Označavanje napona i struja na elementima

Način označavanja struja i napona u kolima koja će biti predmet razmatranja prikazan je na slici 1. Usaglašeni referentni smerovi struja i napona se podrazumevaju u svim slučajevima, tj. za sve elemente, izuzev kod diode, gde je zbog jednostavnosti i izgrađenih navika izabrano neusaglašeno označavanja struja i napona. Veoma često će na šemama biti označavani samo ili napon ili struja, a referentni smer neoznačene veličine će biti podrazumevan u skladu sa navedenom konvencijom ilustrovanom na slici 1.

Označavanje intervala vremena

U energetskoj elektronici se konvertori često analiziraju u ustaljenom stanju gde su naponi i struje periodične veličine sa periodom T_S, koji se naziva "perioda prekidanja". Prekidačka frekvencija se stoga definiše kao recipročna vrednost periode prekidanja

$$f_S = \frac{1}{T_S}.$$

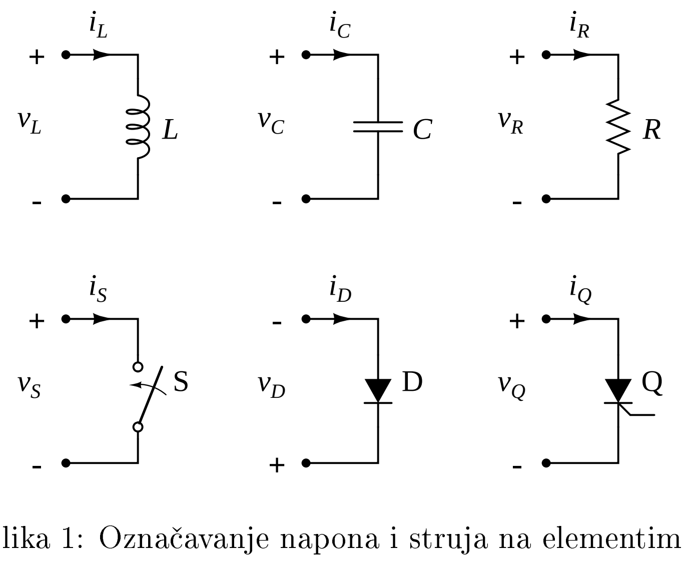
Prekidački elementi se karakterišu svojim stanjem, mogu biti uključeni ili isključeni, odnosno provodni ili neprovodni, odnosno (u laboratorijskom slengu) upaljeni ili ugašeni. Tipičan dijagram stanja prekidača u jednom konvertoru je prikazan na slici 2.

Tokom intervala vremena $0 < t < DT_S$, koji traje DT_S, prekidač je uključen, dok je tokom intervala $DT_S < t < T_S$ koji traje $(1-D)T_S = D'T_S$ prekidač isključen. Normalizovano trajanje intervala vremena tokom koga je prekidač uključen D se zove faktor ispunjenosti pobudnih impulsa prekidača i to je broj koji nema fizičku dimenziju, a vrednost mu se kreće u opsegu $0 \leq D \leq 1$. Normalizovano trajanje intervala tokom koga je prekidač isključen, $D'T_S$ nema poseban naziv, a važi

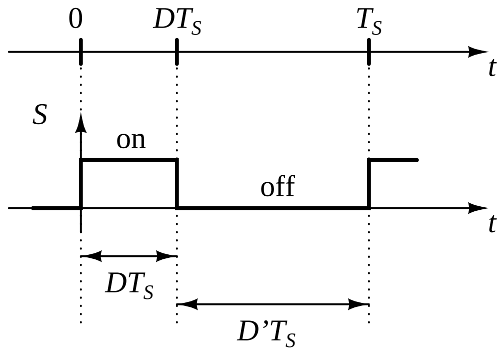
$$D + D' = 1$$

što se često koristi u izvođenjima.

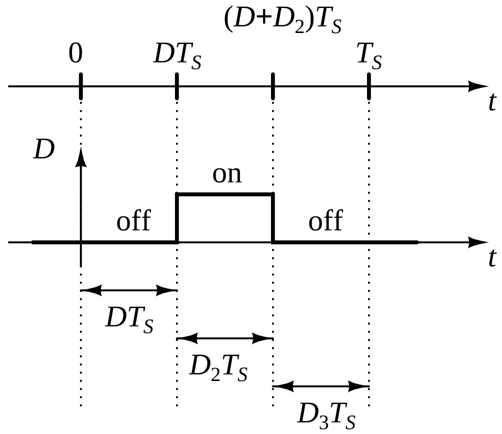
Označavanje koje koristi normalizovano trajanje intervala D i D' pogodno je u slučaju da se tokom periode smenjuju dve kombinacije stanja prekidačkih elemenata. Ovakva situacija je karakteristična za kontinualni režim rada konvertora, kada vode ili prekidač ili dioda. U praksi se sreće još (bar) jedan režim rada, diskontinualni, gde se pojavljuje i treći interval, kada ne vode ni prekidač ni dioda. U tom slučaju je povoljno primeniti nešto drugačije označavanje, po kome se intervali vremena označavaju sa DT_S kada je uključen prekidač, D_2T_S kada vodi



Slika 1: Označavanje napona i struja na elementima



Slika 2: Stanje prekidača, označavanje intervala vremena



Slika 3: Stanje diode, označavanje intervala vremena, diskontinualni režim rada

dioda, i D_3T_S kada ne vode ni prekidač ni dioda. Tipičan dijagram stanja diode je dat na slici 3, gde su označena trajanja pojedinih intervala vremena. Kako je zbir trajanja sva tri intervala jednak periodi prekidanja, u normalizovanoj formi ova činjenica ima oblik

$$D + D_2 + D_3 = 1.$$

Kako će kasnije biti razmatrano, normalizovano trajanje intervala D je nezavisna promenljiva koja se zadaje konvertoru, upravljačka promenljiva, dok je D_2 funkcija D, ali i napona u kolu. Time je i D_3 učinjena funkcijom i D i napona u kolu. Ova naizgled mala razlika uslovljava znatno složenije rešavanje kola kada konvertor radi u diskontinualnom režimu.

Opisan način označavanja vremenskih intervala se može generalizovati za slučaj kada se javlja više karakterističnih intervala vremena, više od tri.

Karakteristike reaktivnih elemenata u integralnom obliku

U analizi prekidačkih konvertora se najčešće određuje odziv kola u ustaljenom stanju. Štaviše, prvi korak u projektovanju konvertora je zadovoljavanje specifikacija zadatih za ustaljeni režim. Specifičnost kola energetske elektronike je istovremeno prisustvo nelinarnih i reaktivnih (akumulacionih) elemenata u kolu, tako da je svako kolo opisano sistemom nelinearnih diferencijalnih jednačina. Kako su osnovni elementi prekidačkih konvertora nelinearni, ubičajeni metod određivanja odziva u ustaljenom stanju koji koristi superpoziciju i Furijeove redove ne može da se primeni. Analiza kola se vrši u vremenskom domenu tako što se pretpostave početne vrednosti promenljivih stanja, struja kalemova i napona kondenzatora, a zatim se odrede talasni oblici struja i napona u kolu. Pod početnim vrednostima se podrazumevaju vrednosti na početku periode prekidanja koje u ustaljenom stanju moraju biti dostignute na kraju periode prekidanja. Same početne vrednosti promenljivih stanja se određuju kasnije, najčešće iz veze sa ulaznim naponom i izlaznom strujom.

Specifičnosti analize prekidačkih konvertora u ustaljenom stanju uzrokuju čestu primenu karakteristika reaktivnih elemenata, kalemova i kondenzatora, u integralnom obliku. U fizičkom smilu, karakteristike u integralnom obliku u slučaju kalema povezuju fluks (integral napona po vremenu) sa promenom struje kalema, dok u slučaju kondenzatora povezuju naelektrisanje (integral struje po vremenu) sa promenom napona na kondenzatoru.

Argument fluksa

Uobičajena forma karakteristike kalema (slika 4) koja se sreće u analizi električnih kola je

$$v_L = L\frac{di_L}{dt}.$$

U teoriji električnih kola ovakva karakteristika elementa se postulira. Ulaskom u fizičku osnovu, tj. poreklo ovakve karakteristike elementa, vidi se da je ona nastala primenom Faradejevog zakona

$$v_L = \frac{d\lambda_L}{dt}$$

gde je λ_L magnetni fluks kroz namotaj kalema, na jednačinu koja povezuje struju i fluks kalema i koja u slučaju linearnog kalema glasi

$$\lambda_L = L\, i_L.$$

Ova jednačina je suštinski vrlo bliska karakteristici kalema u integralnoj formi, pošto je po Faradejevom zakonu fluks integral napona po vremenu. Međutim, sa stanovišta primene u analizi električnih kola i izgrađenih navika nepovoljno je uvoditi nove fizičke veličine, poput fluksa i naelektrisanja, već je povoljno zadržati se na naponima i strujama. Kako je fluks integral napona po vremenu, kako bi se rešili problema određivanja konstante integracije povoljno je preći sa neodređenog na određeni integral tako što će gornja jednačina biti posmatrana u dva trenutka vremena, t_1 i t_2, a zatim biti formirana razlika

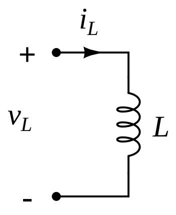
$$\lambda_L(t_2) - \lambda_L(t_1) = L\left(i_L(t_2) - i_L(t_1)\right).$$

Kako je

$$\lambda_L(t_2) - \lambda_L(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} v_L(t)\, dt$$

dobijamo karakteristiku kalema u integralnoj formi

$$i_L(t_2) - i_L(t_1) = \frac{1}{L}\int_{t_1}^{t_2} v_L(t)\, dt$$



Slika 4: Kalem

koja povezuje samo struje i napone. Ovu jednačinu je bilo moguće direktno izvesti od polazne, postulirane, karakteristike kalema, ali će se uvođenje fluksa pokazati korisnim kasnije, pošto je potrebno izgraditi osećaj za dimenzije komponente koje su direktno povezane sa fizičkom suštinom, u ovom slučaju fluksom.

Primena karakteristike kalema u integralnoj formi na poseban slučaj kola u kome se prekidanje vrši sa periodom T_S, odnosno frekvencijom $f_S = 1/T_S$, na trenutke koji se nalaze na početku i na kraju periode daje

$$i_L\left(t_0 + T_S\right) = i_L\left(t_0\right) + \frac{1}{L}\int_{t_0}^{t_0+T_S} v_L(t)\,dt.$$

Kako je u ustaljenom stanju

$$i_L\left(t_0 + T_S\right) = i_L\left(t_0\right)$$

dobijamo

$$\int_{t_0}^{t_0+T_S} v_L\left(t\right)\ dt = 0.$$

Ova jednačina je često u upotrebi kod analize konvertora i naziva se argument fluksa ili (mnogo češće) *volt-second balance*, ponekad i *flux balance*. Po argumentu fluksa integral napona na kalemu tokom periode je u ustaljenom režimu jednak nuli.

Deljenjem jednačine koja opisuje argument fluksa sa periodom prekidanja (odnosno množenjem sa frekvencijom prekidanja), argument fluksa se može iskazati u alternativnoj formi

$$\frac{1}{T_S}\int_{t_0}^{t_0+T_S} v_L\left(t\right)\ dt = 0$$

koja kaže da je srednja vrednost napona na kalemu u ustaljenom režimu jednaka nuli

$$\overline{v_L} = \langle v_L \rangle = 0.$$

Oznaka $\overline{v_L}$ je oznaka za srednju vrednost (napona na kalemu u ovom slučaju) koja se uglavnom koristi u Evropi, dok je u američkoj literaturi češća oznaka $\langle v_L \rangle$.

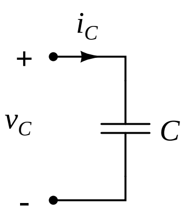
Argument naelektrisanja

Karakteristika kondenzatora (slika 5) u integralnoj formi je dualna karakteristici kalema, mada izgrađene navike i češće sretanje sa kondenzatorom čine kondenzator familijarnijim elementom većini inženjera. Karakteristika kondenzatora koja se postulira u teoriji električnih kola je

$$i_C = C\frac{dv_C}{dt}$$

a ona potiče od definicije jačine električne struje kao protoka naelektrisanja

$$i_C = \frac{dq_C}{dt}$$



Slika 5: Kondenzator

gde je q_C naelektrisanje na kondenzatoru, i jednačine koja povezuje naelektrisanje i napon na kondenzatoru koja u slučaju linearnog kondenzatora glasi

$$q_C = C\,v_C.$$

Ova jednačina je suštinski vrlo bliska karakteristici kondenzatora u integralnoj formi, pošto je naelektrisanje integral struje po vremenu. Međutim, sa stanovišta primene u analizi električnih kola i izgrađenih navika povoljno je zadržati se na naponima i strujama. Kako je naelektrisanje integral struje po vremenu i kako bi se rešili problema određivanja konstante integracije, povoljno je preći sa neodređenog na određeni integral tako što će gornja jednačina biti posmatrana u dva trenutka vremena, t_1 i t_2, a zatim biti formirana razlika

$$q_C(t_2) - q_C(t_1) = C\left(v_C(t_2) - v_C(t_1)\right).$$

Kako je

$$q_C(t_2) - q_C(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} i_C(t)\,dt$$

dobijamo karakteristiku kondenzatora u integralnoj formi

$$v_C(t_2) - v_C(t_1) = \frac{1}{C}\int_{t_1}^{t_2} i_C(t)\,dt$$

koja povezuje samo struje i napone. Ovu jednačinu je bilo moguće i direktno izvesti od polazne, postulirane, karakteristike kondenzatora.

Primena karakteristike kondenzatora u integralnoj formi na poseban slučaj kola u kome se prekidanje vrši sa periodom T_S, odnosno frekvencijom $f_S = 1/T_S$, na trenutke koji se nalaze na početku i na kraju periode daje

$$v_C\left(t_0 + T_S\right) = v_C\left(t_0\right) + \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t_0+T_S} i_C(t)\,dt.$$

Kako je u ustaljenom stanju

$$v_C\left(t_0 + T_S\right) = v_C\left(t_0\right)$$

dobijamo

$$\int_{t_0}^{t_0+T_S} i_C\left(t\right)\,dt = 0.$$

Ova jednačina je često u upotrebi kod analize konvertora i naziva se argument naelektrisanja ili (mnogo češće) *ampere-second balance* ili *charge balance*. Po argumentu naelektrisanja integral struje kondenzatora tokom periode je u ustaljenom režimu jednak nuli.

Deljenjem jednačine koja opisuje argument naelektrisanja sa periodom prekidanja (odnosno množenjem sa frekvencijom prekidanja), argument naelektrisanja se može iskazati u alternativnoj formi

$$\frac{1}{T_S}\int_{t_0}^{t_0+T_S} i_C\left(t\right)\,dt = 0$$

koja kaže da je srednja vrednost struje kondenzatora u ustaljenom režimu jednaka nuli

$$\overline{i_C} = \langle i_C \rangle = 0.$$

Opet, oznaka $\overline{i_C}$ je oznaka za srednju vrednost koja se uglavnom koristi u Evropi, dok je u američkoj literaturi češća oznaka $\langle i_C \rangle$.