



КАТЕДРА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ И ПОГОНЕ
ЛАБОРАТОРИЈА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ
ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ 2

Лабораторијска вежба број 1

ТРОФАЗНИ ПУНОУПРАВЉИВИ МОСНИ ИСПРАВЉАЧ СА
ТИРИСТОРИМА

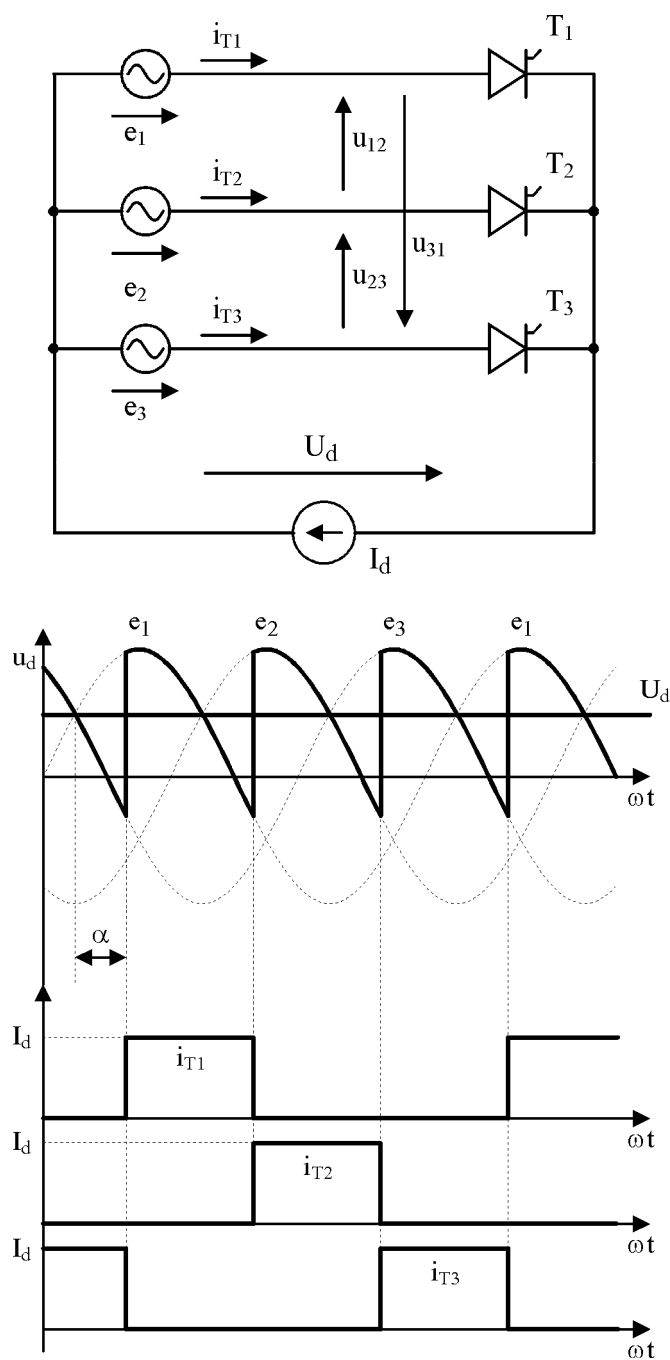
1. ТЕОРИЈСКИ УВОД

Исправљачи представљају најраспрострањенији тип енергетских претвараача. Користе се за управљање разменом енергије између кола са наизменичним напонем и кола са једносмерним напонем применом прекидачких мрежа. Прекидачке мреже се могу реализовати разним комбинацијама диода и тиристора па стога исправљачи могу бити неуправљиви (диодни исправљачи), полууправљиви (исправљачи реализовани комбинацијом диода и тиристора) и пуноуправљиви (тиристорски исправљачи). Као и фазни регулатори, и исправљачи спадају у категорију мрежом вођених претвараача, јер се за искључење прекидачких елемената користи промена поларитета мрежног напона. Највећи део области примене исправљача представља регулација електромоторних погона са машинама за једносмерну струју, електрохемијски и електрометалуршки индустријски процеси, електролитичка производња хемикалија, пуњење и пражњење акумулаторских батерија, извори напајања електронске опреме која ради на мрежном напону итд. Као и код фазних регулатора, главни проблем код примене исправљача је присуство великих хармонијских изобличења струје која се узима из мреже и излазног напона исправљача.

Претварање наизменичног напона напајања у једносмерни напон на оптерећењу врши се тако што се оптерећење прикључује на извор напајања преко мреже прекидача. Затим се, укључењем и искључењем прекидача, на оптерећење прикључују делови простопериодичних таласних облика напона генератора који чине извор напајања тако да се добије жељена средња вредност напона на оптерећењу.

1.1. Трофазни једнострани исправљач

На Слици 1, на следећој страни, приказан је трофазни једнострани исправљач, који је уједно и најједноставнији трофазни исправљач. Оптерећење је преко три тиристора везано на три генератора који чине симетричан трофазни систем. Угао паљења тиристора се дефинише као време (изражено у угловним јединицама) које протекне од тренутка када тиристор постане директно поларисан, до тренутка када добије импулс за паљење, услед чега прелази у проводно стање. Према приказаном таласном облику фазних напона трофазног система на Слици 1, временски редослед ових напона је $e_1, e_2, e_3, e_1, \dots$ због чега је и временски редослед паљења тиристора $T_1, T_2, T_3, T_1, \dots$ при чему сваки од тиристора проводи по 120° . Дакле, пре него што се укључи тиристор T_1 проводи тиристор T_3 , стога се, у односу на нулти проводник, катода тиристора T_1 налази на потенцијалу e_3 док је његова анода на потенцијалу e_1 . Тиристор T_1 постаје директно поларисан у тренутку када фазни напон e_1 постаје већи од фазног напона e_3 , што је тренутак од кога се рачуна угао паљења овог тиристора.



Слика 1: Трофазни једностранни исправљач

Таласни облици напона и струја приказани на Слици 1 подразумевају идеалан трофазни једностранни исправљач, код кога се сматра да је индуктивност пригушнице у једносмерном колу довољно велика да се може занемарити наизменична компонента струје оптерећења, па се оптерећење може сматрати струјним понором. Осим тога, сматра се да трофазни извор напајања чине идеални генератори и да је индуктивност комутационих пригушница једнака нули.

Уз ове претпоставке, средња вредност напона на оптерећењу трофазног једностраног исправљача је:

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}} \sqrt{2}E \sin x \, dx = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi} \cos x \Big|_{\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}}^{\alpha + \frac{\pi}{6}} = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos \alpha \quad (1.1)$$

Анализом таласних облика струја појединих тиристора односно струја кроз поједине генераторе трофазног извора напајања уочава се постојање једносмерне компоненте ових струја. Вредност једносмерне компоненте струје износи $I_d / 3$, јер сваки тиристор проводи струју I_d у току једне трећине периоде. Једносмерна компонента струје, као и виши хармоници струје, не доприносе преносу енергије из извора ка оптерећењу већ само непотребно оптерећује елементе система за дистрибуцију електричне енергије, што представља велики недостатак трофазних једностраних исправљача.

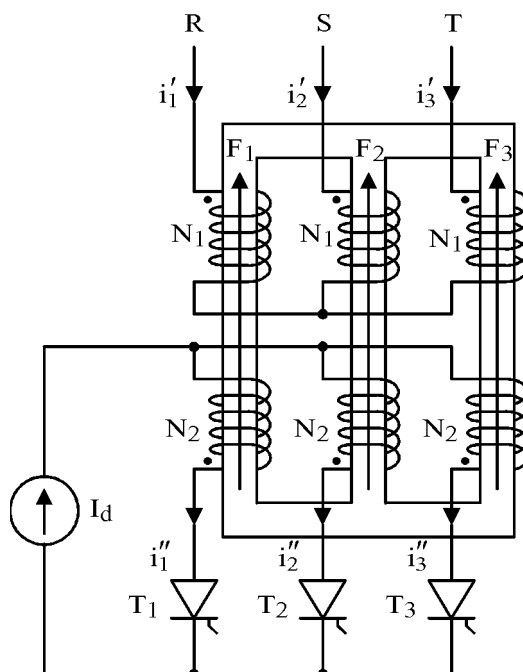
Исправљачи се, сем у ретким случајевима, на мрежни напон прикључују преко трансформатора. За прикључење трофазних исправљача на мрежу стоје на располагању разне трофазне спреге трансформатора. Да би се избегле неке недоумице потребно је осврнути се на дефиницију трофазног извора напајања.

У неким областима енергетике под појмом "фазни напон" подразумева се напон на једној фази потрошача. Вредност тако дефинисаног фазног напона зависи од спреге потрошача. Ако се оптерећење повеже у звезду, ефективна вредност напона на једној фази потрошача једнака је ефективној вредности разлике потенцијала фазног проводника и референтног нултог потенцијала (потенцијал нултог проводника). Код ове спреге ефективна вредност фазног напона је $\sqrt{3}$ пута мања од ефективне вредности линијског (међуфазног) напона.

Ако се оптерећење повеже у троугао, ефективна вредност напона на једној фази потрошача једнака је ефективној вредности разлике потенцијала два фазна проводника што је ефективна вредност линијског напона. Ова дефиниција фазног напона се не може користити при анализи трофазних исправљача јер не постоји трофазно оптерећење које се прикључује на трофазну мрежу већ се једносмерно оптерећење, преко прекидачке матрице, прикључује на погодне напоне трофазног система извора напајања. Стога се, при анализи енергетских претварача, под појмом "фазни напон" увек подразумева разлика потенцијала фазног проводника и референтног нултог потенцијала (потенцијал нултог проводника). Дакле ефективна вредност фазног напона је увек $\sqrt{3}$ пута мања од ефективне вредности линијског (међуфазног) напона, без обзира на спрегу елемената кола. Тренутна и ефективна вредност фазног напона се обележавају са $e(t)$ односно E док се тренутна и ефективна вредност линијског напона обележавају са $u(t)$ односно U , респективно.

1.2. Спектар струје која се узима из мреже код трофазног једностраног исправљача

На Слици 2 приказан је трофазни једнострани исправљач, који је прикључен на мрежу преко трофазног трансформатора у спреси $Y\bar{Y}0$.



Слика 2: Трофазни једнострани исправљач прикључен на мрежу преко трофазног трансформатора у спреси $Y\bar{Y}0$

Струје кроз примарне намотаје трансформатора се могу одредити из услова да је збир магнетопобудних сила по затвореном магнетном путу једнак нули. Ако се занемари струја магнећења трансформатора, изједначавањем магнетопобудних сила за леви и средњи стуб добија се:

$$N_1 i'_1 - N_2 i''_1 = N_1 i'_2 - N_2 i''_2 \quad (1.2)$$

Изједначавањем магнетопобудних сила за леви и десни стуб добија се:

$$N_1 i'_1 - N_2 i''_1 = N_1 i'_3 - N_2 i''_3 \quad (1.3)$$

Писањем једначина једнакости магнетопобудних сила за средњи и десни стуб трансформатора добила би се трећа једначина која је линеарна комбинација претходне две, па се та једначина не може искористити за одређивање струја примара трансформатора. Као трећа једначина, може се искористити чињеница да је збир струја примара трансформатора једнак нули:

$$i'_1 + i'_2 + i'_3 = 0 \quad (1.4)$$

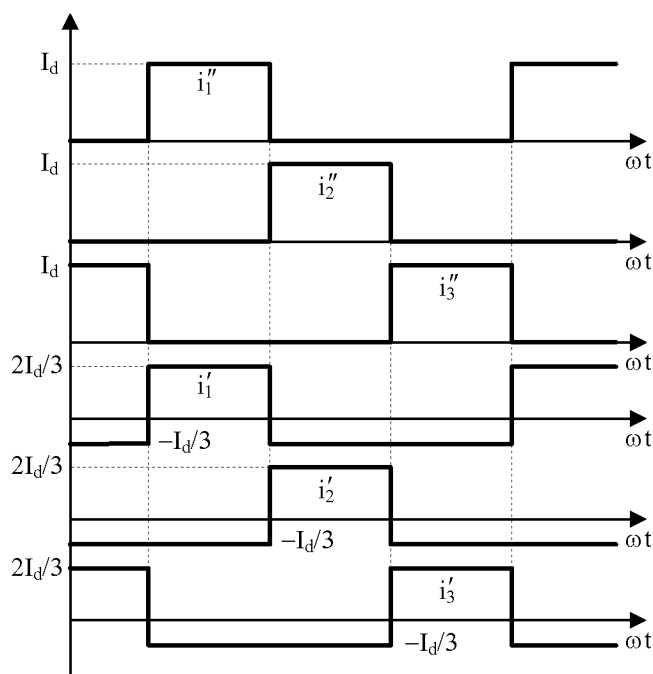
Ако се као преносни однос трансформатора узме однос бројева навојака примарних и секундарних намотаја трансформатора ($m = N_1 / N_2$) решавањем претходне три једначине добија се:

$$i_1' = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{3} \cdot (2i_1'' - i_2'' - i_3'') \quad (1.5)$$

$$i_2' = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{3} \cdot (2i_2'' - i_1'' - i_3'') \quad (1.6)$$

$$i_3' = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{3} \cdot (2i_3'' - i_1'' - i_2'') \quad (1.7)$$

што је приказано на Слици 3, уз претпоставку да је $m = 1$



Слика 3: Таласни облици струја примара и секундара трансформатора

До таласних облика струја кроз примарне намотаје трансформатора могло се доћи и на други начин. Посматрањем таласног облика струја секундара трансформатора, уочава се постојање једносмерне компоненте струје која износи $I_d / 3$. Ова једносмерна компонента се не може пренети кроз трансформатор, па се таласни облик струје кроз примарне намотаје трансформатора добија одузимањем једносмерне компоненте од одговарајућих струја кроз секундарне намотаје, и дељењем амплитуда преносним односом трансформатора.

Једносмерна компонента струје кроз секундарне намотаје трансформатора изазива сталну магнетопобудну силу у сва три стуба трансформатора (F_1 , F_2 и F_3 , Слика 2). Ове магнетопобудне силе изазивају флуks, тзв. флуks принудног магнећења, који се не може затворити унутар трансформатора већ се затвара око језгра: кроз ваздух, делове трансформаторског суда и др. Флуks принудног магнећења, који износи око 25%

основног флукса, некорисно засићује магнетно коло које мора имати повећане димензије да не би дошло до засићења магнетног кола трансформатора.

Ако се координатни почетак на Слици 1 постави у тренутак 60° после паљења тиристора T_1 , таласни облик струје овог тиристора представљаће парну функцију, па се ова функција може представити Фурије-овим редом облика:

$$i_{T1}(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega t) \quad (1.8)$$

где је $I_0 = I_d / 3$, а k -ти хармоник има амплитуду:

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_{T1}(x) \cdot \cos(kx) dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} I_d \cdot \cos(kx) dx = \frac{2I_d}{k\pi} \sin\left(k \frac{\pi}{3}\right) \quad (1.9)$$

Из претходног израза се види да су хармоници, чија је учестаност $3n$ ($n \in \mathbb{N}$) пута већа од мрежне учестаности, једнаки нули. Ефективна вредност струје основног хармоника је:

$$I_1 = \frac{I_d}{\pi} \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (1.10)$$

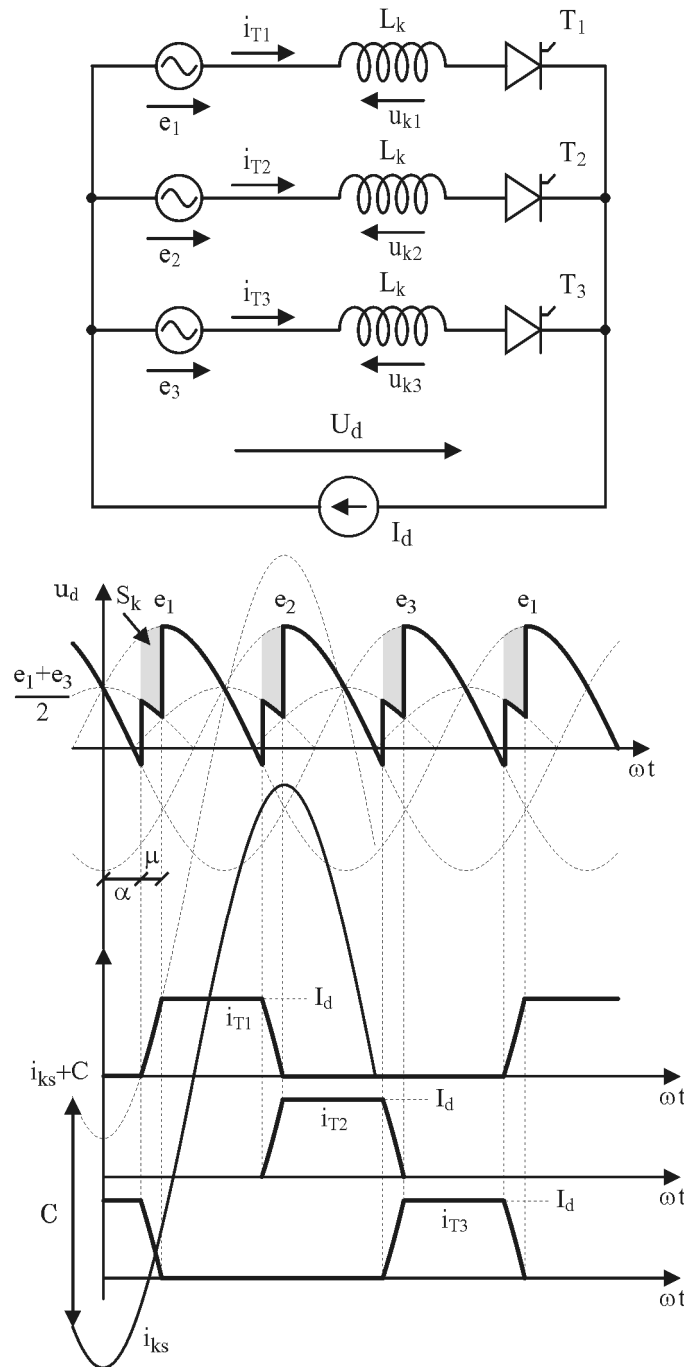
Основни хармоник струје тиристора T_1 касни за фазним напоном e_1 за угао паљења α . У устаљеном стању, ако се занемаре губици, снага којом се енергија узима из мреже мора бити једнака снази којом се енергија троши на оптерећењу:

$$P = 3E \frac{I_d}{\pi} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\alpha) = I_d \cdot \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha) = I_d \cdot U_d \quad (1.11)$$

одакле следи израз за средњу вредност напона на оптерећењу изведен у (1.1).

1.3. Утицај индуктивности расипања трансформатора

Претходна анализа трофазног једностраног исправљача вршена је уз занемаривање свих импеданси у колу исправљача. За детаљну анализу комутационих процеса, морају се у обзир узети импедансе преко којих је исправљач прикључен на мрежни напон, било да су то импедансе расипања трансформатора или комутационе пригушнице преко којих се исправљач везује директно на мрежу. На Слици 4 приказана је еквивалентна шема трофазног једностраног исправљача који је преко комутационих пригушница, L_k , прикључен на мрежни напон, као и таласни облици напона на оптерећењу и струја појединих тиристора.



Слика 4: Процес комутације трофазног једностраног исправљача

Пре него што се, у тренутку $\omega t = \alpha$, укључи тиристор T_1 , струју оптерећења проводи тиристор T_3 . Када се укључи тиристор T_1 , струју оптерећења проводе тиристори T_1 и T_3 па је:

$$I_d = i_{T1} + i_{T3} \quad (1.12)$$

Диференцирањем овог израза и множењем са L_k , добија се:

$$L_k i'_{T3} = -L_k i'_{T1} \Rightarrow u_{k3} = -u_{k1} \quad (1.13)$$

Дакле, напони на комутационим пригушницама су једнаки и супротног знака. Осим тога је и:

$$e_1 - u_{k1} = e_3 - u_{k3} \quad (1.14)$$

Из (1.13) и (1.14) добија се да је напон на комутационој пригушници једнак половини међуфазног напона:

$$u_{k1} = L_k i'_{T1} = \frac{e_1 - e_3}{2} = \frac{u_{13}}{2} = \frac{\sqrt{6}E}{2} \sin(\omega t) \quad (1.15)$$

па је струја тиристора:

$$i_{T1} = \frac{1}{L_k} \int \frac{\sqrt{6}E}{2} \sin(\omega t) dt + C = -\frac{\sqrt{6}E}{2L_k \omega} \cos(\omega t) + C \quad (1.16)$$

Интеграциона константа се добија из почетног услова:

$$i_{T1}(\alpha) = 0 \Rightarrow C = \frac{\sqrt{6}E}{2X_k} \cos(\alpha) \quad (1.17)$$

одакле следи да је:

$$i_{T1} = \frac{\sqrt{6}E}{2X_k} [\cos(\alpha) - \cos(\omega t)] \quad (1.18)$$

Тренутак завршетка комутације ($\beta = \alpha + \mu$) одређен је изразом:

$$i_{T1}(\beta) = I_d \Rightarrow \cos(\beta) = \cos(\alpha) - \frac{2X_k I_d}{\sqrt{6}E} \quad (1.19)$$

Исти израз добија се из услова да је прираштај струје кроз пригушницу сразмеран површини прикљученог напона:

$$L_k di_{T1} = u_{k1} dt \Rightarrow L_k \Delta I = \int_{t_1}^{t_2} u_{k1} dt \quad (1.20)$$

Прираштај струје кроз обе комутационе пригушнице је једнак и износи I_d , с тим што струја кроз пригушницу L_{k1} расте од 0 до I_d а струја кроз пригушницу L_{k3} опада од I_d до 0.

Због тога је комутациона површина:

$$S_k = L_k I_d = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\beta}{\omega}} \frac{1}{2} \sqrt{6} E \sin(\omega t) dt \Rightarrow \cos(\beta) = \cos(\alpha) - \frac{2X_k I_d}{\sqrt{6}E} \quad (1.21)$$

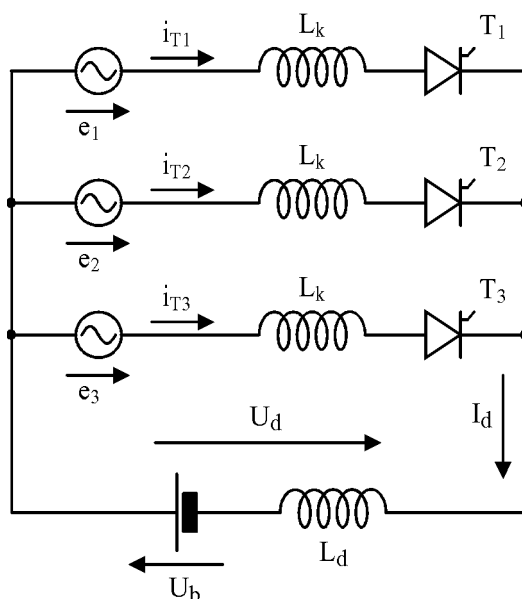
У тренутку $\omega t = \beta$ струја кроз пригушницу L_{k3} опада на нулу и тиристор T_3 престаје да проводи. Сва струја оптерећења сада тече кроз тиристор T_1 а с обзиром да је она константна, пад напона на пригушници L_{k1} биће једнак нули, па ће напон на оптерећењу бити једнак напону генератора e_1 а тиристор T_3 ће бити инверзно поларисан напонам $e_1 - e_3$.

Ако се узме у обзир да се у свакој периоди обави по три комутације, израз за средњу вредност напона на оптерећењу (1.1) треба умањити за средњу вредност површина S_k тако да је:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha) - 3 \frac{L_k I_d}{T} = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha) - \frac{3X_k I_d}{2\pi} \quad (1.22)$$

1.4. Инверторски лимит

Претпоставимо да се трофазни једностранни исправљач користи у инверторском режиму за враћање енергије из оптерећења у извор напајања (рекуперативно кочење мотора за једносмерну струју или пражњење акумулатораске батерије), као што је то приказано на Слици 5.



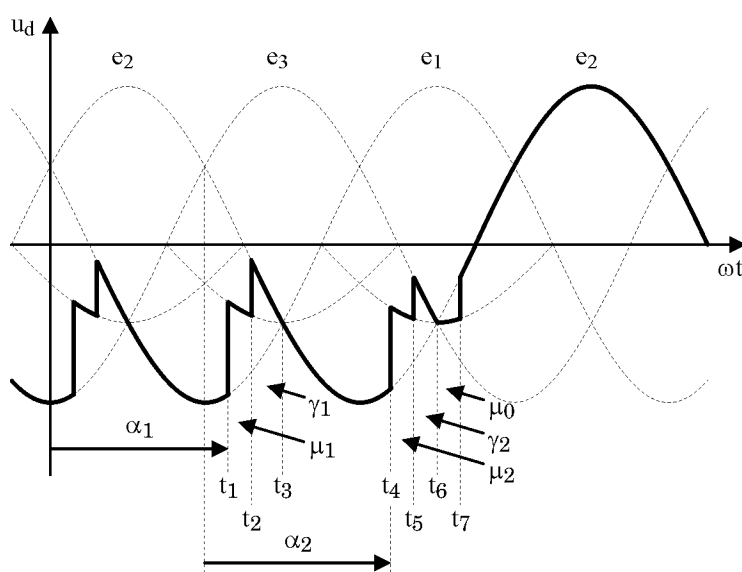
Слика 5: Трофазни једностранни исправљач у инверторском режиму рада

У устаљеном стању, средња вредност напона на пригушници L_d , везаној на ред са оптерећењем, мора бити једнака нули, тако да је:

$$U_d = U_b = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha) - \frac{3X_k I_d}{2\pi} \quad (1.23)$$

Односно, средња вредност напона на излазу исправљача мора бити негативна, што се постиже углом паљења већим од 90° .

На Слици 6 приказана су два могућа редоследа догађаја у колу, зависно од вредности угла паљења и струје оптерећења.



Слика 6: Таласни облик напона на оптерећењу при неуспешној комутацији у инверторском режиму рада

У нормалном раду, у периоду $\omega t = \pi/6 \dots \alpha_1$, проводи само тиристор T_1 . У тренутку $\omega t_1 = \alpha_1$ пали се тиристор T_2 и започиње комутација између тиристора T_1 и T_2 . По завршетку комутације (t_2) престаје да проводи тиристор T_1 и постаје инверзно поларисан напонем $u_{T1i} = e_2 - e_1$. Тиристор T_1 ће бити инверзно поларисан до тренутка t_3 када потенцијал фазе 1 постаје већи од потенцијала фазе 2, тако да ће време инверзне поларизације тиристора T_1 бити:

$$t_0 = \frac{\gamma_1}{\omega} = \frac{\pi - (\alpha_1 + \mu_1)}{\omega} \quad (1.24)$$

где је, према (1.19):

$$\alpha_1 + \mu_1 = \cos^{-1} \left[\cos(\alpha_1) - \frac{2X_k I_d}{\sqrt{6}E} \right] \quad (1.25)$$

Ако је време инверзне поларизације тиристора T_1 довољно дуго ($t_0 > t_q$), он ће прећи у непроводно стање тако да неће поново провести у тренутку t_3 када постаје директно поларисан. Ако се повећа угао паљења (α_2) или ако се због повећања струје оптерећења повећа угао комутације (μ_2), смањиће се угао инверзне поларизације тиристора (γ_2). У случају да је $\gamma_2 < \omega t_q$, време инверзне поларизације тиристора T_2 ће бити недовољно за његово гашење тако да ће он поново провести у тренутку t_6 када постаје директно поларисан. У периоду $\mu_0 = t_7 - t_6$ ће се обавити комутација између тиристора T_3 и T_2 тако да ће по истеку комутације даље проводити само тиристор T_2 а напон на излазу исправљача ће променити смер, што ће довести до наглог повећања струје и, вероватно, до хаварије исправљача. Због описаних проблема угао паљења тиристора се мора ограничити на вредност знатно мању од 180° (инверторски лимит), тако да је у свим условима рада испуњен услов:

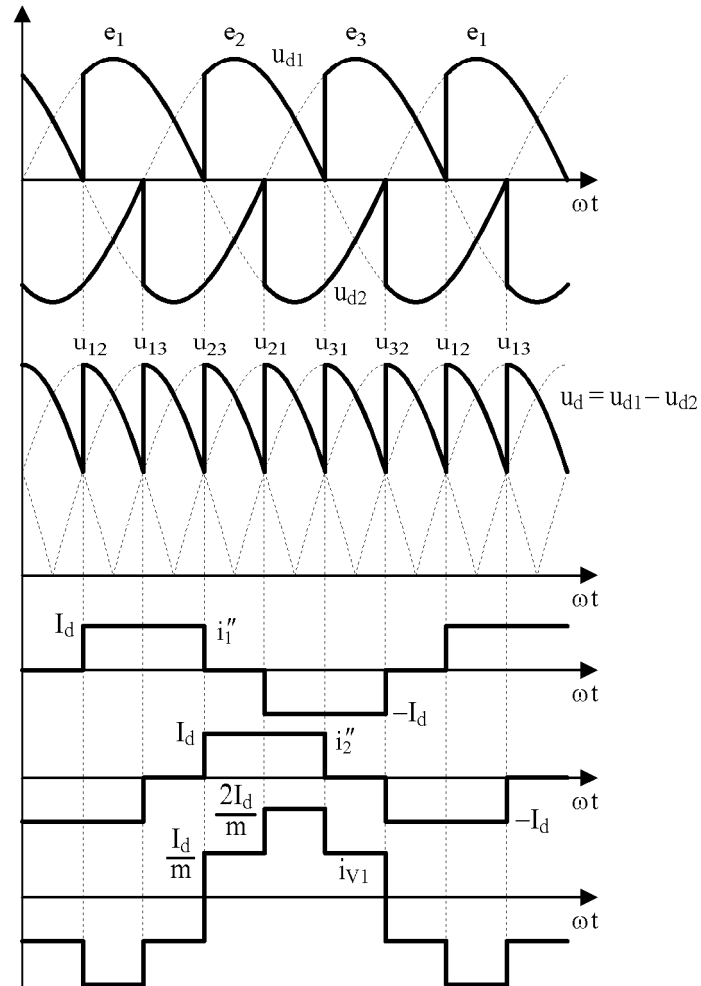
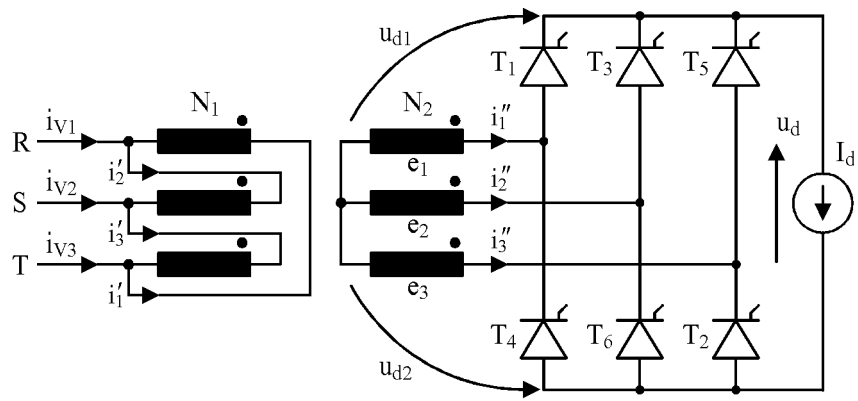
$$\frac{\pi - (\alpha + \mu)}{\omega} \geq t_0 \quad (1.26)$$

где је t_0 предвиђено време инверзне поларизације, које обезбеђује сигурно гашење тиристора.

1.5. Трофазни мостни исправљач

На Слици 7, на следећој страни, приказан је трофазни мостни исправљач са карактеристичним таласним облицима напона и струја за угао паљења $\alpha = 30^\circ$. Бројеви тиристора су распоређени тако да указују на временски редослед импулса за њихово паљење. Ако се мостни исправљач посматра као редна веза два трофазна једнострана исправљача чији су излазни напони u_{d1} и u_{d2} средња вредност напона на излазу мостног исправљача је према (1.1):

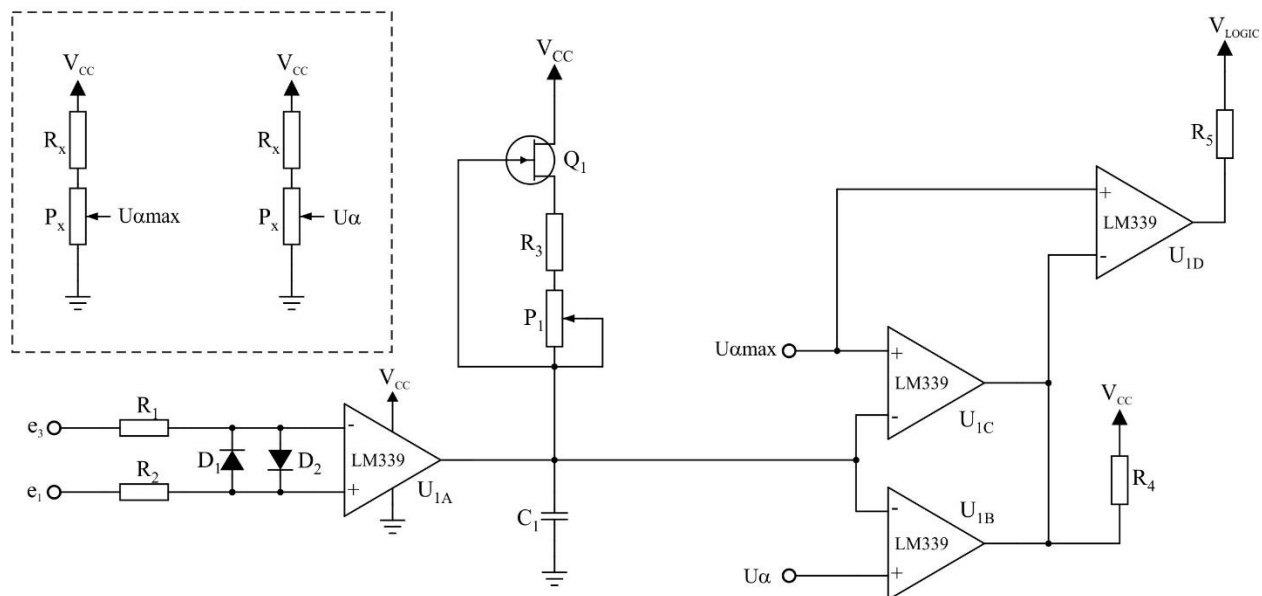
$$U_d = 2 \cdot \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha) = \frac{3\sqrt{6}E}{\pi} \cos(\alpha) \quad (1.27)$$



Слика 7: Трофазни мостни исправљач

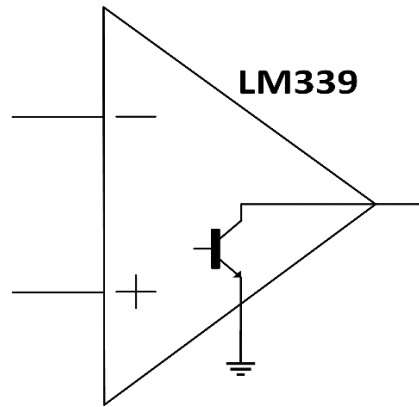
1.6. Генерисање сигнала за укључење тиристора

На Слици 8 приказано је коло за генерисање сигнала за укључење тиристора T_1 . Угао укључења овог тиристора рачуна се од тренутка када овај тиристор постане директно поларисан, тј. кад напон e_1 постане већи од напона e_3 ,



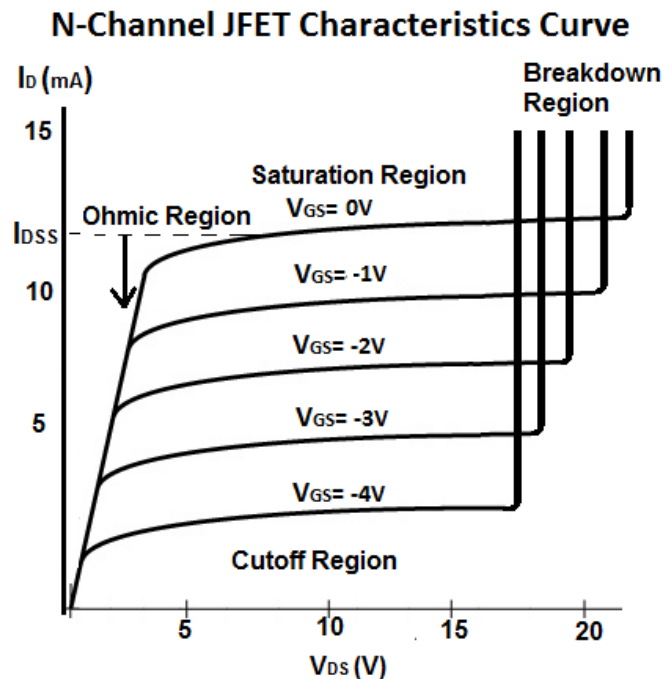
Слика 8: Коло за генерисање сигнала за укључење тиристора T_1

Унутар компаратора LM339, на његов излазни пин повезан је биполарни транзистор са „отвореним колектором” (*open collector*), као што је то приказано на Слици 9. Када је напон који је доведен на неинвертујући пин (+) мањи од напона доведеног на инвертујући пин (-) компаратора, биполарни транзистор је укључен, па је излазни пин компаратора доведен на масу. У супротном, када је напон на инвертујућем пину мањи од напона на неинвертујућем пину, биполарни транзистор је искључен.



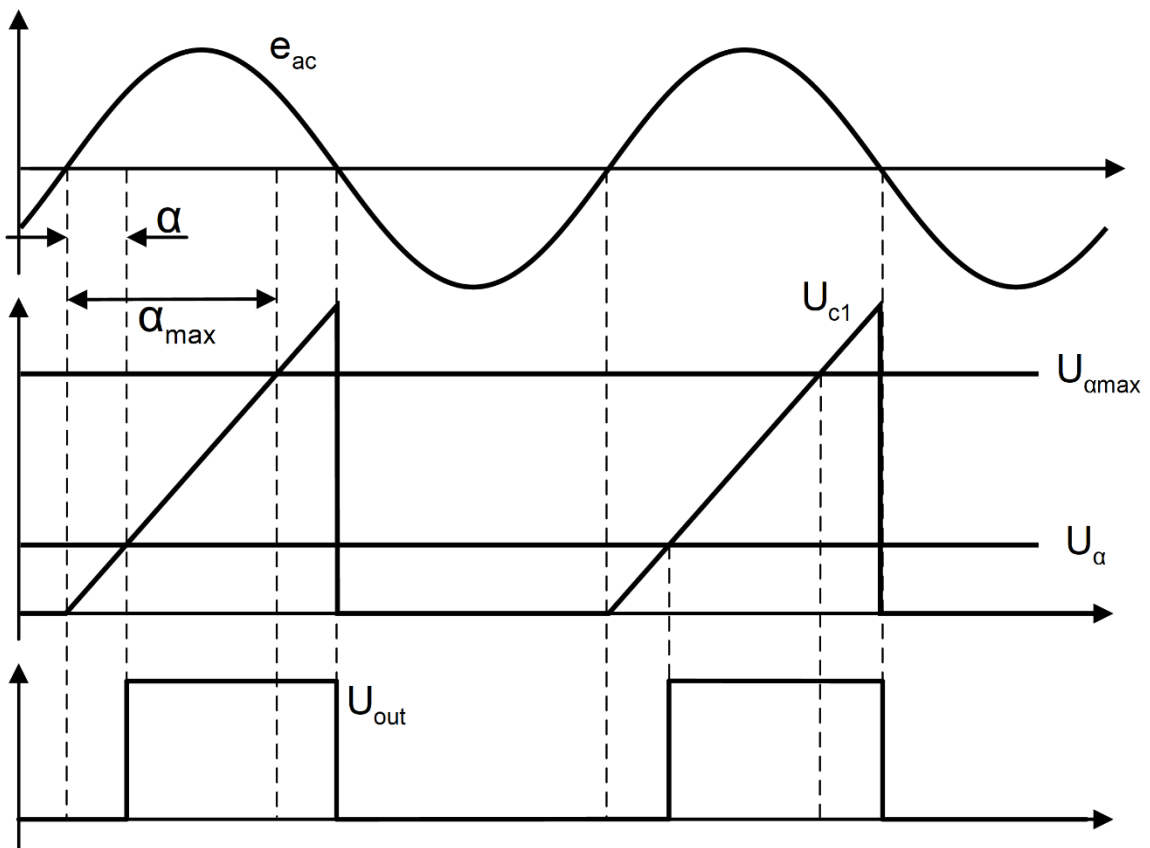
Слика 9: Отворени колектор на излазном пину компаратора

Уколико Н канални JFET транзистор Q_1 ради у засићењу, чим се струја дрејна повећа, напон споја гејт-сорс се смањује (повећа по апсолутној вредности), што ће условити струју дрејна да се смањи. Аналогно, уколико се струја дрејна смањи напон споја гејт-сорс се повећа (смањи по апсолутној вредности), што условљава струју дрејна да се повећа (Слика 10). На овај начин остварена је негативна повратна спрега по струји дрејна, па Q_1 заједно са потенциометром P_1 , отпорником R_3 и извором константног напона V_{CC} образује извор константне струје. Ова струја ће тећи кроз кондензатор C_1 уколико је биполарни транзистор унутар U_{1A} искључен ($e_1 > e_3$), што ће условити линеарни пораст напона кондензатора. Чим напон e_3 постане већи од напона e_1 , струја дрејна транзистора Q_1 ће се затворити преко транзистора унутар компаратора U_{1A} . Такође, енергија нагомилана у C_1 испразниће се преко истог транзистора, и напон овог кондензатора пашће на нулу.

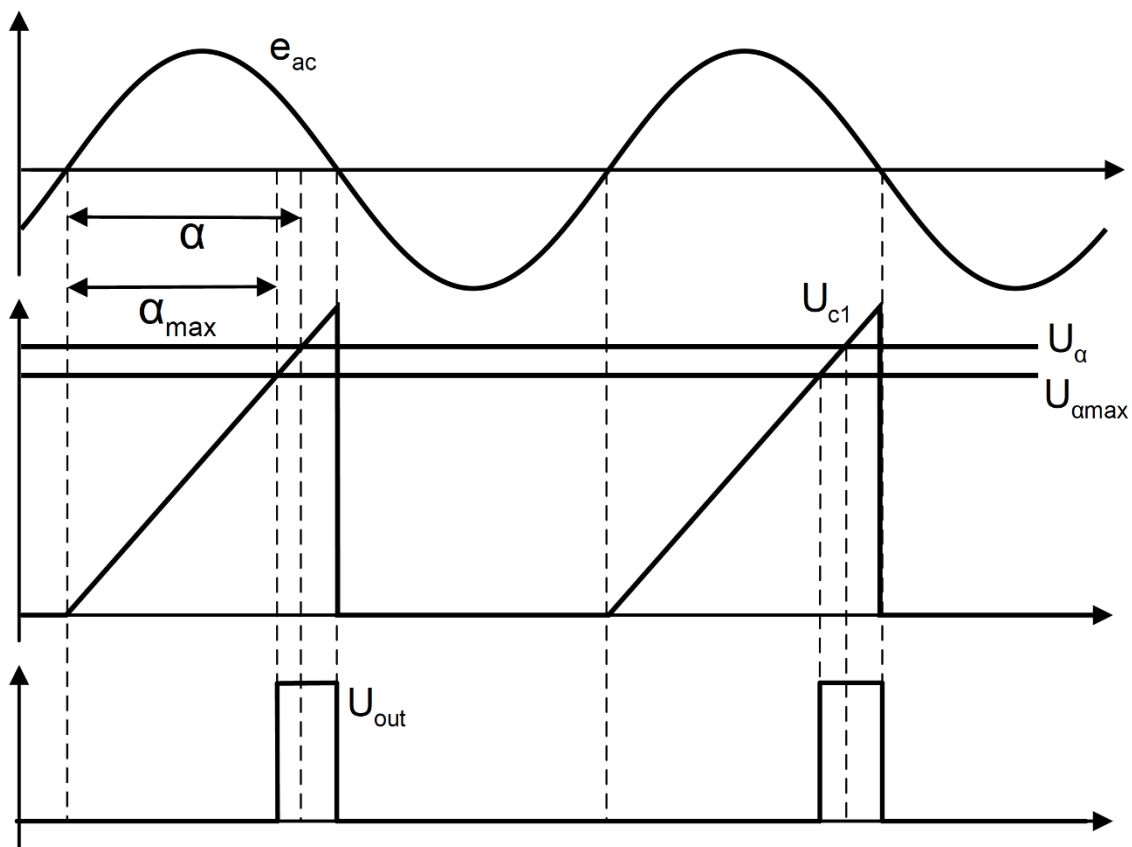


Слика 10: Струјно-напонска карактеристика н-каналног JFET-а

Углом паљења α и инверторски лимит α_{\max} подешавају се помоћу напона U_α и $U_{\alpha_{\max}}$. Компаратори U_{1B} и U_{1C} образују логичко И коло, па могу се разликовати два случаја: 1) случај када је напон U_{C1} мањи од напона U_α и $U_{\alpha_{\max}}$, услед чега је напон на излазу компаратора U_{1B} и U_{1C} једнак напону V_{CC} ; 2) случај када је напон U_{C1} већи од бар једног од напона U_α и $U_{\alpha_{\max}}$, што резултује да напон на излазу компаратора U_{1B} и U_{1C} буде једнак нули. Тај напон је доведен на инвертујући пин компаратора U_{1D} . У првом случају, напон на излазу овог компаратора биће једнак нули (V_{CC} је увек већи или једнак напону $U_{\alpha_{\max}}$). У другом случају, напон на излазу компаратора U_{1D} биће једнак напону $U_{\text{LOGIC}} = 5 \text{ V}$ ($U_{\alpha_{\max}} > 0$). Ово значи да ће управљачко коло слати импулс за паљење од тренутка $\min\{\alpha, \alpha_{\max}\}$ до тренутка када напон U_{C1} пада на нулу (Слика 11). Такође, у случају када се зада угао паљења α који је већи од угла α_{\max} , импулс за укључење тиристора се генерише од тренутка α_{\max} (Слика 12).



Слика 11: Карактеристични напони кола за генерисање импулса за паљење тиристора – случај $\alpha < \alpha_{\max}$



Слика 11: Карактеристични напони кола за генерисање импулса за паљење тиристора – случај $\alpha > \alpha_{\max}$

Симулација овог кола може се пронаћи у додатним материјалима за ову лабораторијску вежбу.

2. ЗАДАТАК

Пре доласка у лабораторију, потребно је израчунати средњу вредност излазног напона трофазног мостног исправљача на основу израза (1.27), за различите вредности угла паљења α . Ефективна вредност фазног напона доведеног на крајеве моста једнака је $E = 11.5 \text{ V}$. Мењати угао паљења помоћу потенциометра на управљачком колу исправљача. За конкретне вредности угла паљења задате у табели, измерити средњу вредност излазног напона исправљача помоћу осцилоскопа.

α	0°	30°	45°	60°	90°	120°	150°
$U_d^{\text{израчунато}}$							
$U_d^{\text{измерено}}$							