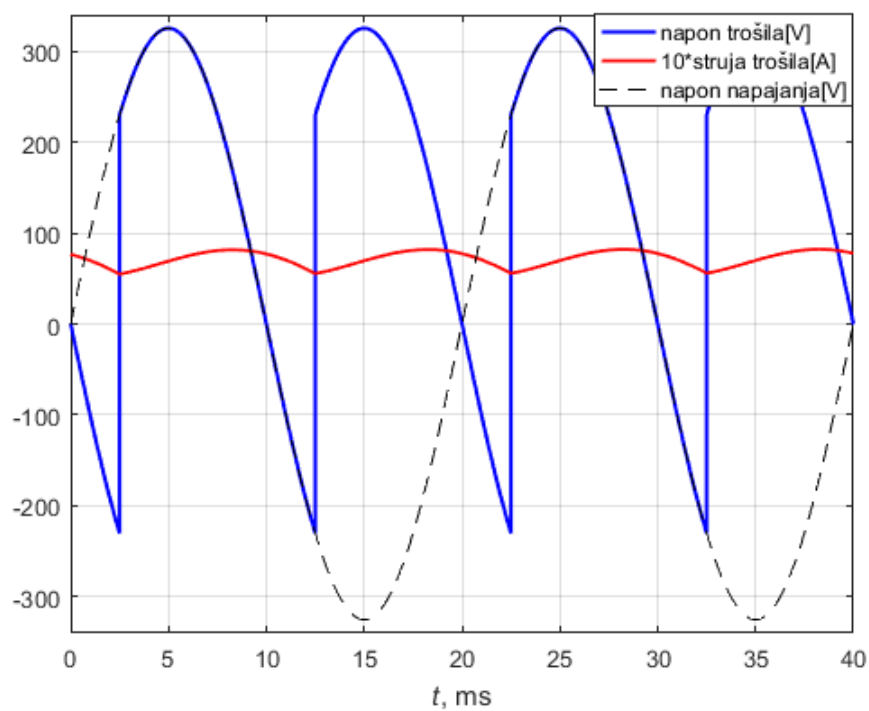
Slika 2.1 prikazuje shemu jednofaznog tiristorskog usmjerivača, zadane su vrijednosti: $L_d = 300\text{mH}$, $E_{EMS} = 0\text{V}$, $\alpha = 45^\circ$, $U_s = 230\sqrt{2}\sin(\omega t)$, $f = 50\text{Hz}$, $R_d = 20\Omega$, iznos komutacijskog induktiviteta $L_k = 0\text{H}$, napon praga tiristora $U_T = 0\text{V}$, dinamički otpor tiristora $r_T = 0\Omega$ jer je promatran idealni sklop. Iz zadanog kuta upravljanja α vidljivo je da će ovaj usmjerivački spoj raditi u ispravljačkom načinu rada.

Slika 2.2 prikazuje valni oblik struje i napona na radno-induktivnom trošilu spojenom na tiristorski ispravljački spoj u jednofaznom mosnom spoju uz kut upravljanja $\alpha = 45^\circ$. Struja trošila je neisprekidana, ali zbog konačnog induktiviteta valovita.

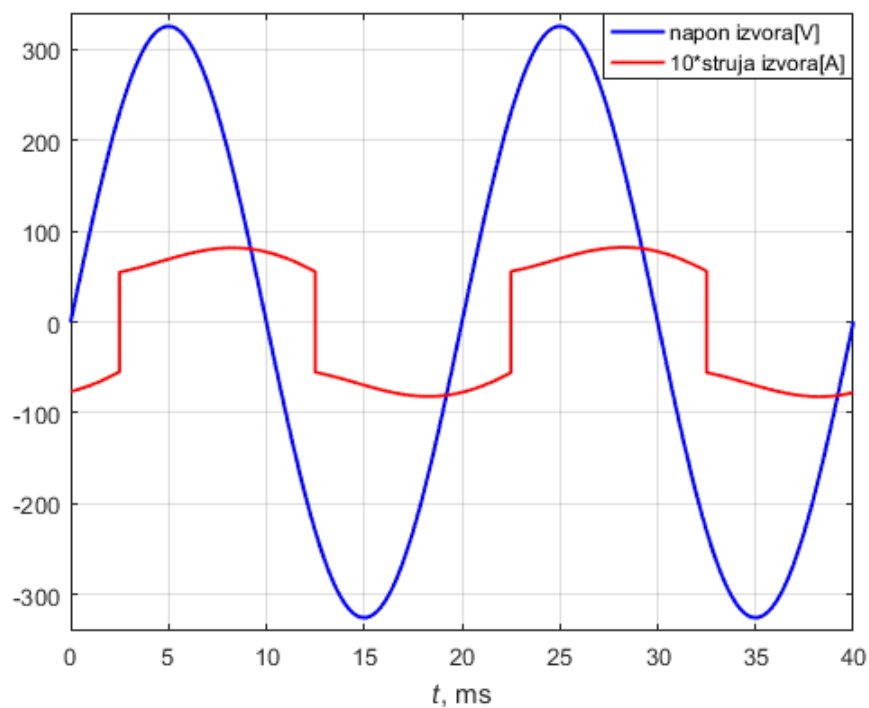
Zbog neisprekidane struje tiristori ne prestaju voditi kad je na njima negativni napon ($U_{AK} < 0$), te je na izlaz propušan i negativni dio poluperiode izvora tako dugo dok struja kroz njih ne poprimi vrijednost $I_T = 0\text{A}$. (Slika 2.4)

U slučaju velike vremenske konstante trošila, svi viši harmonici struje su zanemarivi, struja trošila ima samo istosmjernu komponentu, a struja kroz izvor je potpuno pravokutna.

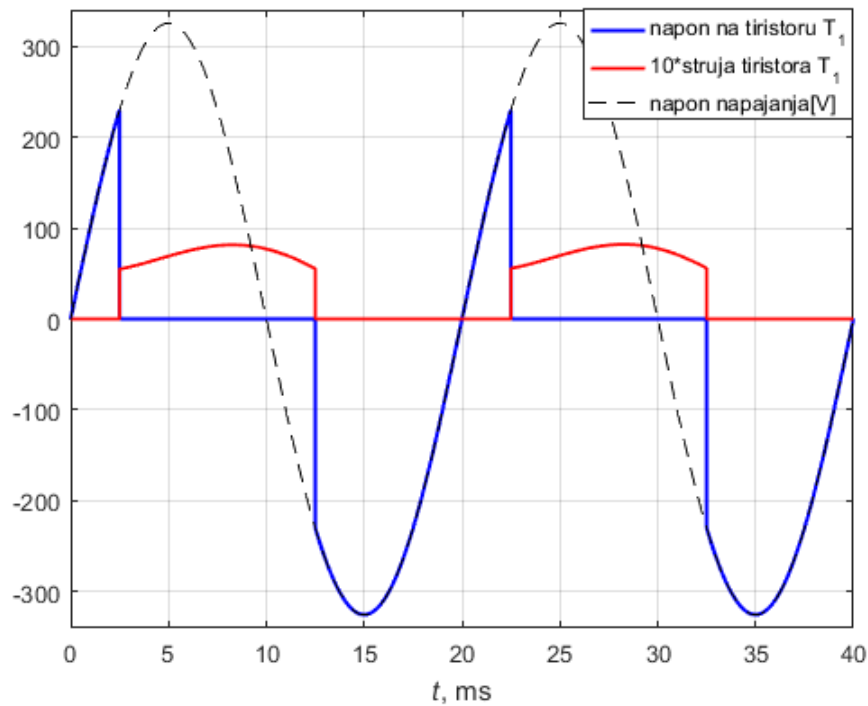
Slika 2.3 prikazuje da valni oblik napona izvora ostaje nepromijenjen, a struja kroz izvor poprima pravokutni oblik.



Slika 2.2: Valni oblik struje i napona na radno-induktivnom trošilu



Slika 2.3: Valni oblik struje i napona izvora tiristorskog ispravljača



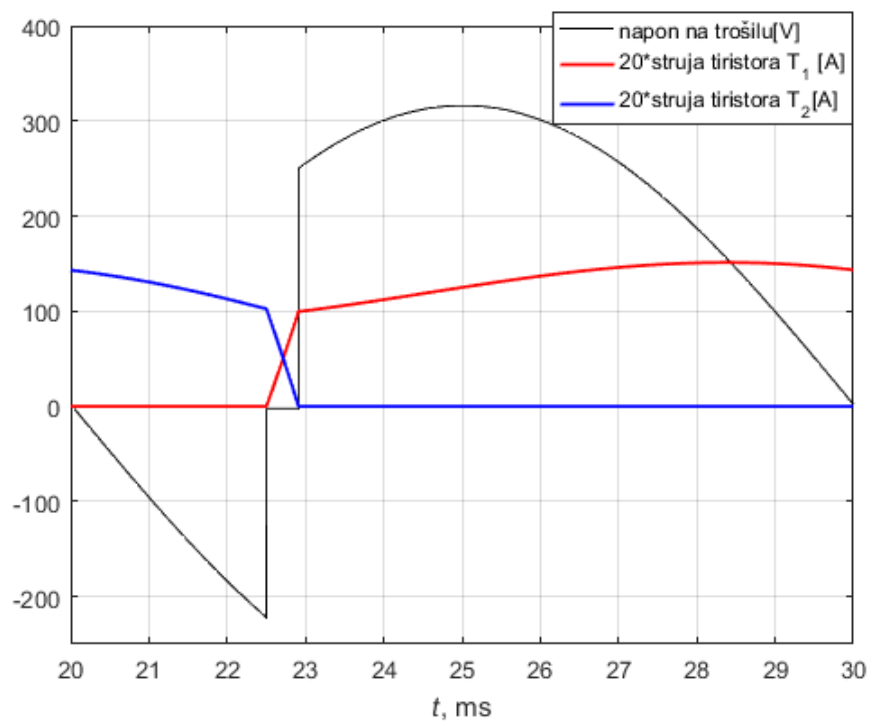
Slika 2.4: Valni oblik struje i napona na tiristoru T_1 tiristorskog ispravljača

2.2. Realni tiristorski usmjerivač

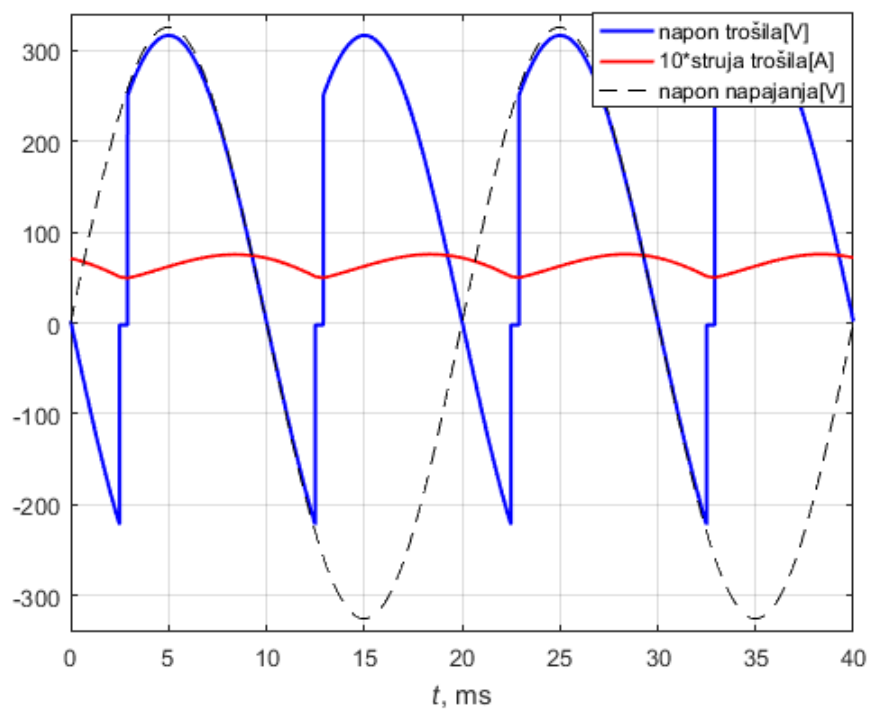
Nadalje je simuliran isti jednofazni tiristorski usmjerivački spoj kao i u prošlom simulacijskom eksperimentu (Slika 2.1) uz promijenjen iznos komutacijskog induktiviteta $L_k = 10mH$, napon praga tiristora $U_T = 1V$, dinamički otpor tiristora $r_T = 50m\Omega$ jer je promatran realni sklop.

Spoj je simetričan, tiristori sklapaju u dijagonalnim parovima($T_{1,4}, T_{2,3}$). U idealnom sklopu proces isključivanja jednog para tiristora i prijenos opterećenja na drugi par tiristora događa se trenutno, ali zbog nadodanog komutacijskog induktiviteta taj prijenos opterećenja u realnom sklopu nije trenutni već za to potrebno određeno vrijeme koje se naziva vrijeme komutacije. Za vrijeme trajanja komutacije vode svi tiristori, izlaz je kratkospojen, odnosno izlazni napon je jednak nuli $U_d = 0V$. Slika 2.5 daje uvećani prikaz opisane pojave.

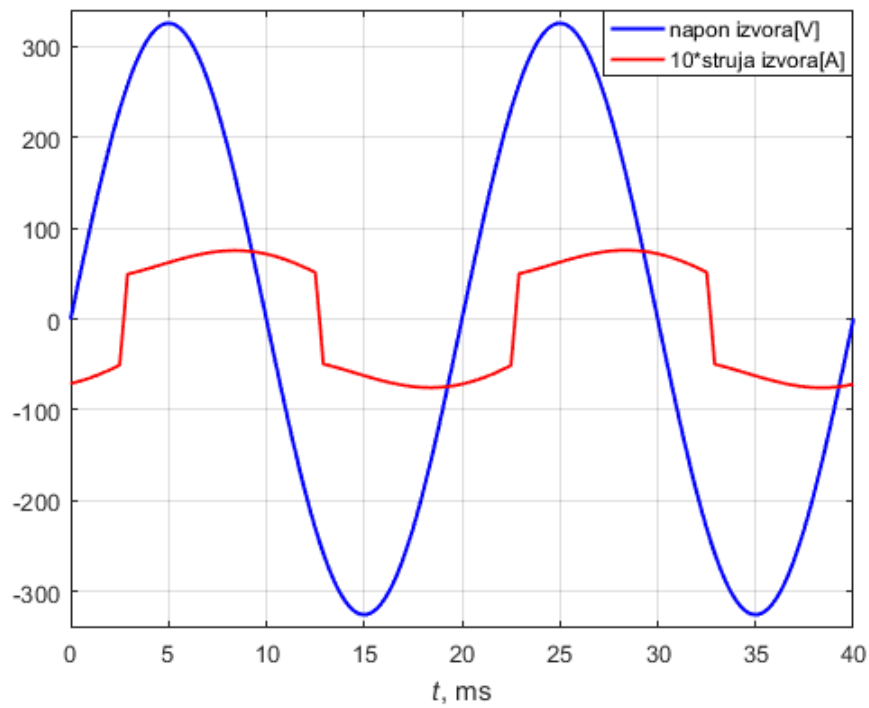
Zbog modela realnih tiristora i pada napona na njima, napon trošila je manje vršne vrijednosti nego napon izvora, a zbog trajanja komutacije smanjena je srednja vrijednost napona na trošilu (Slika 2.6). Prijenos opterećenja iz jednog para tiristora na drugi par tiristora vidljiv je u valnom obliku struje izvora kao povećani nagib u prijelazu iz pozitivnog u negativni dio. (Slika 2.7)



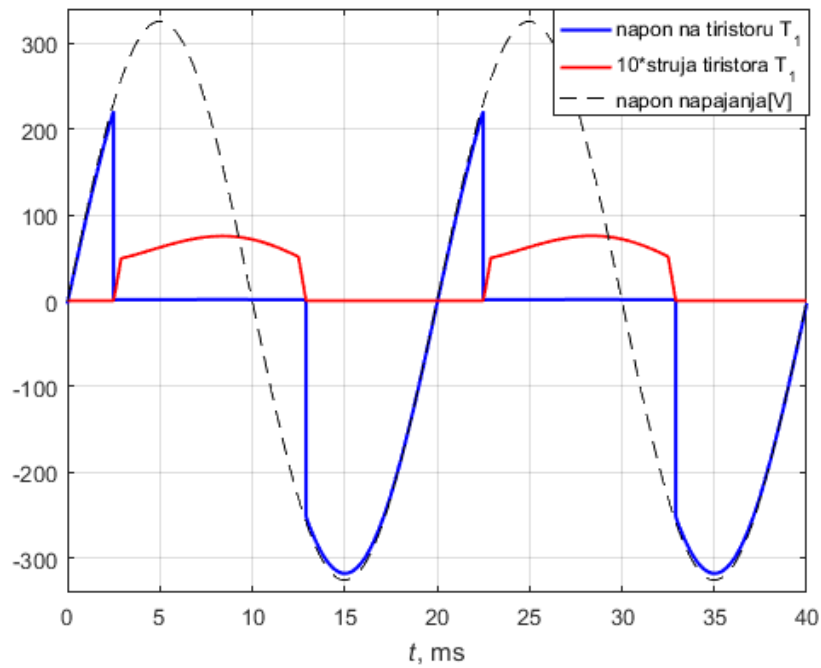
Slika 2.5: Valni oblik struje tiristora T_1 , T_2 i napona na radno-induktivnom trošilu



Slika 2.6: Valni oblik struje i napona na radno-induktivnom trošilu



Slika 2.7: Valni oblik struje i napona izvora tiristorskog ispravljača



Slika 2.8: Valni oblik struje i napona na tiristoru T_1 tiristorskog ispravljača

struja simuliranog (idealnog) spoja iz teorije je definirana kao

$$I_d = \frac{2U_s}{\pi R_d} \cos(\alpha)$$

”najduži” prijelaz struje izvora od negativnog ($I_s = -I_d$) do pozitivnog ($I_s = I_d$) dijela je za $\alpha = 0^\circ$ i za takav kut upravljanja je utjecaj komutacije u danom spoju najizraženiji.

2.3. Usmjerivač u jednofaznom mosnom spoju i protuelektromotorna sila u krugu trošila

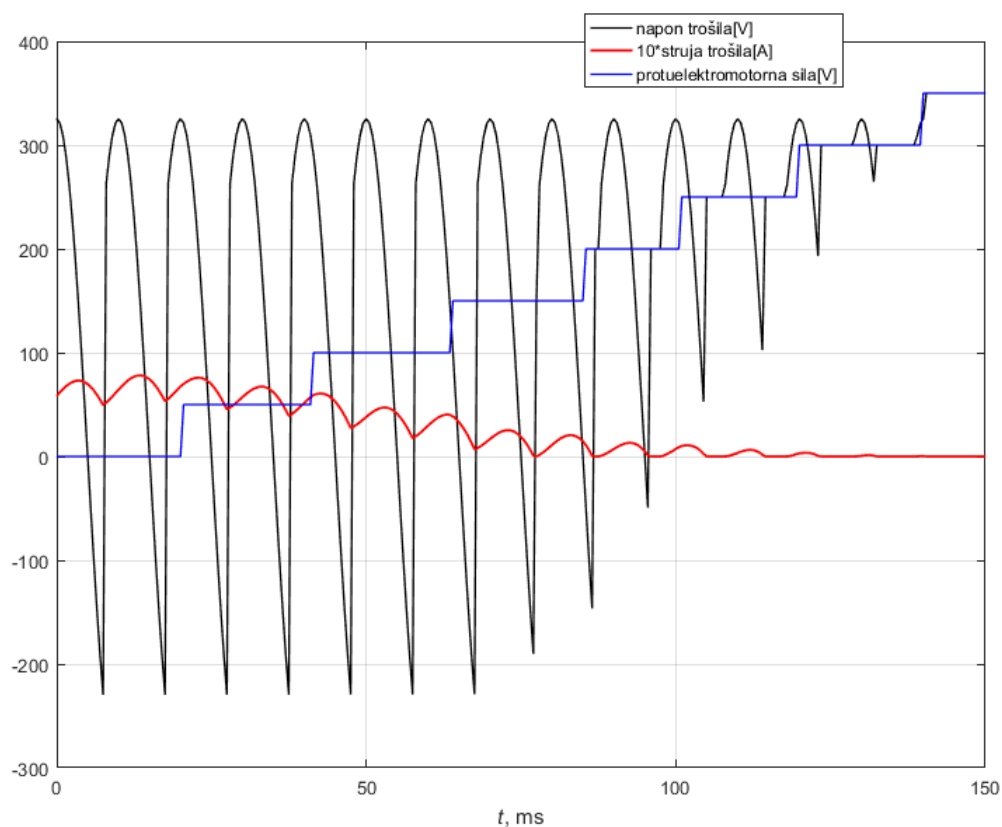
U ovom simulacijskom eksperimentu istražuje se utjecaj elektromotorne sile na valni oblik i iznos napona na trošilu i struje kroz trošilo idealnog usmjerivača. Početno protuelektromotorna sila ima iznos nula. Iznos elektromotorne sile se interaktivno, za vrijeme simulacije povećava u koraku od $\Delta E_{EMS} = 50V$.

Iz teorije je poznato

$$I_d = \frac{U_d - E_{EMS}}{R_d}$$

povećanjem iznosa protuelektromotorne sile vrijednost srednje struje trošila se smanjuje, a povećanje E_{EMS} je na valnom obliku napona trošila vidljivo nakon što spoj prijeđe u isprekidani način rada ($I_d = 0A$).

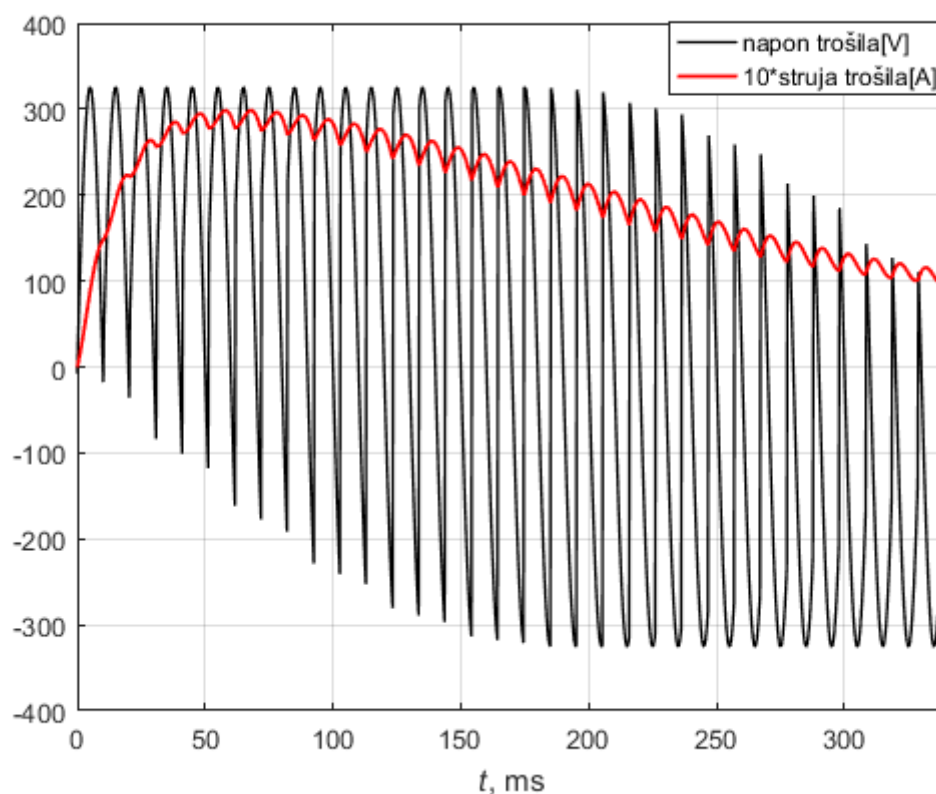
Povećavanjem napona $E_{EMS} > U_{s,max}$ ($350 > 230\sqrt{3}$) tiristori nikad ne počnu voditi jer je $U_{AK} < 0$, kroz trošilo nema struje ($I_d = 0A$), a voltmetar na izlazu mjeri napon istosmjernog izvora (E_{EMS}) (Slika 2.9).



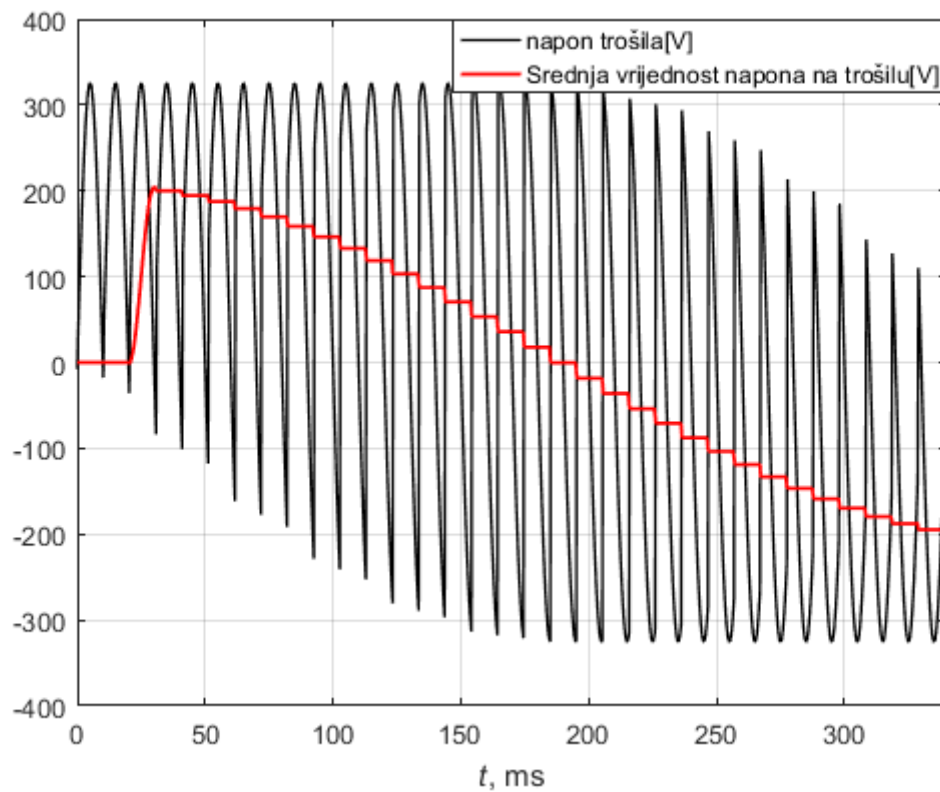
Slika 2.9: Valni oblik struje i napona na tiristoru T_1 tiristorskog ispravljača

2.4. Promjenjivi kut upravljanja

Usmjerivač prelazi u izmjenjivački način rada za kut upravljanja α kod kojeg srednja vrijednost napona $u_{d\alpha}$ postane negativna ($\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$). Smjer istosmjerne struje I_d se ne može promijeniti, jer tiristori dopuštaju tok struje samo u jednom smjeru. Da bi se uz promijenjeni polaritet srednje vrijednosti napona $u_{d\alpha}$ održao isti smjer istosmjerne struje I_d , na istosmjernoj strani mora postojati aktivan izvor. U praksi to može biti istosmjerni motor za vrijeme kočenja. U izmjenjivačkom načinu rada aktivni izvor na istosmjernoj strani šalje energiju u izmjeničnu mrežu. Promjena kuta upravljanja se odvija iz perioda u period. Da bi se simuliralo ponašanje usmjerivača u izmjenjivačkom načinu rada potrebno je zadana je vrijednost elektromotorne sile. $E_{EMS} = -400V$.



Slika 2.10: Valni oblici struje i napona trošila uz linearno rastući kut upravljanja ($\alpha = 500t$)



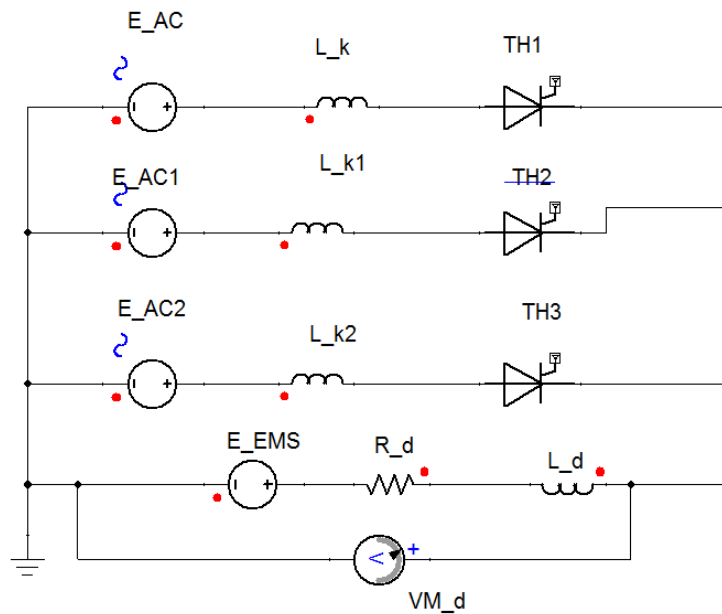
Slika 2.11: Valni oblik napona i srednje vrijednosti napona trošila uz linearno rastući kut upravljanja ($\alpha = 500t$)

Mjerenje srednje vrijednosti napona na trošilu obavljeno je mjernim elementom Sliding Mean Value. Ovaj element mjeri srednju vrijednost napona tako da se mjeri srednja vrijednost zadanog valnog oblika unutar prethodne periode. Zbog toga je izračunata srednja vrijednost napona na trošilu u prvoj periodi jednaka nuli. (Slika 2.11).

Elektromotorna sila iznosa $E_{EMS} = -400V$ održava struju kroz trošilo kontinuiranom i nepromjenjivog smjera. Promjenom kuta upravljanja $\alpha = 0^\circ$ do približno 180° mijenja se srednja vrijednost napona na trošilu od maksimalne pozitivne vrijednosti do maksimalne negativne vrijednosti. Zbog takve promjene srednje vrijednosti napona na trošilu smanjuje se i iznos srednje vrijednosti struje trošila. (Slika 2.10)

3. TIRISTORSKI USMJERIVAČ U TROFAZNOM SPOJU SA SREDNJOM TOČKOM

Shema tiristorskog usmjerivača u trofaznom spoju sa srednjom točkom prikazana je na slici 3.12. Srednja točka je zajednička točka sekundara usmjerivačkog transformatora (zvjezdiste). Trošilo je spojeno između zajedničke točke sekundara usmjerivačkog transformatora i zajedničke katode tiristora. Trofazni usmjerivački spoj sa srednjom točkom je temeljni trofazni usmjerivački spoj. Različitim kombinacijama dvaju ili više trofaznih usmjerivačkih spojeva sa srednjom točkom dobivaju se složeniji usmjerivački spojevi. Primjerice, serijskim spajanjem dobiva se trofazni mosni spoj.



Slika 3.12: Shema tiristorskog usmjerivača u trofaznom spoju sa srednjom točkom

3.1. Idealni usmjerivač u trofaznom spoju opterećen radno induktivnim trošilom

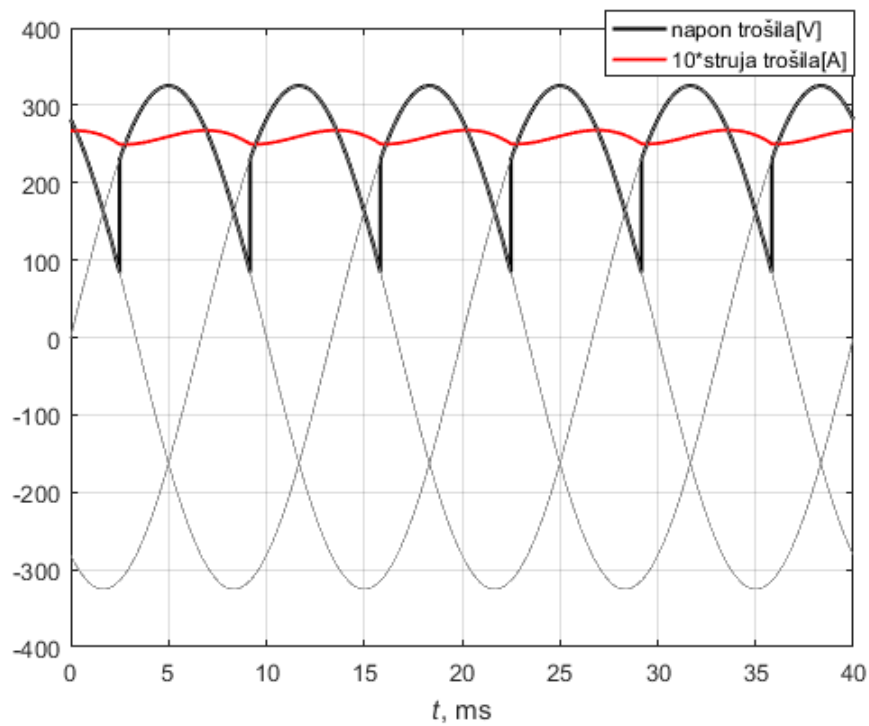
Slika 3.12 prikazuje shemu tiristorskog usmjerivača u trofaznom spoju sa srednjom točkom, zadane su vrijednosti: $L_d = 0.1H$, $E_{EMS} = 0V$, $\alpha = 45^\circ$, $U_s = 230\sqrt{2}\sin(\omega t)$, $f = 50Hz$, $R_d = 10\Omega$, iznos komutacijskog induktiviteta $L_k = 0H$, napon praga tiristora $U_T = 0V$, dinamički otpor tiristora $r_T = 0\Omega$ jer je promatran idealni sklop.

Slika 3.13 prikazuje valni oblik struje i napona na radno-induktivnom trošilu spojenom na tiristorski ispravljački spoj u trofaznom spoju sa srednjom točkom uz kut upravljanja tiristora $\alpha = 45^\circ$. Struja trošila je neisprekidana, ali zbog konačnog induktiviteta valovita.

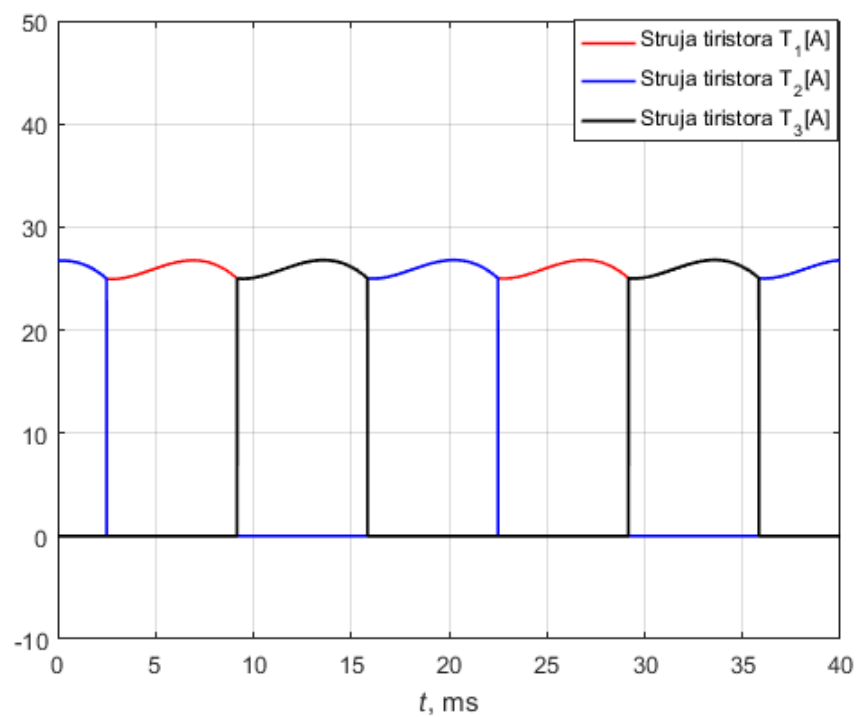
Zbog neisprekidane struje tiristori ne prestaju voditi kad je na njima negativni napon ($U_{AK} < 0$), te je na izlaz propuštan i negativni dio poluperiode izvora tako dugo dok struja kroz njih ne poprimi vrijednost $I_T = 0A$ (Slika 3.14)

U slučaju velike vremenske konstante trošila ($L \rightarrow \infty$), svi viši harmonici struje mogu se zanemariti, struja trošila ima samo istosmjernu komponentu.

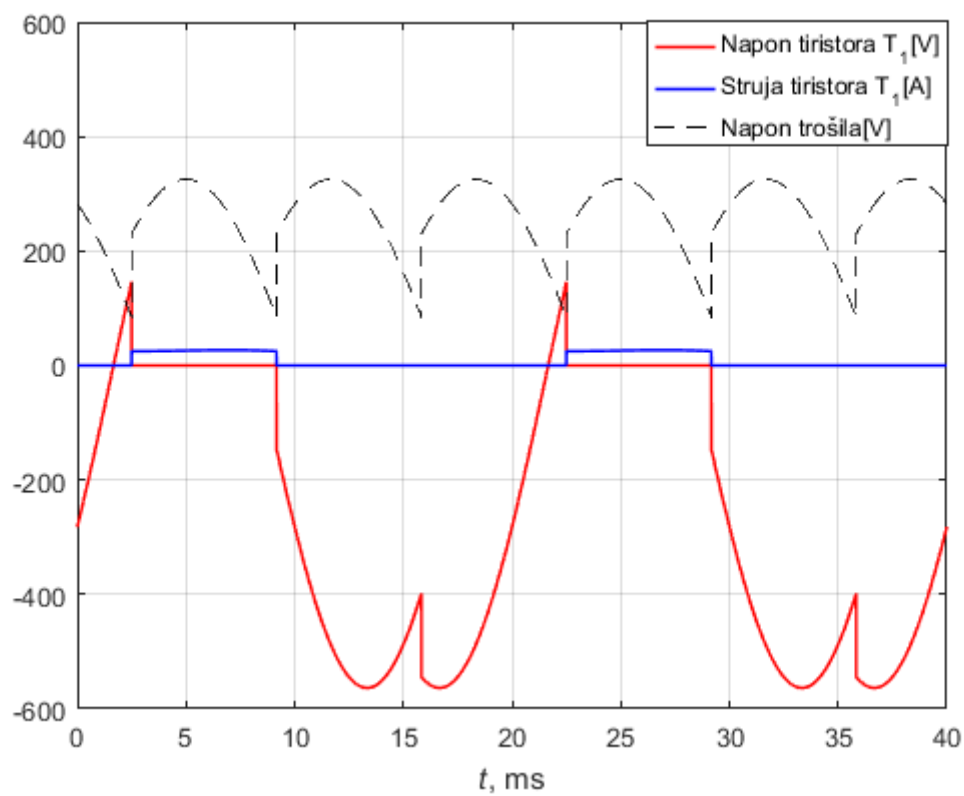
Slika 3.16 prikazuje valni oblik napona jedne faze koji ostaje nepromijenjen, a struja izvora jedne faze poprima pravokutni oblik.



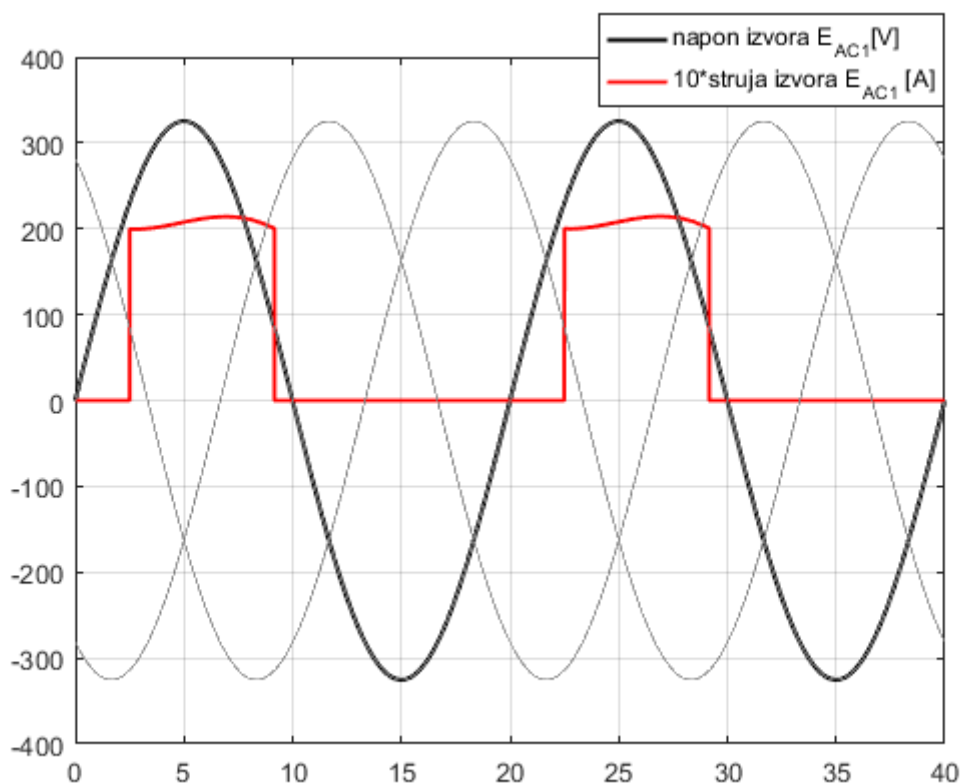
Slika 3.13: Valni oblik struje i napona trošila



Slika 3.14: Valni oblik struje svih tiristora u spoju



Slika 3.15: Valni oblik struje i napona tiristora T_1



Slika 3.16: Valni oblik struje i napona izvora E_{AC1}

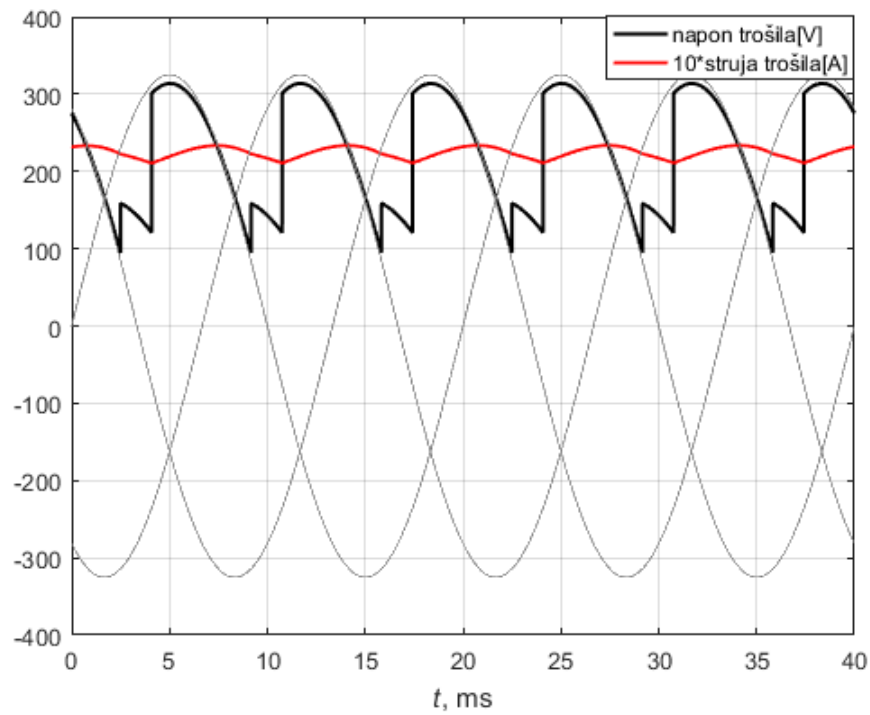
3.2. Realni usmjerivač u trofaznom spoju opterećen radno induktivnim trošilom

Nadalje je simuliran trofazni tiristorski usmjerivački spoj prikazan na slici 3.12 uz promijenjen iznos komutacijskog induktiviteta $L_k = 10mH$, napon praga tiristora $U_T = 1V$, dinamički otpor tiristora $r_T = 10m\Omega$ jer je promatran realni sklop.

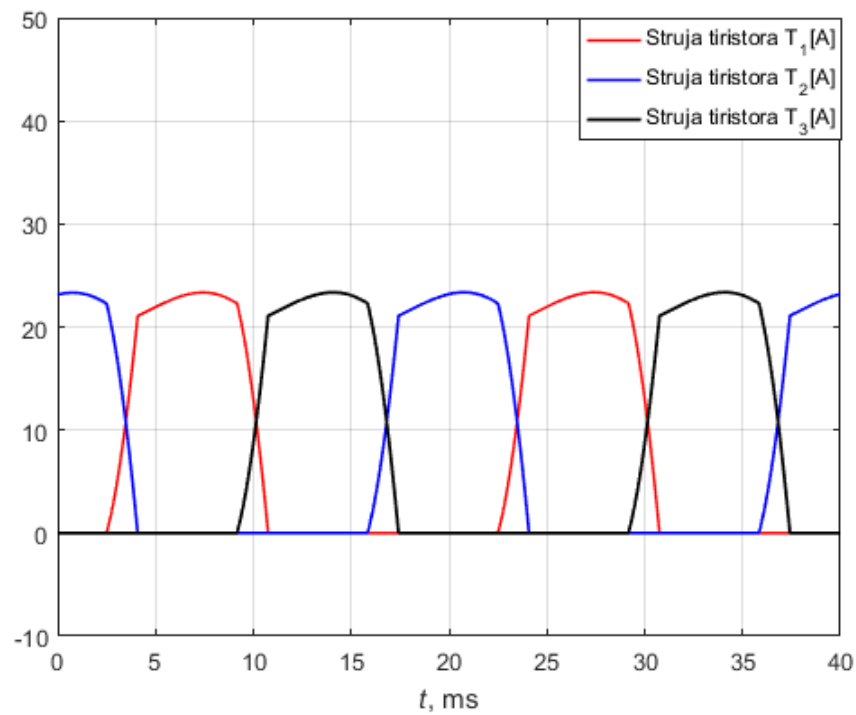
Za vrijeme trajanja komutacije vode oba tiristora između kojih komutira struja, izlazni napon je jednak aritmetičkoj sredini napona faza koje komutiraju. Zbog postojanja komutacije, odnosno komutacijskog induktiviteta smanjuje se srednja vrijednost napona na trošilu, postoje "propadi napona" (slika 3.17).

U valnom obliku struje kroz E_{AC2} vidljiv je postepeni porast i pad struje zbog komutacijskog induktiviteta (Slika 3.20). Porast i pad struje se odvija prema sinusnoj funkciji jer je u komutacijskom krugu samo komutacijski napon (napon mreže) i komutacijski induktiviteti dviju faza koje komutiraju.

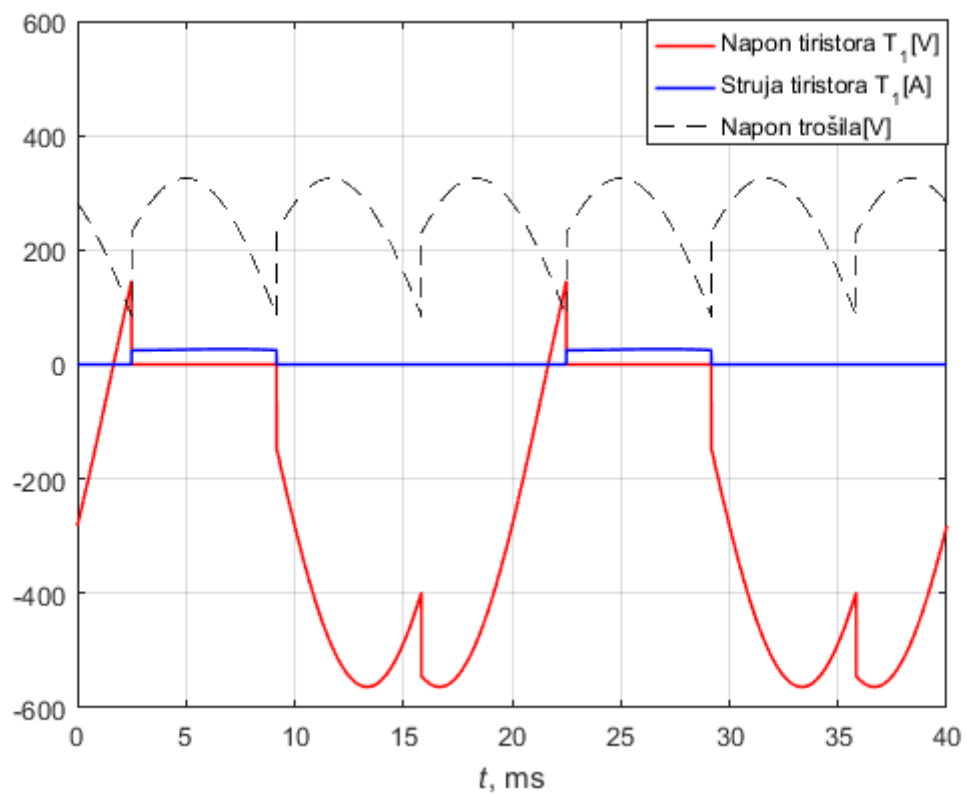
U valnom obliku struje kroz tiristor vidljiv je postepeni porast i pad struje zbog komutacijskog induktiviteta (slika 3.18).



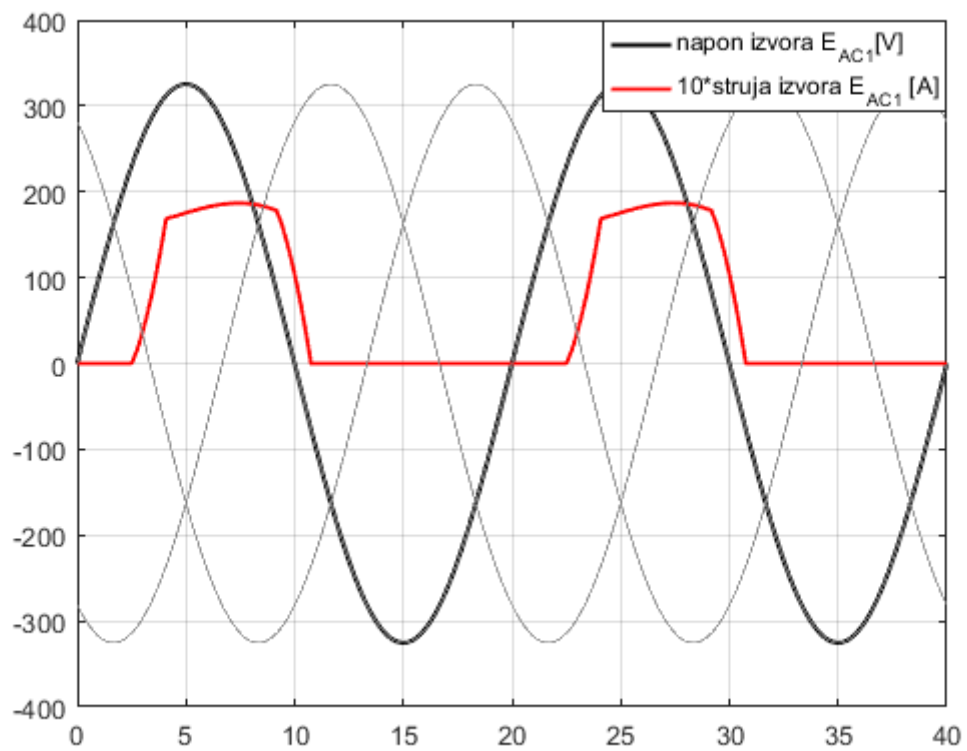
Slika 3.17: Valni oblik struje i napona trošila



Slika 3.18: Valni oblik struje svih tiristora u spoju



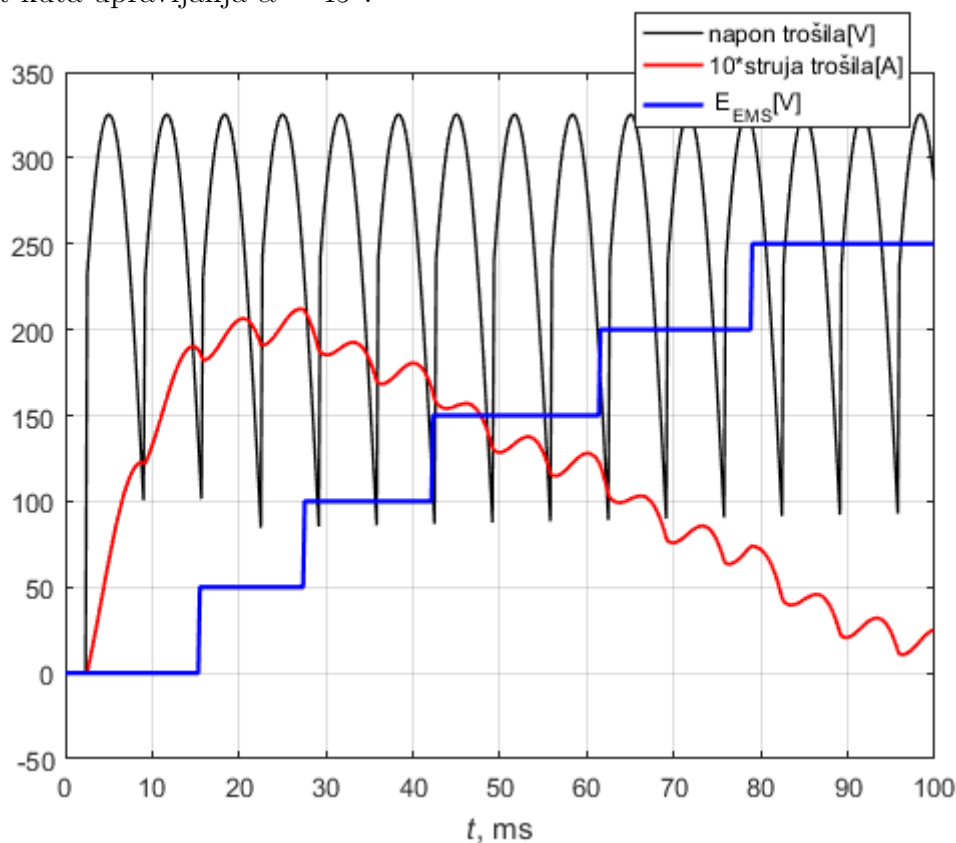
Slika 3.19: Valni oblik struje i napona tiristora T_1



Slika 3.20: Valni oblik struje i napona izvora E_{AC1}

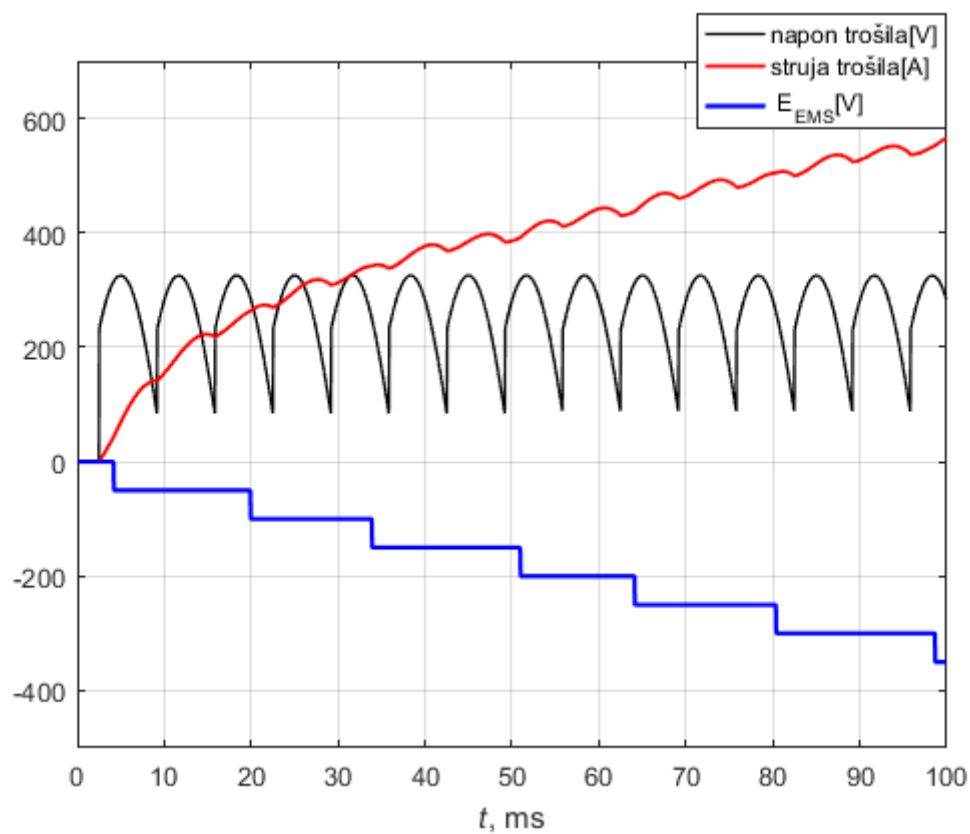
3.3. Usmjerivač u trofaznom spoju opterećen radno induktivnim trošilom s izvorom u krugu trošila

U ovom simulacijskom eksperimentu istražuje se utjecaj elektromotorne sile na valni oblik i iznos napona na trošilu i struje kroz trošilo. Početno elektromotorna sila ima iznos nula. Simuliran je trofazni tiristoroski usmjerivač bez komutacijskih induktiviteta uz konstantnu vrijednost kuta upravljanja $\alpha = 45^\circ$.



Slika 3.21: Valni oblici struje i napona trošila i napona elektromotorne sile

Povećavanjem iznosa elektromotorne sile smanjuje se vrijednost struje kroz trošilo. Elektromotorna sila se u ovom slučaju ponaša kao protuelektromotorna sila (Slika 3.21).

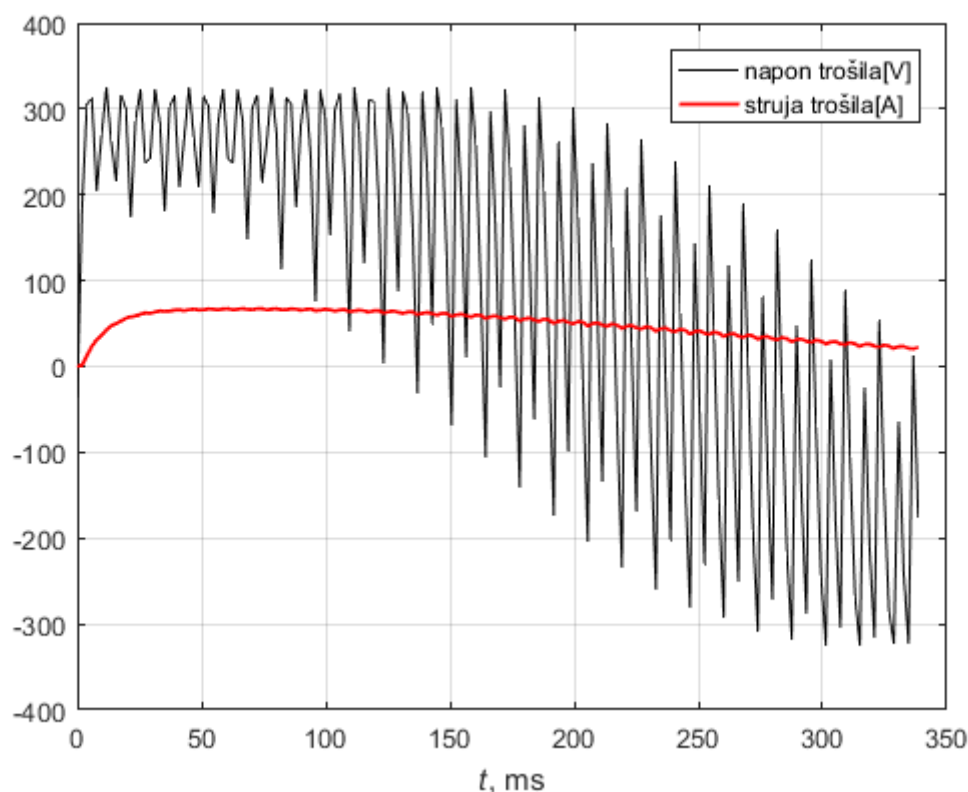


Slika 3.22: Valni oblici struje i napona trošila i napona elektromotorne sile

Smanjivanjem iznosa elektromotorne sile s obzirom na referentni polaritet naponskih izvora u simulacijskom modelu povećava se vrijednost struje kroz trošilo. Struja je kontinuirana i u naponu na trošilu se ne vidi napon elektromotorne sile (Slika 3.22).

3.4. Usmjerivač u trofaznom spoju s promjenjivim kutem upravljanja tiristora

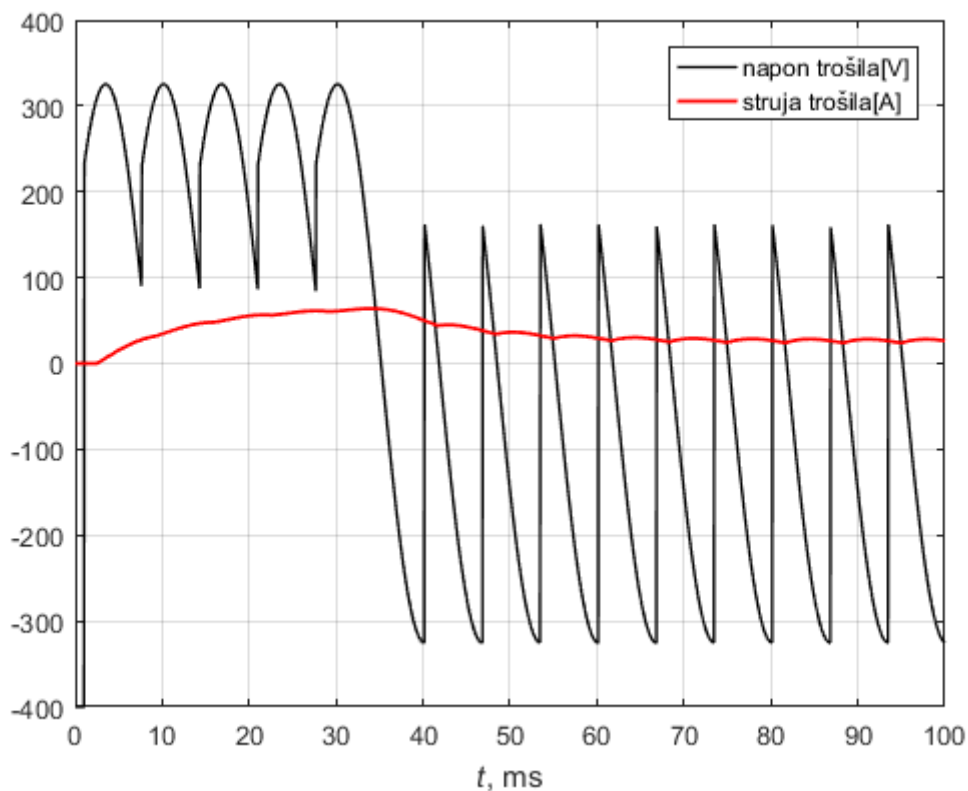
Usmjerivač prelazi u izmjenjivački način rada za kut upravljanja α kod kojeg srednja vrijednost napona $u_{d\alpha}$ postane negativna. Smjer istosmjerne struje I_d se ne može promijeniti, jer tiristori dopuštaju tok struje samo u jednom smjeru. Da bi se uz promijenjeni polaritet srednje vrijednosti napona $u_{d\alpha}$ održao isti smjer istosmjerne struje I_d , na istosmjernoj strani mora postojati aktivan izvor. U izmjenjivačkom načinu rada aktivni izvor na istosmjernoj strani šalje energiju u izmjeničnu mrežu. Promjena kuta upravljanja se odvija iz perioda u period. Da bi se simuliralo ponašanje usmjerivača u izmjenjivačkom načinu rada zadana je vrijednost elektromotorne sile $E_{EMS} = -400V$.



Slika 3.23: Valni oblici struje i napona trošila uz linearno rastući kut alpha ($\alpha = 500 \times t$)

3.5. Trenutna promjena načina rada usmjerivača u trofaznom spoju sa srednjom točkom

Za vrijeme rada usmjerivača prelazi se direktno u izmjenjivački način rada uz kut upravljanja $\alpha = 150^\circ$ (reverziranje).



Slika 3.24: Valni oblici struje i napona trošila kod reverziranja

Struja trošila je u izmjenjivačkom načinu rada manja nego u ispravljačkom načinu rada, ali u oba slučaja je istog smjera.

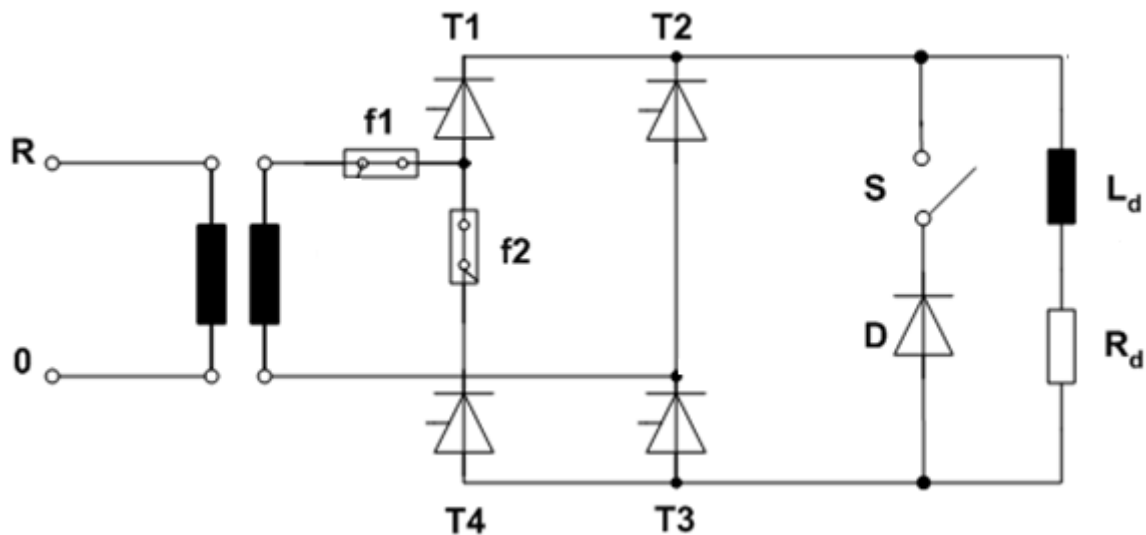
4. MJERENJE U LABORATORIJU

Prilikom mjerenja u laboratoriju umjesto izvora koristi se sekundar transformatora koji mrežni napon snižava na 130V. Valni oblici promatraju se pomoću dvo kanalnog osciloskopa (TETRONIX TDS 2002) te se pomoću odgovarajućeg softvera prebacuju na računalo.

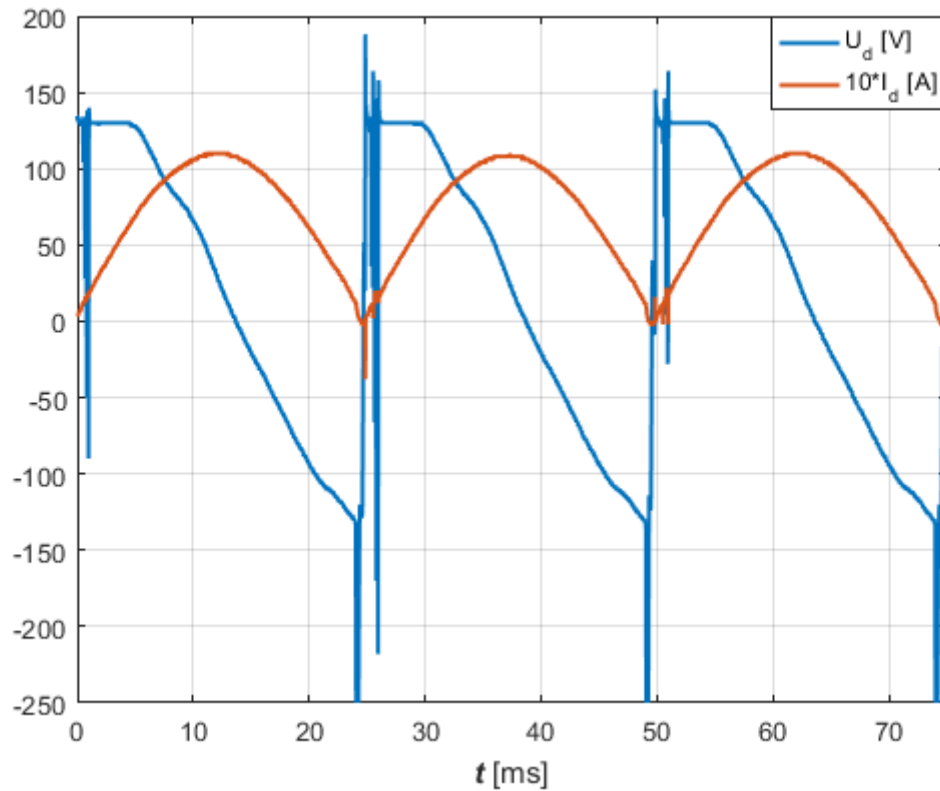
Za mjerenje valnih oblika struje koristi se strujni shunt:8022($0,01\Omega \pm 0.25\Omega$) nazivne snage $P_n = 100mW$ na kojemu se pomoću osciloskopa snimi pad napona te se dalje izračuna pripadna struja. Radni otpor je $R = 20\Omega$, $P=20W$

Također su korištena četiri zavodska tiristora za učinsku elektroniku, zavodska dioda za učinsku elektroniku te sklopka za uključivanje poredne diode u krug trošila.

Mjerenja se provode na usmjerivaču u jednofaznom mosnom spoju s pasivnim, omsko-induktivnim trošilom prikazanom na slici 4.25.



Slika 4.25: Tiristorski ispravljač u jednofaznom mosnom spoju



Slika 4.26: Valni oblici struje i napona trošila uz kut upravljanja $\alpha = 76^\circ el$

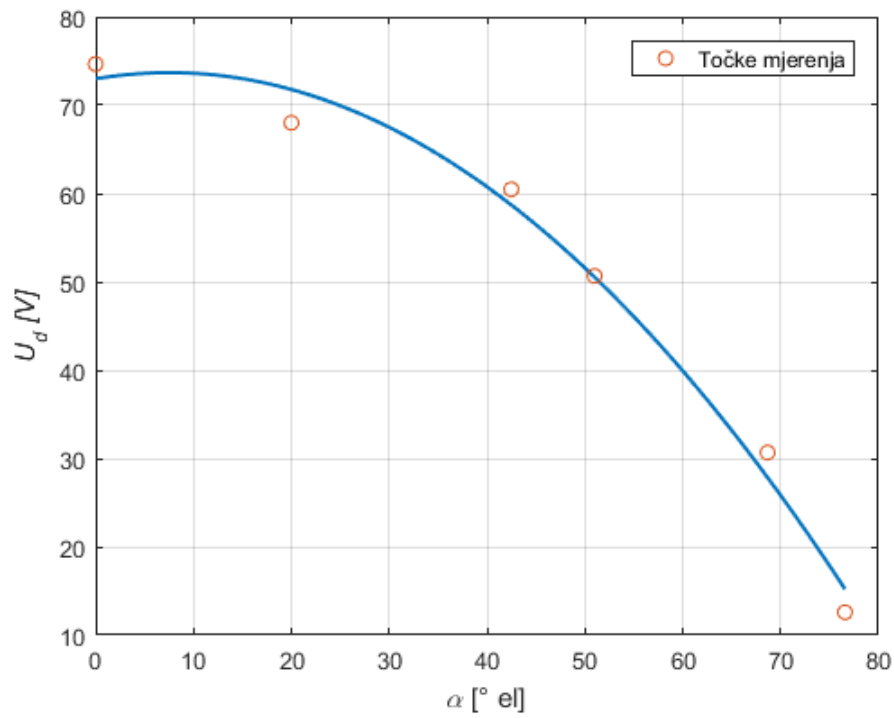
Granični kut definiran je kao kut kod kojeg struja trošila pada na nulu. Na slici 4.26 vidljivo je da se to događa u trenucima $t \approx 25ms$ i $t \approx 50ms$. Ako bi se upravljački kut nastavio povećavati iznad graničnog kuta, struja trošila bi postala isprekidana. Granični kut za promatrano trošilo iznosi $\alpha_g = 76^\circ el$. Na ovakvom laboratorijskom modelu nije mogući trajni izmjenjivački način rada, jer za takav način rada potreban stalan istosmjerni izvor koji će predavati energiju mreži, tj. zavojnica samo kratkotrajno može poslužiti kao izvor energije.

Povećanjem kuta upravljanja smanjuje se iznos srednje vrijednosti napona na trošilu U_d , da bi se to potvrdilo provedena su mjerenja iznosa srednje vrijednosti napona na trošilu za različite kuteve upravljanja α , rezultati su dani tablicom 3.1 i prikazani slikom 4.27.

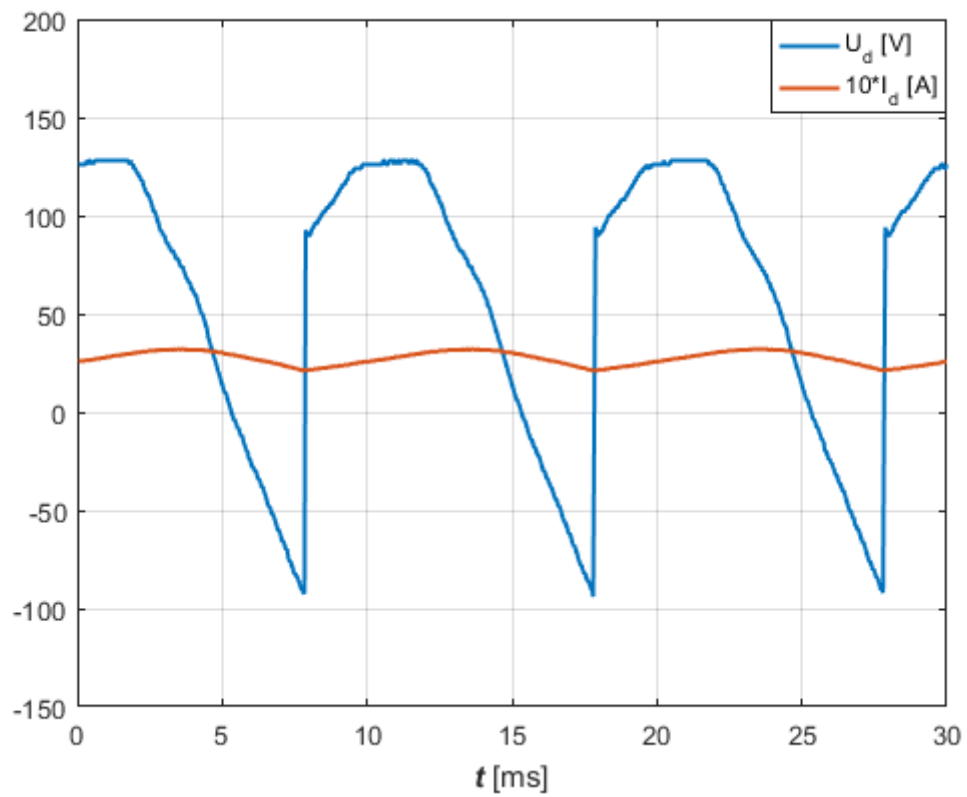
Tablica 3.1 Ovisnost napona U_d o kutu upravljanja α

$\alpha[^\circ]$	$U_d[V]$
0	74.58
42	68.47
51	50.65
68	30,374
76	12,58

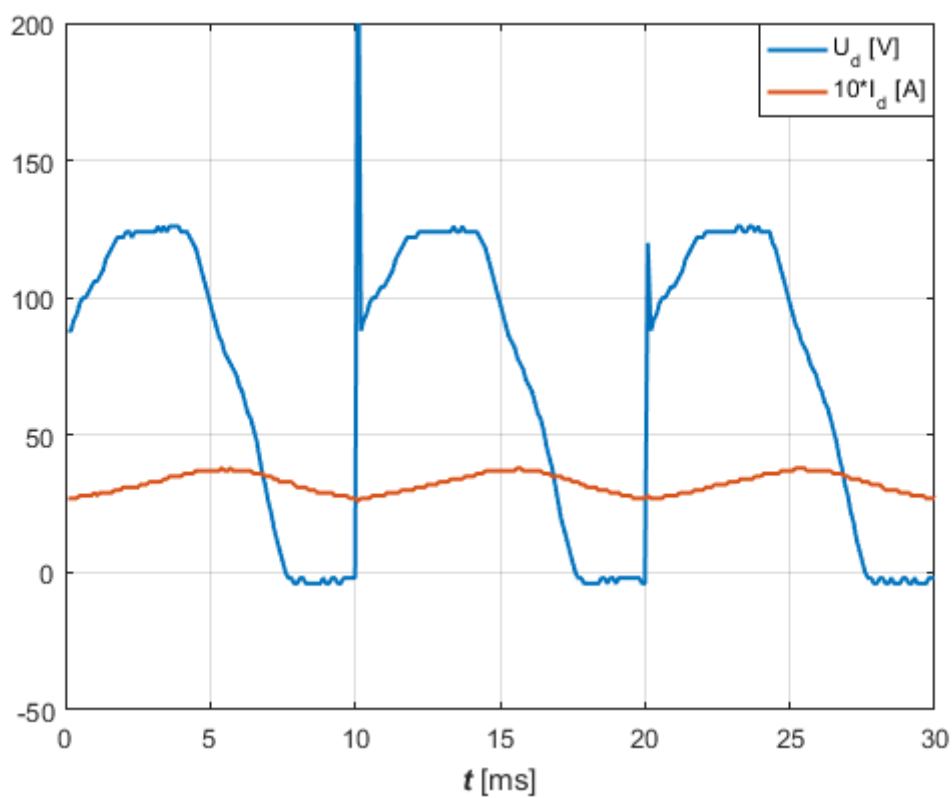
Upravljačka karakteristika usmjerivača prikazuje ovisnost izlaznog napona o kutu upravljanja α (Slika 4.27). Kad bi u krugu trošila postojala protuelektromotorna sila, upravljačka karakteristika bi daljnjim povećavanjem kuta alpha prošla u negativni dio y-osi, tj. iznos napona U_d bi postao negativan.



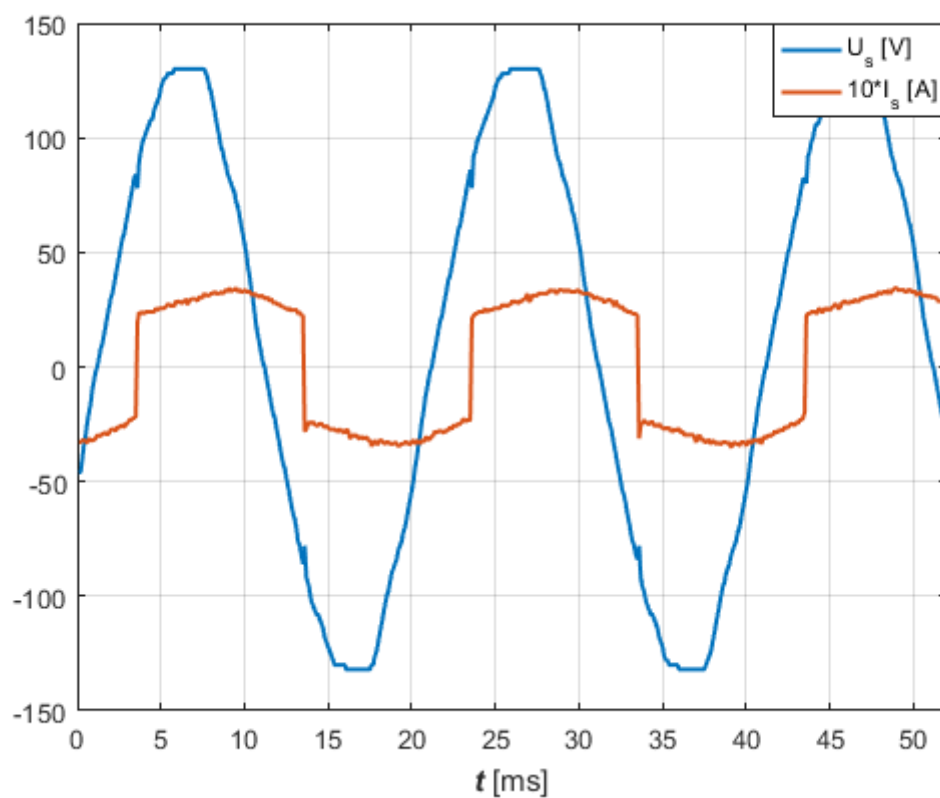
Slika 4.27: Točke mjerenja izlaznog napona U_d u ovisnosti o kutu upravljanja α i aproksimirana upravljačka karakteristiku usmjerivača



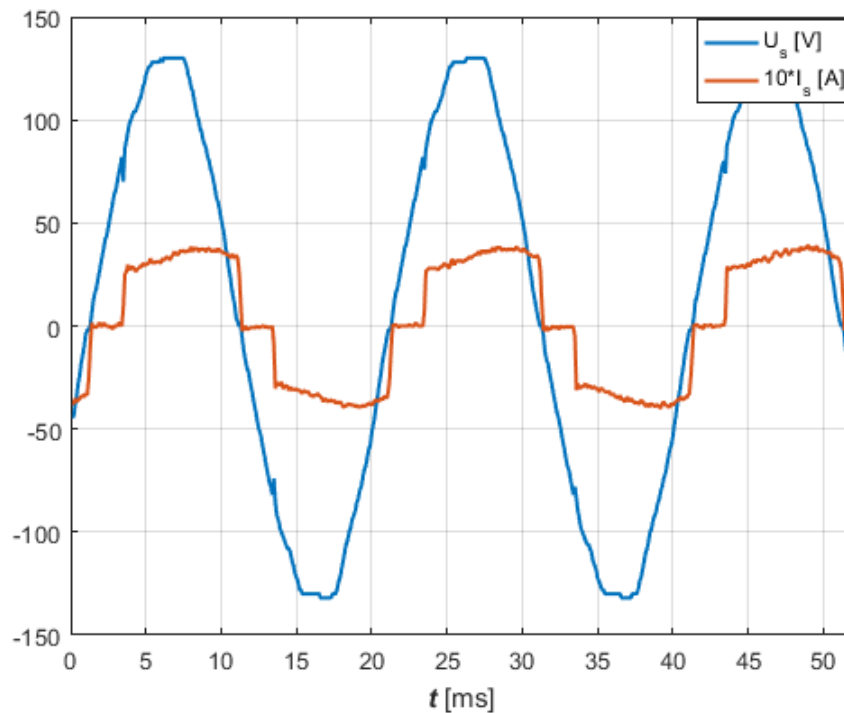
Slika 4.28: Valni oblici struje i napona trošila uz kut upravljanja $\alpha = 45^\circ el$



Slika 4.29: Valni oblici struje i napona trošila uz kut upravljanja $\alpha = 45^\circ el$ i dodanu porednu diodu trošilu



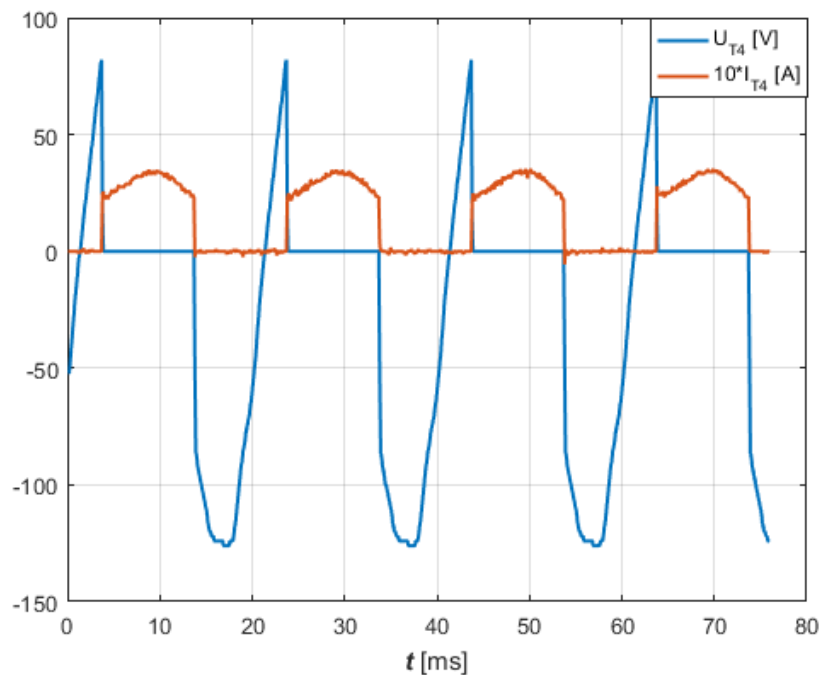
Slika 4.30: Valni oblici struje i napona izvora uz kut upravljanja $\alpha = 45^\circ el$



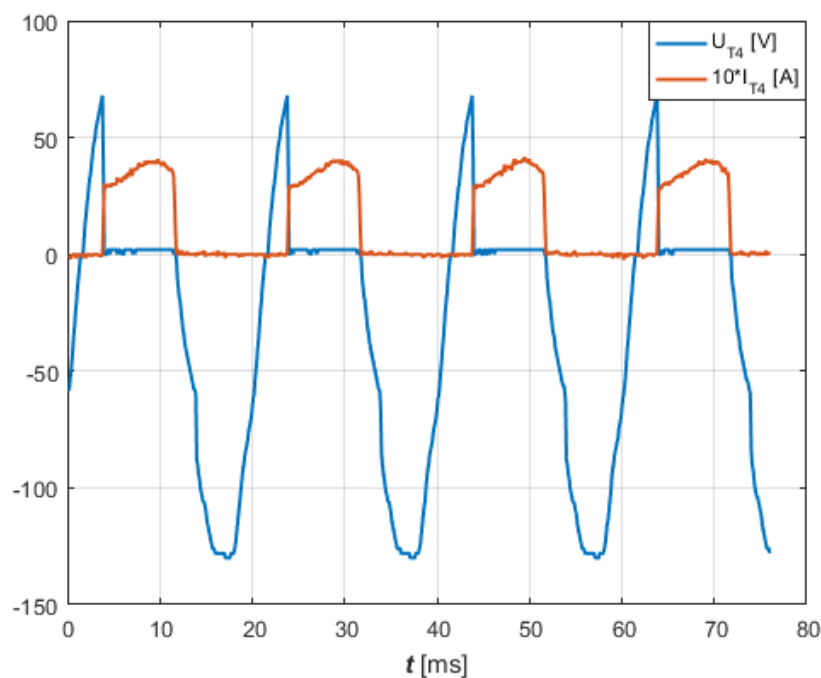
Slika 4.31: Valni oblici struje i napona izvora uz kut upravljanja $\alpha = 45^\circ$ i dodanu porednu diodu trošilu

Upotrebom poredne diode, valni oblik napona na trošilu gubi negativne dijelove (Slika 4.29). Za vrijeme negativnog poluvala ulaznog napona, a za vrijeme dok još uvijek usljed kuta upravljanja α nije proveo sljedeći par tiristora, struja trošila se zatvara kroz porednu diodu. Napon na trošilu za vrijeme vođenja diode je jednak iznosu pada napona na diodi $U_d \approx 1.5V$. Dodavanjem poredne diode trošilu za isti kut upravljanja α na izlazu je veća srednja vrijednost izlaznog napona, odnosno veća srednja vrijednost izlazne struje. Za vrijeme pozitivnog poluvala ulaznog napona na diodi je reverzni napon koji odgovara naponu na trošilu.

Struja kroz izvor je kvazipravokutnog valnog oblika (Slika 4.31), za razliku od pravokutnog valnog oblika kod jednofaznog spoja bez poredne diode (Slika 4.30).



Slika 4.32: Valni oblici struje i napona Tiristora T_4 uz kut upravljanja $\alpha = 45^\circ el$



Slika 4.33: Valni oblici struje i napona Tiristora T_4 uz kut upravljanja $\alpha = 45^\circ el$ i dodanu porednu diodu trošilu

Tiristor uklapa nakon kuta upravljanja α . Prethodno na tiristoru vlada blokirni napon. Za vrijeme vođenja napon na tiristoru je približno nula. Nakon isklapanja na tiristoru je zaporni napon. Zbog zanemarivo malog komutacijskog induktiviteta, pad i porast struje tiristora je gotovo trenutačan. Dodavanjem poredne diode trošilu smanjeno je vrijeme vođenja tiristora za $t \approx 2.2ms$ (Slika 4.32, Slika 4.33)

5. ZAKLJUČAK

Svako mjerenje u laboratoriju je ponavljano uz porednu diodu i bez poredne diode trošila. Pokazuje se da dodavanje poredne diode paralelno trošilu ima nekoliko učinaka. Po-najprije, poredna dioda sprječava pojavu negativnog napona na trošilu, pa stoga one-mogućava stvaranje negativne srednje vrijednosti napona na trošilu. Pretvarač više ne može raditi u izmjenjivačkom načinu rada, već samo u jednom kvadrantu (pozitivni na-pon i struja) kao ispravljač. Pozitivni učinak poredne diode je smanjivanje jalove snage kojom pretvarač opterećuje mrežu. Za istu djelatnu snagu P predanu trošilu, jalova snaga Q kojom se opterećuje mreža kod pretvarača s porednom diodom je manja od one kod pretvarača bez poredne diode. Poredna dioda odterecuje izmjeničnu mrežu, preuzevši dio struje trošila.

Povećavanje kuta upravljanja kod jednofaznog mosnog usmjerivača povećava se kut između sinusnog valnog oblika napona mreže i pravokutne struje mreže, povećavanjem kuta uprav-ljanja povećava se opterećenje mreže.

U oba slučaja, radi li se o jednofaznom mosnom tiristorskom usmjerivaču ili trofaznom tiristorskom ispravljaču s srednjom točkom, komutacijski induktivitet mreže smanjuje srednju vrijednost napona trošila (tablica 3.1), a zbog toga je i iznos srednje vrijednosti struje na trošilu smanjen. Kod promatranog jednofaznog mosnog usmjerivača zbog ko-mutacije postoje intervali u kojima je izlaz kratkospojen i u tim intervalima je napon na trošilu iznosa $U_d = 0V$, a kod promatranog trofaznog usmjerivača promjena u valnom obliku vidljiva je kao "propad" napona za vrijeme trajanja komutacije.

Proces isključivanja jednog para tiristora i prijenos opterećenja na drugi par tiristora traje duže što je iznos struje kroz tiristor većeg iznosa.

Izlazna karakteristika usmjerivača daje ovisnost srednje vrijednosti izlaznog napona o srednjoj vrijednosti struje trošila, a parametar je kut upravljanja α . Upravljačka karak-teristika prikazuje ovisnost izlaznog napona o kutu upravljanja i prikazana je slikom 4.27.

Usmjerivač prelazi u izmjenjivački način rada što je vidljivo kad srednja vrijednost napona na trošilu postane negativna. Smjer istosmjerne struje se ne može promijeniti jer tiristori dopuštaju tok struje samo u jednom smjeru. Da bi se uz promijenjeni polaritet sred-nje vrijednosti napona održao isti smjer istosmjerne struje, na istosmjernoj strani mora postojati aktivan izvor. U praksi to može biti istosmjerni motor za vrijeme kočenja. U izmjenjivačkom načinu rada aktivni izvor na istosmjernoj strani šalje energiju u izmjeničnu mrežu.

Valni oblici iz simulacija odgovaraju onima dobivenim mjerenjem na stvarnim komponen-tama u laboratoriju, postoje manje razlike zbog odstupanja realnih komponenti.