

6 JALOVA MOČ ZARADI KRMILJENJA IN ZARADI POPAČENJA

Pri enofaznih in trifaznih nastavljalnikih s spreminjanjem krmilnega kota α »izrezujemo« različno velike napetostno-časovne ploščine iz gonilne sinusne napetosti in na ta način krmilimo efektivno (pa tudi srednjo) vrednost napetosti in toka na bremenu. Analizirajmo posledice takšnega krmiljenja!

1. Predvsem lahko ugotovimo, da statični karakteristiki za napetost u_L in tok i nista odvisni samo od velikosti krmilnega kota α , temveč zelo močno tudi od značaja, t.j. od sestave bremena (ohmsko, induktivno, mešano)! To pomeni, da pri nastavljalnikih velikost u_L in i nista enoumno določena le z velikostko krmilnega kota α . Do enake splošne ugotovitve bomo kasneje prišli tudi pri drugih polprevodniških pretvornikih.
2. Izhodna napetost in tok nista več sinusna, temveč sta različno »popačena«. Ta popačitev ima daljnosežne posledice za jalove in navidezne moči, ki se pretakajo po pretvornikih, vpliva pa tudi na energetski izkoristek in na izkoriščenost elementov pretvornika, vključno s transformatorjem. Ker so ti nesinusni toki periodični (v stacionarnem obratovanju!) jih lahko za analizo razstavimo po Fourierju na harmonske komponente. Tako dobimo osnovno harmonsko komponento določene amplitude in fazne lege ter celo vrsto harmonskih komponent višjega reda ν , katerih frekvence so celi mnogokratniki osnovne frekvence $f_\nu = \nu f_1$. Tudi za te višje harmonske komponente lahko izračunamo amplitude in fazne lege. Večinoma postajajo njihove amplitude tem manjše, čim večji je njihov red ν .

6.1 Harmonska analiza

Fourierjeva enačba razstavi periodični nesinusni tok $i(t)$, katerega perioda je T , na njegove komponente:

$$i(t) = I_d + \sum_{\nu=1}^n (a_\nu \cdot \cos \nu \omega t + b_\nu \cdot \sin \nu \omega t) = I_d + I_{\sim}$$

I_d je enosmerna komponenta:

$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

Amplitude delnih harmonskih komponent so:

$$a_v = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cdot \cos v\omega t \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cdot \cos v\omega t \cdot d\omega t$$

$$b_v = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cdot \sin v\omega t \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cdot \sin v\omega t \cdot d\omega t$$

Če združimo deleže, ki imajo enake frekvence oz. enaki red ν , dobimo:

$$i(t) = I_d + \sum_{\nu=1}^n \hat{I}_\nu \sin(v\omega t + \varphi_\nu) = I_d + I_{izm}$$

pri čemer je:

$$\hat{I}_\nu = \sqrt{a_\nu^2 + b_\nu^2}$$

$$\varphi_\nu = \arctg \frac{a_\nu}{b_\nu}$$

Deleže z redom $\nu=1$ imenujemo **osnovno harmonsko komponento**, ostale pa **višje harmonske komponente**. Njihova frekvenca f_ν oz. perioda T_ν je:

$$f_\nu = \nu f_1 = \frac{\nu \omega_1}{2\pi}$$

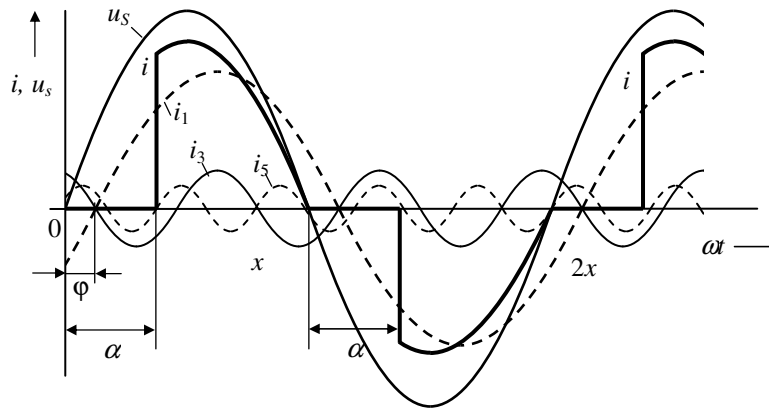
oziroma:

$$T_\nu = \frac{T_1}{\nu}$$

pri čemer se vrednosti za osnovno harmonsko komponento ujemajo z vrednostmi gonilne (npr. omrežne) napetosti:

$$T_1 = T, \quad f_1 = f \quad \text{in} \quad \omega_1 = \omega$$

Slika 6.1 kaže rezultat harmonske analize za periodični nesinusni tok i s sl. 5.6. Narisane so samo harmonske komponente reda $\nu=1, 3$ in 5 . Enosmerna komponenta je v tem zgledu $I_d = 0$.



Slika 6.1: Prikaz harmonskih komponent toka pri delno izkrmiljenem enofaznem nastavljalniku z ohmskim bremenom: u_s - omrežna gonilna napetost; i - bremenski tok; i_1, i_3, i_5 - harmonske komponente bremenskega toka; α - krmilni kot, φ_1 - fazni kot osnovne harmonske komponente toka

6.2 Energetske razmere v linearnih tokokrogih s sinusnimi veličinami

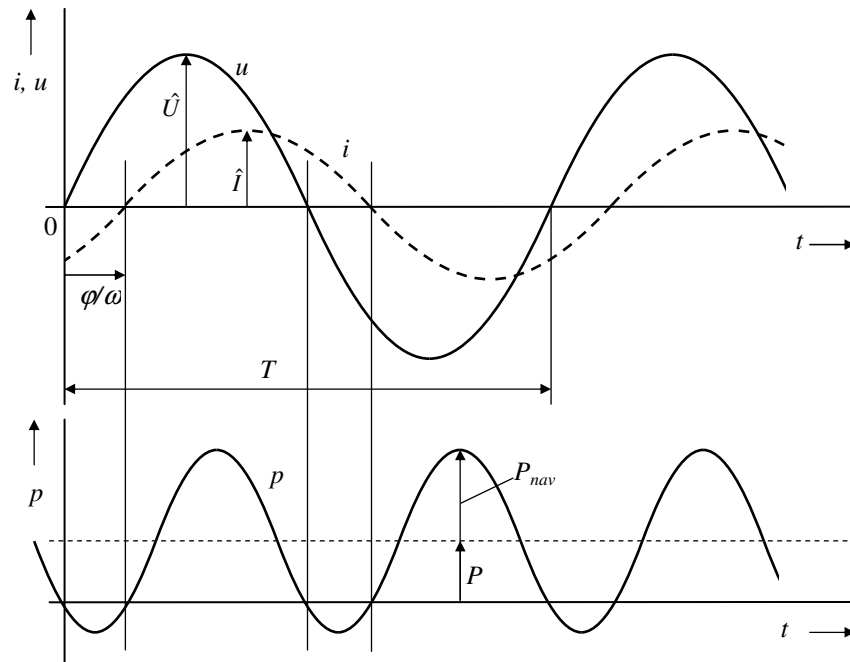
Obnovimo si znanje iz osnov elektrotehnike! V električnih tokokrogih kakršnekoli vrste je **trenutna električna moč** p v neki točki tokokroga podana z zmnožkom trenutne vrednosti napetosti u in trenutne vrednosti toka v tej točki:

$$p = u \cdot i$$

V izmeničnih tokokrogih se predznaka pri u in i v vsaki periodi spreminjata, zato lahko zavzame tudi njun zmnožek p v času ene periode pozitivne in negativne vrednosti. Pozitivni predznak pomeni energijski pretok v eno smer (npr. energija odteka), negativni predznak pa energijski pretok v nasprotni smeri (energija priteka). Celoten ali **neto energijski pretok oz. neto moč** v času ene periode T lahko v izmeničnih tokokrogih izračunamo z:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt \equiv P_{del}$$

P je potemtakem srednja (povprečna, neto) moč in jo v elektrotehniki imenujemo tudi **delovna moč**.



Slika 6.2: Časovni potek trenutne moči p pri sinusni napetosti in toku, ki sta fazno premaknjena za električni kot φ

Slika 6.2 kaže sinusno napetost $u(t)$ in sinusni tok $i(t)$, ki sta časovno premaknjena za čas:

$$t = \frac{\varphi}{\omega}$$

oziroma za električni kot φ , pri čemer je $\omega = 2\pi f$ krožna frekvenca. \hat{U} in \hat{I} sta temenski (maksimalni) vrednosti napetosti oz. toka. Zmnožek trenutnih vrednosti je:

$$p = \hat{U} \sin \omega t \cdot \hat{I} \sin(\omega t - \varphi)$$

in ga lahko ob uporabi matematičnega adicijskega teorema napišemo tudi v obliki:

$$p = UI \cos \varphi \cdot UI \sin(2\omega t - \varphi)$$

pri čemer sta U in I efektivni vrednosti sinusne napetosti in sinusnega toka.

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) \cdot dt}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt}$$

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$$

Ustrezen časovni potek trenutne moči p kaže sl.6.2. Vidimo, da se spreminja moč po sinusni funkciji z dvojno omrežno frekvenco $2f$ in zavzema pozitivne in negativne vrednosti. To pomeni, da se energija med vsako periodo pretaka v obe smeri. Njena srednja ali neto vrednost je delovna moč P (enota Watt):

$$P = UI \cos \varphi$$

medtem ko njen preostali del:

$$UI \sin(2\omega - \varphi) = P_{nav} \sin(2\omega - \varphi)$$

niha sinusno z dvojno frekvenco in v vsaki periodi štirikrat spremeni svoj predznak. Njen neto energijski pretok je nič: energija se samo »premetava«. Njeno amplitudo P_{nav} imenujemo v elektrotehniki **navidezna moč** (enota VA):

$$P_{nav} = UI$$

Tako podana energetska slika je realna. Vendar v elektrotehniki zaradi enostavnejšega prikaza in računanja uporabljamo raje neke **računske, realno neobstoječe** vrednosti za sinusne toke: sinusni tok, ki je v splošnem zaradi neohmske impedance v tokokrogu premaknjen glede na sinusno napetost $u(t)$ za nek električni kot φ , razdelimo računsko na dve komponenti: na tako imenovano **delovno komponento**:

$$I_{del} = I \cdot \cos \varphi$$

ki je v fazi z napetostjo, in na **jalovo komponento**:

$$I_{jal} = I \cdot \sin \varphi$$

ki je glede na napetost premaknjena za električni kot $\varphi = 90^\circ$. Le zmnožek delovne komponente toka I_{del} z napetostjo daje delovno moč, medtem ko zmnožek jalove komponente z napetostjo ne daje nobene srednje moči. Razmerje:

$$\frac{P}{P_{nav}} = \frac{I_{del}}{I} = \cos \varphi$$

imenujemo **faktor premaknitve** (ali tudi faktor moči za osnovno harmonsko komponento).

Jalova komponenta toka I_{jal} je v splošnem škodljiva, saj ne samo da nič ne prispeva k prenosu energije, temveč povzroča na impedancah tokokroga napetostne padce $I_{jal}Z$ in

energijske izgube $(I_{jal})^2 \cdot R$ na ohmskih uporih, obremenjuje pa tudi elemente vezja in prenosne kapacitete, npr. transformatorjev in daljnovodov. Zato je tok I_{jal} nezaželen. Zapomnimo si: jalove toke povzročajo v **linearnih** elektriških tokokrogih neohmska bremena! V elektriških sistemih, v katerih nastopajo polprevodniški pretvorniki, pa generirajo jalove toke (moči) žal, tudi drugi povzročitelji.

Iz osnov elektrotehnike so poznane naslednje zveze:

$$I = \sqrt{I_{del}^2 + I_{jal}^2}$$

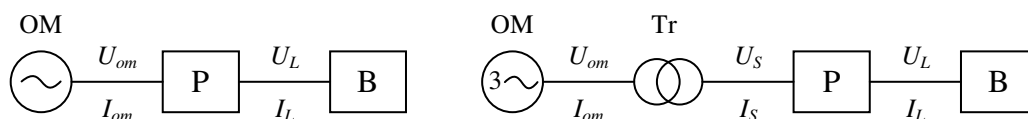
$$P_{nav} = \sqrt{P^2 + P_{jal}^2}$$

pri čemer je **jalova moč** (enota V Ar):

$$P_{jal} = UI_{jal}$$

6.3 Energetske razmere v izmeničnih tokokrogih z nesinusnimi periodičnimi toki

Pretvorniki so mnogokrat priključeni na **togo** izmenično enofazno ali trifazno električno omrežje. Takšno omrežje ima (teoretično) konstantno napetost sinusne oblike. Sl.6.3 kaže takšen primer. Zaradi izrazito nelinearnih elementov, kot so polprevodniški ventili, toki ne bodo sinusni. Električno moč lahko v vsaki točki sistema izračunamo z osnovno en. 10.11, enako tudi moč na omrežni strani, kjer je omrežna napetost (U_{om} na sl.6.3) sicer sinusna, omrežni tok I_{om} pa ne. Vendar sta analiza in računanje bolj enostavna, če računsko razstavimo nesinusni, toda periodični tok najprej na njegove harmonske komponente. **V primeru, da je napetost sinusna, tok pa nesinusen, vendar periodičen in brez enosmerne komponente, veljajo v elektrotehniki naslednje definicije:**



Slika 6.3: Na togo omrežje priključen polprevodniški pretvornik: a) neposredno, b) posredno: OM-togo omrežje, Tr-transformator, P-pretvornik, B-breme, U_{om} - omrežna napetost sinusne oblike

Delovna moč: $P = UI_1 \cos \varphi_1$

kjer je U efektivna vrednost napetosti, I_1 efektivna vrednost osnovne harmonske komponente toka in φ_1 fazna premaknitev osnovne harmonske komponente toka glede na napetost. Iz te enačbe sledi:

faktor premaknitve:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{U \cdot I_1} = \frac{P}{P_{nav1}}$$

Ostale definicije so:

Osnovna harmonska navidezna moč:

$$P_{nav1} = UI_1$$

Celotna navidezna moč:

$$P_{nav} = UI$$

kjer je I efektivna vrednost:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

I_1, I_2, I_3 itd. so efektivne vrednosti posameznih harmonskih komponent toka.

Celotna jalova moč:

$$P_{jal} = \sqrt{P_{nav}^2 - P^2}$$

Osnovna harmonska jalova moč:

$$P_{jal1} = UI \sin \varphi_1$$

Moč popačenja:

$$P_{pop} = U \cdot \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

Osnovna harmonska vsebina toka oz. faktor popačenja:

$$g_1 = \frac{I_1}{I}$$

Iz teh enačb vidimo, da lahko daje **delovno moč** le osnovna harmonska komponenta toka, ki ima isto frekvenco kot omrežna napetost, vse ostale harmonske komponente pa prav nič ne prispevajo k delovni moči, ampak zato le k jalovi moči. Osnovno harmonsko komponento toka lahko dodatno računsko razstavimo na njeno **delovno** komponento:

$$I_{del1} = I_1 \cos \varphi_1$$

in na **jalovo** komponento:

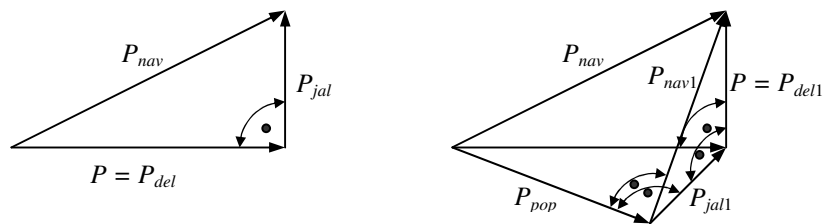
$$I_{jal1} = I_1 \sin \varphi_1$$

ki dajeta delovno in jalovo moč prve harmonske komponente. Ostale harmonske komponente toka ne dajejo, neodvisno od njihove fazne lege glede na sinusno napetost, s to napetostjo nobene delovne moči, temveč le moč popačenja P_{pop} , ki je nekakšna **jalova** moč. Med celotno navidezno močjo P_{nav} , delovno močjo $P = P_{del}$, osnovno harmonsko jalovo močjo P_{jal1} in močjo popačenja P_{pop} obstaja naslednja matematična zveza:

$$P_{nav}^2 = P_{del1}^2 + P_{jal1}^2 + P_{pop}^2 = P_{nav1}^2 + P_{pop}^2$$

$$P_{nav1}^2 = P_{del1}^2 + P_{jal1}^2$$

To lahko prikažemo tudi grafično v ravnini oz. prostorsko na sl. 6.4.



Slika 6.4: Grafični prikaz navidezne, delovne in jalove moči: a) pri sinusni napetosti in sinusnem toku, b) pri sinusni napetosti in nesinusnem toku

Sedaj lahko tudi za ta obravnavani primer definiramo **faktor moči** λ kot razmerje med delovno močjo $P = P_{del1}$ in med celotno navidezno močjo P_{nav} :

$$\lambda = \frac{P}{P_{nav}}$$

Ob upoštevanju izraza za g_1 je faktor moči tudi enak:

$$\lambda = g_1 \cdot \cos \varphi_1$$

Pri sinusnem toku je $g_1 = 1$, torej je faktor moči λ kar faktor premaknitve $\cos \varphi_1$, t.j. faktor moči za osnovno harmonsko komponento. Pri popačenih (nesinusnih periodičnih) tokih pa doprinesejo k »premaknitvi« oz. k povečani jalovi moči ne samo fazna premaknitev osnovne harmonske komponente toka glede na sinusno napetost, temveč tudi »popačenja« oblike toka, t.j. višje harmonske komponente toka. To pomeni, da je pri nesinusnih tokih faktor moči λ vedno manjši od faktorja premaknitve $\cos \varphi_1$.

Vse te definicije in matematične zveze veljajo le v primeru, če je napetost sinusna! Pri nesinusni napetosti izgubijo veljavo.

Za novinca so te definicije sprva nepregledne in nekoliko odveč. Vendar moramo vedeti, da takšno gledanje poenostavlja kasnejšo analizo dogajanj, zlasti razčlemba jalove moči in škodljivih vplivov zaradi popačitve toka. V linearnih tokokrogih povzroča jalovo moč izključno neohmsko breme. Pri pretvornikih pa nastopajo dodatno še drugi povzročitelji jalove moči, npr. fazno krmiljenje, komutacijski procesi, različne vezave trifaznih transformatorjev itd. Ker tečeta jalova moč in jalov tok, obremenjujeta elemente, povzročata energijske izgube, motita delovanje transformatorjev, povzročata popačitev omrežne napetosti v ne togih omrežjih, itd.

4	HLAJENJE VENTILOV	65
4.1	Električne izgube	66
4.2	Termično nadomestno vezje	67
4.3	Hladilna telesa in namestitve ventilov	70
5	TIRISTORSKA STIKALA IN NASTAVLJALNIKI.....	72
5.1	Tiristorsko stikalo v izmeničnih tokokrogih.....	72
5.2	Vklop induktivnosti s tiristorskim stikalom	76
5.3	Tiristorski nastavljalniki za izmenični tok.....	77
5.3.1	Trifazni tiristorski nastavljalnik.....	80
6	JALOVA MOČ ZARADI KRMILJENJA IN ZARADI POPAČENJA	82
6.1	Harmonska analiza	82
6.2	Energetske razmere v linearnih tokokrogih s sinusnimi veličinami	84
6.3	Energetske razmere v izmeničnih tokokrogih z nesinusnimi periodičnimi toki	87