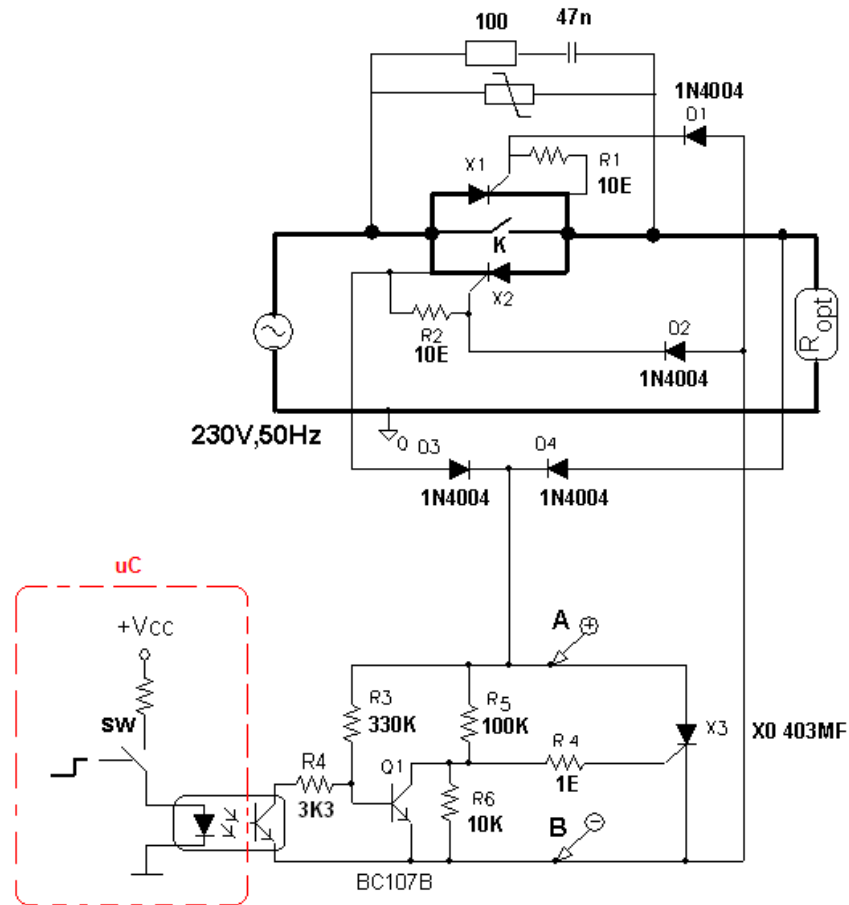


ZADATK 14

Dato je kolo na slici koje se koristi kao tzv. „*nulta sklopka*“ za uključenje i isključenje čisto otpornog opterećenja pri nultim (bliskim nuli) vrednostima mrežnog napona. Kolo je realizovano sa antiparalelnom spregom tiristora i upravljačkim kolom. Uključenje i isključenje se ostvaruju iz mikrokontrolerskog uređaja μC preko prekidača SW.



- 1) Objasniti rad energetskog i upravljačkog kola. Objasniti ulogu RC člana 100K, 47nF, kao i ulogu varistora koji su stavljeni paralelno sa tiristorskom grupom. Kakva je uloga optokaplera u upravljačkom kolu? Kakva je uloga prekidača K koji je paralelno vezan sa tiristorskom grupom.
- 2) Nacrtati talasne oblike mrežnog napona, struje opterećenja i napona između tačaka A i B koje su prikazane u upravljačkom kolu.
- 3) Podaci o energetskom delu: $V_s=230V$, 50Hz i $R_{opt}=10\Omega$. Pretpostaviti da se kontrolerom zadaje takvo upravljanje da je antiparalelna grupa uključena $n=25$ ciklusa mrežnog napona, a da je isključena $m=75$ ciklusa mrežnog napona. Pri ovim uslovima odrediti efektivnu vrednost napona na opterećenju, ulazni faktor snage i srednju i efektivnu vrednost struje svakog od tiristora. Izračunati ukupnu disipaciju na tiristorskoj grupi za slučajeve $n/m=25/75$, $n/m=74/1$. Izračunati u drugom slučaju ($n/m=74/1$) disipaciju ukoliko su tiristori prespojeni kontaktom K, čija je otpornost $10m\Omega$.

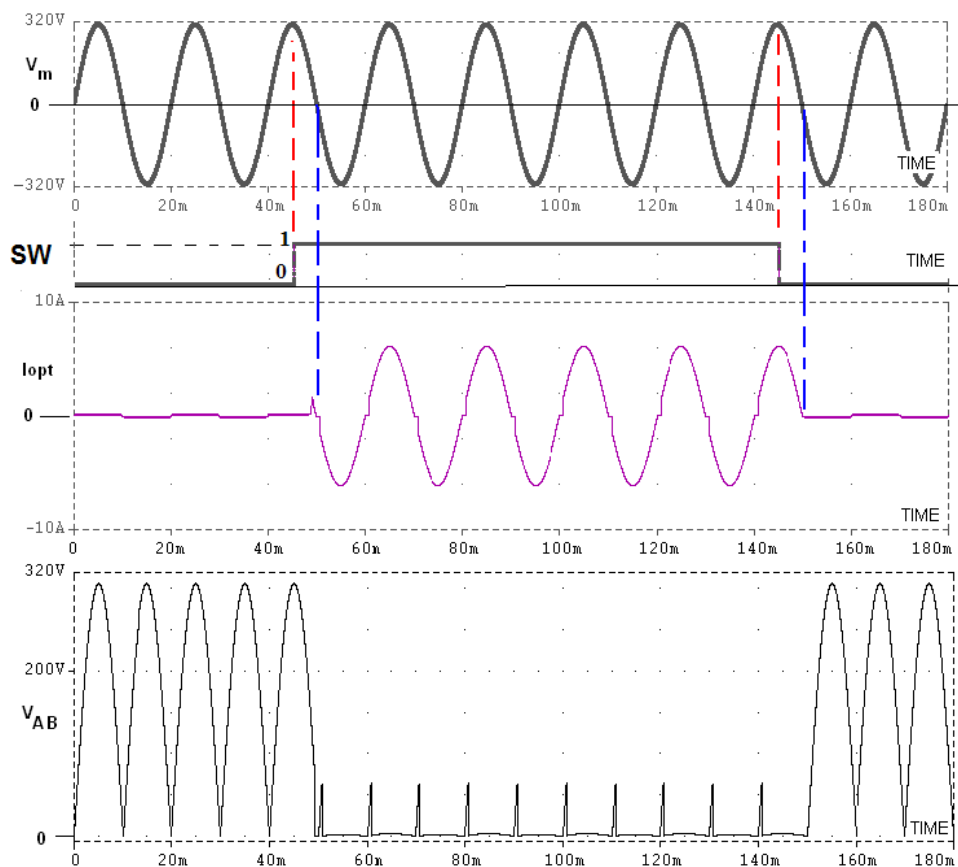
REŠENJE:

(1) Kada je tiristor X3 isključen napon između tačaka A i B je ispravljeni mrežni napon koji je dobijen preko dioda D1-D4 (one su vezane u Grecovom spoju). Kada je tiristor X3 uključen napon između tačaka A i B je jednak približno 0. Uslov za uključenje tiristora X3 je da je napon između njegovog gejta i katode približno 2V. Napon na gejtju ovog tiristora je određen razdelnikom R6/(R5+R6). Ovaj odnos je 1/11. To znači da kada je napon između tačaka A i B približno jednak 30V doći će do uključanja tiristora X3, pod uslovom da je tranzistor Q1 isključen. Kada je Q1 uključen tiristor X3 neće moći da se uključi.

Kada je isključen prekidač SW (SW-OFF) tada LED ne svetli i izlazni tranzistor optokaplera je otvoren (isključen). Baza tranzistora Q1 se napaja preko R3=330k. Tranzistor Q1 je uključen kada je njegov spoj B-E približno 0.6V. Za dati otpornik R3 i dati napon baza-emiter Q1, tranzistor Q1 je o ovom slučaju stalno uključen i blokira rad X3.

Kada je uključen prekidač SW (SW-ON) tada LED svetli i izlazni tranzistor optokaplera je uključen i spaja otpornik R4 između baze i emitor Q1. Deo struje sada ide i kroz otpornik R4. Pri naponu $V_{AB} \geq 30V$, tranzistor Q1 je uključen i blokira X3. Pri naponima $V_{AB} < 30V$, struja baze Q1 je mala (manja od 10 μ A), a takođe i napon baza-emiter (manji je od 0.2V), i ovo je nedovoljno da Q1 bude pobudjen, tako da je u ovom intervalu Q1 isključen, dok je napon $V_{AB} = 30V$ dovoljan da pobudi X3.

Uključenjem X3 dolazi do uključanja jednog od glavnih tiristora X1 ili X2 zavisno da li je pobudni impuls na SW došao u pozitivnoj ili negativnoj poluperiodi mrežnog napona. Talasni oblici karakterističnih veličina su dati na slici 1.



Slika 1- Talasni oblici karakterističnih veličina za „nultu sklopku“

Po dolasku pobudnog impulsa – ON iz mikrokontrolera- μC (ovaj pobudni impuls može biti zadat u bilo kojem trenutku u pozitivnoj ili negativnoj poluperiodi), odnosno kod uključenja opterećenja upravljačko kolo „čeka“ sledeći prolazak mrežnog napona kroz nulu i u tom trenutku se uključuje onaj tiristor koji ima uslov da provede (X1 u pozitivnoj poluperiodi a X2 u negativnoj poluperiodi).

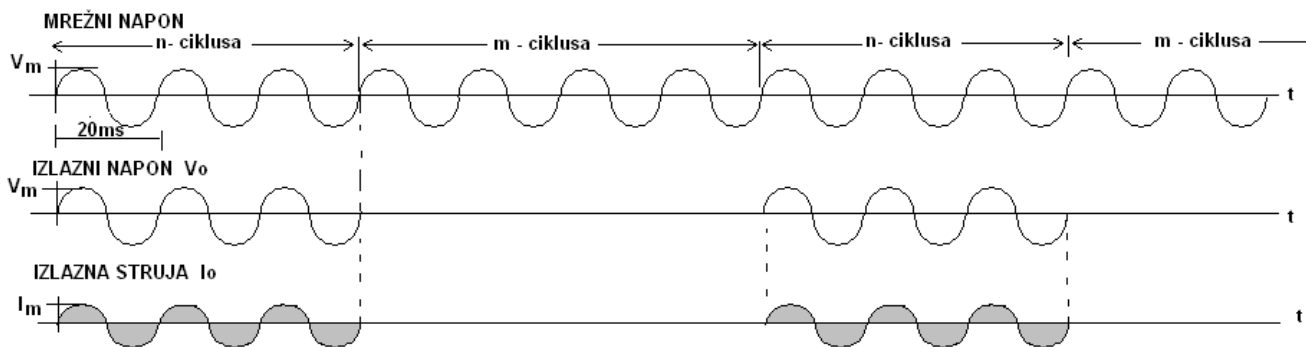
Po dolasku pobudnog impulsa- OFF iz mikrokontrolera- μC (takođe i ovaj impuls može biti zadat u bilo kojem trenutku), odnosno kod isključenja energetski tiristori X1 ili X2 provode sve do trenutka kada im struja padne ispod struje držanja (u našem slučaju praktično kada struja padne u nulu), a nakon toga je opterećenje isključeno sve dok ne nađe novi impuls za uključenje.

Rezultat je uključenje i isključenje omskog opterećenja pri nultoj vrednosti napona bez obzira u kojem trenutku je μC dao zahtev za uključenje, odnosno isključenje. Drugim rečima na opterećenje se „prosleđuje“ ceo broj poluperioda, odnosno perioda mrežnog napona.

RC član koji je paralelno vezan tiristorskoj grupi služi kao zaštita tiristora od prevelikog porasta napona „ dv/dt “ na njihovim krajevima, odnosno između anode i katode. Varistor koji se pored RC člana takođe dodaje služi kao prenaponska zaštita oba tiristora i ima ulogu da „odseče“ prenapone (naponi veći za 30-50% od nominalnog) koji se mogu javiti u toku uključenja i isključenja. Kontakt K je ustvari deo kontaktora koji se vrlo često integriše u „nultu sklopku“, a njegova uloga je da se u ustajenom režimu prespoji tiristorska grupa koja bi inače disipirala značajno. Neka je pad napona na svakom tiristoru oko 1V. Pri srednjoj vrednosti struje svakog od njih (preračunata na periodu mrežnog napona) od recimo 20A, disipacija na njima bi iznosila približno $2 \times 20W$, što nije zanemarljivo i što bi zahtevalo dodatno ulaganje u odvođenje disipacije. Ukoliko je paralelno vezan kontakt K (od kontaktora) čija je približna vrednost otpora od 5-10m Ω , jasno je da se postiže značajno manje zagrevanje cele grupe. Ovo naročito ima smisla kod većih snaga. Nulta sklopka sa integrisanim kontaktom se u industriji naziva POLUPROVODNIČKI KONTAKTOR (SSC-SOLID STATE CONTACTOR).

(2) Talasni oblici napona karakterističnih tačaka i struje opterećenja su dati na Slici 1.

(3) Talasni oblici kod uključenja „nulte sklopke“ za n i m ciklusa su dati na Slici 2.



Slika 2- Karakteristični talasni oblici kod uključenja i isključenja otpornog opterećenja, korišćenjem „nulte sklopke“.

Otpornost opterećenja je prema uslovima zadatka $R_{opt} = 10\Omega$, efektivna vrednost mrežnog napona $V_s = 230V$, 50Hz.

Maksimalna vrednost mrežnog napona $V_m = V_s \cdot \sqrt{2}$, $V_m = 230 \cdot \sqrt{2} = 324.3V$

Efektivna vrednost izlaznog napona V_0 (napon na opterećenju):

$$V_0 = \left[\frac{n}{2\pi(m+n)} \cdot \int_0^{2\pi} (\sqrt{2} \cdot V_s)^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$V_0 = \left[\frac{n}{2\pi(m+n)} \cdot 2V_s^2 \int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t \cdot d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t \cdot d(\omega t) = \pi$$

Efektivna vrednost izlaznog napona (napona na opterećenju) je jednaka definitivno:

$$V_0 = V_s \cdot \sqrt{\frac{n}{m+n}} = V_s \cdot \sqrt{\delta}$$

$$\delta = \frac{n}{m+n} \cdot 100\% \quad (\text{koeficijent radnog režima tzv. „duty-cycle“})$$

Što se tiče ovog koeficijenta režima rada razlikujemo karakteristične slučajeve:

$$n \ll m, \quad \delta \rightarrow 0\%$$

$$n = m, \quad \delta = 50\%$$

$$n \gg m, \quad \delta \rightarrow 100\%$$

Brojno efektivna vrednost izlaznog napona (napona na opterećenju) iznosi:

$$V_0 = 230 \cdot \sqrt{\frac{25}{75+25}} = 230 \cdot \sqrt{0.25} = 230 \cdot 0.5 = 115V$$

Efektivna vrednost struje opterećenja je:

$$I_0 = \frac{V_0}{R_{opt}} = \frac{115V}{10\Omega} = 11.5A$$

Izlazna snaga na opterećenju je jednaka:

$$P_0 = R_{opt} I_0^2$$

$$P_0 = 10 \cdot 11.5^2 = 1.322kW$$

Ulazna prividna snaga (koja se uzima iz mreže) je jednaka:

$$S = V_s \cdot I_s = V_s \cdot I_0 = 230 \cdot 11.5 = 2.645kVA$$

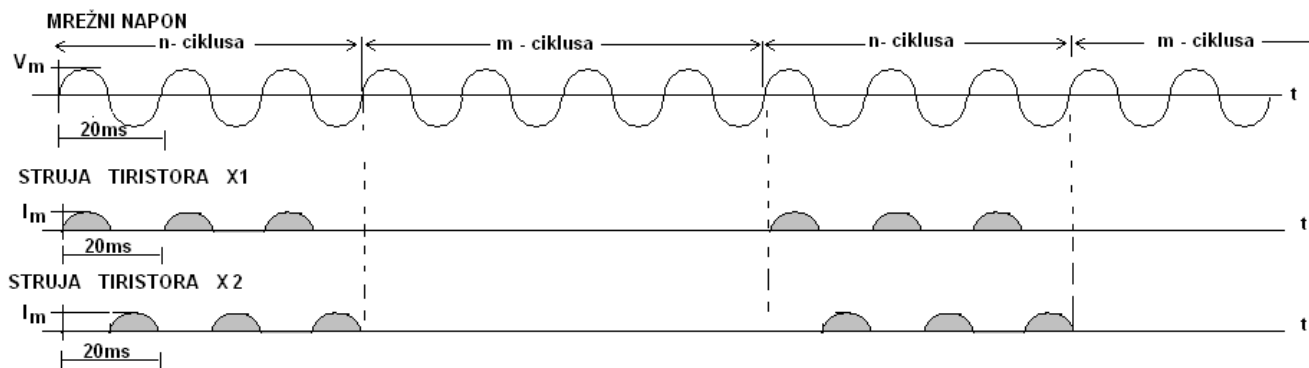
Faktor snage je jednak:

$$\lambda = \frac{P_0}{S} = \frac{1.322kW}{2.645kVA} = 0.499$$

Maksimalna vrednost struje opterećenja je jednaka:

$$I_m = \frac{V_m}{R_{opt}} = \frac{230 \cdot \sqrt{2}}{10\Omega} = 32.43A$$

Svaki od tiristora vodi po jednu poluperiodu, dok u drugoj „pauzira“. Talasni oblici struja tiristora su dati na Slici 3.



Slika 3- Talasni oblici struja tiristora X1 i X2

Srednja vrednost struje svakog od tiristora je jednaka:

$$I_{TH-AVG} = \frac{n}{2\pi(m+n)} \cdot \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t \cdot d(\omega t)$$

$$I_{TH-AVG} = \frac{n \cdot I_m}{2\pi(m+n)} \cdot \int_0^{\pi} \sin \omega t \cdot d(\omega t)$$

$$\int_0^{\pi} \sin \omega t \cdot d(\omega t) = 2$$

$$I_{TH-AVG} = \frac{n \cdot I_m}{2\pi(m+n)} \cdot 2 = \frac{I_m}{\pi} \cdot \frac{n}{m+n}$$

$$I_{TH-AVG} = \frac{I_m}{\pi} \cdot \delta$$

$$\delta = 0.25$$

$$I_{TH-AVG} = \frac{32.43}{\pi} \cdot 0.25 = 2.58A$$

Efektivna vrednost struje svakog od tiristora je jednaka:

$$I_{TH-RMS} = \left[\frac{n}{2\pi(m+n)} \cdot \int_0^{\pi} I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$I_{TH-RMS} = \left[\frac{n \cdot I_m^2}{2\pi(m+n)} \cdot \int_0^{\pi} \sin^2 \omega t \cdot d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$\int_0^{\pi} \sin^2 \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{\pi}{2}$$

$$I_{TH-RMS} = \frac{I_m}{2} \cdot \sqrt{\frac{m}{m+n}} = \frac{I_m}{2} \cdot \sqrt{\delta}$$

$$I_{TH-RMS} = \frac{32.43}{2} \cdot \sqrt{0.25} = 8.1A$$

Procena gubitaka na tiristorskoj grupi pri datom režimu n/m=25/75, odnosno $\delta=25\%$

Pretpostavićemo da je pad napona na tiristoru u stanju vođenja jednak $V_{TO} \approx 1V$ (tipično) i da je njegova dinamička otpornost u stanju vođenja $r_d = 10m\Omega$ (tipično). Sada ćemo na osnovu izračunate efektivne i srednje vrednosti struje tiristora izračunati disipaciju na njima.

Disipacija na tiristoru je data relacijom:

$$P_D = V_{TO} \cdot I_{TH-AVG} + r_d \cdot I_{TH-RMS}^2$$

$$P_D = 1V \cdot 2.58A + 0.01 \cdot 8.1^2 = 3.23W$$

Pošto imamo dva tiristora ukupna disipacija na tiristorskoj grupi je jednaka $2 \times 3.23W = 6.46W$

Kada je $\delta \approx 100\%$ (najkritičniji slučaj što se tiče disipacionih gubitaka!!!), srednje i efektivne vrednosti struje svakog od tiristora iznose:

$$I_{TH-AVG} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{32.43}{3.14} = 10.33A$$

$$I_{TH-RMS} = \frac{32.43}{2} = 16.215A$$

Snaga disipacije je u ovom slučaju jednaka:

$$P_D = 1V \cdot 10.33A + 0.01 \cdot 16.215^2$$

$$P_D = 10.33 + 2.63 \approx 13W$$

$$\Sigma P_D = 2 \cdot 13W = 26W$$

Ova snaga je kritična i ona se mora uzeti pri proračunu hladnjaka tiristorske grupe!!!!

Ukoliko je umesto tiristorske grupe priključen kontakt K kontaktora (otpornost kontakta $R_k = 10m\Omega$)

Snaga disipacije u ovom slučaju je jednaka:

$$P_{DK} = R_k \cdot I_0^2 = 0.01 \cdot 16.215^2 = 2.125W$$

Zaključujemo da je disipacija u slučaju priključenog kontakta K, mnogo manja od disipacije snage kada je uključena tiristorska grupa, odnosno: $P_{DK} \ll P_{D_{TH}} = 26W$.

Za tiristore većih snaga, izračunate snage disipacije su značajno veće, tako da primena kontaktora odnosno kontakta K ima puno više smisla.

U Beogradu 18.12.2013

UEEP-Specijalističke studije NET

Predmetni profesor

Dr Željko Despotović, dipl.el.inž