



Automatika

PODSINHRONA KASKADA

MPSK

9.06

NAMENA

- ↗ *Kontinualna regulacija brzine elektromotora sa kliznokolutnim rotorom*

SNAGA

- ↗ *Najekonomičnija iznad 250 kW*
- ↗ *Mogućnost do 3150 kW*

NAPON

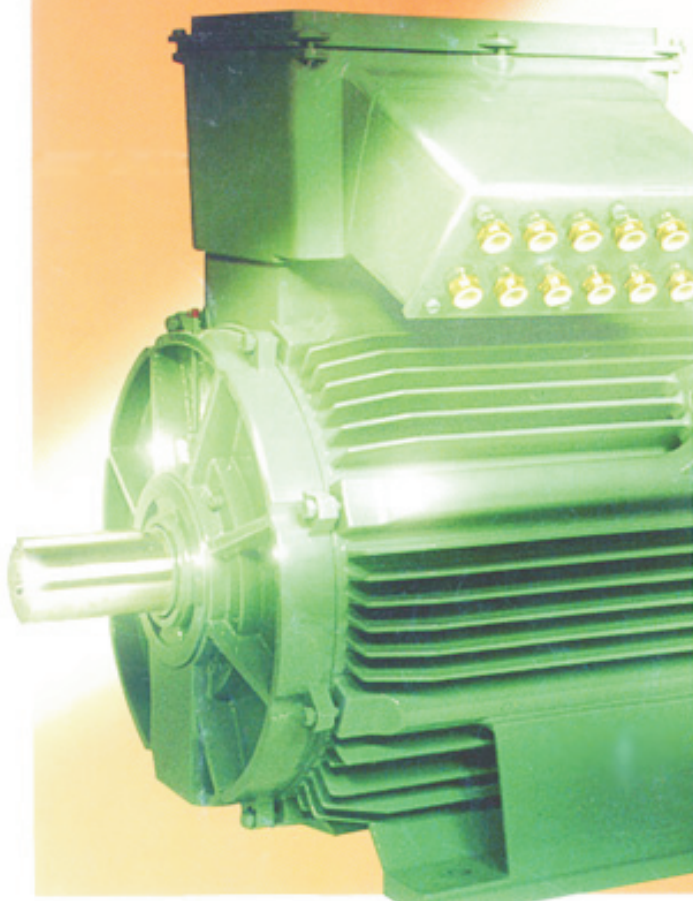
- ↗ *3×400/230 V, 6 kV, 10 kV, 50 Hz*

OBLAST PRIMENE

- ↗ *Pumpna postrojenja*
- ↗ *Ventilatorski pogoni*
- ↗ *Mlinovi*
- ↗ *Valjaonički stanovi*
- ↗ *Kompresorska postrojenja*
- ↗ *Rotacioni bageri*

OPSEG REGULACIJE

- ↗ *Zavisno od tehnoloških potreba*
- ↗ *Standardno u opsegu $(0,6 \div 1) n_n$*



UVOD

Najpoznatiji svetski proizvođači energetske elektronske komponente (diode, tiristori, tranzistori itd), ulažući u razvoj, teže permanentno da pomeraju granice njihovih snaga i naponske izdržljivosti.

Zahvaljujući tome razvoju komponente energetske elektronike, razvila se oblast regulacije brzine elektromotornih pogona.

Na osnovu praćenja kako svetskih iskustava, a takođe i naših, nametnula se u oblasti regulacije elektromotornih pogona sledeća podela:

a) FREKVENTNI REGULATORI

To su elektronski uređaji koji se primenjuju prvenstveno za regulaciju brzine niskonaponskih elektromotora sa kratkospojenim rotorom snage reda 0,25 kW do 250 kW. Moguće je vršiti frekventnu regulaciju i za snage veće od 250 kW, ali to je neekonomično. Troškovi izrade uređaja znatno su veći zbog dimenzionisanja uređaja na celu snagu elektromotora koja mora proći kroz njega i zbog nemogućnosti primene frekventnih regulatora za VN motore.

b) PODSINHRONA KASKADA

Za regulaciju brzine kako NN tako i VN elektromotora, snaga većih od 250 kW, nameće se PODSINHRONA KASKADA kao uređaj koji je u pogledu tehničkih i ekonomskih efekata u prednosti nad frekventnim regulatorom i drugim mehaničkim regulatorima.

Da bi se mogla primeniti PODSINHRONA KASKADA elektromotor mora biti izrađen sa namotanim kliznokolutnim rotorom čiji se naponski nivo svodi na vrednosti manje od 1 kV, a statorski namotaj prvenstveno za VN 6 kV ili 10 kV ili 0,4 kV smao u slučaju kada ne postoje uslovi za napajanje elektromotora sa VN.

1.1. Kontinualna regulacija broja obrtaja asinhronog elektromotora snage iznad 250 kW sa kliznokolutnim rotorom najekonomičnije se postiže sa podsinhronom tiristorskom kaskadom pri čemu se:

- snaga podsinhronne kaskade je u funkciji opsega regulacije brzine vrtnje (npr. kod pumpi, i ventilatora snaga PSK se dimezionise na cca 35% snage elektromotora)
- ostavaruje ušteda električne energije do 30 %
- otplativost investicija do dve godine

1.2. Za regulaciju brzine elektromotora sa kliznokolutnim rotorom srednjih i velikih snaga, napona napajanja 0,4 kV, 6 kV i 10 kV podsinhrona kaskada je nezamenljiva kao tehničko i ekonomsko rešenje u odnosu na druge regulatore.

1.3. "Minel - Automatika" je u konkurenciji sa domaćim i INO proizvođačima dobila poverenje da proizvede i pusti u rad pet jedinica Podsinhronih Kaskada (PSK) u Beogradskim toplanama i to:

- 1976. god.

Dve podsinhronne kaskade za regulaciju brzine asinhronih elektromotora sa kliznokolutnim rotorom snage 415 kW, napona 0,4 kV, brzine vrtnje u opsegu $n=(9801\div 480)\text{min}^{-1}$ u Toplani "KONJARNIK" u Beogradu.

- 1989. god.

Dve podsinhronne kaskade za regulaciju brzine asinhronih elektromotora sa kliznokolutnim rotorom snage 550 kW, napona 6 kV, brzine vrtnje u opsegu $n=(1000 \div 1480)\text{min}^{-1}$ u Toplani "KONJARNIK" u Beogradu.

- 1990. god.

Jedna podsinhrona kaskada za regulaciju brzine asinhronog elektromotora sa kliznokolutnim rotorom snage 800 kW, napona 6 kV, brzine vrtnje u opsegu $n=(1000 \div 1485)\text{min}^{-1}$ u Toplani "DUNAV" u Beogradu.

Za sve ugrađene podsinhronne kaskade vršene su analize utrošene električne energije i konstatovane su uštede do 30 %.

- 1.4. Navedene podsinhronne kaskade do danas neprekidno i pouzdano rade, što znači da je za prve ugrađene podsinhronne kaskade protekao period od 25 godina kvalitetnog i pouzdanog rada. Ovako dug i pouzdan period rada podsinhronih kaskada nameće zaključak da je rešenje regulacije brzine na ovaj način mnogo komfornije od mehaničke regulacije realizovane pomoću hidraulične VOIT spojnice.
- 1.5. Podsinhronne kaskade predstavljaju jedan od najznačajnijih uređaja sa kojim bi se u buduću mogla izvršiti značajna ušteda električne energije na mehanička prigušenja. Imajući u vidu ogroman broj VN i NN elektromotora sa kliznokolutnim rotorima snage iznad 250 kW instaliranim po energetske objektima širom zemlje, možemo zaključiti da je u većini slučajeva primenjena mehanička regulacija (pumpe, ventilatori), pri čemu se maksimalno troši električna energija.
- 1.6. Energetska kriza, skupa električna energija čija cena će u budućnosti rasti, nametaće potrebu štednje električne energije neminovno kod velikih potrošača, a potom i kod potrošača srednjih i manjih snaga elektromotornih pogona.

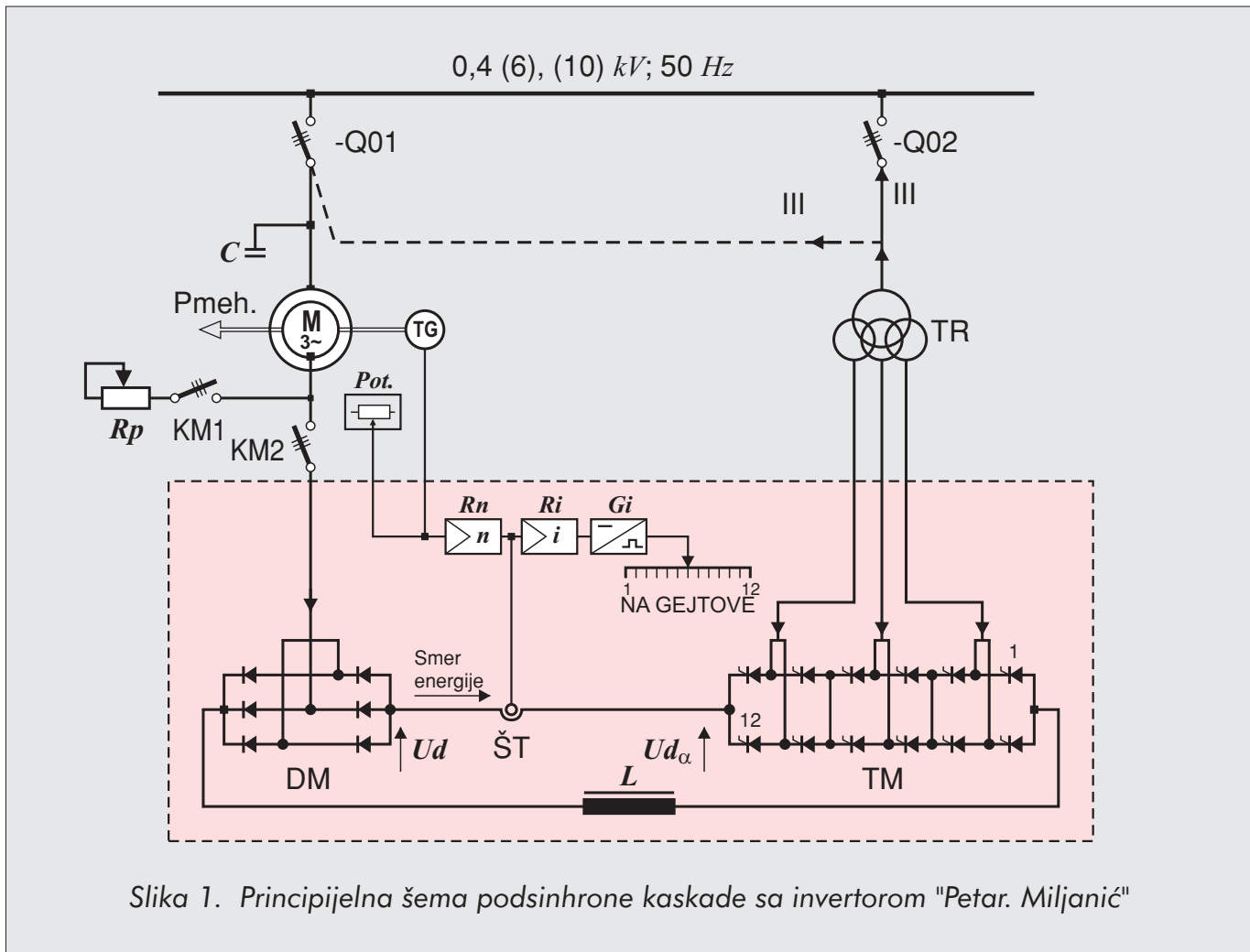
"Minel - Automatika" sa svojim najvrednijim proizvodom "PODSINHRONA KASKADA" nudi budućim kupcima prvenstveno u vodovodima, toplanama i drugim industrijskim objektima najprofitabilniji uređaj koji Vam detaljnije predstavljamo.

PRINCIP RADA

Na slici broj 1. prikazana je principiijelna šema podsinhronne kaskade sa kratkospajajućim inverterom. Posebno ističemo kratkospajajući inverter, patent Akademika profesora Petra Miljanića, sa značajnim prednostima u odnosu na klasične invertore sa 6 tiristora.

LEGENDA:

Q01	Glavni prekidač	ŠT	Merenje jednosmerne struje - šant
Q02	Transformatorski prekidač	TG	Tažo Generator
KM1	Kontaktor za rotorski otpornik	TR	Rekuperacioni transformator
KM2	Kontaktor za uključenje na DM	Rp	Rotorski otpornik
DM	Trofazni Diodni Most	Pot	Referenca brzine (elektronski potencijometar)
TM	Tiristorski Most (patent Akademika prof. Petra Miljanića)	Rn	Regulator brzine
L	Prigušnica	Ri	Regulator struje
		Gi	Generator impulsa za paljenje tiristora



Podsinhrona kaskada je statički energetskelektronski uređaj koji vrši regulaciju brzine u rotorskom kolu kliznokolutnog asinhronog elektromotora bez gubitka energije klizanja, odnosno energije kočenja rotora. Energija klizanja putem rekuperacije vraća se u napojnu električnu mrežu. Promena brzine vrši se u kolu rotora sa promenom ugla paljenja tiristora u opsegu od $90^\circ \div 150^\circ$. Ovo se tehnički izvodi putem ispravljanja rotorskih trofaznih struja pomoću trofaznog diodnog mosta DM. Ispravljena pulzirajuća struja rotora se pegla preko prigušnice L i uvodi u trofazni kratkospajajući tiristorski most TM. Iz tiristorskog mosta mrežom vođenog preko rekuperacionog transformatora TR energija klizanja se vraća u napojnu mežu.

Kod regulacije brzine promenljivim otpornikom energija klizanja se pretvara u toplotu i predstavlja čisti gubitak energije. Ovakav vid regulacije je neekonomičan i danas se ne koristi za trajan rad, već samo kratkotrajno do 30 s za ograničenje polazne struje kod zaletanja elektromotora. Nakon zaletanja promenom otpora i postizanjem nazivne brzine elektromotora napon rotora je zanemarljivo mali tj iznosi 0 V.

U tom najpovoljnijem trenutku automatski se uključuje kontaktor KM2 (spaja rotorski namotaj na diodni most DM) i isključuje kontaktor KM1 (rotorski pokretač).

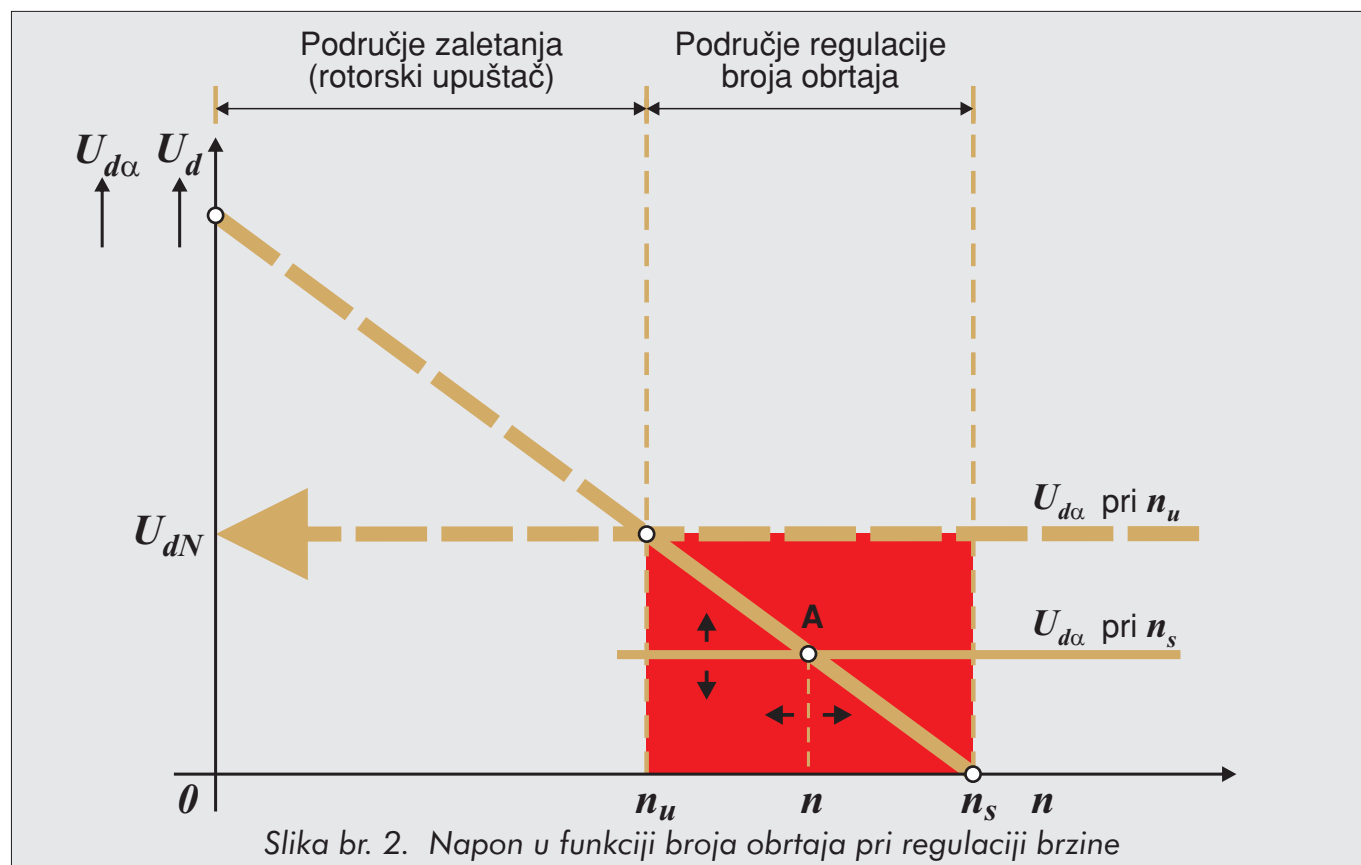
Promenom ugla upravljanja tiristorskim inverterom menja se napon rotora a sa tim i brzina elektromotora. Maksimalna vrednost napon rotora pada sa porastom brzine, odnosno raste sa smanjenjem brzine, što je prikazano na slici broj 2. $U_d = f(n)$.

Za najviši napon izmenjivača kojem odgovara ugao upravljanja od 150° postiže se najniža brzina motora.

Najviši ugao upravljanja ograničen je na 150° sa ciljem da se obezbedi dovoljna sigurnost da kod pojave promene opterećenja usled strujnih udara ne dođe do prelaska iz invertorskog u ispravljački rad, što bi značilo kratak spoj u jednosmernom krugu podsinhrona kaskade.

Na slici broj 2 prikazana je promena napona u jednosmernom kolu pri regulaciji broja obrtaja gde je:

- n_s - sinhroni broj obrtaja u pogonu
- n - podesivi broj obrtaja u pogonu
- n_u - minimalni broj obrtaja opsega regulacije



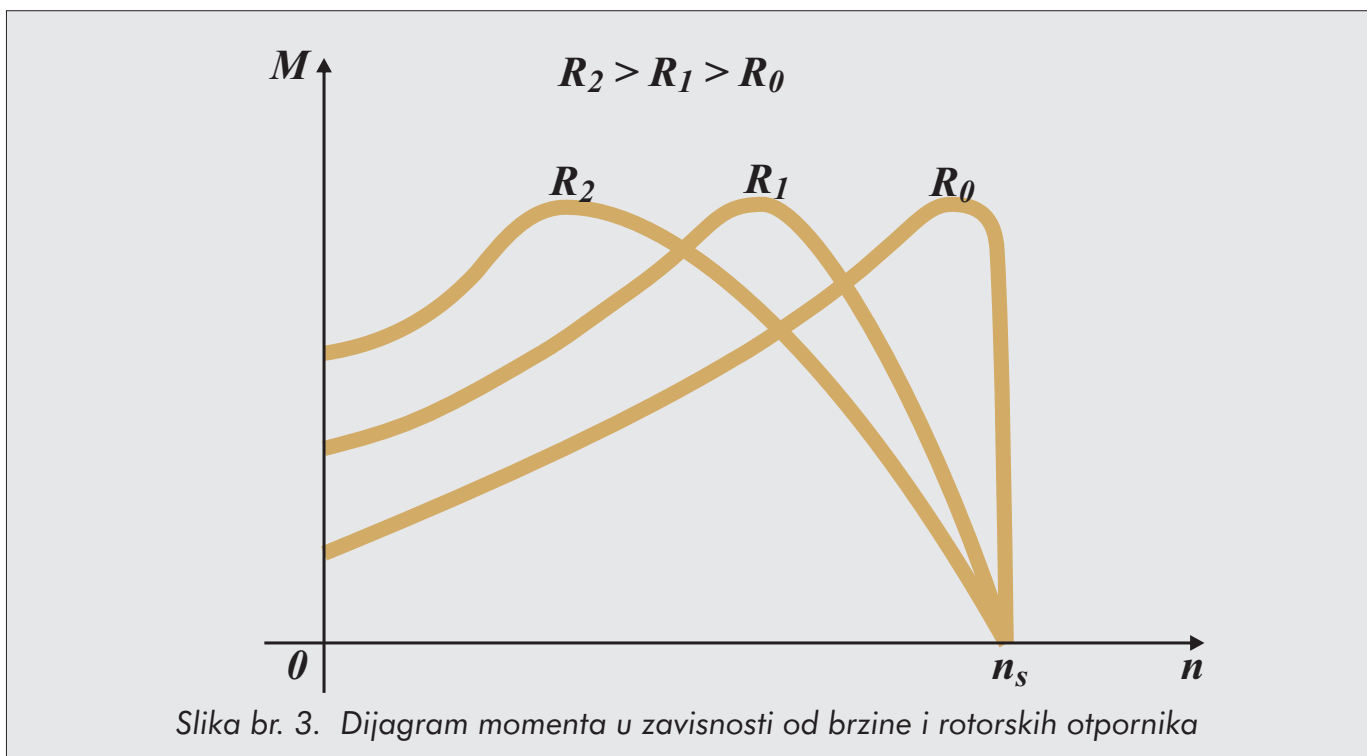
Broj obrtaja trofaznog asinhronog elektromotora priključenog na mrežu konstantnog napona i frekvencije može se po potrebi regulisati samo uključivanjem protiv napona u kolu rotora.

Ovaj napon deluje nasuprot naponu indukovanom u rotoru, čija veličina zavisi od klizanja, tj. odstupanja od sinhronog broja obrtaja. Ispravljeni napon rotora U_d od najveće vrednosti u mirovanju opada linearno sa povećanjem broja obrtaja (n) i dostiže nultu vrednost kod sinhronog broja obrtaja što se jasno vidi sa dijagrama na slici br. 2.

Ako izvršimo poređenje regulacije brzine elektromotora pomoću otpornika u kolu rotora i pomoću podsinhronne kaskade zaključujemo sledeće:

- ↪ Ako se regulacija brzine obrtanja asinhronog kliznokolutnog motora vrši pomoću otpora u rotorskom kolu, tada se suprotan napon gradi pomoću pada napona u promenljivom otporu. Pošto ovaj pad napona zavisi od struje kroz otpornik nastaje jaka zavisnost broja obrtaja od opterećenja motora.
- ↪ Povećanjem otpora karakteristika motora postaje mekša i zavisnost je jače izražena.

Ove promene možemo predstaviti dijagramom momenta motora u zavisnosti od promene brzine pomoću termogenog otpornika kao na slici br. 3.



Kod regulisanja brzine promenljivim otporom $R_2 > R_1 > R_0$ snaga klizanja se pretvara u toplotu i tako nastaju veliki gubitci.

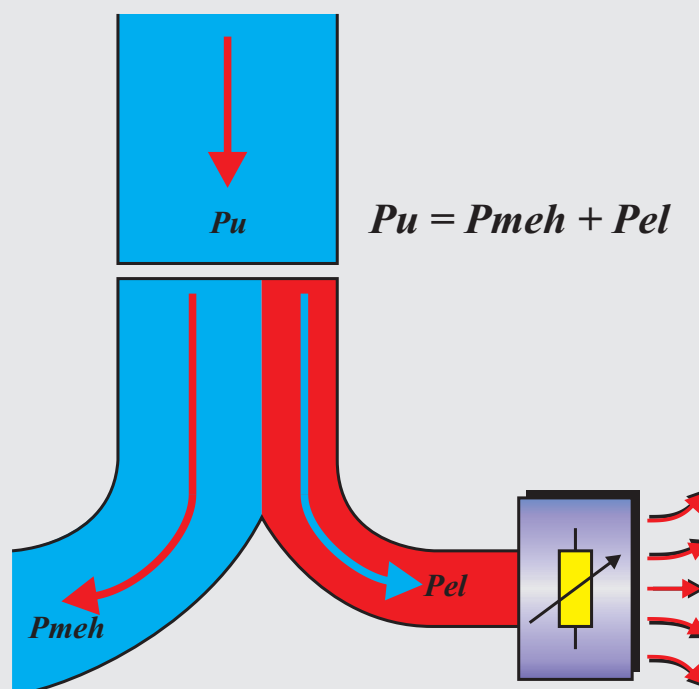
Ove promene snage između ukupne P_n i utrošene snage prikazane su senki dijagramom na slici 4.

Sa slike br. 4 jasno se vidi da se znatna električna energija bespovratno troši u toplotu, a često puta se i dodatna električna energija troši za pokretanje ventilatora za hlađenje rotorskih otpornika.

Primenom podsinhronne tiristorske kaskade veći deo električne energije se vraća u mrežu. Kod podsinhronne kaskade zavisnost brzine od opterećenja nije jako izražena i pogon zadržava skoro konstantnu brzinu nezavisno od opterećenja.

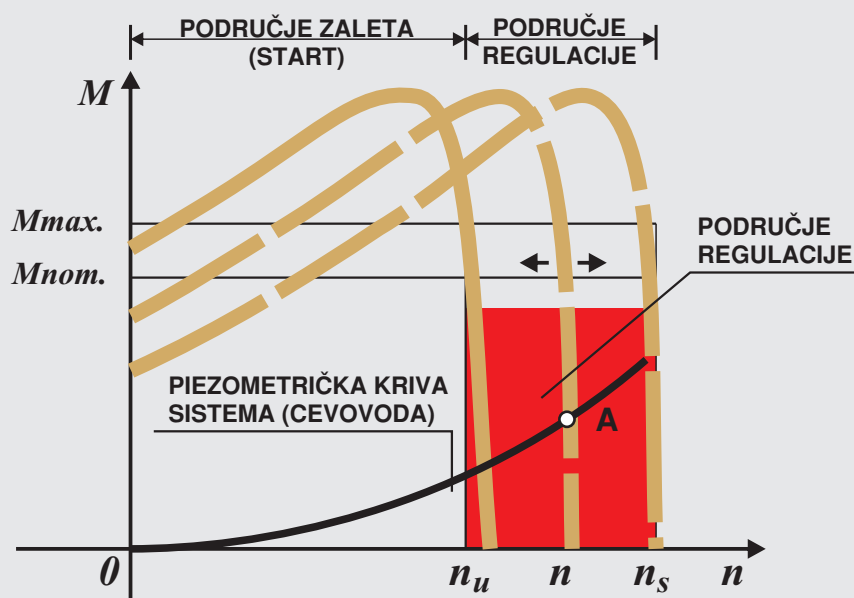
Kada moment pređe maksimalnu dozvoljenu vrednost karakteristika gubi svojstva i brzina obrtanja se naglo smanjuje.

Očigledno je da podsinhrona kaskada ima daleko bolje karakteristike i stabilniju regulaciju u celom opsegu regulacije.



Slika br. 4. "Senki" dijagram snage elektromotora sa rotorskim otporom

Promene momenta u zavisnosti od promene brzine prikazane su dijagramom na slici 5.



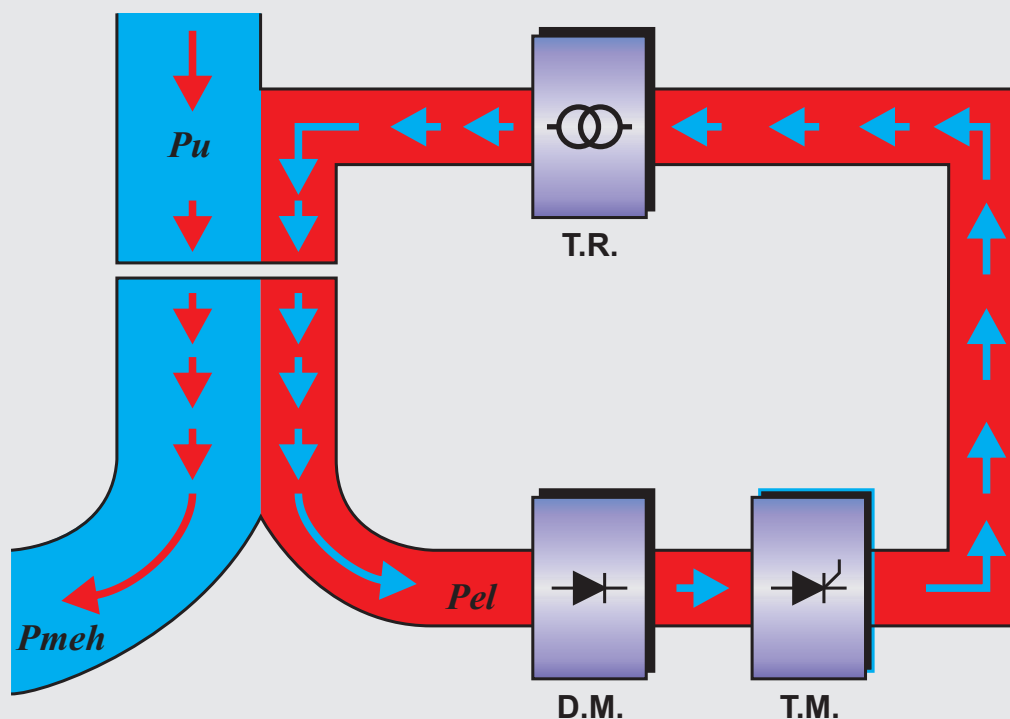
Slika br. 5 Dijagram momenta u zavisnosti od brzine za podsinhronu kaskadu

Pomoću "senki" dijagrama na slici br. 6 prikazane su snage $P_{meh} + P_{el}$ a posebno snaga P_{el} koja se otporničkom regulacijom gubi u toplotu, preko podsinhronne kaskade vraća se u mrežu, tako da pogon ima stepen korisnog dejstva samo oko 2 % niži od motora sa kratkospojnim rotorom i istim momentnim opterećenjem.

Zanemarljivo mali gubici reda do 2 % se javljaju na samoj elektronici podsinhronne kaskade tj. u diodnim i tiristorskim mostovima, prigušnici i transformatoru za vraćanje električne energije u električnu mrežu.

LEGENDA UZ SLIKU BR. 6

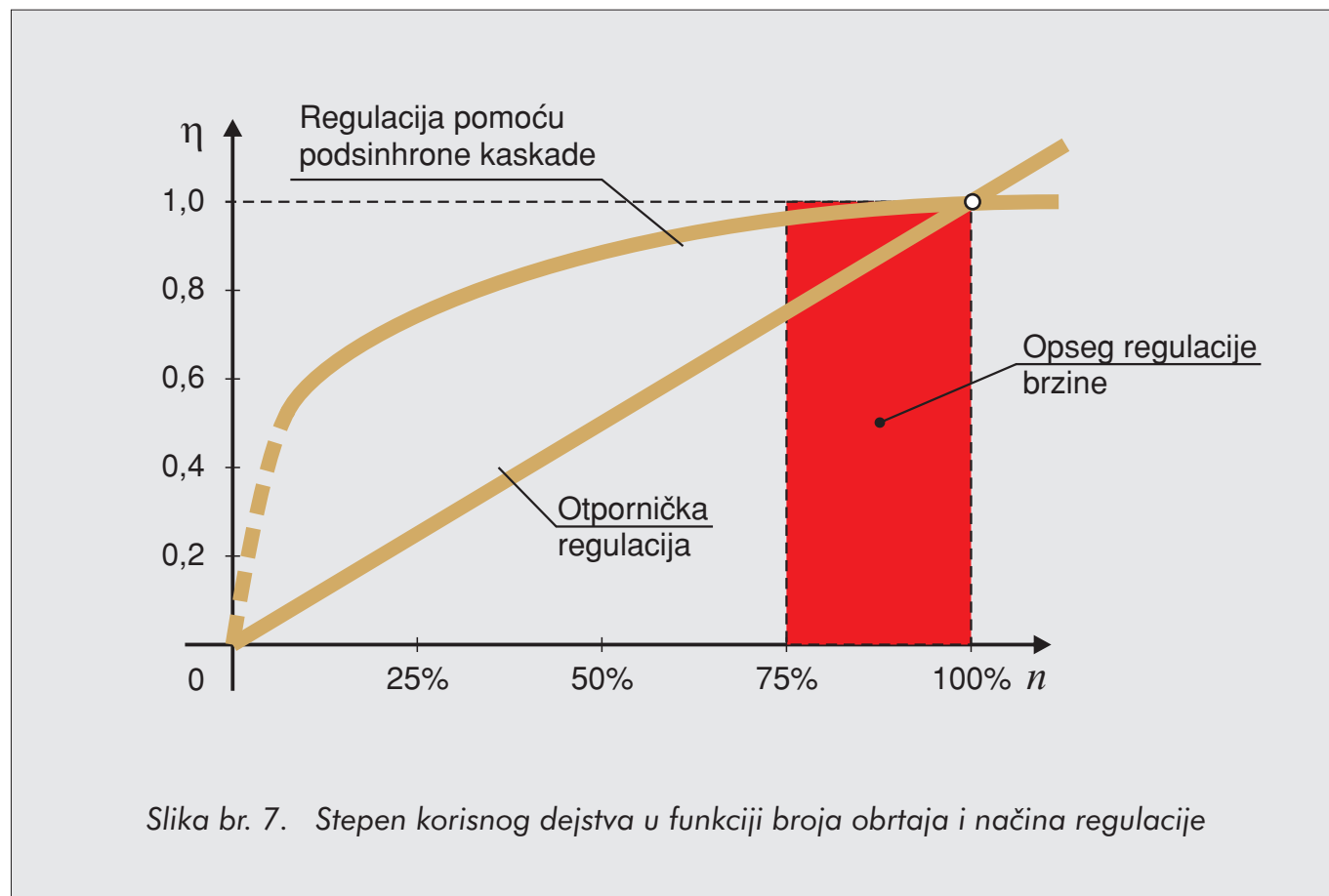
- T.R.** - TRANSFORMATOR REKUPERACIJE
- D.M.** - DIODNI MOST
- T.M.** - TIRISTORSKI MOST



Slika br. 6. Senki dijagram snage sa podsinhronom kaskadom

Upoređujući otporničku regulaciju brzine i regulaciju pomoću podsinhronne kaskade zaključujemo da je stepen iskorišćenja mnogo veći sa podsinhronom kaskadom.

Ovo poređenje prikazano je na slici br. 7.

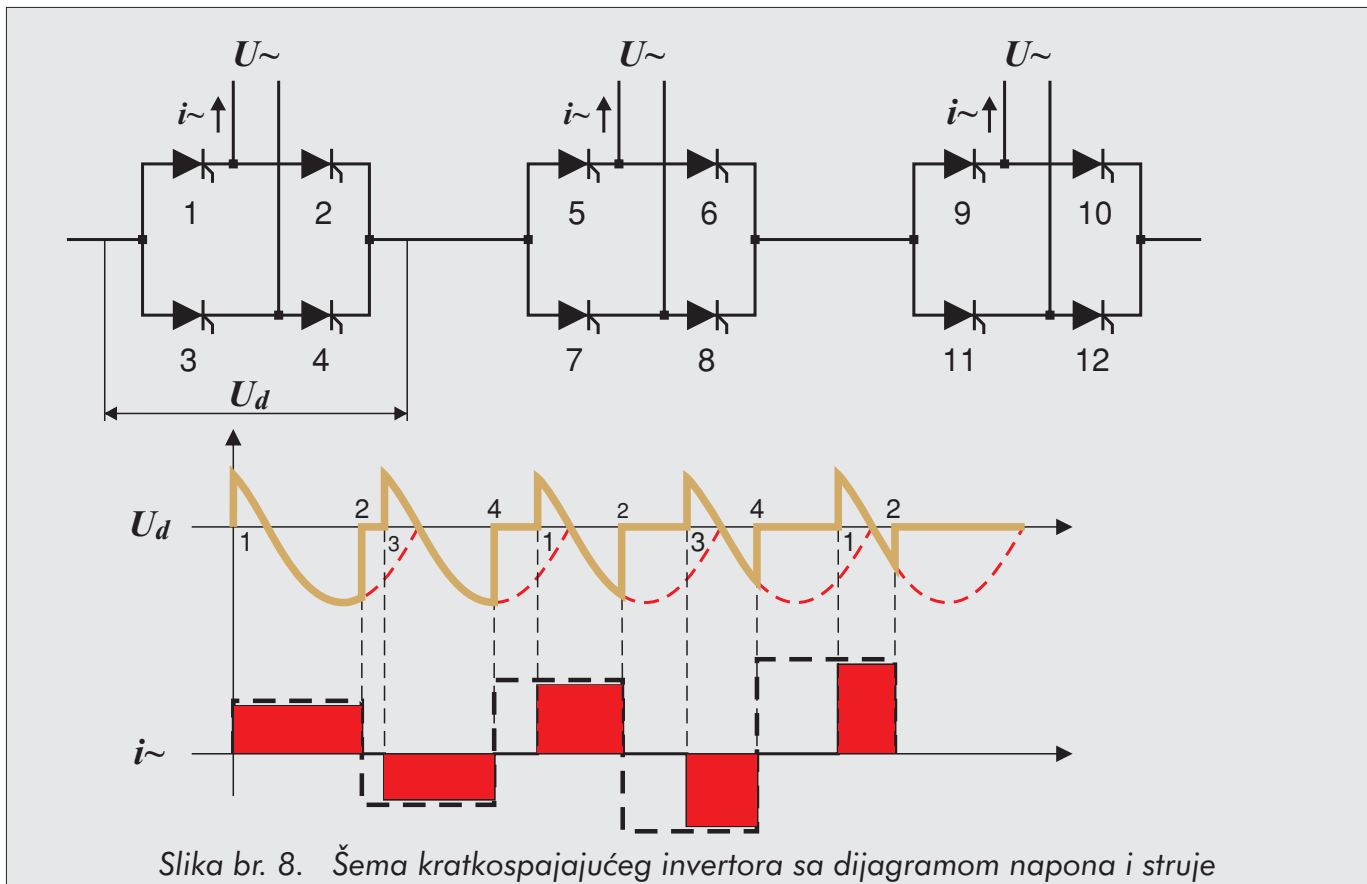


Slika br. 7. Stepen korisnog dejstva u funkciji broja obrtaja i načina regulacije

KRATKOSPAJAJUĆI INVERTOR akademika prof. PETRA MILJANIĆA

Proizvođači podsinkronih kaskada u svetu koriste klasične invertore sa 6 tiristora u trofaznom mostu koji imaju izraženu komponentu reaktivnu energije i više harmonike. Uz kaskade proizvedene sa klasičnim tiristorskim mostom (T.M.) potrebne su dodatne investicije za kompenzaciju reaktivne energije i u prigušnice za potiskivanje viših harmonika.

U podsinkronoj kaskadi "Minel - Automatika" primenjen je inveror sa 12 tiristora povezanih po šemi sa slike br. 8. projektovanim od strane Akademika prof. Petra Miljanića.



Invertor radi na principu tako što impulsi za paljenje tiristora u jednofaznom mostu nisu simetrični.

U oscilatoru napona invertora sa jednosmerne strane uspostavljaju se jednosmerni kratkotrajni spojevi koji dovode do smanjenja naizmernične struje i njeno približavanje naponu.

Faktor snage \cos znatno je bolji nego kod klasičnog invertora i ne zahteva dodatnu kompenzaciju reaktivne energije.

Na dijagramu sa slike br. 8 pokazano je kako naizmernična struja i_{\sim} koja se iz mostova šalje u mrežu NE POSTOJI za vreme kratkog spoja u naponu U_d na intervalu (2-3 i 4-1).

Kvantitativna analiza rektivne snage osnovnog i viših harmonika kod klasičnih i kratkospajajućih invertora ukazuje na značajna preimućstva kratkospajajućih invertora.

Praktično se pri projektovanju opreme za kratkospajajući inverter u podsinkronim kaskadama smanjuje instalisana snaga transformatora, prekidača i kablova na oko 60 % od onih vrednosti koje bi morala imati pri primeni klasičnih invertora.

Razumljivo, uštede se postižu ne samo u investicijama, veći u troškovima pogona, pošto su pri manjoj reaktivnoj snazi manji i gubitci, odnosno veći stepen korisnog dejstva.

Ovaj zaključak dobija svoj puni značaj kada se radi sa vrlo velikim snagam, čija se granična snaga danas penje na desetine MW.

Konstrukcija

Uređaj je smešten u limeni orman standardnih dimenzija. Tiristorski mostovi su kod većih snaga snadbaveni ventilatorima za hlađenje (i to su jedini pokretni delovi). Elektronski sklopivi su u modularnom izvođenju, smešteni u standardnom kućištu sa izvedenim mernim i konotrolnim tačkama.

Sve komponente se nabavljaju kod renomiranih proizvođača i podvrgnute su ulaznoj kontroli. Po potrebi, izvesni delovi mogu da budu van ormara, npr. komande izvedene na udaljenom komandnom pultu, i energetski transformator za rekuperaciju električne energije u slučaju VN elektromotora.

Ekonomičnost

U poređenju sa drugim načinima regulisanja elektromotora (ispravljač sa motorom za jednosmernu struju ili pretvarač frekvencije sa kaveznim asinhronim motorom) ovaj sistem ima značajna preimućstva u pogledu investicionih i eksploatacionih troškova. Razlog je u tome što je instalisana snaga kaskade u odnosu na snagu motora samo jedan njen mali deo (cca do 35% snage na osovini elektromotora).

Relativna snaga je jednaka maksimalnom klizanju s prema relaciji

$$s = \frac{n_s - n_{min}}{n_s}$$

gde je:

n_s - sinhrona brzina eletromotora

n_{min} - najmanja brzina radnog opsega

Komplet elemenata energetske elektronike koji nosi najveći deo cene materijala sastoji se od energetskih dioda i tiristora mrežnog tipa koji se nabavljaju od renomiranih svetskih proizvođača.

Transformator REKUPERACIJE je specijalnog tipa, tronamotajni i izrađuje se kao suvi u okviru MINELOVIH proizvodnih pogona. Eksploatacioni troškovi su takođe redukovani. Ovo se naročito odnosi na reaktivnu snagu koja je relativno sasvim mala, zahvaljujući specijalnoj konstrukciji mrežnog invertora nazvanog **KRATKOSPAJAJUĆI INVERTOR**.

Podaci za naručivanje

NAZIV	OZNAKA	JEDINICA
Naznačena snaga elektromotora.....	Pn	kW
Naznačeni napon statora.....	Un	V
Naznačena brzina rotora.....	n_r	min ⁻¹
Naznačeni faktor snage	$\cos\varphi$	
Naznačeni napon rotora.....	U_{ro}	V
Naznačena struja rotora.....	I_r	A
Opseg regulacije		
- Nazivna maksimalna brzina	$n_r = n_{max}$	min ⁻¹
- Minimalna brzina.....	$n_r = n_{min}$	min ⁻¹
Mehanička zaštita	IP	
Karakteristika Taho Geneatora (TG)	Un	V