

# Primena strujnih pretvarača učestanosti u elektromotornim pogonima

Dr Aleksandar Nikolić, dipl.ing.,  
viši naučni saradnik, IEEE Senior Member

# Sadržaj

- Osnovne karakteristike strujnog pretvarača učestanosti
- Analiza komutacionog kola kod strujnog invertora
- Talasni oblici struja i napona
- Regenerativno kočenje
- Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača
- Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača
- Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima
- Primena strujnih pretvarača u elektromotornim pogonima
- Zaključak
- Literatura

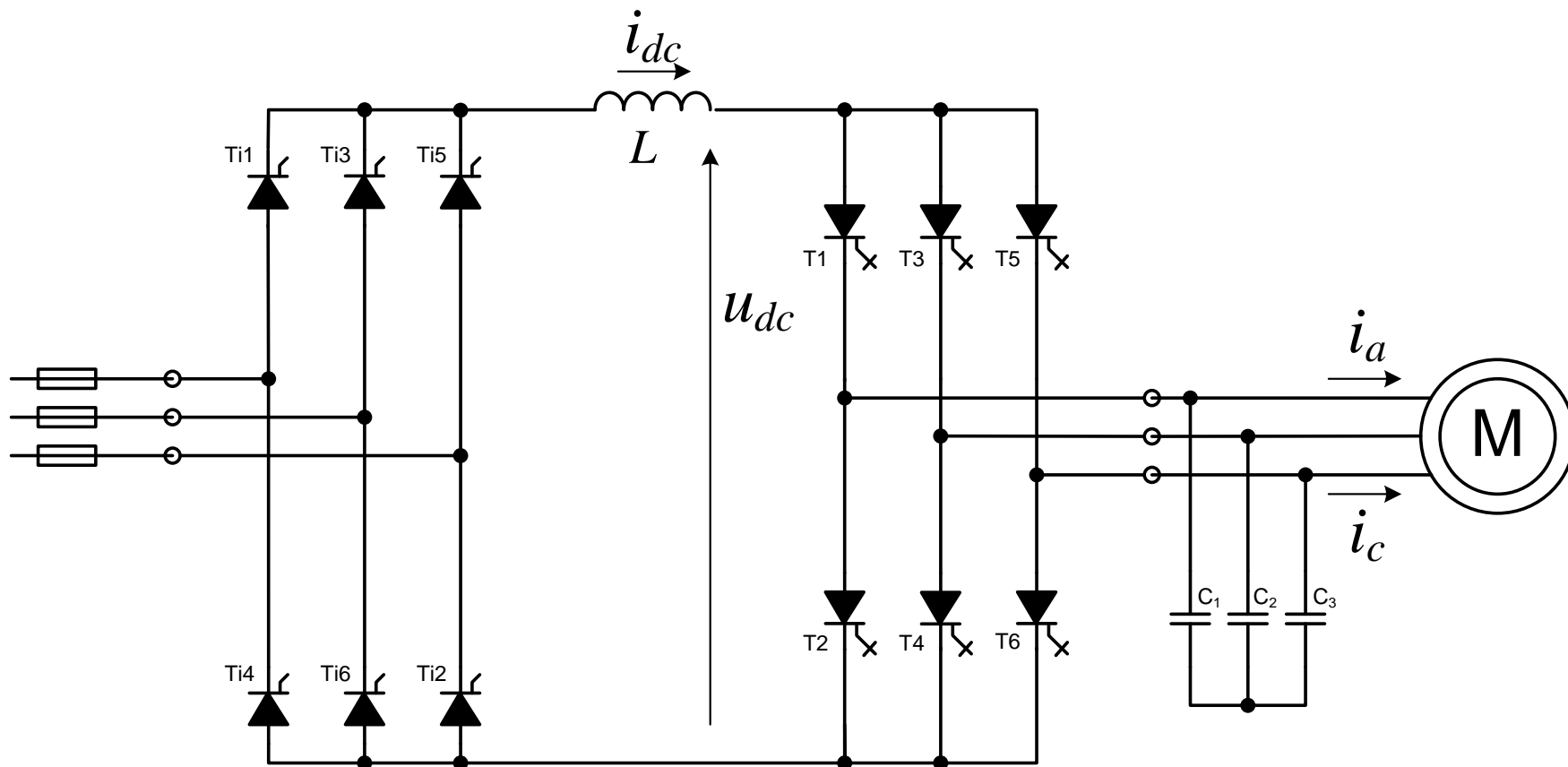
# Osnovne karakteristike strujnog pretvarača učestanosti

- ✓ Punoupravljivi ispravljač na ulazu (2-kvadrantni)
- Jednosmerno međukolo sa prigušnicom
- Invertor sa forsiranom komutacijom
- Niska komutaciona učestanost invertora
- ✓ Rekuperacija energije u napojnu mrežu pri kočenju
- 6 diskretnih vektora struje motora
- ✓ Neosetljiv na kratak spoj na izlazu
- ✓ Talasni oblik napona na motoru obezbeđuje manji  $du/dt$

# Strujni pretvarači – pregled tržišta

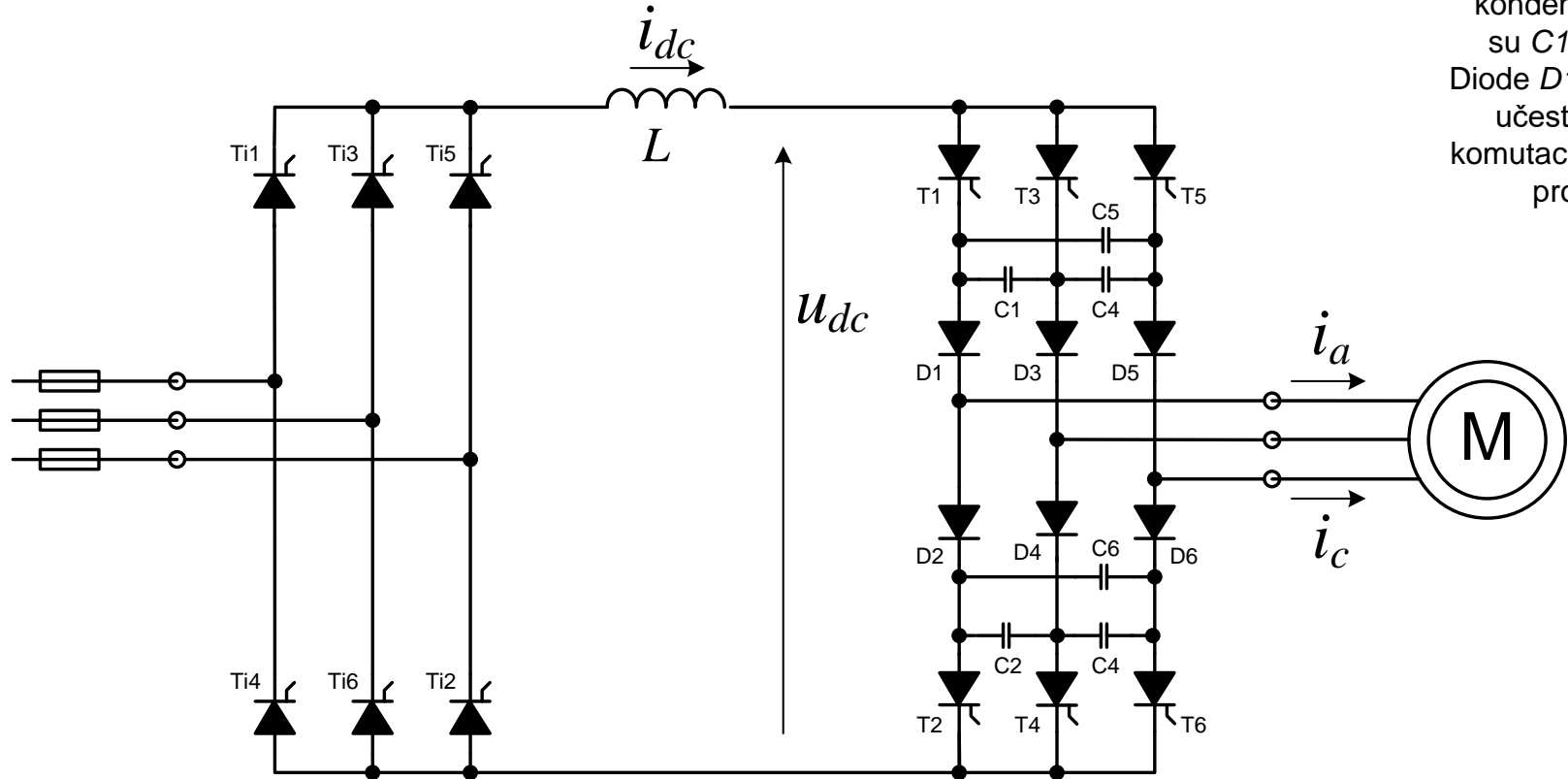
Konfiguracija	Prekidački element	Opseg snage [MVA, MW]	Napon na motoru	Proizvođač
CSI / Strujni inverter	GTO 240Hz	8,3 – 13,5	6kV, 10kV	Alstom/GE (CDM8000)
LCI / Load Commutated Inverter	Tiristor 6/ 12/24 pulsni	2 – 10 Air 5 – 100 Water	1 – 10 kV	Alstom/GE (SD7000)
LCI Naponski (više)	Tiristor 6/ 12/24 pulsni	2-41 Air 7-72 Water	2,1-10kV	ABB MegaDrive LCI
LCI Naponski (više)	Tiristor 6/ 12/24 pulsni	2,8-19,6 Air 16-74 Water	4,8kV 11kV	Siemens Sinamics GL150
Multilevel Naponski	IGBT	10	2,4 – 11 kV	Yaskawa
CSI / Strujni inverter	SGCT	6	6,6 kV	Rockwell Allen-Bradley PowerFlex 7000
NPC 3-Level Naponski	IGBT	4,4	2,4 – 13,8 kV	Eaton (SC9000)
LCI	Tiristor 12 pulsni	100	4 – 10	Nidec (Ansaldo)

# Principijelna šema pogona sa asinhronim motorom napajanim iz strujnog invertora sa GTO tiristorima



GTO (Gate Turn Off) tiristori imaju mogućnost isključenja.

# Principijelna šema pogona sa asinhronim motorom napajanim iz strujnog invertora sa sekvencijalnom komutacijom

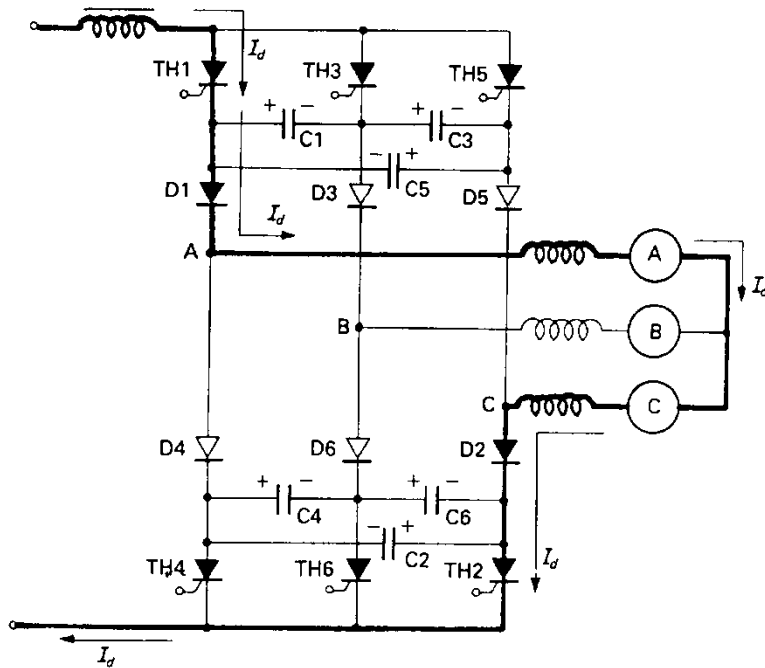


Komutacioni kondenzatori su  $C1 - C6$ . Diode  $D1 - D6$  učestvuju u komutacionom procesu.

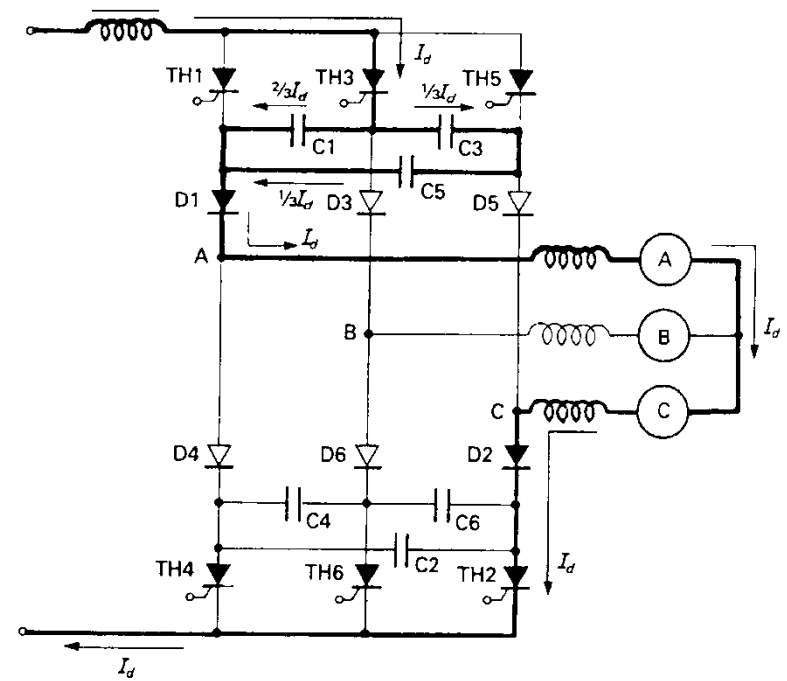
Ispravljačem se podešava vrednost struje, a invertorom se podešava učestanost. Talasni oblik izlazne struje je pravougaoni, sa stalnom maksimalnom vrednošću  $i_{dc}$

# Analiza komutacionog kola kod pretvarača sa sekvencijalnom komutacijom

- Interval A

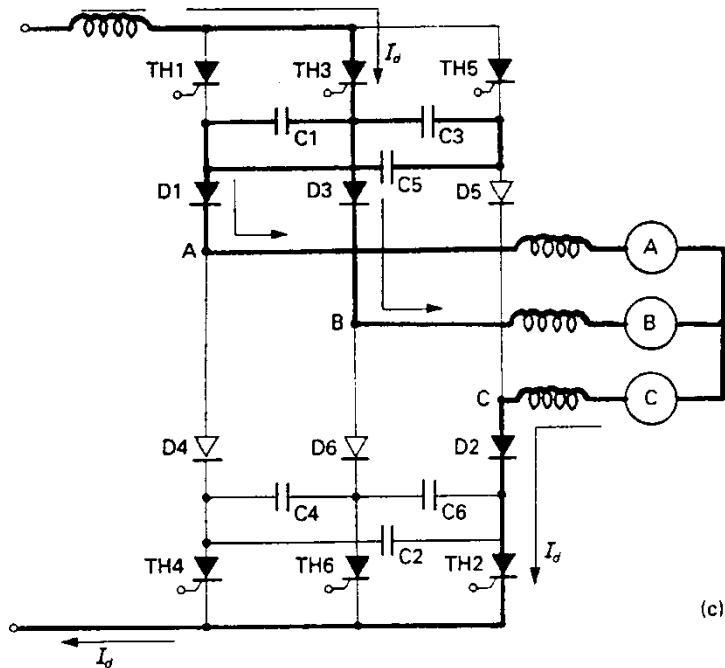


- Interval B

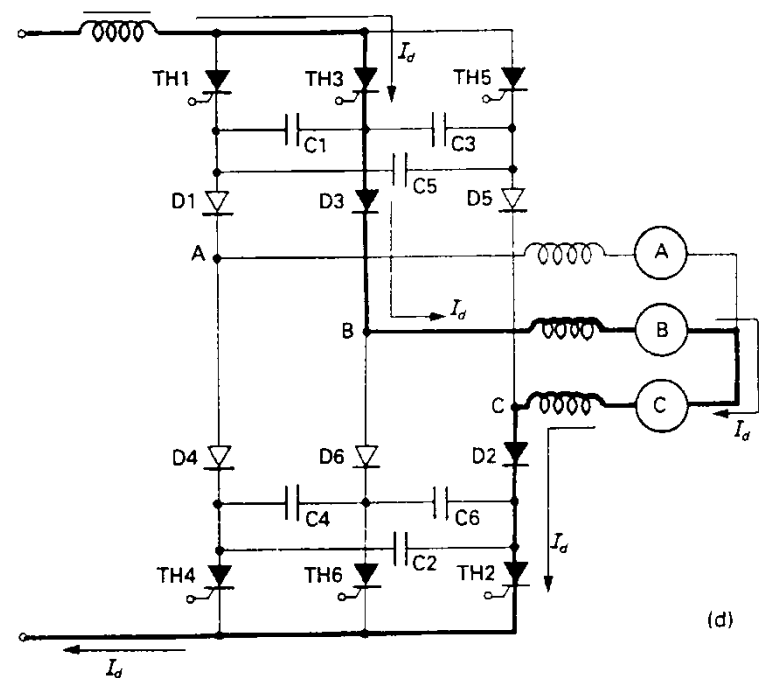


# Analiza komutacionog kola kod pretvarača sa sekvencijalnom komutacijom

- Interval C



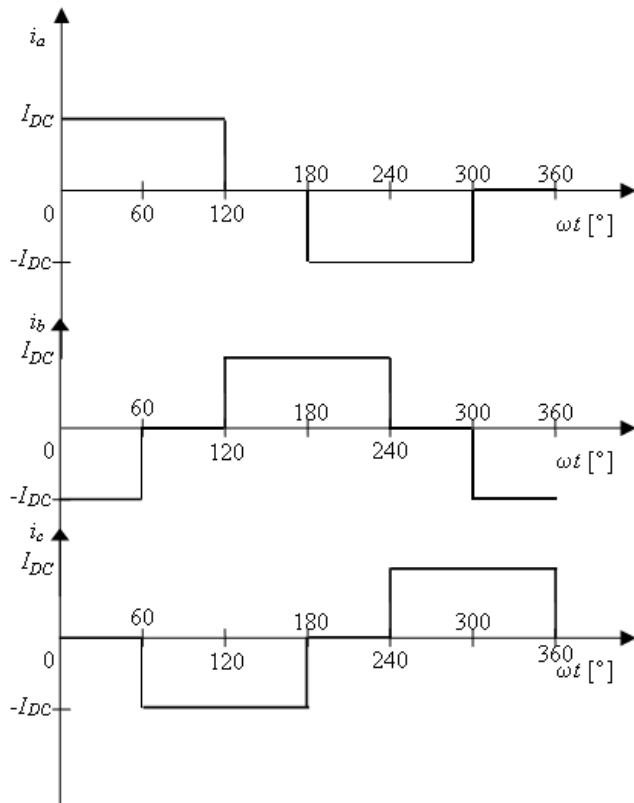
- Interval D





# Talasni oblici struja i napona

Analiza talasnog oblika struje na izlazu  
invertora

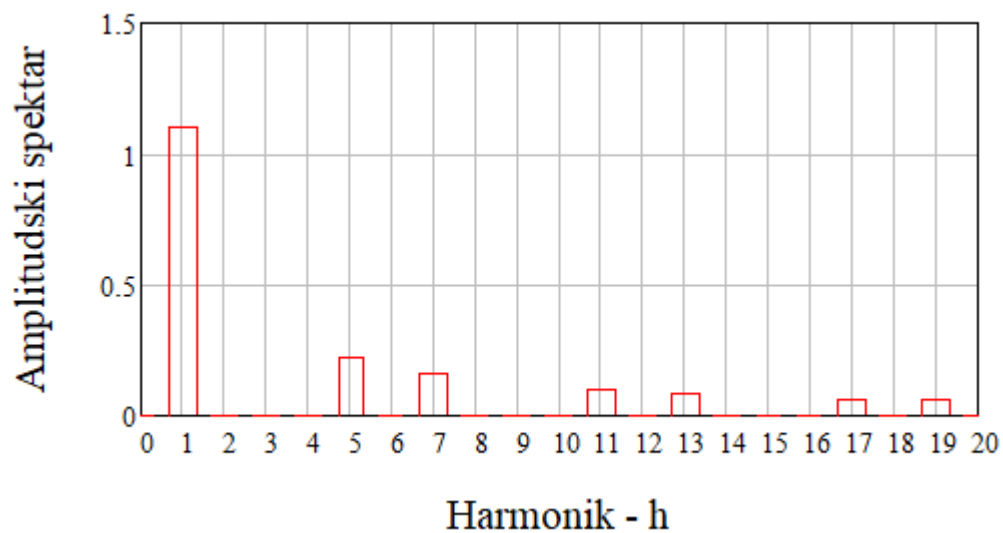
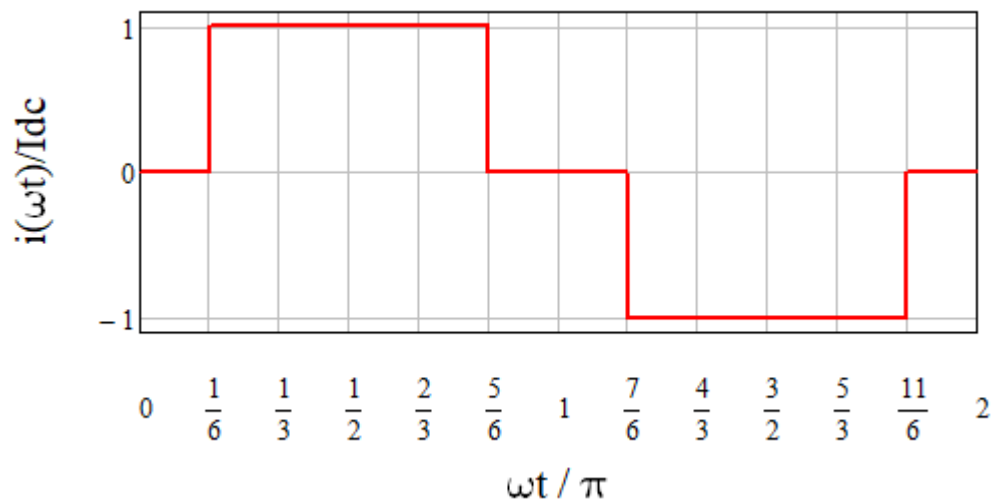


$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{DC} \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \\ &+ \frac{1}{7} \sin(7\omega t) - \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \dots \end{aligned} \right]$$

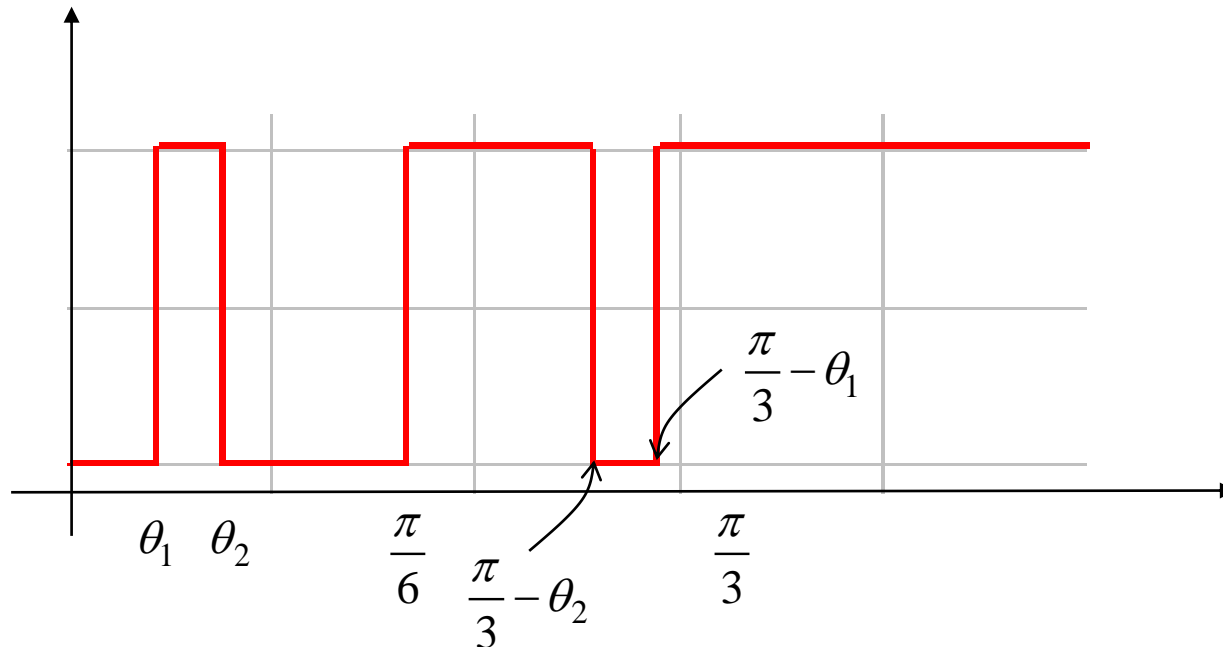
$$I_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{DC} \approx 1,1 \cdot I_{DC}$$

$$I_{RMS} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{DC} \approx 0,78 \cdot I_{DC}$$

# Harmonijska analiza pravougaonog signala



# Selektivna eliminacija harmonika

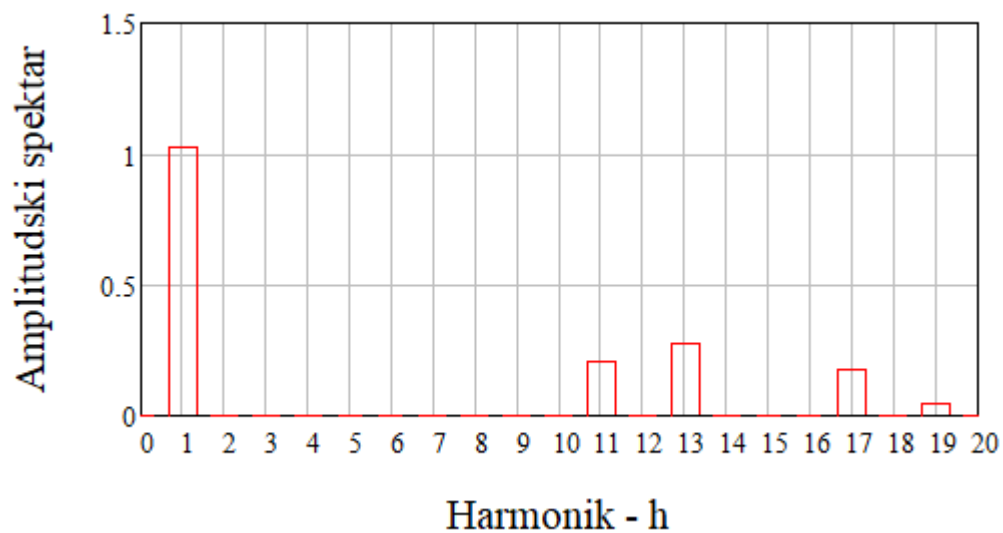
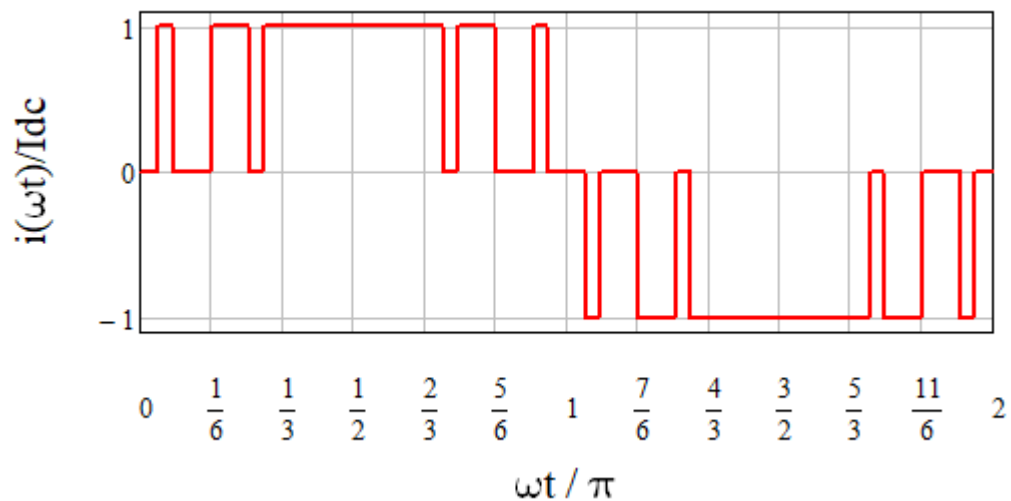


Ugao  $\theta_1$  i  $\theta_2$  se odrede tako da se izgube harmonici koje želimo da nemamo, na pr. (H5 i H7), ili (H5, H7 i H11).

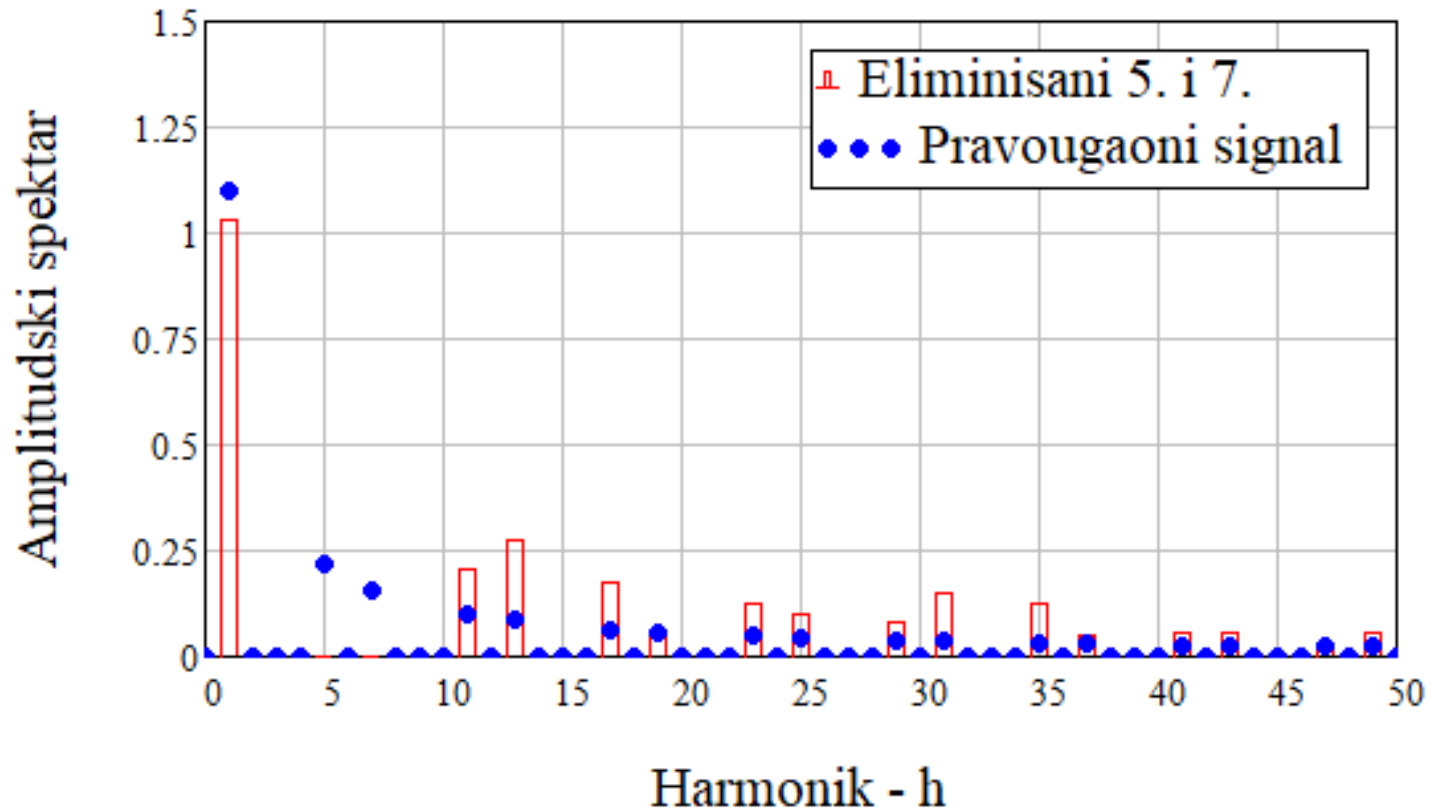
Ovaj postupak se mora sprovesti numerički, treba rešiti sistem nelinearnih i transcendentnih jednačina.

Postupak se može sprovesti unapred, (ne realnom vremenu) i rezultati smestiti u look-up tabelu.

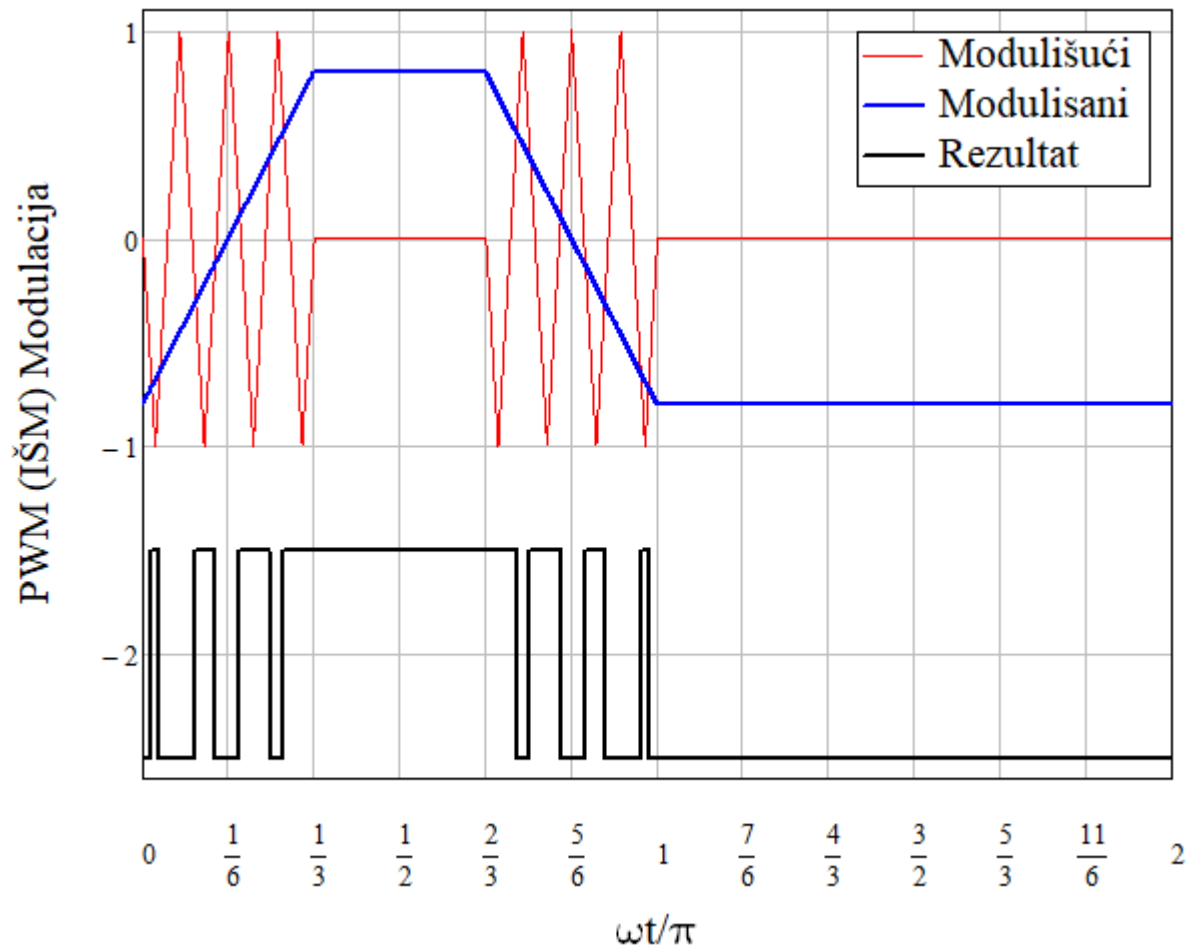
# Analiza signala sa eliminacijom harmonika



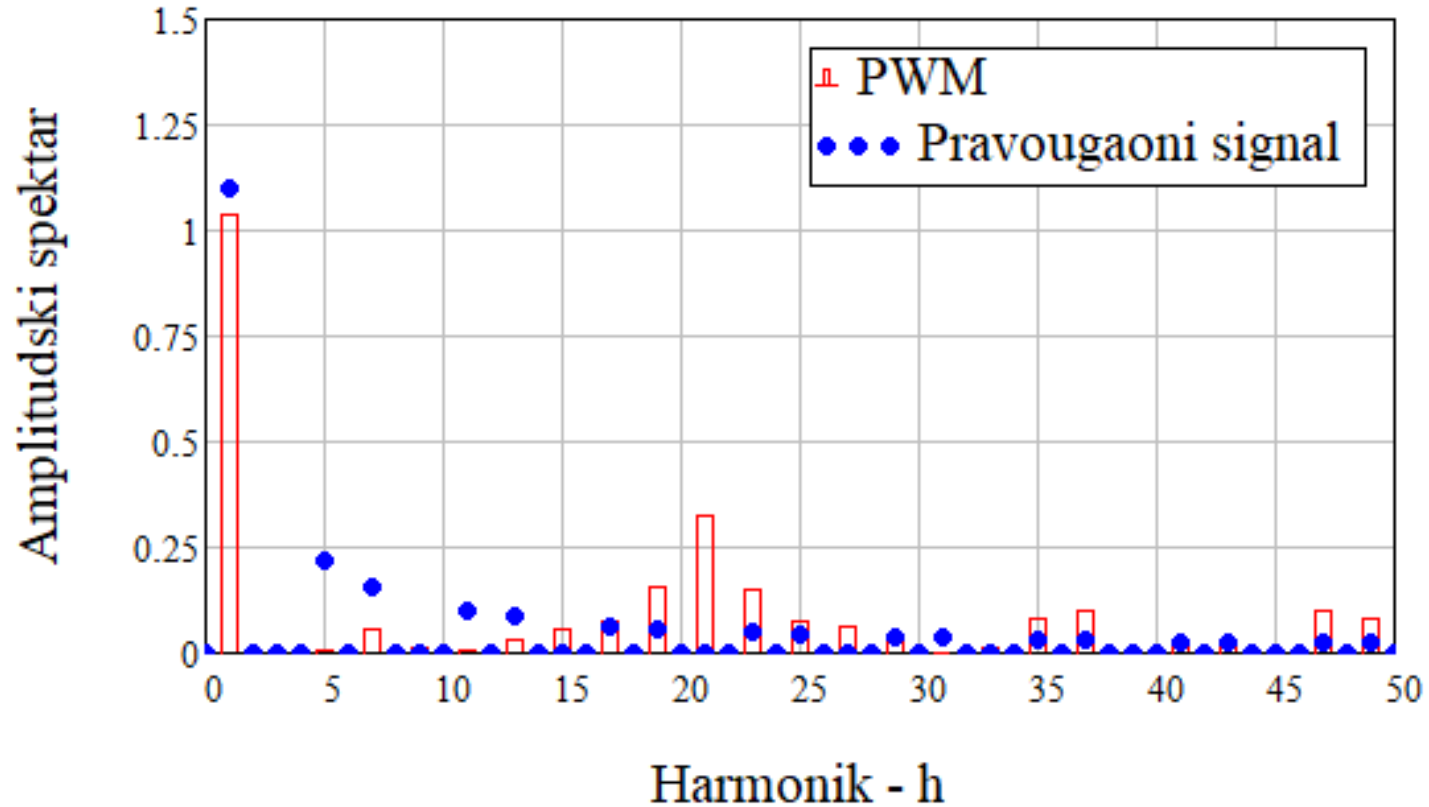
# Uporedni prikaz amplitudskih spektara



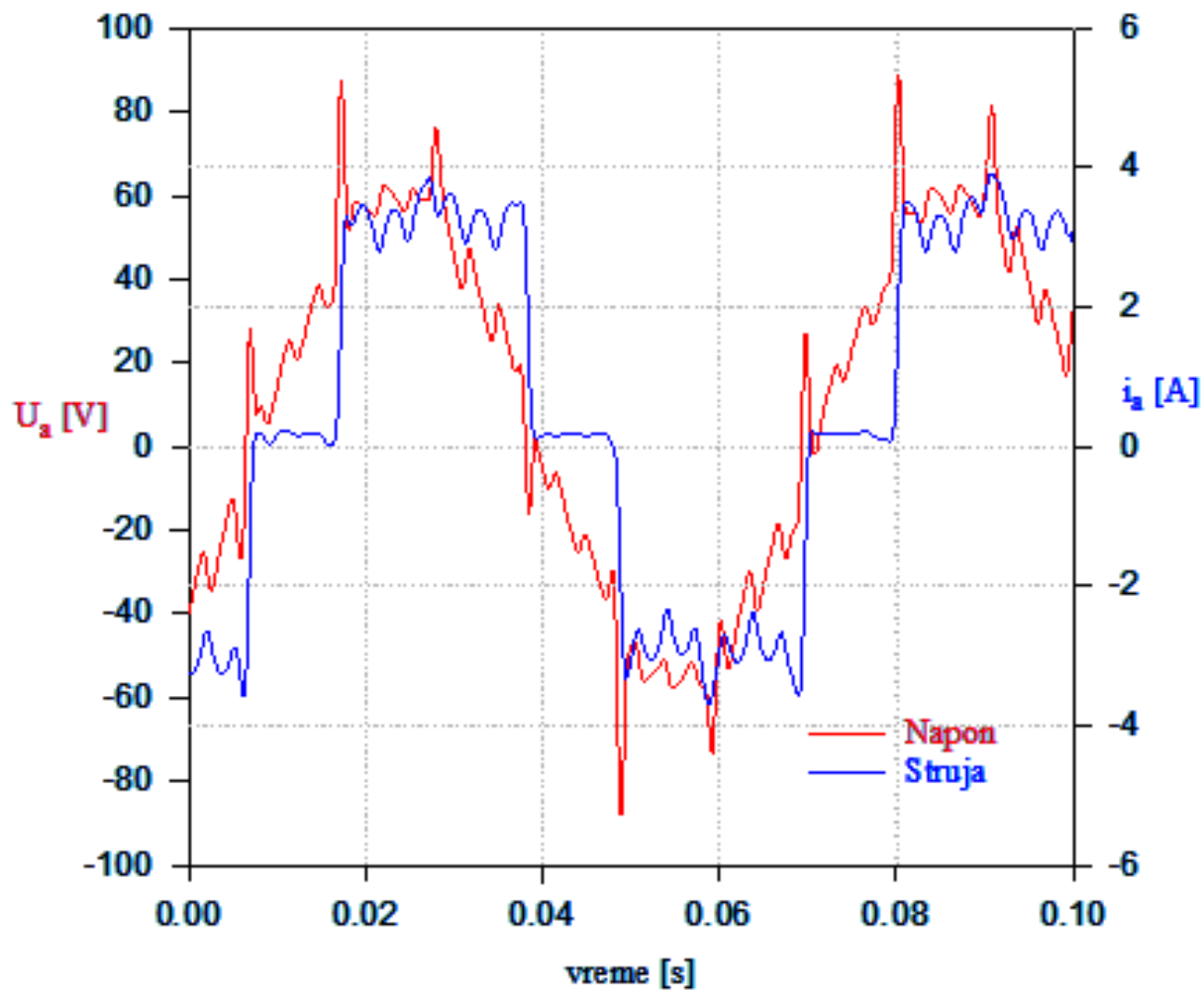
# Impulsno širinska modulacija IŠM, PWM



# Uporedni prikaz amplitudskih spektara



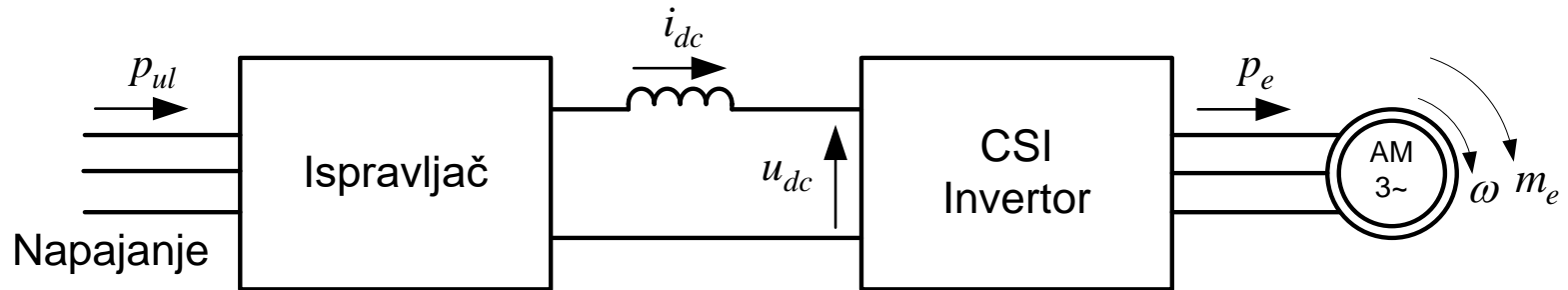
# Talasnii oblik fazne struje i napona motora napajano iz strujnog invertora sa sekvencijalnom komutacijom





# Regenerativno kočenje

Princip vraćanja energije u mrežu kod strujnog invertora



Motorni režim rada:  $p_{ul} > 0$   $i_{dc} > 0$   $u_{dc} > 0$   $p_e > 0$

$$p_m = m_e \cdot \omega > 0$$

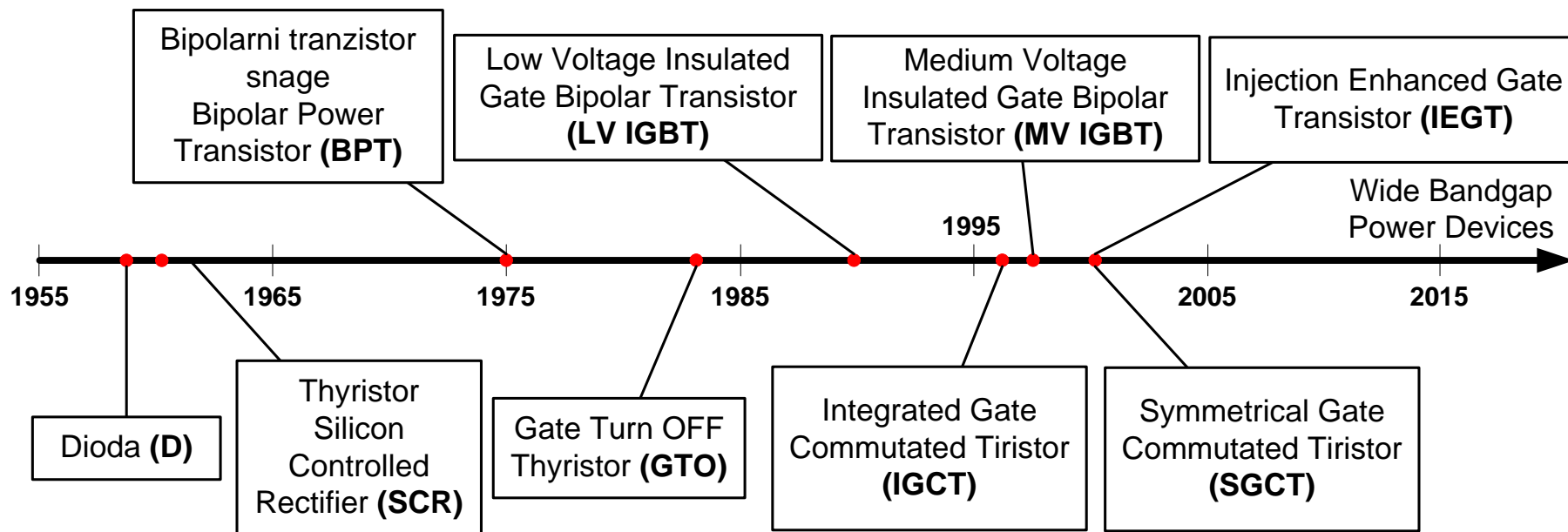
Generatorski režim rada:  $p_{ul} < 0$   $i_{dc} > 0$   $u_{dc} < 0$   $p_e < 0$

$$p_m = m_e \cdot \omega < 0$$

# Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača

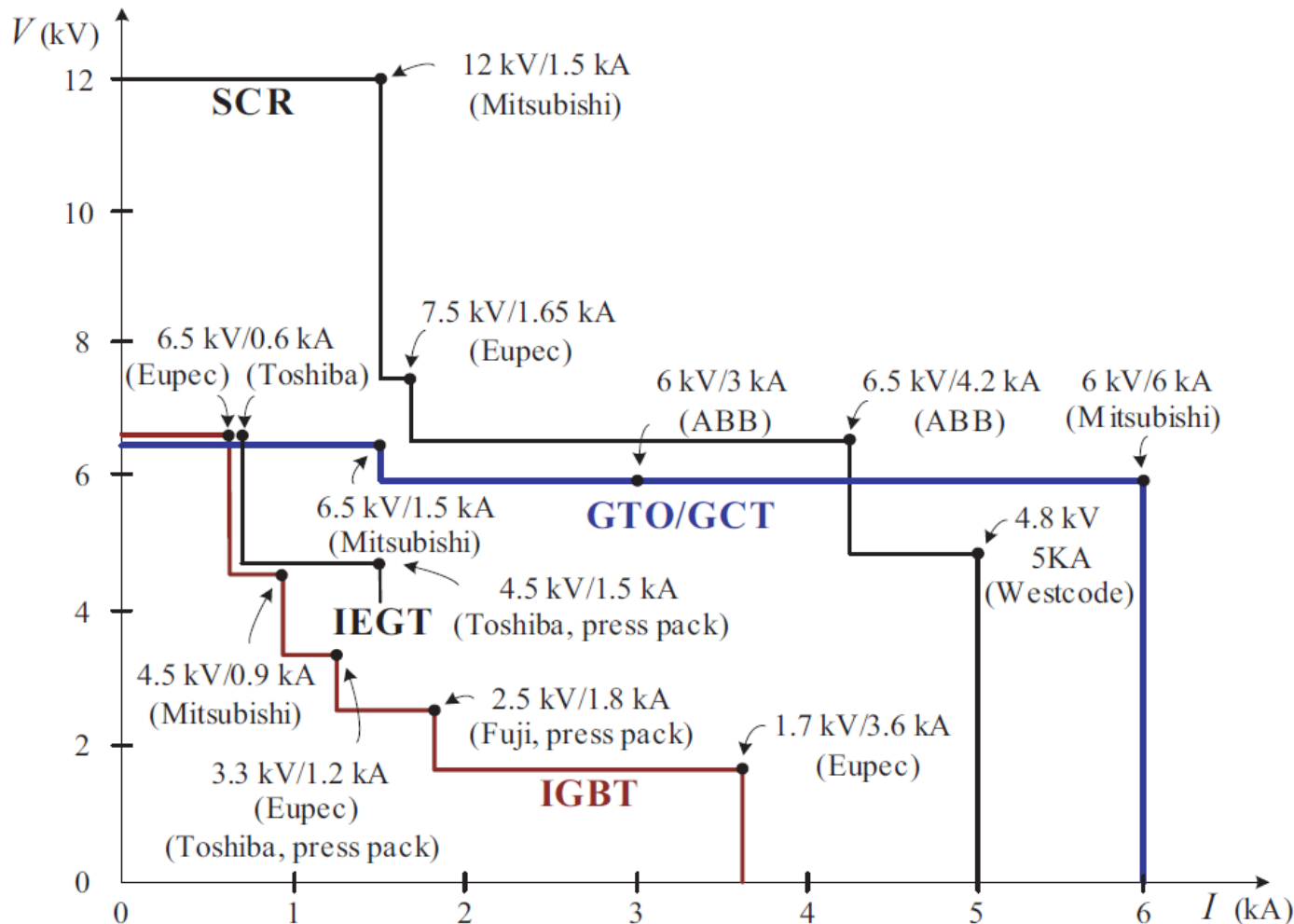
# Istorijski razvoj poluprovodničkih komponenti

## Tranzistorske komponente



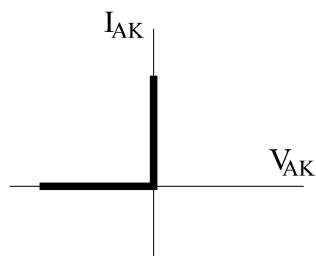
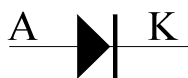
## Tiristorske komponente

# Naponske i strujne karakteristike poluprovodničkih komponenti



# Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača

## Diode



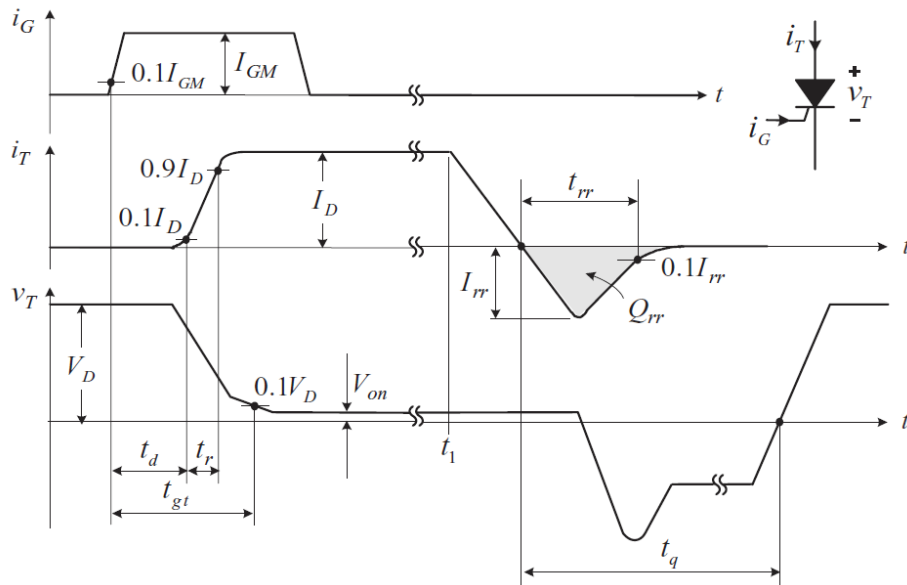
Diode:

Levo: 4,5 kV; 0,8 kA "press pack"

Desno: 1,7 kV; 1,2 kA "modul"

# Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača

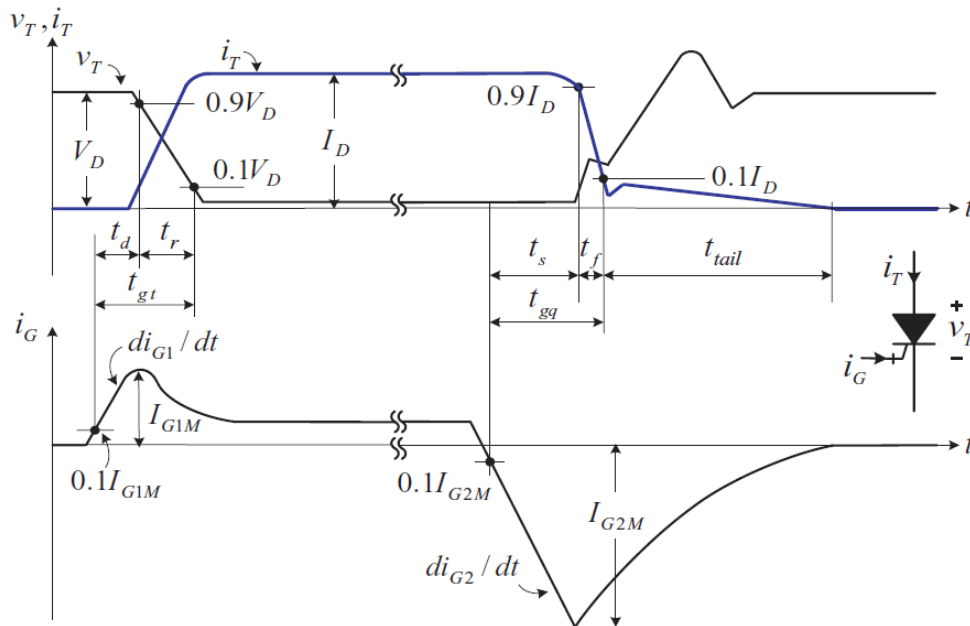
## Tiristori (SCR)



SCR:  
Levo: 4,5kV; 1,5kA  
Desno 8,5kV; 6,6kA

# Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača

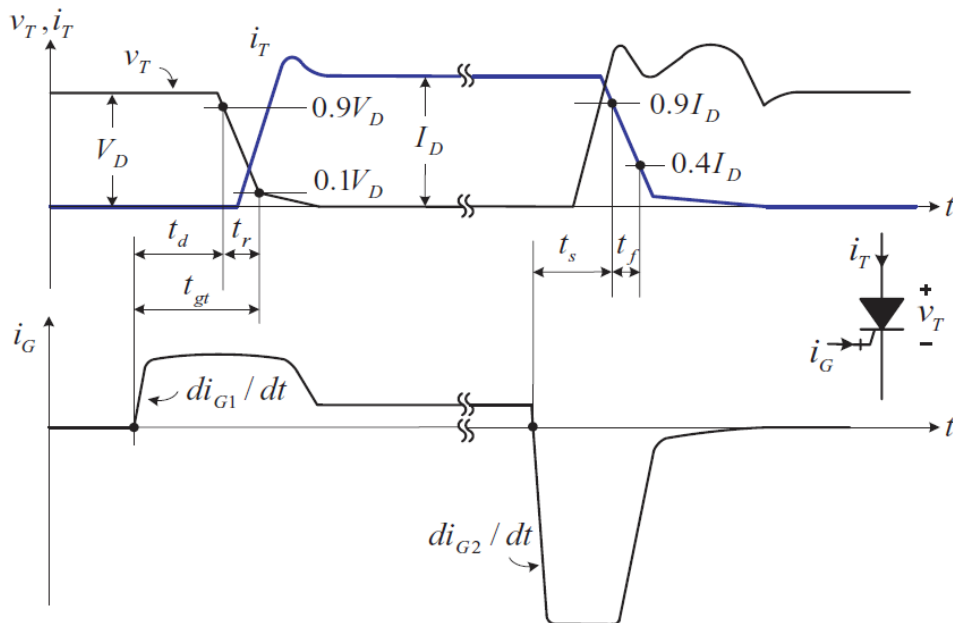
Tiristori sa mogućim isključenjem (GTO)



GTO:  
Levo: 4,5kV; 1.5kA  
Desno: 6kV; 6kA

# Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača

Tiristori sa komutovanim gejtom (GCT, IGCT, SGCT)

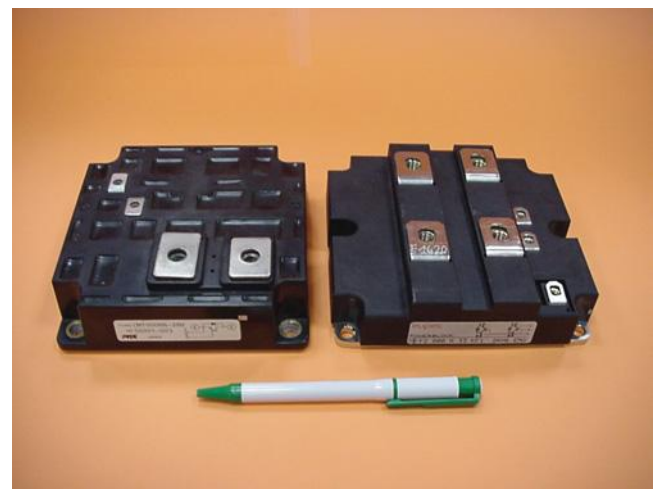
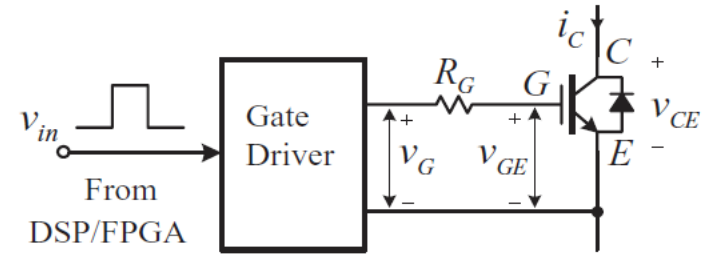
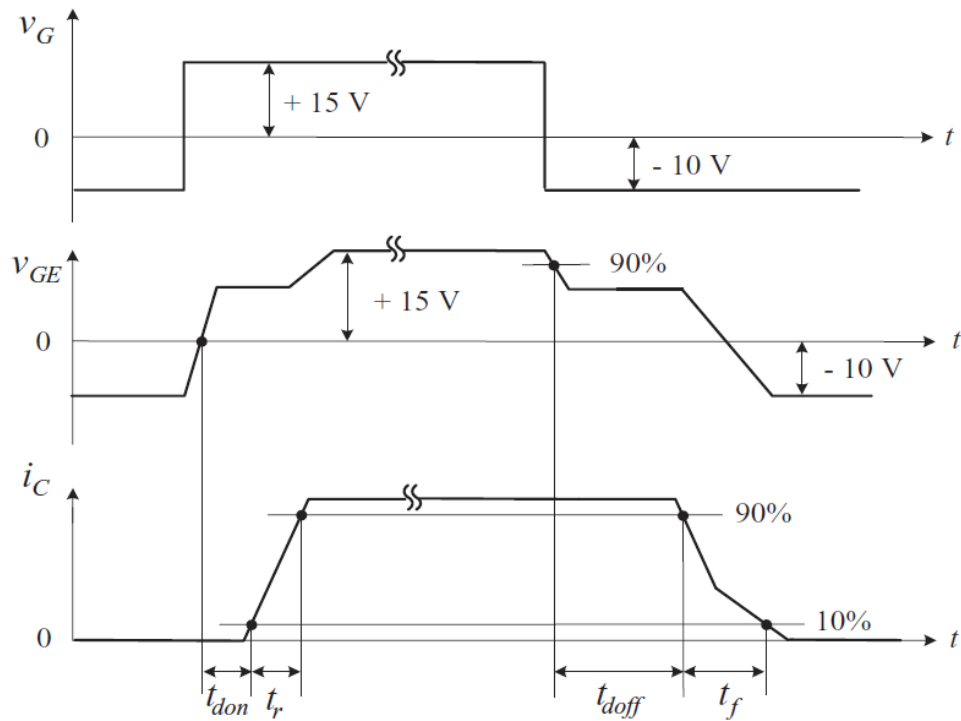


SGCT: 6.5kV, 1.5kA  
(do 6.5kV, 6kA)



# Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača

- IGBT tranzistori



IGBT:  
Levo: 1,7 kV; 1,2 kA  
Desno: 3,3 kV, 1,2 kA)

# Poluprovodnici koji se primenjuju kod strujnih pretvarača

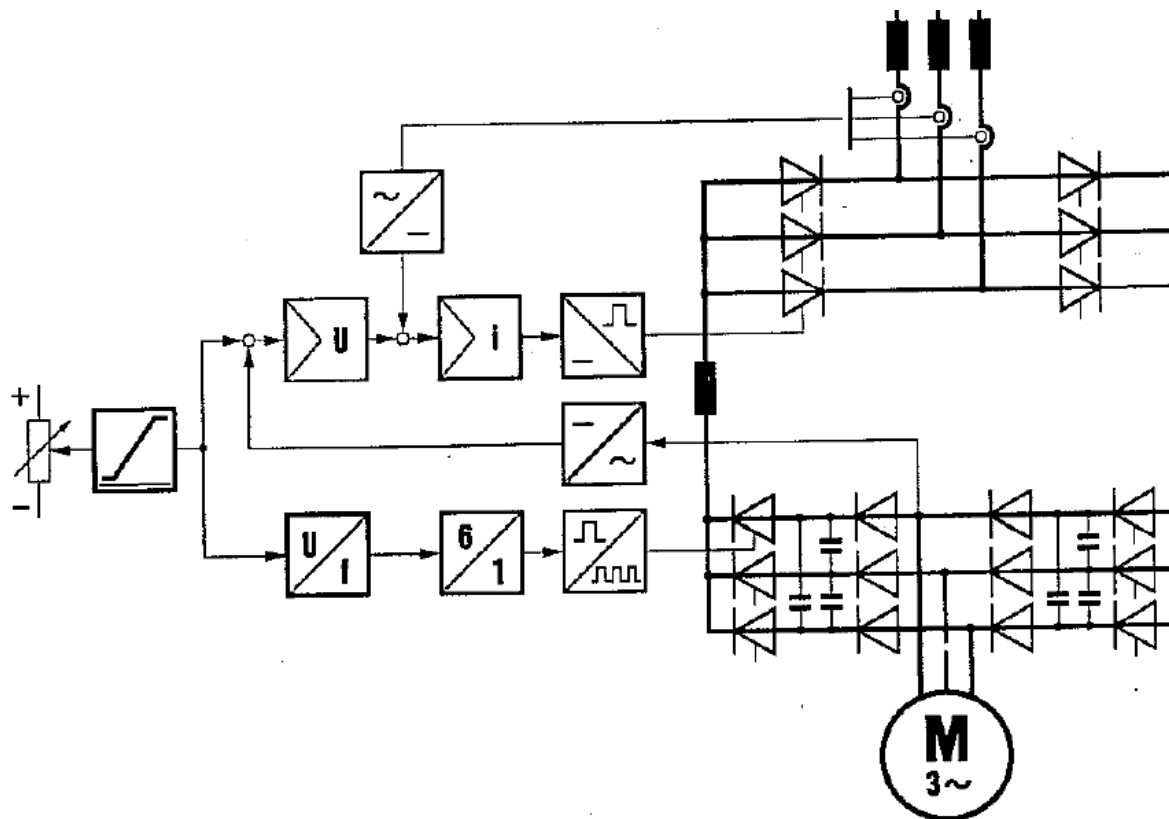
Ostale komponente:

- MOSFET,
- ETO (Emitter Turn-Off thyristor),
- MCT (MOS-Controlled Thyristor),
- SIT (Static Induction Thyristor),
- IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor).

# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

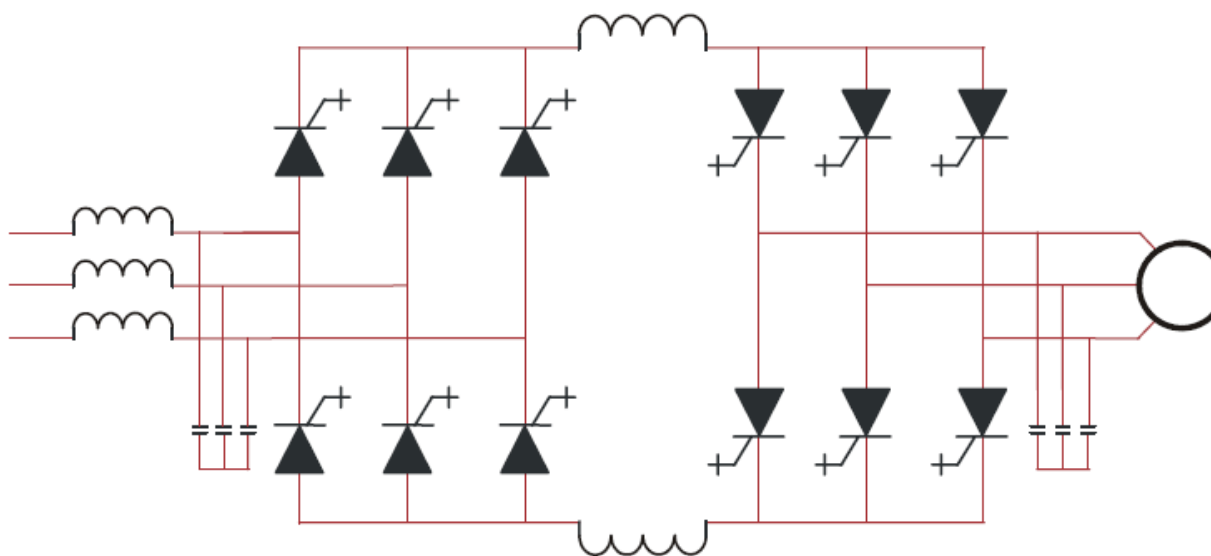
# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

Strujni inverter sa autosekvencijalnom komutacijom (ASCI, LCI)



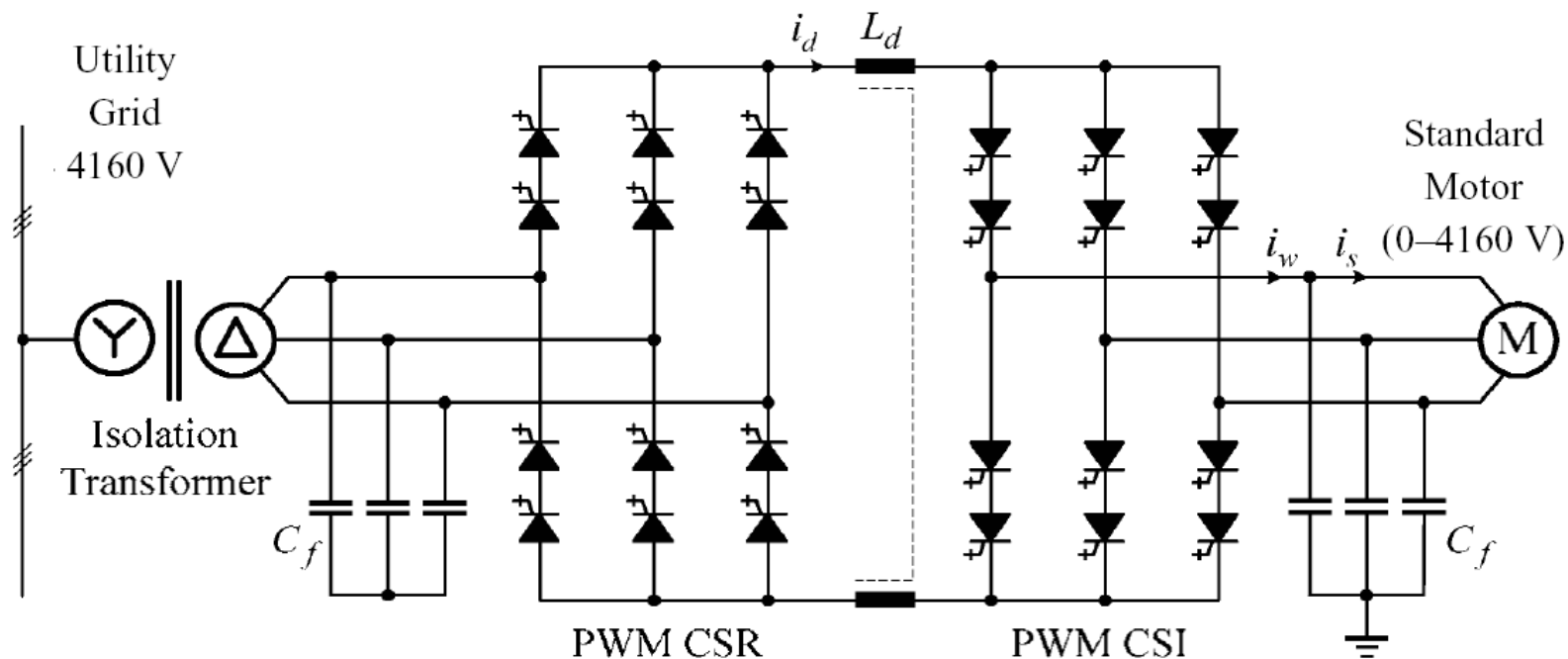
# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

Strujni PWM inverter sa GTO tiristorima



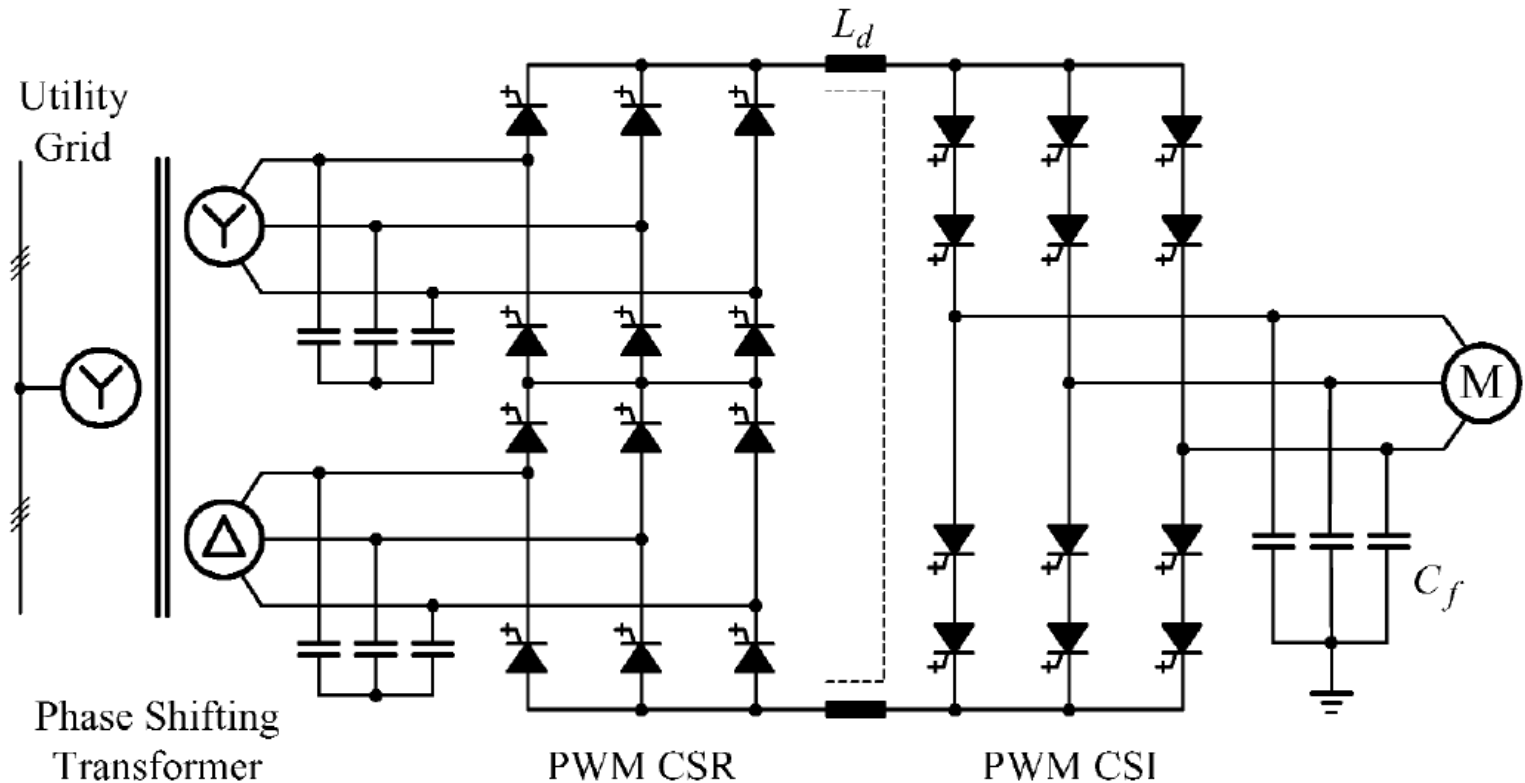
# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

Strujni pretvarači sa PWM ispravljačem (SGCT ili GTO)



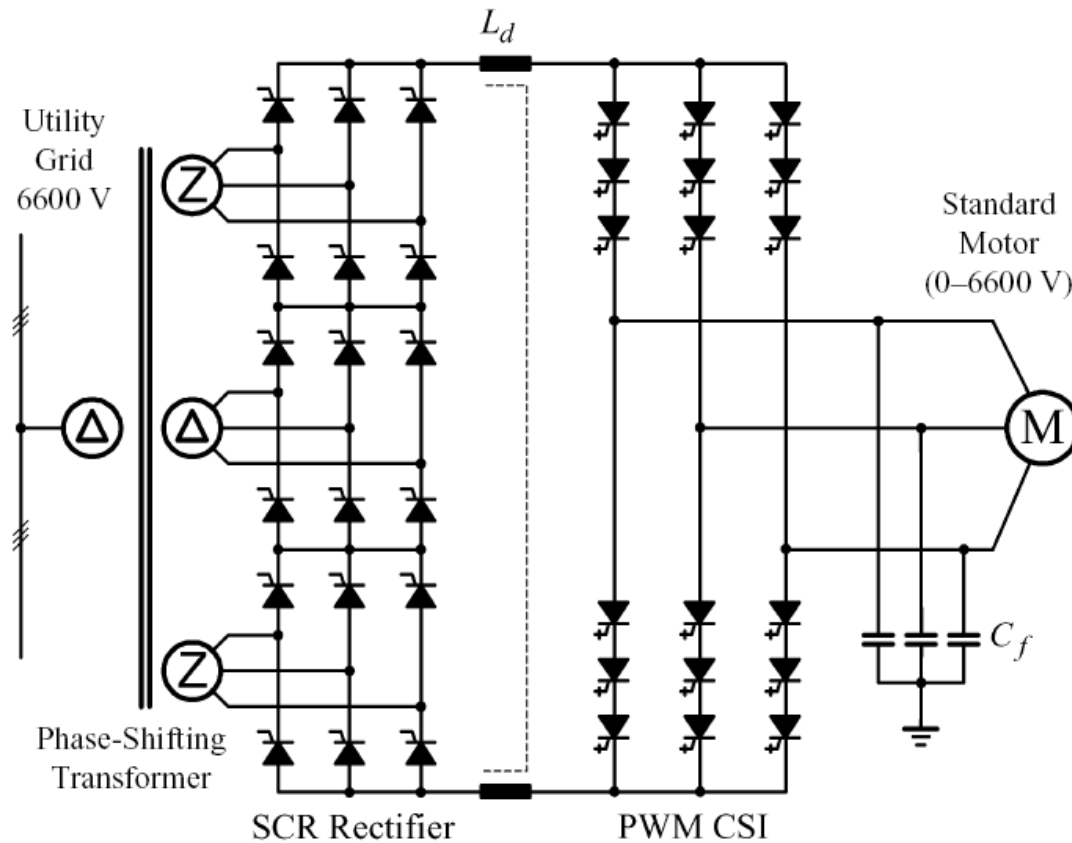
# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

Strujni pretvarači sa dvostrukim PWM ispravljačem



# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

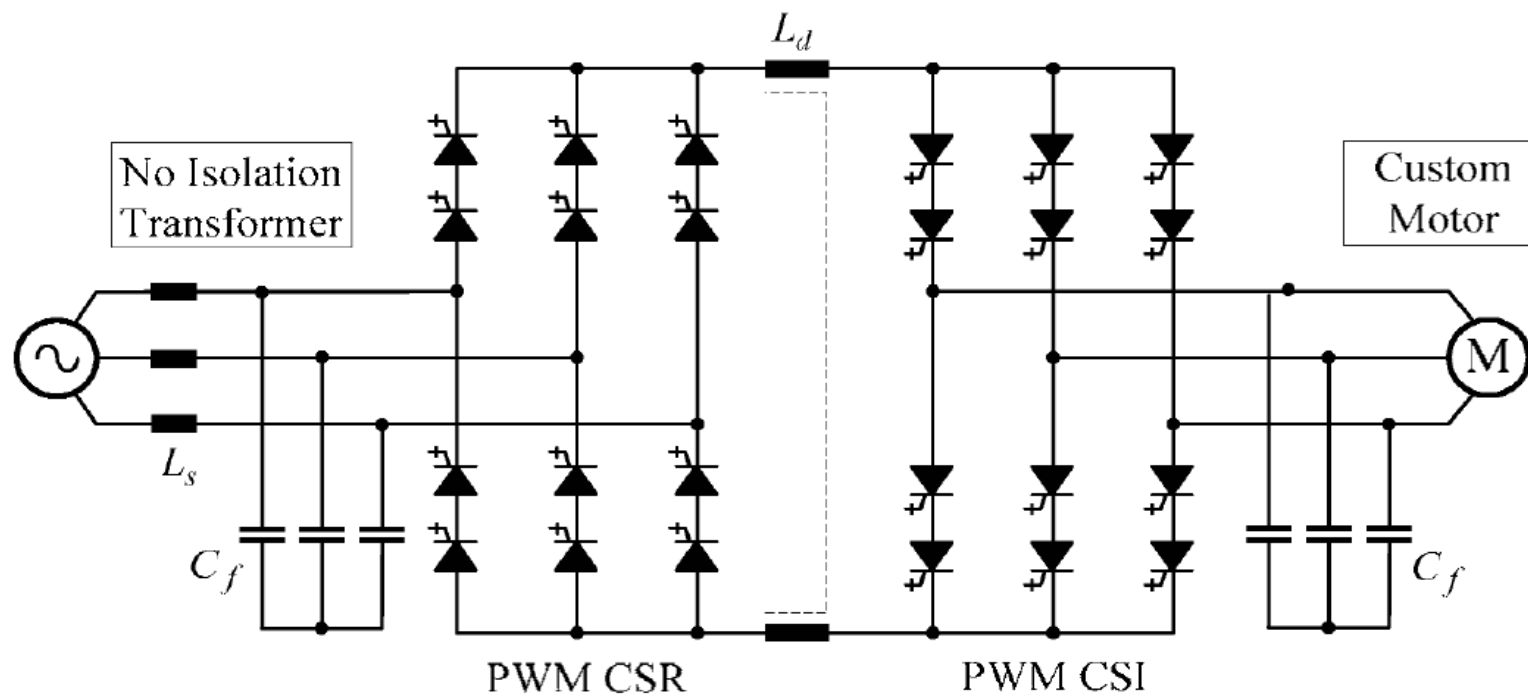
Strujni pretvarači sa više impulsnim tiristorskim ispravljačem





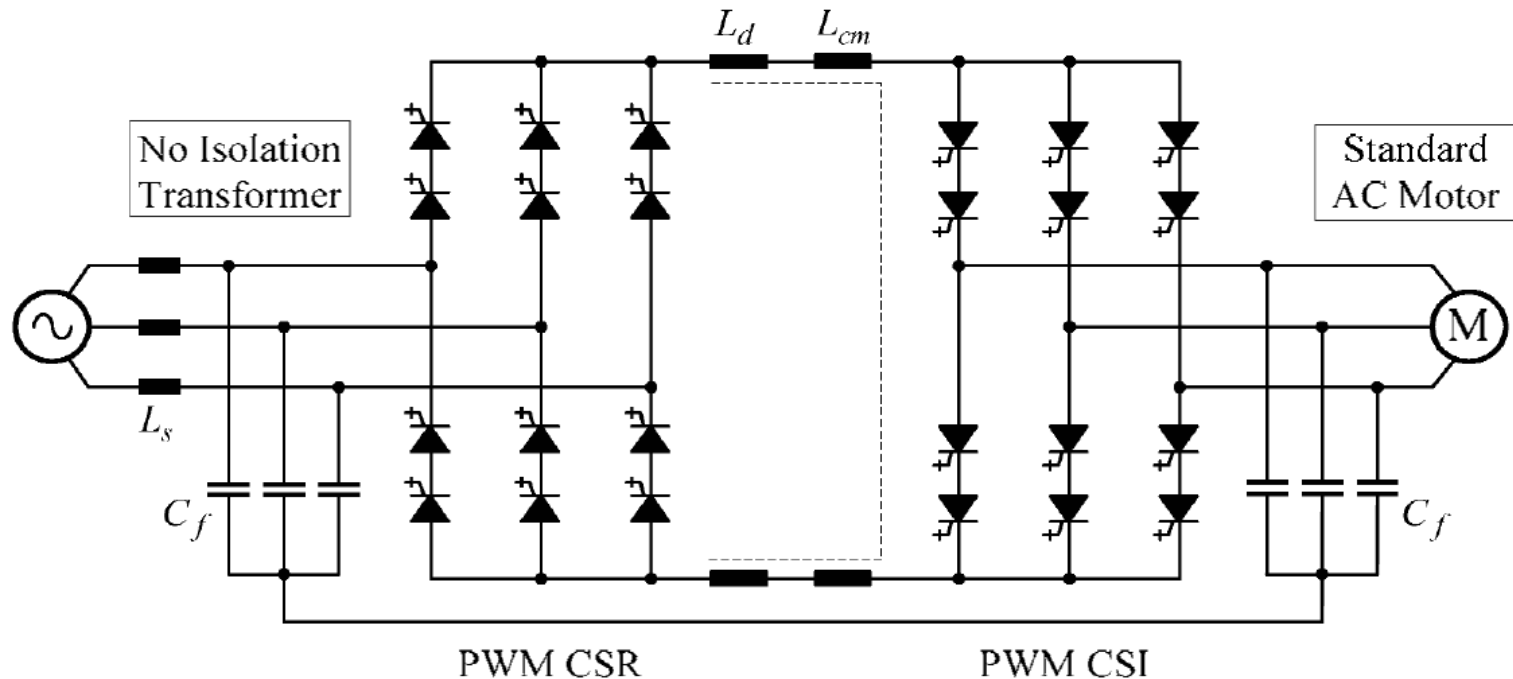
# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

Strujni pretvarači bez transformatora na ulazu,  
za posebno konstruisan motor



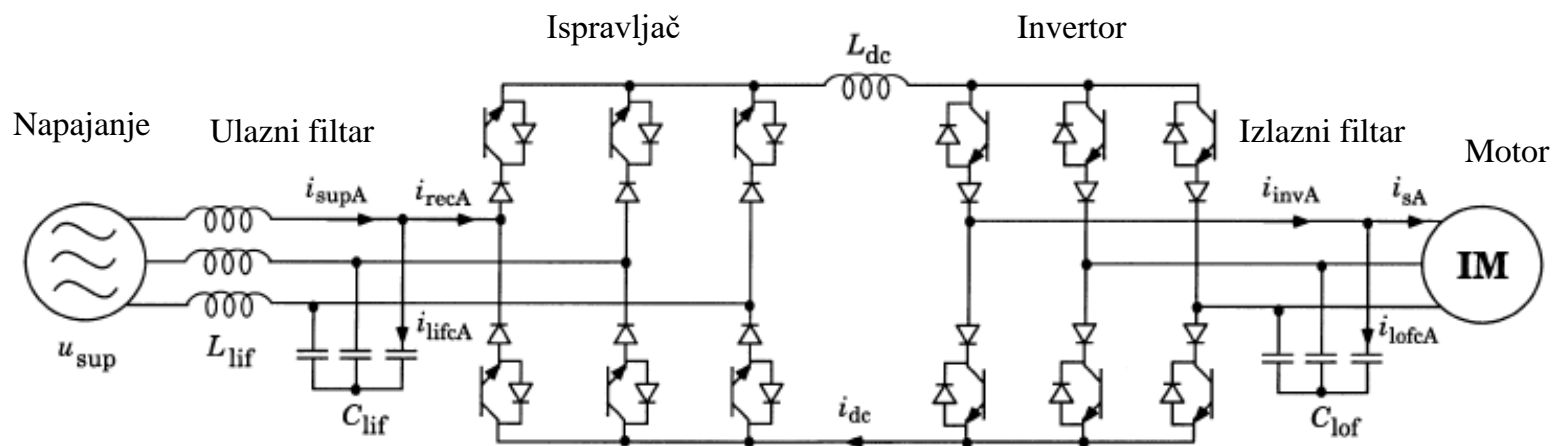
# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

Strujni pretvarači bez transformatora na ulazu,  
standardni motor



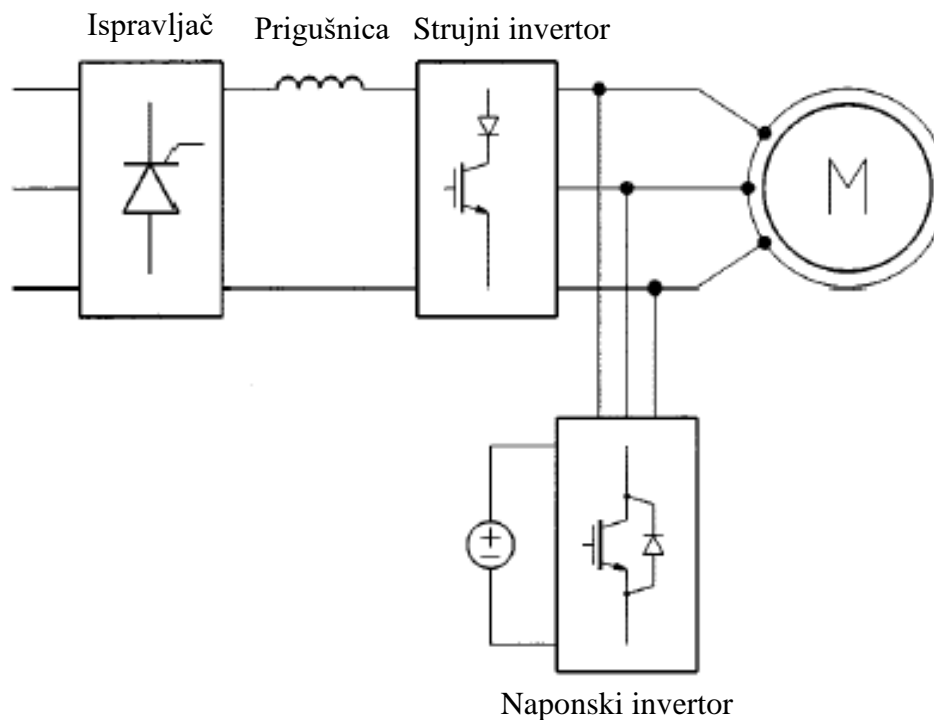
# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

Strujni PWM inverter sa IGBT tranzistorima



# Različite topologije i modifikacije strujnog pretvarača

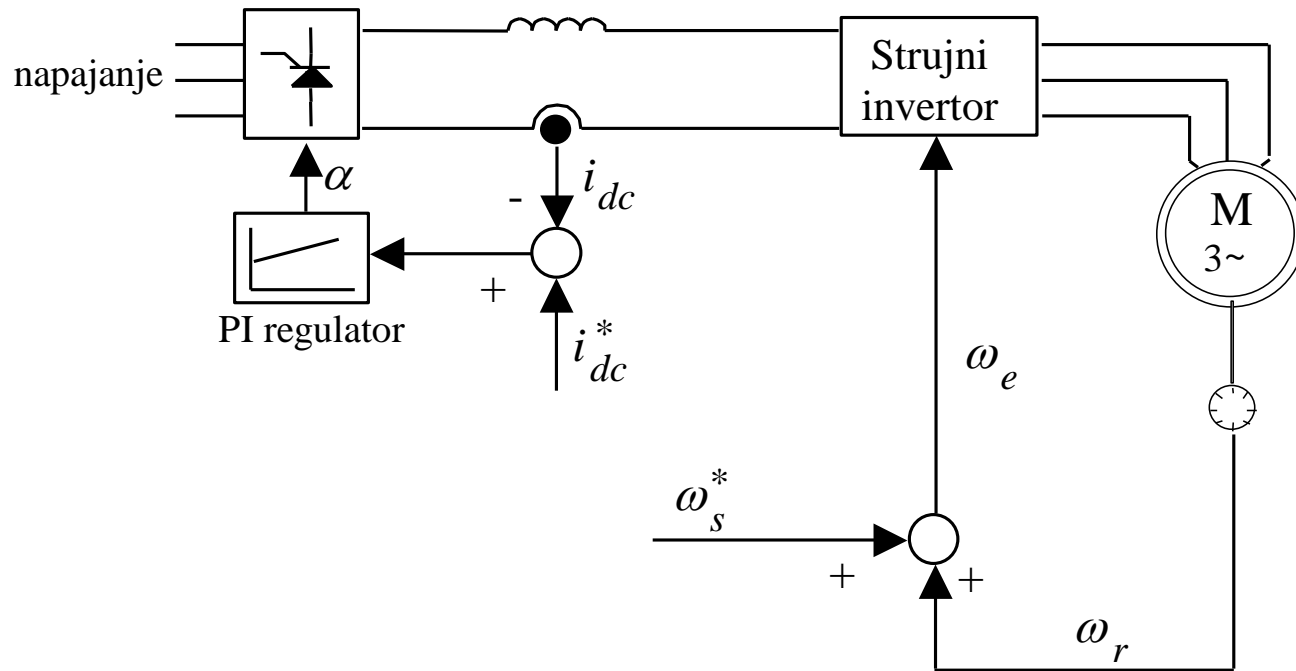
## Hibridni strujno-naponski inverter



# Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima

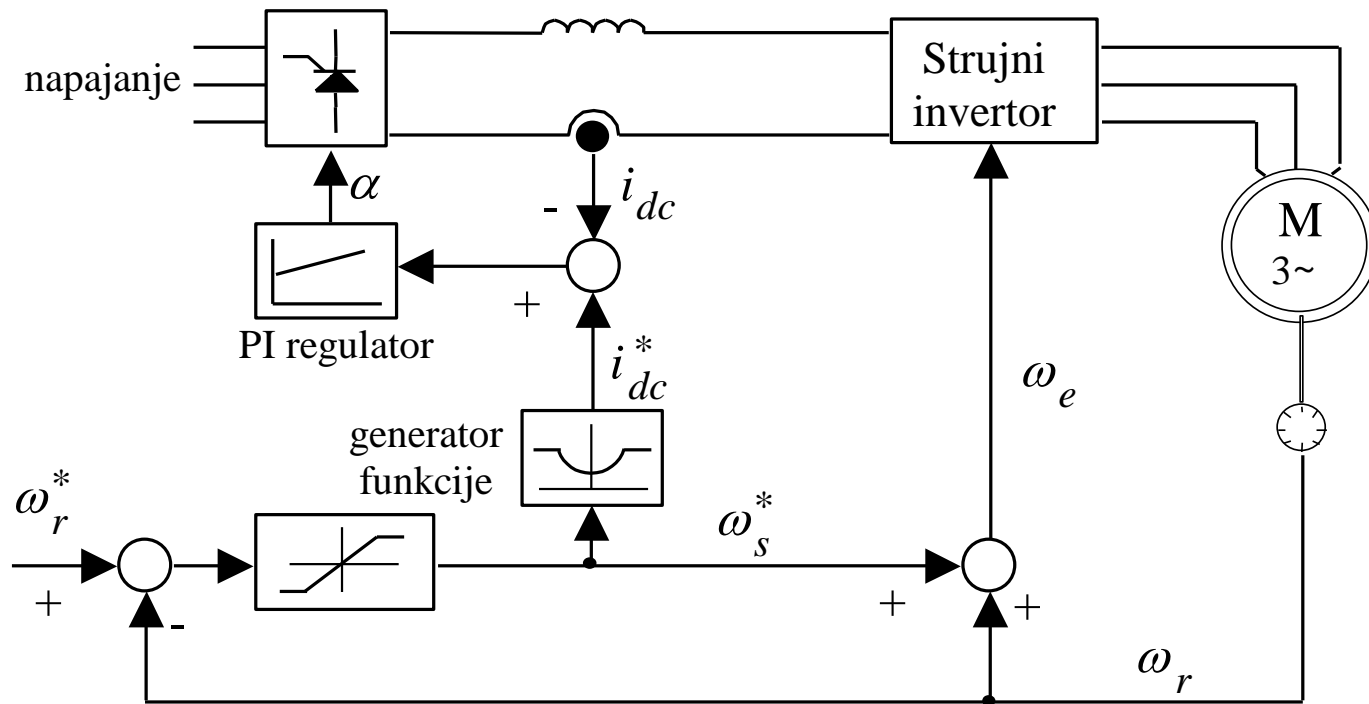
# Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima

Nezavisna regulacija struje i klizanja

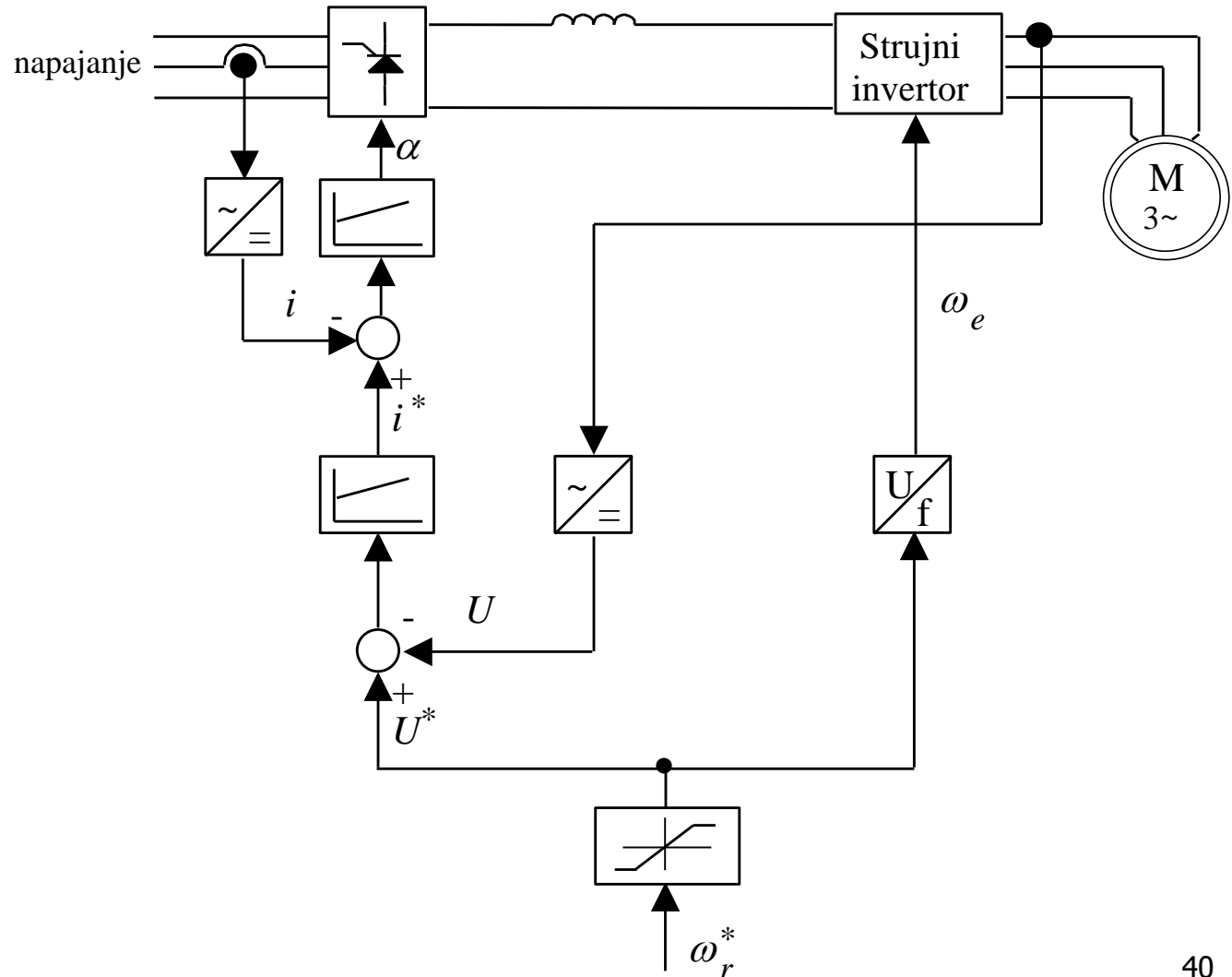


# Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima

Skalarno upravljanje sa konstantnim fluksom



# Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima

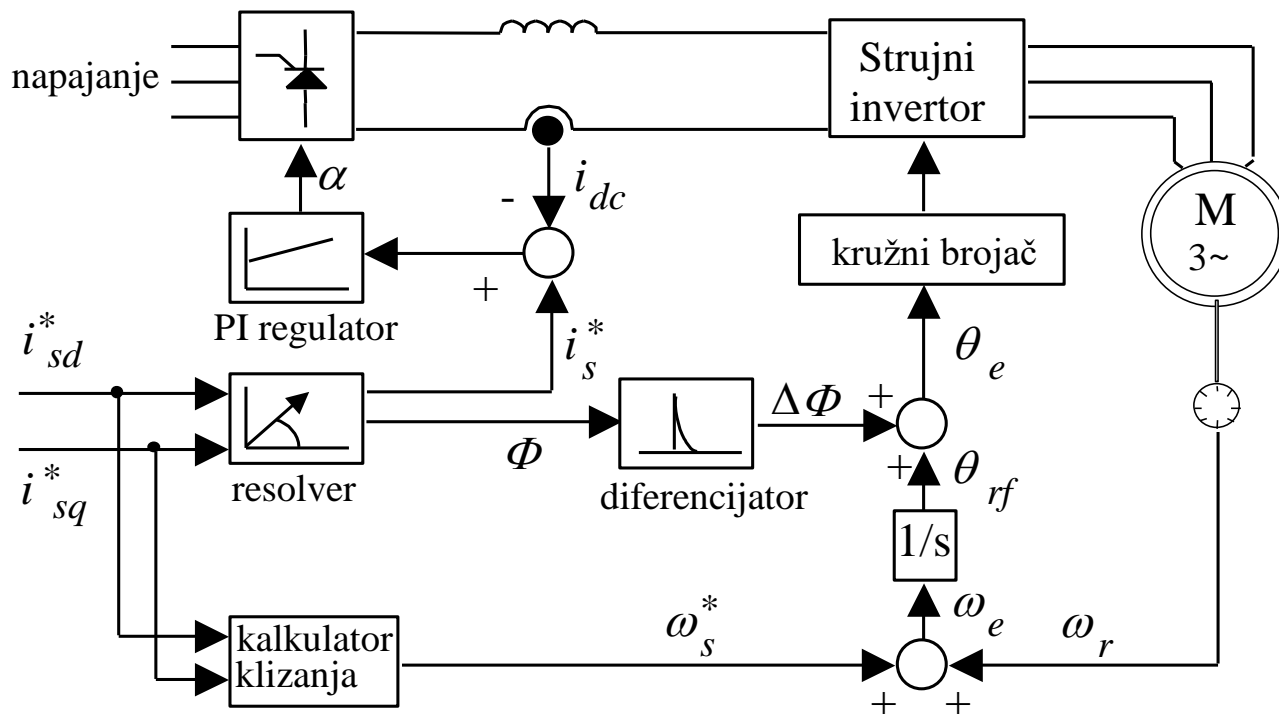


Skalarno  
upravljanje u  
otvorenoj sprezi  
(Sever Microvert)



# Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima

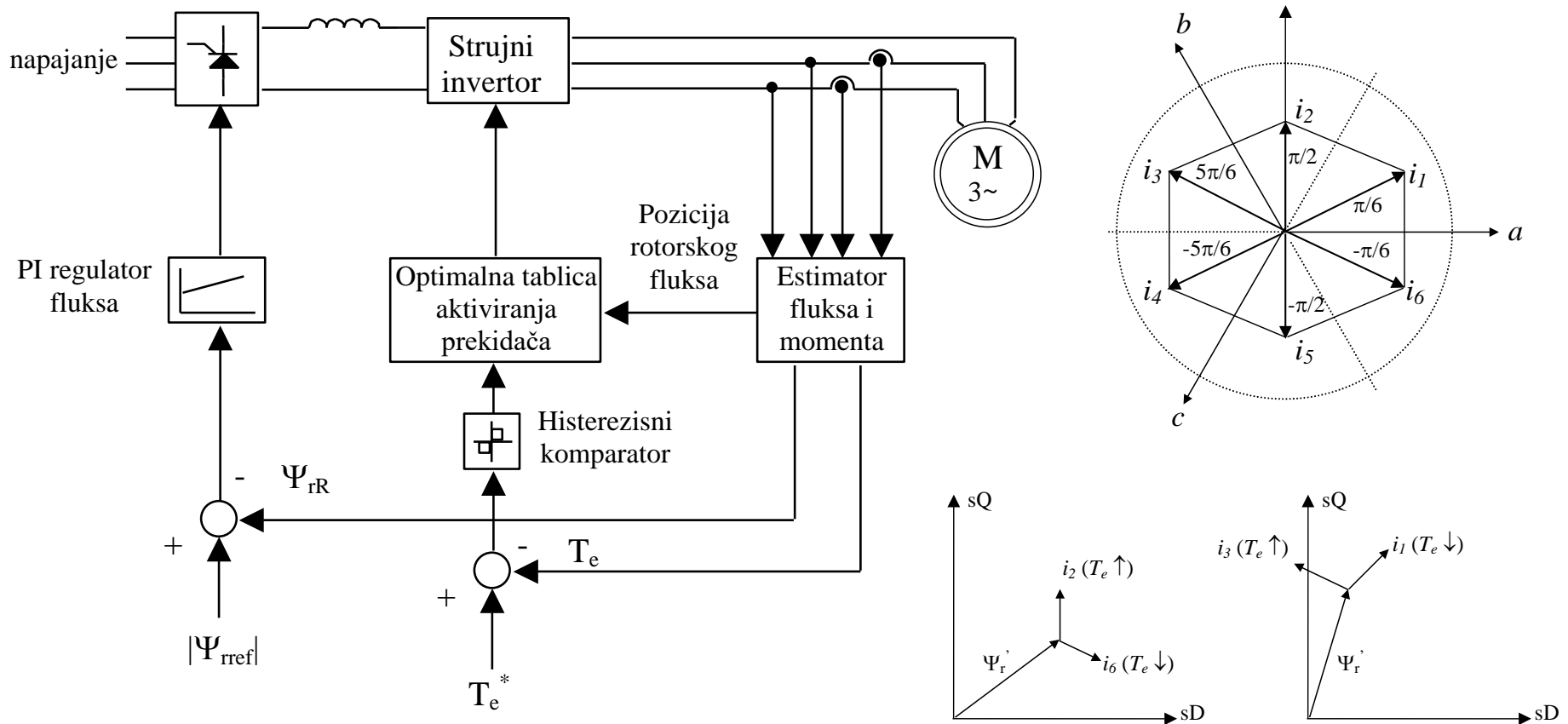
## Indirektno vektorsko upravljanje





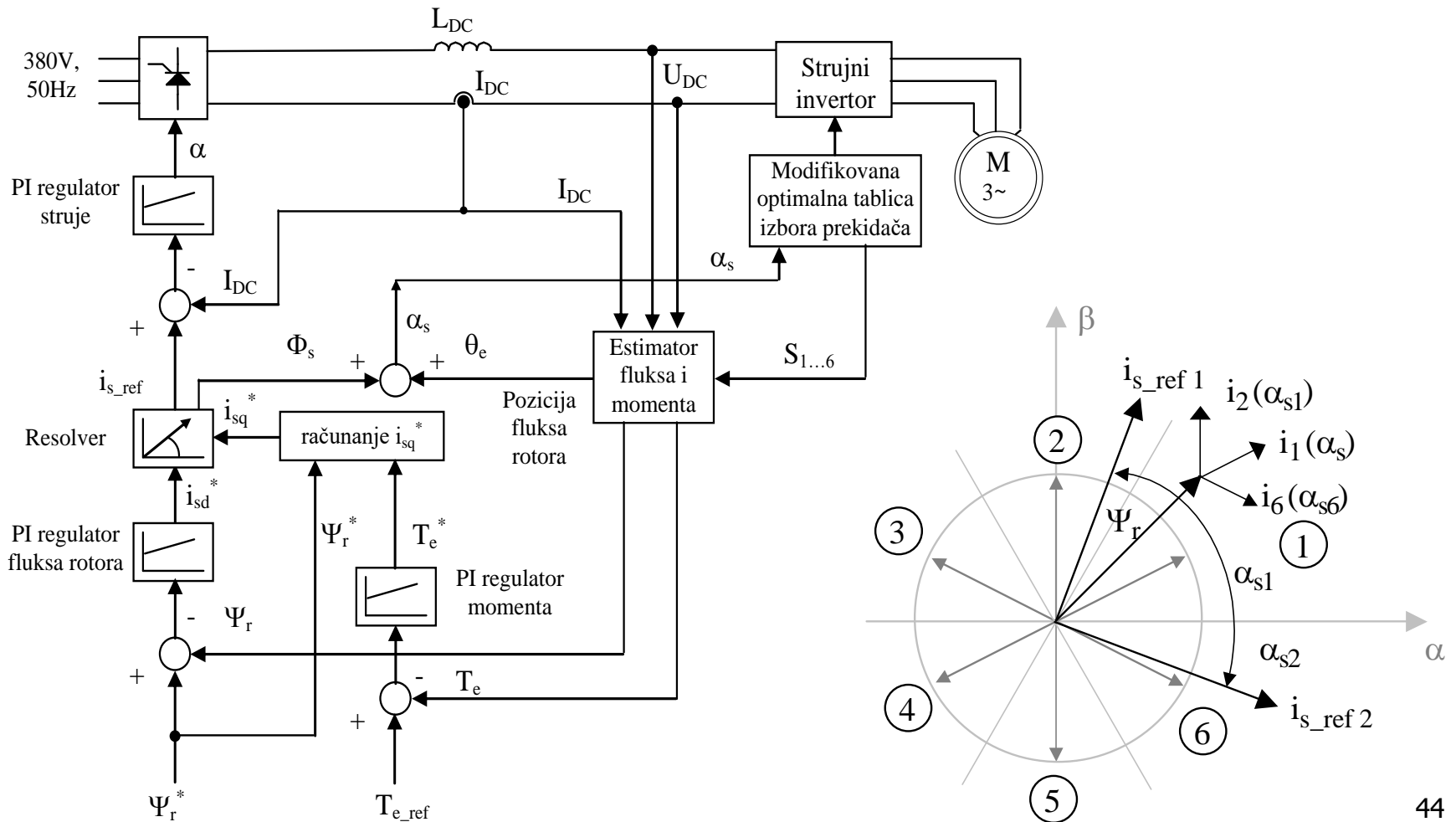
# Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima

Direktna kontrola momenta (osnovna šema iz literature)



# Upravljačke strategije u pogonima sa strujnim pretvaračima

Direktna kontrola momenta (unapređenje osnovne šeme)



# Primena strujnih pretvarača u elektromotornim pogonima

# Primena strujnih pretvarača u elektromotornim pogonima

Strujni pretvarač za napajanje i upravljanje asinhronih motora  
Eksperimentalna postavka sa sekvencijalnom komutacijom.

Laboratorijski prototip,  
ETF Laboratorija  
za elektromotorne pogone

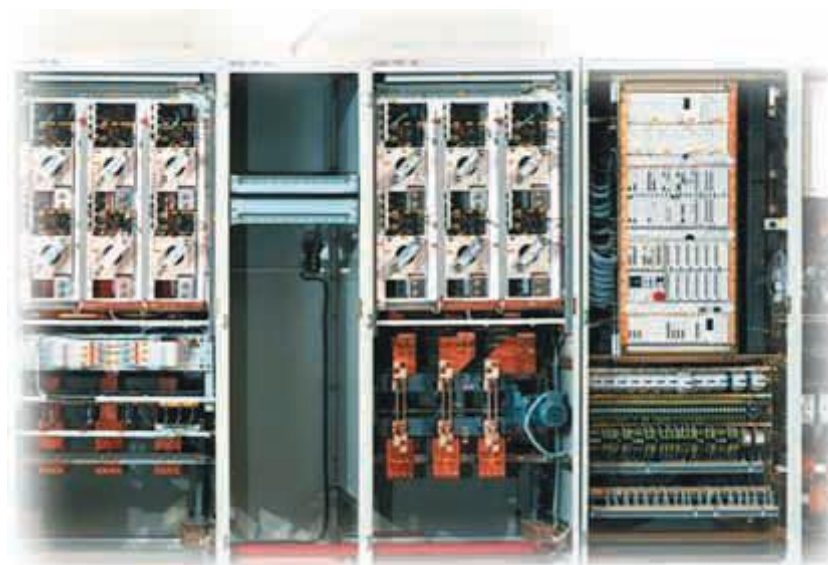


# Primena strujnih pretvarača u elektromotornim pogonima

## Primena strujnih pretvarača u pogonima velikih snaga



Siemens Sinamics GL 150 (LCI)



Alstom/GE SD7000 (LCI)

# Primena strujnih pretvarača u elektromotornim pogonima

Primena strujnih pretvarača u pogonima velikih snaga



ABB MEGADRIVE-LCI (do 10kV, 72MW)



# Primena strujnih pretvarača u elektromotornim pogonima

Primena strujnih pretvarača u pogonima velikih snaga



Rockwell PowerFlex 7000 PWM SGCT  
Current Source Converter



Alstom/GE CDM 8000 Current Source Converter

# Zaključak

- Karakteristike strujnih pretvarača;
- Poboljšanje performansi pogona sa CSI, unapređenjima upravljačkih algoritama;
- Prednosti i mane strujnih pretvarača;
- Pregled tržišta strujnih pretvarača;
- Trenutna istraživanja sa primenom na pretvaračima većih snaga (iznad 3MW).

# Literatura

- J.M.D.Murphy, F.G.Turnbull, Power Electronic Control of AC Motors, Pergamon Press, Oxford, 1988.
- W.Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag Berlin, Heildeberg, 1996 (Second Edition).
- B.K.Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, New Jersey, 1986.
- D.W.Novotny, R.D. Lorenz, “Introduction to Field Orientation and High Performance AC Drives”, Presented at IEEE Industry Applications Society Annual Meeting in Toronto, Canada, 1985.
- P.Vas, Vector Control of AC Machines, Clarendon Press Oxford, New York, 1990.
- P.Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford, U.K., Oxford University Press, 1998.
- I.Boldea, S.A.Nasar, Electric Drives, CRC Press, 1998.

# Literatura

- B. Wu, M. Narimani, “High-Power Converters and AC Drives”, 2nd edition, Wiley-IEEE Press, ISBN: 978-1-119-15603-1, March 2017.
- V. Yaramasu, B. Wu, “Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems”, Wiley-IEEE Press, ISBN: 978-1-118-98858-9, January 2017.
- Sever, “Monoverter – Tehnički Opis sa Principom Regulacije”, Subotica, 1986.
- Rockwell Automation, PowerFlex 7000 Medium Voltage AC Drive – Technical Guide for Frame A, Publication No. 7000A-TD200B-EN-P, Canada, November 2004.
- Alstom, ALSPA Drive Range, Publication N° POWC/BPROB/ALSPA/uke/GDB/03.01/FR/1780, France, 2001.

# Literatura

- A.Nikolic, B.Jeftenic, “Precise Vector Control of CSI Fed Induction Motor Drive”, European Transactions on Electrical Power (ETEP), John Wiley & Sons USA, ISSN 1430-144X, Issue 2, Volume 16, pp. 175-188, March 2006.
- A.Nikolic, B.Jeftenic, “Different Methods for Direct Torque Control of Induction Motor Fed From Current Source Inverter”, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, ISSN 1109-2734, Issue 7, Volume 7, pp. 738-748, July 2008.
- A.Nikolic, B.Jeftenic (invited paper), “Current Source Converter Topologies for PMSG Wind Turbine Applications”, in Proceedings of International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, Special session on wind energy conversion systems, Ohrid, FYRM, September 2010.
- A.Nikolic, B.Jeftenic, “Direct Torque Control and Virtual-Flux Based Direct Power Control of Current Source Converter in Wind Turbine Application”, in Proceedings of 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), Birmingham, UK, September 2011.

# Literatura

- M.Rivera, S. Kouro, J. Rodriguez, B. Wu, V. Yaramasu, J. Espinoza and P. Melin, „Predictive Current Control in a Current Source Inverter Operating with Low Switching Frequency“, in Proceedings of 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013, pp. 334-339.
- A.Nikolic, M.Rivera, M.Bebic, S.Milosavljevic, “Predictive Control of a Current Source Rectifier in Wind Energy Conversion System with PMSG”, in Proceedings of 3rd IEEE Southern Power Electronics Conference, SPEC 2017, 4-7 December 2017., Puerto Varas, Chile.
- P. Tenca, T. Lipo, “Reduced cost Current-source Topology improving the Harmonic Spectrum Through On-line Functional Minimization”, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference PESC2004, Aachen, Germany, pp.2829-2835, July 2004.
- J. Dai, D. Xu, B. Wu, “A Novel Control System for Current Source Converter Based Variable Speed PM Wind Power Generators”, IEEE 38th Annual Power Electronics Specialists Conference PESC2007, Orlando, Florida, USA, June 2007, pp. 1852-1857.

# Literatura

- Z. Chen, E. Spooner, “Current source thyristor inverter and its active compensation system”, *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*. Vol. 150 No. 4 July 2003.
- N. Zargari, S. Rizzo, Y. Xiao, H. Iwamoto, K. Sato, J. Donlon, “A New Current Source Converter Using A Symmetric Gate Commutated Thyristor (SGCT)”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume: 37 Issue: 3, Page(s): 896 – 903, 2001.
- Seggewiss J. G., Kottwitz R. G., McIntosh D., “The process and economic benefits of synchronizing applications with medium-voltage drives”, *IEEE Industry Application Magazine*, 58-65, July/August 2003.
- CEE, “Motor Efficiency, Selection and Management – A Guidebook for Industrial Efficiency Programs”, Boston, USA. September 2013.

# Literatura

- A.Nikolić, “Vektorsko upravljanje asinhronim pogonom sa strujnim pretvaračem učestanosti”, Magistarska teza, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Beograd, Maj 1999
- A.Nikolić, “Direktna kontrola momenta asinhronog motora napajanog iz strujnog pretvarača učestanosti”, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Beograd, April 2009