

Dodatak M

Modelovanje udarnog naponskog generatora

Pri projektovanju udarnog naponskog generatora potrebno je odabrati elemente generatora na osnovu sledećih uslova:

1. Podešavanje talanog oblika napona koji generator daje,
2. provera da li otpornici mogu da podnesu termička naprezanja za sledeće procese:
 - proces generisanja udarnog talasa,
 - punjenje kondenzatora generatora,
 - proces rasterećenja generatora posle završetka rada.

Na slici M.1 prikazana je jedna od mogućih šema četvorostepenog udarnog generatora.

Oznake na slici M.1 imaju sledeće značenje:

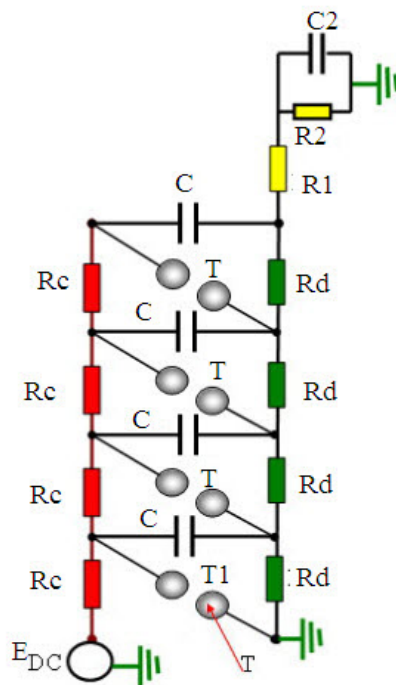
E_{DC} -Idealni jednosmerni naponski izvor vrednosti napona E_{DC} ,

R_c -otpornici koji ograničavaju struju punjenja kondenzatora,

R_d -otpornici koji ograničavaju struju rasterećenja kondenzatora prema zemlji,

C -kondenzatori punjenja koji definišu začelje talasa,

C_2 -kondenzatori rasterećenja koji definišu čelo talasa,



Slika M.1: Šema petostepenog udarno generatora

R_1 -otpornik koji definiše čelo talasa,

R_2 -otpornik koji definiše začelje talasa,

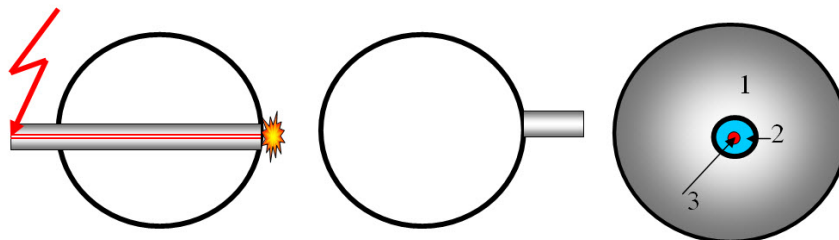
T -iskrište koje se sastoji od dve kugle između kojih dolazi do preskoka kada napon pređe preskočni napon,

T_1 -iskrište koje se sastoji od dve kugle, od kojih kugla koja je vezana za uzemljenje ima šupljinu kroz koju se dovodi visokonaponski impuls na treću elektrodu, koja se zove elektroda za trigerovanje.

Nakon reagovanja iskrišta T_1 dolazi do povećanja napona na svim kondenzatorima i do preskoka na svim iskrištima, tako da se kondenzatori preko iskrišta prevezuju na red, jer su otpornici R_c i R_d velike vrednosti. Dobija se ekvivalentni kapacitet punjenja koji iznosi:

$$C_1 = \frac{C}{n} \quad (\text{M.1})$$

Prva kugla iskrišta, koja je vezana za uzemljenje, ima specijalnu konstrukciju. Konstrukcija troelektrodnog iskrišta sa internim okidanjem prikazana je na slici M.2.



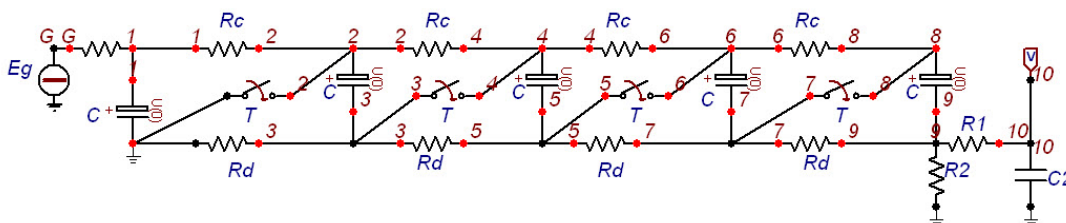
Slika M.2: Troelektrodno iskrište sa internim okidanjem

- 1 - metalna kugla iskrišta,
- 2 - izolacioni prsten u otvoru kugle,
- 3 - centralna elektroda na koju se dovodi visokonaponski impuls,

M.1 Proračun talasnog oblika izlaznog napona

Ispitivanja izolacije udarnim naponim se vrše standardizovanim oblicima napona. Jedan od standardnih oblika napona je atmosferski udarni talas oblika $1.2/50 \mu s$, što znači da je trajanje linearizovanog čela $T_f = 1.2 \mu s$, a začelja $T_t = 50 \mu s$. Trajanje linearizovanog čela talasa za udarni naponski talas se definiše preko prave koja prolazi kroz tačku gde napon postiže vrednost $0.3 \cdot U_{max}$ i $0.9 \cdot U_{max}$. Postavlja se prava kroz ove dve tačke i određuje vreme od preseka prave sa apscisnom osom do preseka prave sa horizontalnom linijom na visini U_{max} , što predstavlja vreme čela talasa T_f . Prava predstavlja linearizovano čelo talasa, a U_{max} je temena vrednost dobijenog napona. Začelje se određuje kao tačka kada napon opadne na $0.5 \cdot U_{max}$ na opadajućem delu talasa.

Na slici M.3 prikazana je ekvivalentna šema 5. stepenog naponskog udarnog generatora formirana u programskom okruženju ATPdrow (grafički korisnički intefejs za koji koristi za pripremu podataka za elektromagnetni tranzijentni program EMTP) [27] za proračun prelaznog procesa.



Slika M.3: Ekvivalentna šema 5. stepenog naponskog udarnog generatora

Oznake na slici M.3 imaju sledeće značenje:

G -tačka priključka jednosmernog izvora amplitude 100 kV,

E_g -elektomotorna sila DC generatora,

T -naponski zavisni prekidači koji uključuju u trenutku pojave napona iznad napona reagovanja,

C -kondenzatori koji su napunjeni do napona $U = 100$ kV, tako da jednosmerni izvor u ovoj šemi nema nikakvu ulogu. Na ovaj način je postignuto da u trenutku početka proračuna napon na prekidačima ima vrednost U , što izaziva njihovo trenutno zatvaranje i prevezivanje kondenzatora u rednu vezu.

V -registrator napona u čvoru 10.

Elementi koji se biraju iz liste koji su korišćeni u EMTP-atp programu su:

DC1PH -jednosmerni generator napona amplitude -100000 V, sa vremenom početka delovanja $T_{stat}=-1$, što znači da je u trenutku $t=0$ uključen.

CAP_U0 -kondenzator sa početnim uslovima, $U_o=-100000$ V,

TSWITCH -vremenski kontrolisani prekidač, sa vremenom uključenja $T_{cl}=0$, i vremena isključenja $T_{op} \geq T_{max}$, gde je T_{max} trajanje proračuna.

Mora se naglasiti da u realnim udarnim generatorima postoje i induktiviteti, koji utiču na oblik talasa, ali se ne mogu izmeriti, već samo proceniti vrednosti upoređujući oscilogramе i računski dobijene talase.

Izvršeno je variranje elemenata generatora R_1 i R_2 koji se mogu menjati, za razliku od elemenata C_1 i C_2 koji imaju stalne vrednosti ili se eventualno mogu menjati prevezivanjem u rednu ili paralelnu vezu.

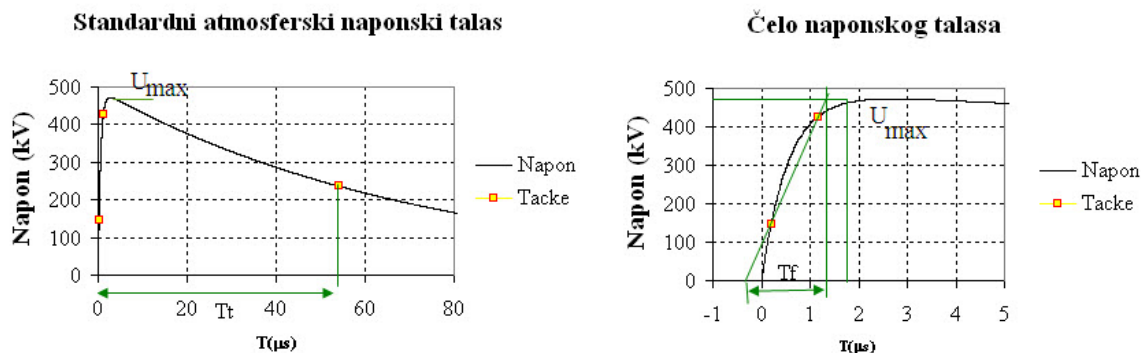
Proračun je rađen sa vremenskim korakom proračuna $\Delta t = 10^{-8}$ s, a period posmatranja je $T = 8 \times 10^{-5}$ s. Ukupan broj koraka proračuna je $n_t = T/\Delta t = 8000$.

Vrednosti elemenata šeme sa slike M.3 za koje su dobijene vrednosti parametara talasa koje su najbliže standardnom talasu oblika $1.2/50 \mu s$ date su u tabeli M.1.

Na slici M.4 prikazan je talasni oblik kompletnog talasa i uvećano čelo sa prikazanim postupkom određivanja parametar talasa.

Tabela M.1: Vrednosti elemenata udarnog naponskog generatora

C	$C_1 = C/4$	C_2	R_1	R_2
μF	μF	μF	Ω	Ω
0.2	0.05	0.0018	250	1370



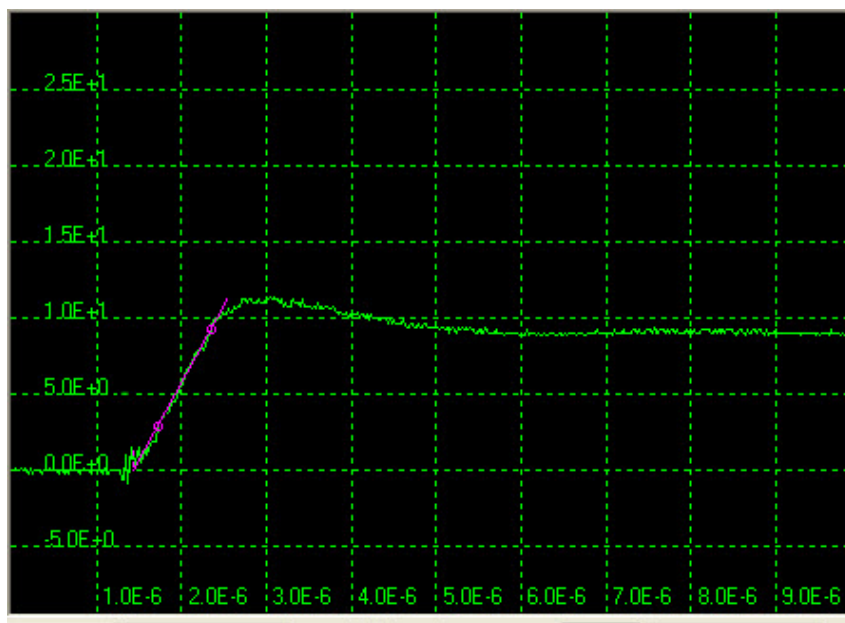
Slika M.4: Talasni oblik kompletnog talasa i uvećano čelo sa postupkom određivanja parametar talasa

Tačke na dijagramu služe za određivanje čela i začelja talasa. Talas na dijagramu ima parametre $T_f = 1.3 \mu\text{s}$ i $T_t = 51.8 \mu\text{s}$, što se uklapa u granice tolerancije koje su za čelo talasa $\pm 30\%$ i za začelje $\pm 10\%$.

Na slici M.5 prikazan je registrovan udarni naponski talas pomoću digitalnog osciloskopa. Udarni napon je dobijen pomoću 4. stepenog udarnog naponskog generatora. Talas je obrađen i određeno je vreme čela talasa, koje iznosi $T_f = 1.1 \mu\text{s}$, amplitude 120 kV, začelje nije određeno na oscilogramu. Na oscilogramu ordinatnu osu treba pomnožiti sa 10.

M.2 Termički proračun otpornika za struju punjenja

Iza izvora visokog jednosmernog napona za punjenje kondenzatora udarnog generatora koji su vezani paralelno, mora se postaviti otpornik velikog otpora koji služi da spreči preopterećenje izvora. Ovaj otpornik se naziva zaštitni otpornik i obeležava kao R_Z . Punjenje kondenzatora udarnog generatora vrši se tako da se omogući da kondenzatori budu puni za vreme od oko 1 min. Propisima je definisano da vreme između dva udara ne sme da bude kraće od 1 min, stoga nema ni potrebe da izvor jednosmernog napona bude previše snažan da bi omogućio brže punjenje. Merenje napunjenosti generatora vrši se iza otpornika R_Z , i to je u stvari kontrola napunjenosti kondenzatora prvog stepena višestepenog udarnog generatora.



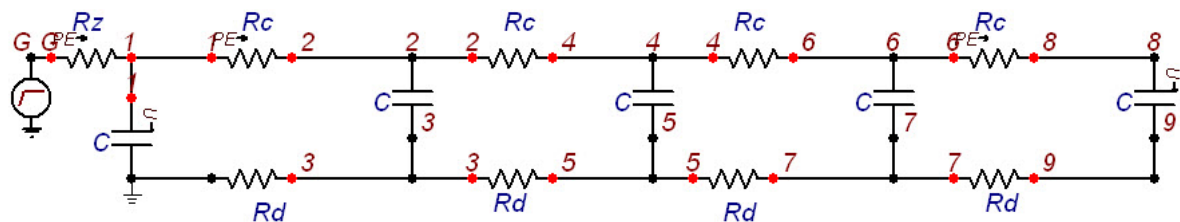
Slika M.5: Oscillografski snimak standardnog

Visokoomski otpornici između pojedinih stepeni služe da onemoguće rasterećivanje kondenzatora u lokalnim konturama i da obezbede paralelno punjenje kondenzatora. Step napunjenosti kondenzatora poslednjeg stepena udarnog generatora se ne može vršiti, jer bi nakon reagovanja i prevezivanja kondenzatora na red uređaj za merenje bio podvrgnut n puta višem udarnom naponu, gde je n broj stepeni. Stoga se ne preporučuje da otpornost otpornika između stepeni bude prevelika, da ne bi punjenje kondenzatora bilo previše dugo. Sa druge strane, ne preporučuje se ni premala vrednost zbog toga što bi se mogli kondenzatori prazniti posle reagovanja i efikasnost udarnog generatora bi se smanjivala. Ovi otpornici su obeleženi oznakama R_c i R_d . Otpornici R_c vezani su redno od izvora jednosmernog napona, a R_d redno od uzemljenog priključka.

Otpornici za ograničavanje struje ne moraju biti bezinduktivni jer služe samo za usporavanje punjenja kondenzatora. Na slici M.6 dat je ekranski prikazan zamenske šeme udarnog generatora samo sa otpornicima za ograničavanje struje punjenja kondenzatota, bez otpornika za oblikovanje talasa R_1 i R_2 i iskrišta. Cilj proračuna iz prikazane šeme je da se vidi brzina punjenja prvog kondenzatora, na kome se kontroliše napon, kao i poslednjeg kondenzatora, od čije napunjenosti u trenutku okidanja zavisi maksimalni napon koji udarni generator realizuje. Izvor napona punjenja je generator linearno rastućeg čela talasa i konstantnog napona posle završetka čela izabranog iz liste sa oznakom **RAMP**, sa osnovnim karakteristikama:

AMP -amplituda napona (ukoliko je odabran naposki izvor pri izboru vrste izvora),

T_Ramp -vreme trajanja linearnog rasta,



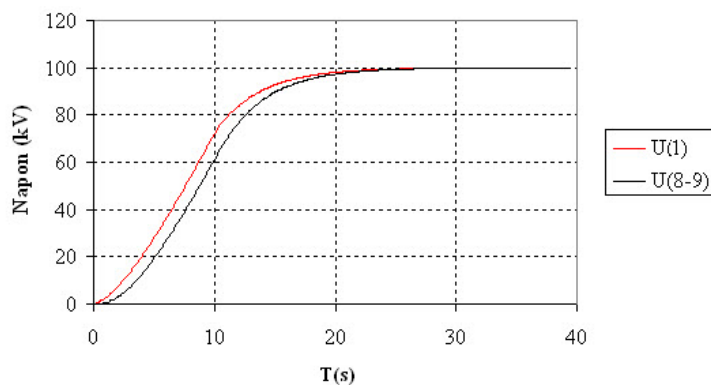
Slika M.6: Zamenska šema udarnog generatora samo sa otpornicima za ograničavanje struje

Tstart -vreme početka linearnog čela $T_{start}=0$,

Tstop -vreme završetka delovanja mora biti veće ili jednako trajanju proračuna T_{max} .

Na slici M.7 prikazani su naponi na prvom i petom stepenu udarnog generatora. Vidi se da se kondenzator petog stepena puni malo sporije nego kondenzator prvog stepena, ali se sve nalazi unutar vremenskog intervala od 1 min.

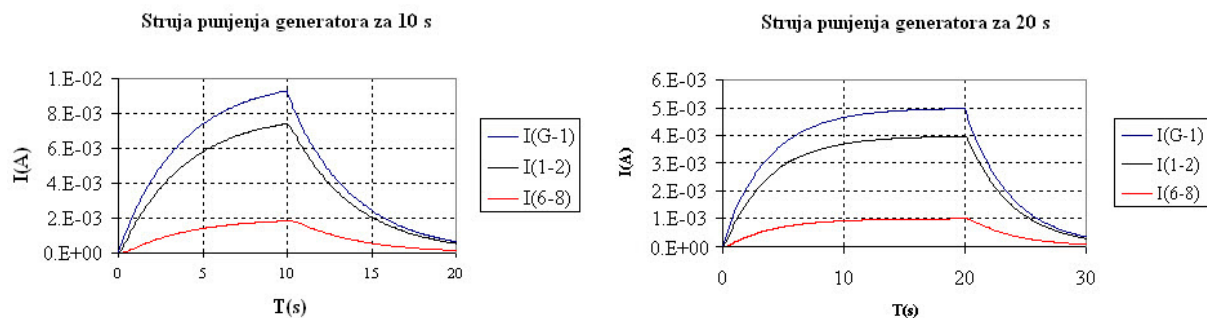
Napon punjenja kondenzatora C1 i C4



Slika M.7: Naponi na kondenzatorima prvog i petog stepena

Izvor visokog napona ima linearno rastući oblik napona kao posledicu postepenog podizanja napona na regulacionom transformatoru. Vreme podizanja do punog napona je varirano da bude 10 s i 20 s.

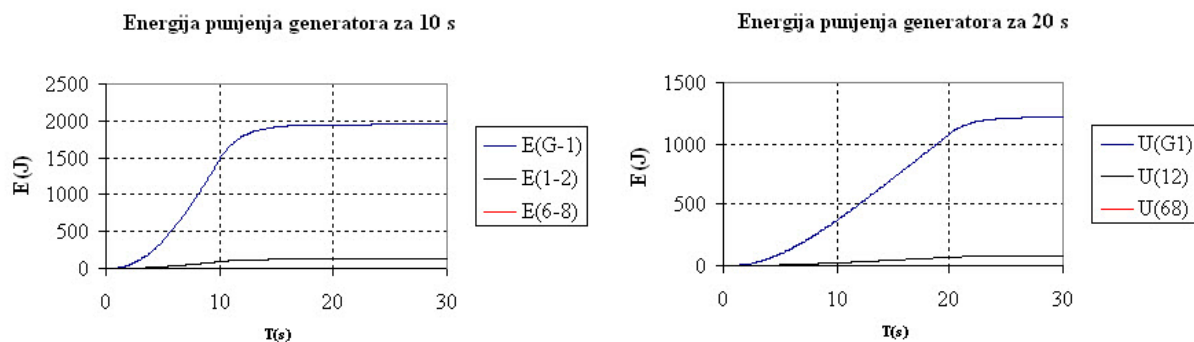
Na slici M.8 prikazan je vremenski tok struje kroz rezistor R_Z grani $G - 1$ koja je omeđena čvorovima G i 1, zatim na otporniku R_c u grani 1 – 2 prvog stepena generatora i na otporniku R_c u grani 6 – 8 poslednjeg stepena generatora, za vremena podizanja napona na generatoru 10 s i 20 s.



Slika M.8: Struje kroz zaštitni otpornik, otpornik za punjenje prvog stepena i petog stepena generatora, za 2 različite brzine podizanja napona punjenja

Može se uočiti da je sa duplo sporijim podizanjem napona struja punjenja opala na oko polovinu vrednosti, što nas navodi na zaključak da se pri izboru snage otpornika može izvršiti optimizacija otpornika izborom brzine podizanja napona.

Na slici M.9 prikazan je vremenski tok energije oslobođene na rezistorima R_z u grani sa zaštitnim otpornikom, kao i u prvom i poslednjem stepenu na otpornicima za ograničavanje struje punjenja kondenzatora. Grane u dijagramu su obeležene prema čvorovima $G - 1$ za zaštitni otpornik, $1 - 2$ prvog stepena generatora i $6 - 8$ za poslednji stepen generatora. Vreme podizanja napona na generatoru je varirano i ima vrednosti 10 s i 20 s. Može se uočiti da je sa duplo sporijim podizanjem napona enerija oslobođena na

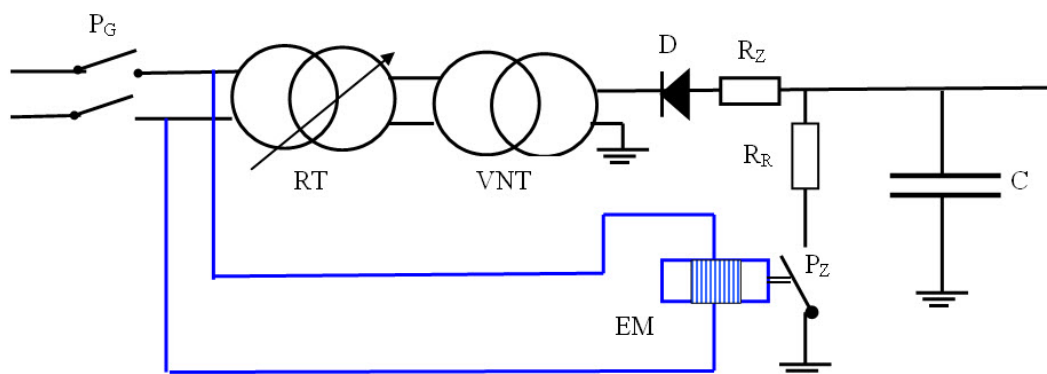


Slika M.9: Energija oslobođena na zaštnomi otporniku, otporniku za punjenje prvog stepena i petog stepena generatora, za 2 različite brzine podizanja napona punjenja

otpornicima opala na oko 75 % vrednosti, što nas navodi na zaključak da se pri izboru snage otpornika može izvršiti optimizacija otpornika izborom brzine podizanja napona.

M.3 Izbor otpornika za pražnjenje kondenzatora

Kada se isključi napajanje udarnog naponskog generatora, automatski se pomoću zemljospojnika i odgovarajućeg otpornika spajaju i uzemljuju svi krajevi kondenzatora i obezbeđuje se siguran pristup udarnom generatoru. Na slici M.10 prikazana je šema po kojoj se vrši napajanje udarnog generatora i upravljanje zemljospojnikom.



Slika M.10: Šema napajanja generatora i upravljanje zemljospojnikom za rasterećenje generatora

Oznake na slici M.10 imaju sledeće značenje:

P_G - Glavni prekidač,

RT -Regulacioni transformator,

VNT - Visokonaponski transformator,

D - Dioda, koja se nalazi u zajedničkom kućištu sa transformatorom,

R_Z - Zaštitni otpornik za ograničenje struje punjenja kondenzatora,

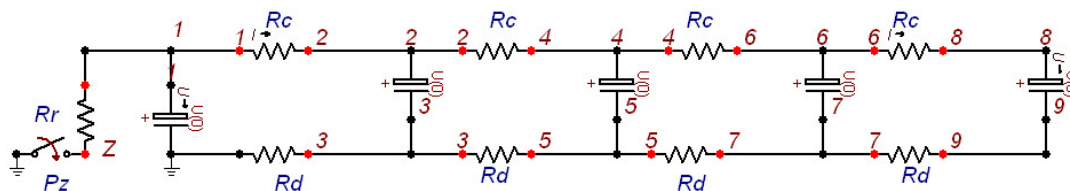
R_R - Otpornik za rasterećenje,

EM - Elektromagnet koji otvara zaštitni zemljospojnik kada je glavni prekidač uključen. Čim se otvori glavni prekidač, zemljospojnik se automatski zatvara obezbeđujući rasterećenje svih kondenzatora.

P_Z -Zaštini rastavljač (zemljospojnik), za rasterećenje kondenzatora,

C - kondenzatori udarnog generatora.

Na slici M.11 prikazana je zamenska šema iz programa Atpdraw za upravljanje izvršnog programa EMTP-atp za proračun pojava pri rasterećenju udarnog generatora posle izključenja glavnog prekidača. Na šemi su svi kondenzatori napunjeni do 100 kV



Slika M.11: Šema za modelovanje rasterećenja udarnog generatora u EMTP-atp

i posle 10 s se uključuje prekidač P_Z koji uzemljuje tačku Z udarnog generatora, iako udarni generator nije reagovao. Da bi prohran ispravno radio moraju se izabrai sledeći elementi

CAP_U0 -kondenzator sa početnim uslovima,

TSWITCH -vremenski kontrolisani prekidač.

Prilikom podešavanje karakteristika prekidača u ovom slučaju mora se voditi računa da se moraju izabrati sledeća podešenja:

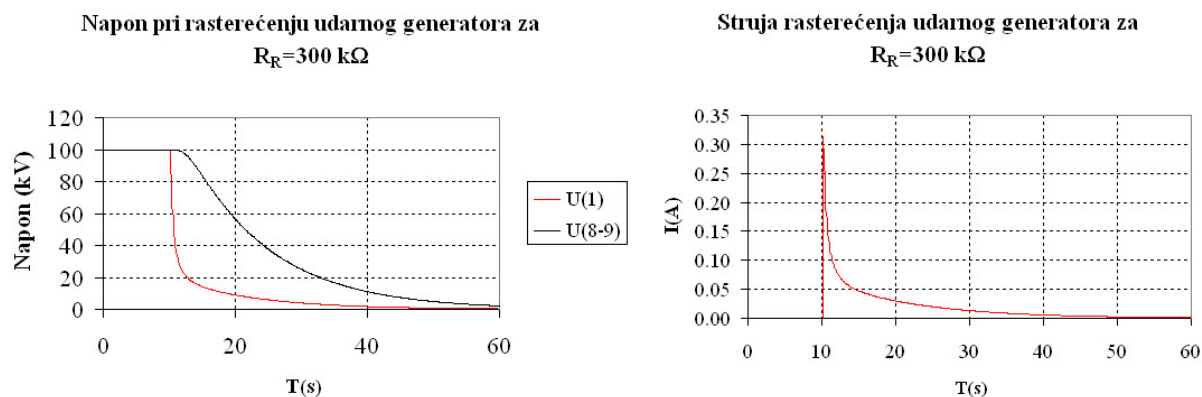
Tcl -vreme zatvaranja, izabrano 10 s da bi se jasno uočio proces rasterećenja,

Top -trenutak otvaranja, mora biti veći ili jednak vremenu proračuna

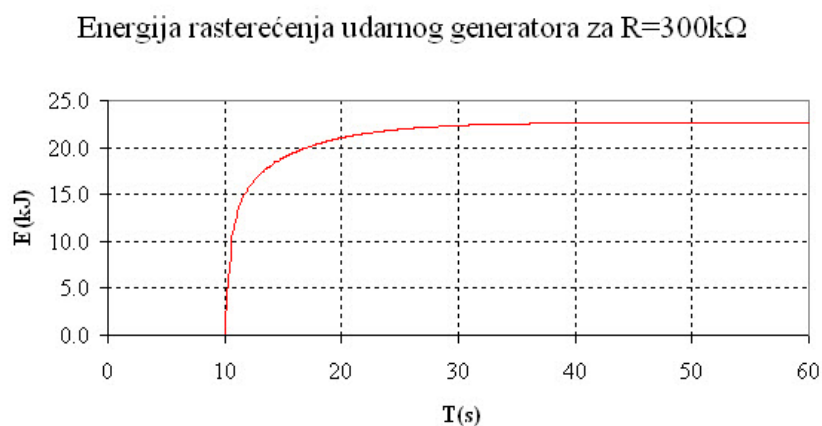
Imar -granična struja sečenja, za $t > T_{top}$ za $|I| < I_{mar}$ struja se trenutno prekida. Može se usvojiti $I_{mar}=0$.

Izvršen je proračun talasnog oblika napona na kondenzatorima prvog i petog stepena i struje kroz otpornik za rasterećenje da bi sagledali brzinu rasterećenja, kada se pretpostavlja da nije došlo do reagovanja iskrišta. U tom slučaju se opterećenje svih kondenzatora rasterećuje kroz otpornik $R_R = 300k\Omega$ i zemljospojni prekidač. Na slici M.12 prikazani su naponi na prvom i petom kondenzatoru (levo) i struja kroz otpornik R_R (desno).

Može se uočiti da se rasterećenje kondenzatora vrši relativno sporo, tako da na prvom kondenzatoru napon dostiže vrednost od oko 10 kV posle 20 s, a posle 40 s postaje bezopasan. Naprotiv, na poslednjem kondenzatoru napon opada na oko 10 kV posle 40 s, a posle 60 s je vrlo nizak i dozvoljava se prilaz generatoru. Maksimalna struja rasterećenja iznosi $I_{max} = 0.3086$ A. Trenutna snaga oslobođena u trenutku maksimuma struje iznosi $P_{max} = RI^2$, odnosno $P_{max} = 28570$ W. Ukupna oslobođena energija kroz otpornik prikazana je na slici M.13.



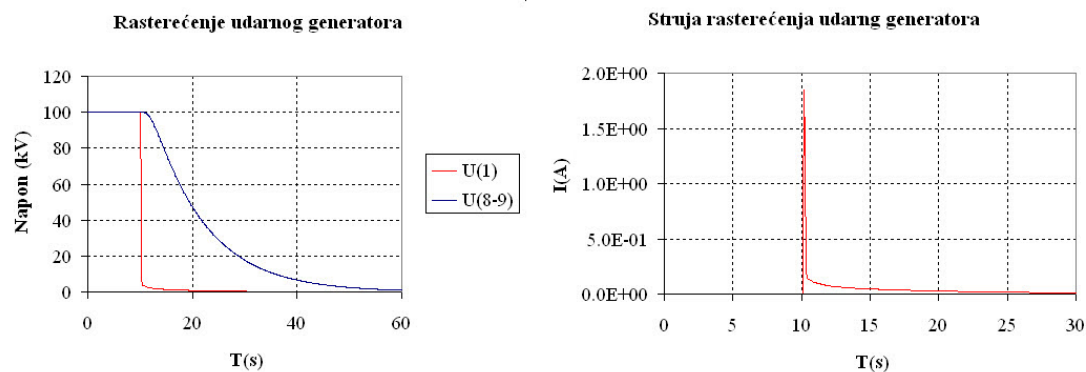
Slika M.12: Talasni oblici napona i struja prilikom uključenja zemljospojnika kada je otpornik za rasterećenje $300\text{ k}\Omega$



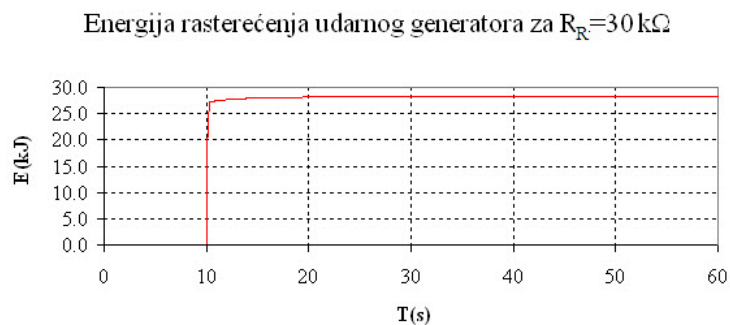
Slika M.13: Energija oslobođena na otporniku za rasterećenje vrednosti otpora $300\text{ k}\Omega$

Proračun je ponovljen sa manjim otpornikom za rasterećenje, otpornosti $R_R = 30\text{ k}\Omega$. Rezultati proračuna napona i struja u pri rasterećenju prikazani su na slici M.14. Ukupna oslobođena energija kroz otpornik prikazana je na slici M.15.

Može se uočiti da sa smanjenom vrednošću otpora za rasterećenje vrednost ukupne energije oslobođene na otporniku neznatno raste, iako je vrednost struje kroz i toplotne snage na otporniku znatno veća, ali je period proticanja kraći.



Slika M.14: Talasni oblici napona prilikom uključenja zemljospojnika kada je otpornik za rasterećenje $30 \text{ k}\Omega$



Slika M.15: Energija oslobođena na otporniku za rasterećenje otpora $30 \text{ k}\Omega$