

# SREDNJENAPONSKI FREKVENTNI PRETVARAČI ZA POGON ASINHRONIH MOTORA

**Dr. Žarko Janda, dipl. ing., viši naučni  
saradnik**

**Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”**

[www.ieent.org](http://www.ieent.org), [janda@ieent.org](mailto:janda@ieent.org)

# Šta su srednjenaponski frekventni pretvarači?

- Srednjenaponski frekventni pretvarači su invertori koji napajaju kavezne motore nazivnog napona 6,0 ili 6,6 kV kod nas. U drugim zemljama srednji napon može biti i 2,3 kV, 3,3 kV, 4,16 kV i 10 kV.
- Postoje dve osnovne vrste srednjenaponskih frekventnih pretvarača, prema prirodi jednosmernog međukola i to su naponski i strujni.
- Kod svih je implementirano vektorsko upravljanje brzinom motora, sa i bez senzora brzine, odnosno kao opcija uvek postoji i skalarno upravljanje.

- ZAŠTO POSTOJI POTREBA ZA SREDNJENAPONSKIM FREKVENTNIM PRETVARAČIMA BRZINE ASINHRONIH MOTORA?
- Postoji zbog pogona velikih snaga, da bi preseki kablova bili manji, odnosno da bi se snaga veličine od reda megavata do nekoliko megavata mogla prebaciti na daljinu do nekoliko kilometara (rastojanje između frekventnog pretvarača i motora).

Tipični potrošači su pumpe u termoelektranama i sistemima vodovoda, ventilatori u termoelektranama.

Kod upotrebe pumpi mora da se vodi računa o pojavi vodenog udara u cevima (ako se suviše brzo zaustavlja tok vode kroz cevi) a kod ventilatora je reč o veoma velikoj inerciji. Inače **glavna korist je u uštedi energije** pri regulisanju protoka fluida, u odnosu na rešenja sa prigušnim ventilima na potisu.

Centrifugalne pumpe i ventilatori su pogodni takođe zato što moment opterećenja zavisi od kvadrata brzine, tako da frekventni pretvarači startuju praktično neopterećeni.

H: Characteristic of fan at rated rotation speed (N), R: Windage resistance curve,  
 A (Intersection of H and R): Rated operation point of fan  
 Air volume and air pressure at point A is 1.0 (Rated air volume and rated air pressure)

1) 50% air volume operation by damper close

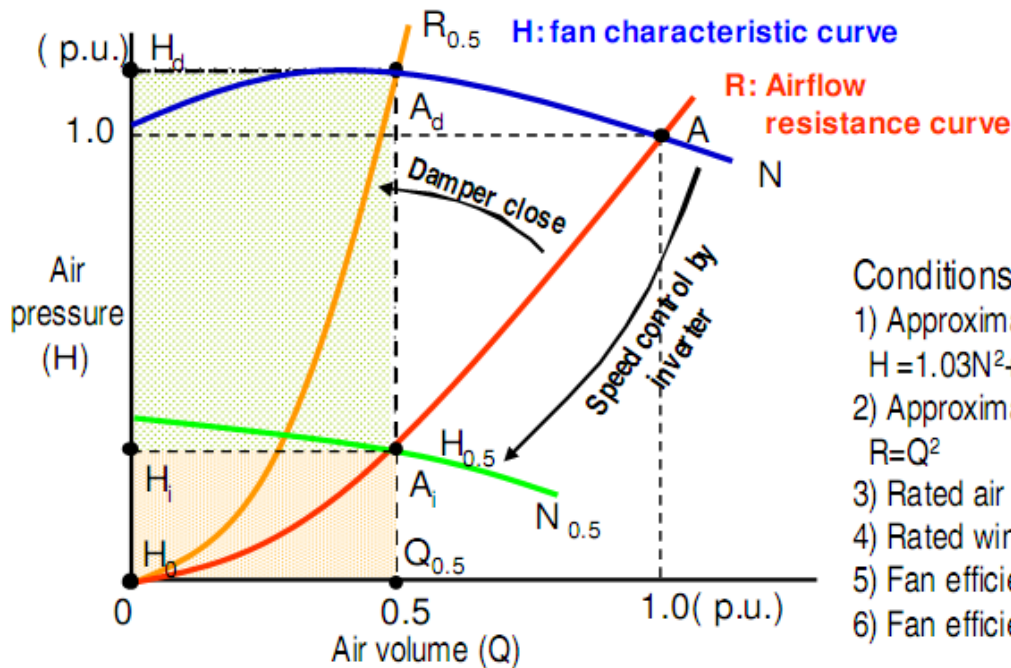
Windage resistance curve:  $R \rightarrow R_{0.5}$ , Electric power:  $H_o Q_{0.5} A_d H_d$

2) 50% air volume operation by inverter

Motor rotation speed:  $N \rightarrow N_{0.5}$ , Fan characteristic:  $H \rightarrow H_{0.5}$

Electric power:  $H_o Q_{0.5} A_i H_i$

Energy saving effect by inverter:  
 $H_i H_{0.5} A_i H_d$



Calculation of motor shaft power P

$$P = \frac{QH}{60\eta_f} \times Q_o H_o \text{ (kW)}$$

Unit for Q and H is p.u. (per unit)

Conditions

- 1) Approximate formula of fan characteristic H:  
 $H = 1.03N^2 + 0.56NQ - 0.59Q^2$
- 2) Approximate formula of windage resistance R:  
 $R = Q^2$
- 3) Rated air pressure: 1000m<sup>3</sup>/minute
- 4) Rated wind pressure: 5kPa
- 5) Fan efficiency at rated air volume: 0.7
- 6) Fan efficiency at 50% of rated air volume: 0.54

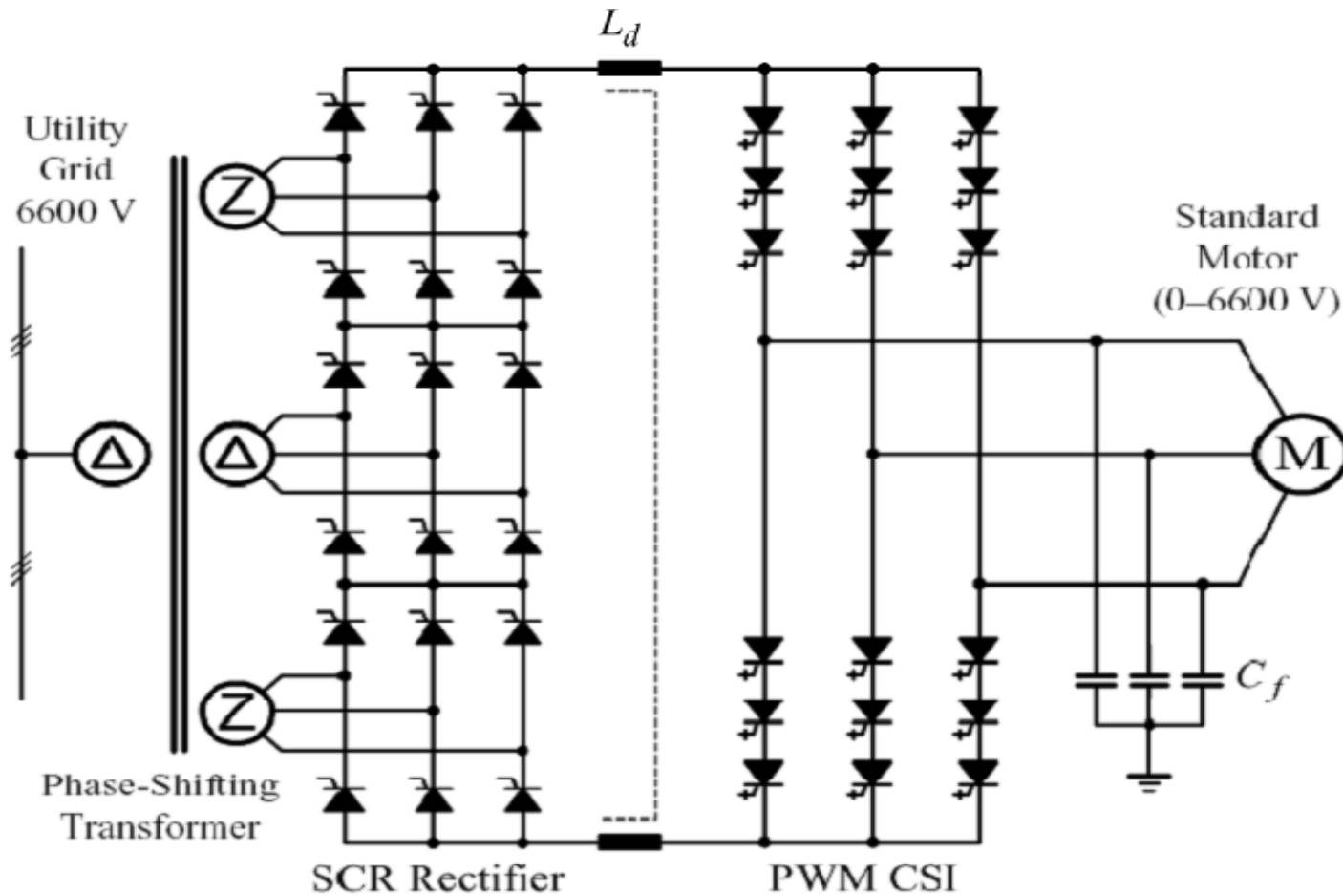
“P (kW)”, motor shaft power of fan application, is proportional to product of wind volume (m<sup>3</sup>/minute) and wind pressure (kPa).

$$P = \frac{q h}{60 \eta_f} \text{ (kW)}$$

- q : Wind volume (m<sup>3</sup>/minute), which comes from motor rotation speed (N)
- h : Wind pressure (kPa), which comes from motor torque (T)
- $\eta_f$  : Efficiency of the fan

Kod drugih vrsta pogona, kao što je pogon transportne trake, to nije slučaj. Kod transportne trake se pogon startuje sa punim momentom, čak je potrebno u početku obezbediti i veći momenat dok natovarena traka krene (zamrznuta zimi,...) a potom frekventni pretvarač i motor obezbeđuju potreban momenat uz postepeno povećavanje brzine, tako da nema pojava mehaničke rezonanse i pojave mehaničkog transferzalnog talasa duž trake.

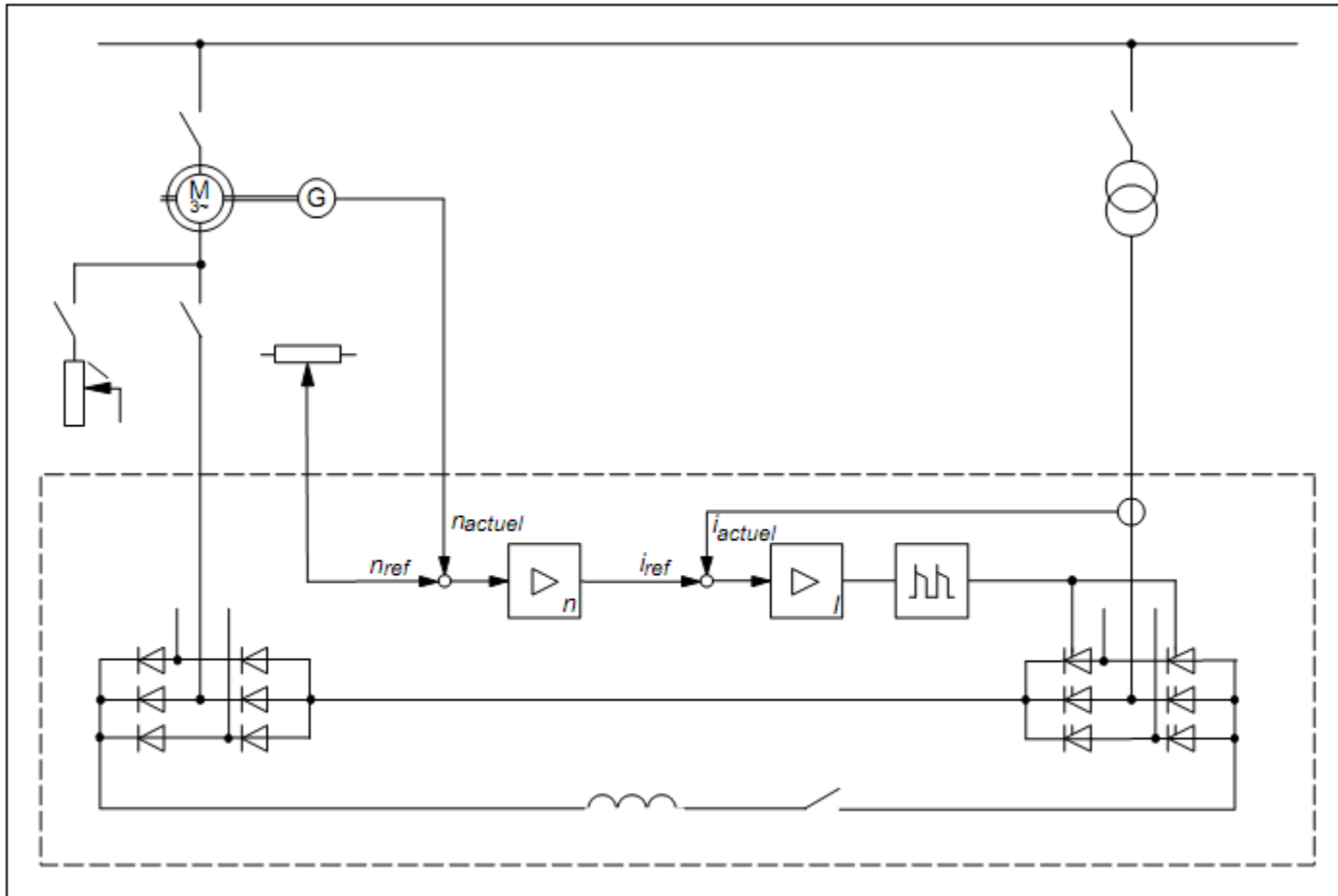
A kako je to ranije rađeno?



**GTO tiristori kao prekidači, složena snaberska kola, ne baš najpouzdanije ...**

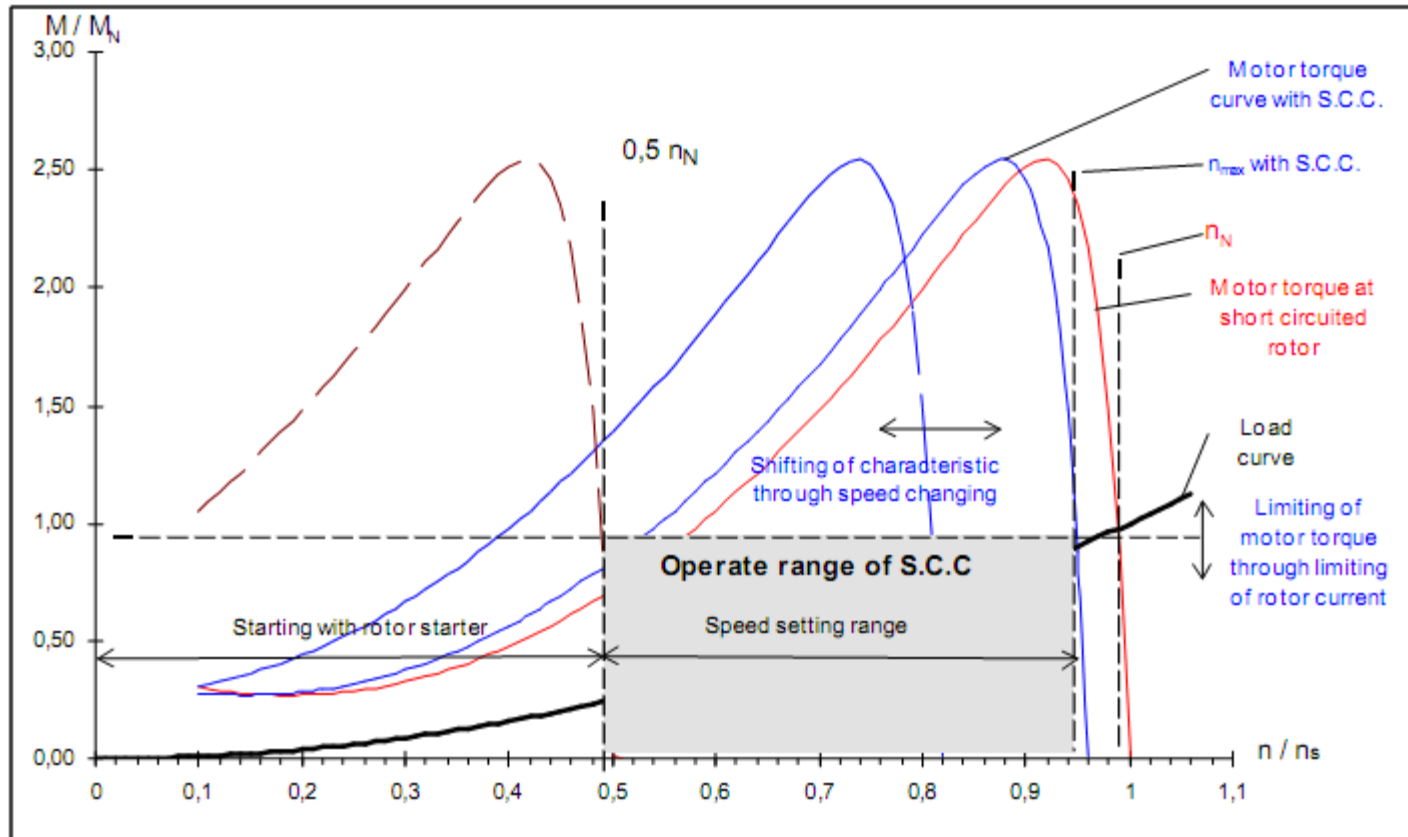


A kako je to ranije rađeno? (pumpe)



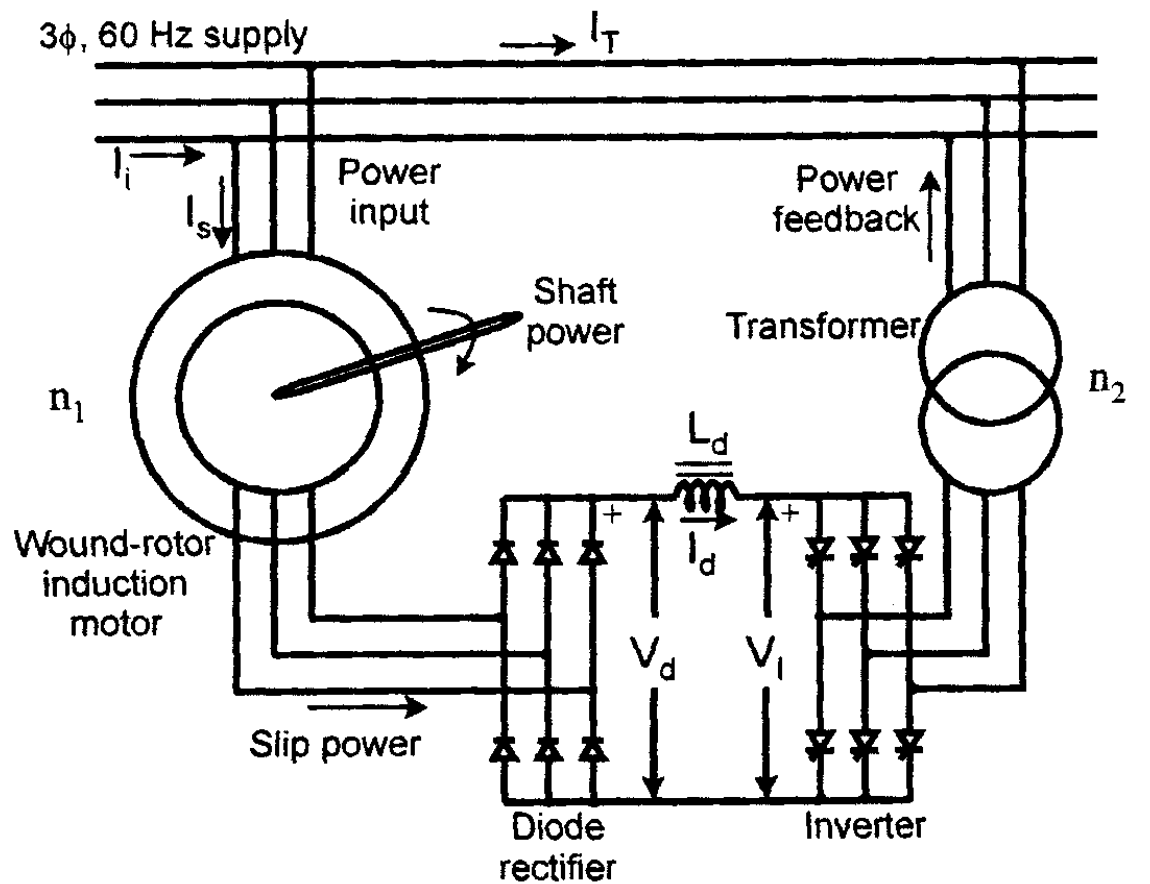
**Podsinkrona kaskada, uglavnom korišćena za pogone pumpe u vodovodu ...**

# A kako je to ranije rađeno? (pumpe)



**Podsinhrona kaskada, mehaničke karakteristike ... opseg podešavanja brzine 0,5 do 0,95 nominalne, problem gubitka komutacije pri propadu mrežnog napona ... motor sa namotanim rotorom ... otpornik za start ...**

# Energetska šema podsinhrone kaskade



Voltage  $V_d$  (neglecting stator and rotor voltage drops) is given by:

$$V_d = \frac{1.35sV_L}{n_1}$$

where  $s$ =per unit slip,  $V_L$ = stator line voltage and  $n_1$ =stator-to-rotor turns ratio. The inverter dc voltage  $V_I$  is given by:

$$V_I = \frac{1.35V_L |\cos \alpha|}{n_2}$$

where  $n_2$ =transformer turns ratio (line side to inverter side) and  $\alpha$ =inverter firing angle.

For inverter operation,  $\pi/2 < \alpha < \pi$ . In steady state  $V_d = V_1$   
(neglecting ESR loss in inductor)

$$\Rightarrow s = \frac{n_1}{n_2} |\cos \alpha|$$

The rotor speed  $\omega_r$  is given by:

$$\omega_r = (1 - s)\omega_e = \left(1 - \frac{n_1}{n_2} |\cos \alpha|\right)\omega_e = (1 - |\cos \alpha|)\omega_e \quad \text{if } n_1 = n_2$$

Thus rotor speed can be controlled by controlling inverter firing angle,  $\alpha$ .

At  $\alpha = \pi$ ,  $\omega_r = 0$  and at  $\alpha = \pi/2$ ,  $\omega_r = \omega_e$ .

It can be shown that the torque may be expressed as:

$$T_e = \left( \frac{P}{2} \right) \frac{1.35V_L}{\omega_e n_1} I_d$$

# NAPONSKI INVERTORI ZA POGON SREDNJE NAPONSKIH MOTORA

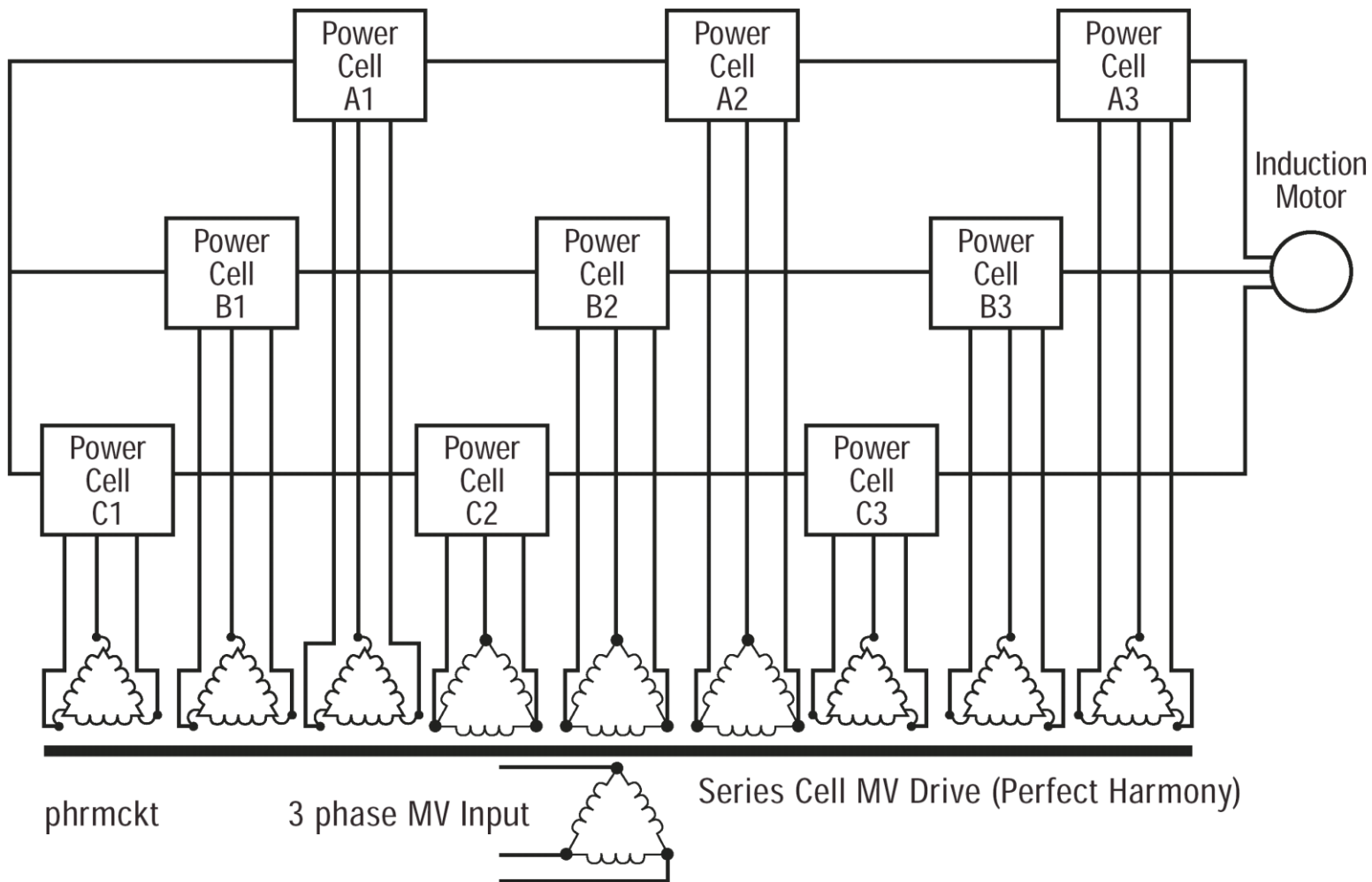
Postoje dve osnovne topologije pretvarača:

- redna multićelijska veza (*Series power cell*)
- Multilevel ili sa *invertorskim mostovima sa diodama klampovanom (naponski ograničenom) srednjom tačkom*

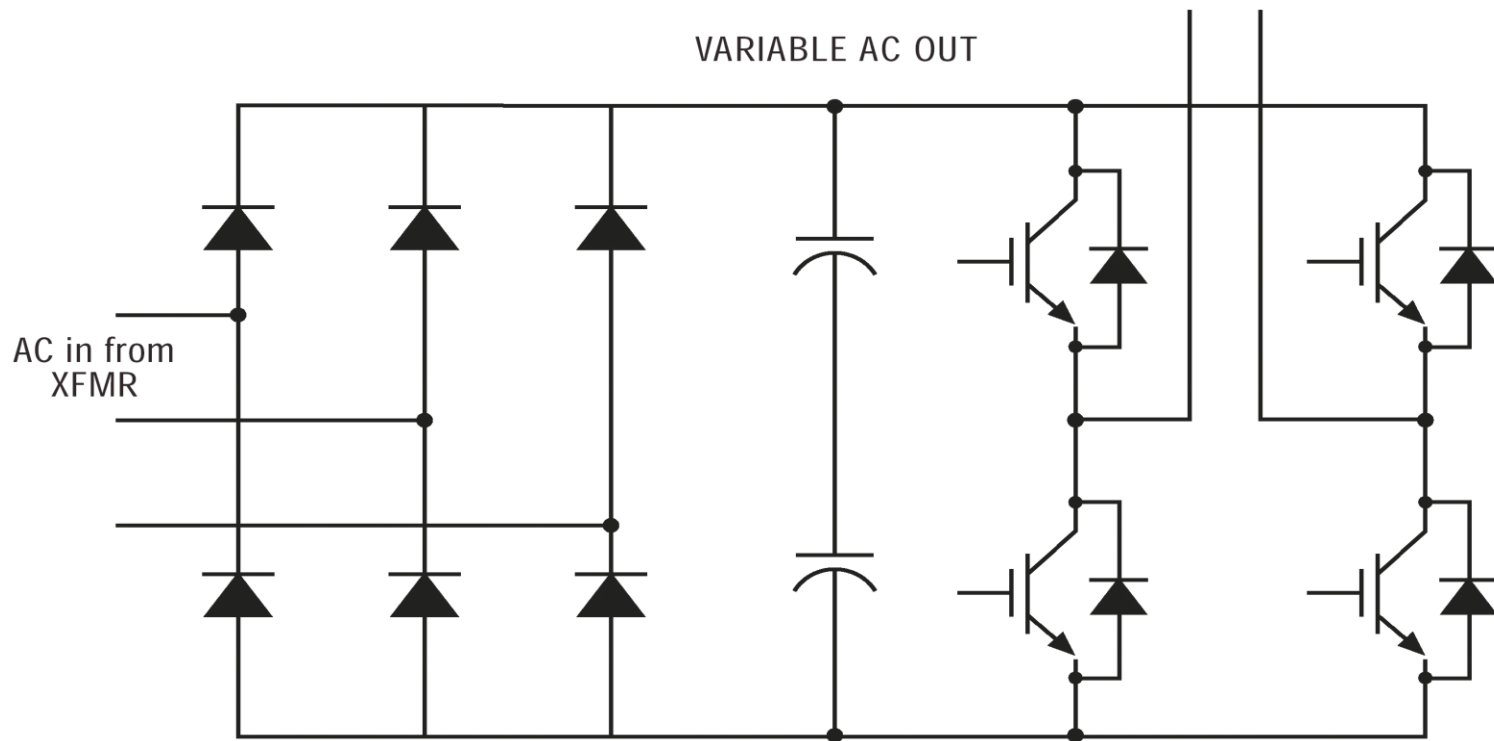
## Redna multićelijska topologija

- *Novija rešenja srednjenaponskih frekventnih pretvarača čiji su predstavnici firme MITSUBISHI , TMEIC, MAIDAN, YASKAWA (Japan), HYUNDAI (J. Koreja) i ROBICON (Nemačka) baziraju se na rešenju koje se sastoji od niza izolovanih monofaznih invertora koji generišu sinusno modulisane PWM napone koji se dalje slažu u trofazni sistem srednjeg napona za napajanje kaveznog motora. Sad je postao ROBICON – SIEMENS.*
- *Koncept topologije invertora za srednji napon, koji se sastoji od nekoliko izolovanih monofaznih invertora, koji generišu zvezdu srednjenaponskih fazora, je poznat pod nazivom »perfect harmony« ili inverter sa redno vezanim ćelijama.*





Redno složeni višenaponski inverter



Jedna energetska ćelija iz niza u redno složenom višenaponskom invertoru

Pošto se izolovani monofazni invertori napajaju sa više sekundara jednog srednjenaponskog transformatora, postignuto je vrlo dobro slaganje ulaznih struja pojedinih jedinica u skoro sinusoidalni talasni oblik ulazne struje, pa je uticaj na mrežu mali. Važna prednost je i da nisu potrebni specijalno izolovani motori kad se koristi tehnika višestepene PWM modulacije, pošto je naprezanje izolacije motora manje, nego kod starijih rešenja.

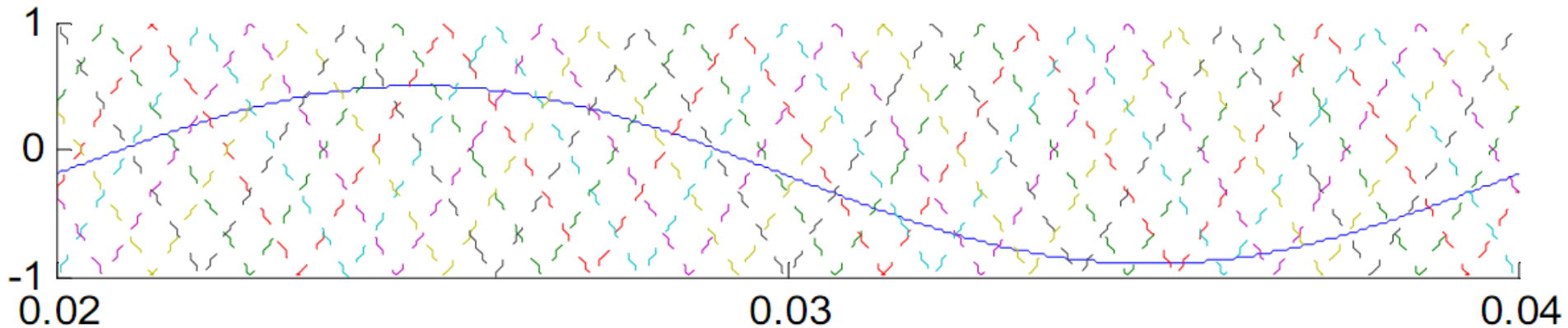
ZNAČI, ne može direktno da se primeni PWM modulacija sa tri nivoa, kao kod niskonaponskih rešenja, zbog uticaja na izolaciju motora (veliki  $du/dt$ ).

Takođe, osim pretvaračkih ćelija potreban je i složen ulazni transformator, težak i košta.

ALI, nema rekuperacije energije nazad u napojnu mrežu.

Svaka ćelija ima isti signal referentne PWM sinusoide, ali su trougaoni noseći talasi POMERENI

(a) PWM Reference signal  $n$  (solid) and interleaved carriers (dotted)



**Tako je izbegnuto da istovremeno komutuju prekidači u više redno vezanih ćelija!!!!**

# Princip slaganja izlaznog napona pomoću redne veze energetskih ćelija

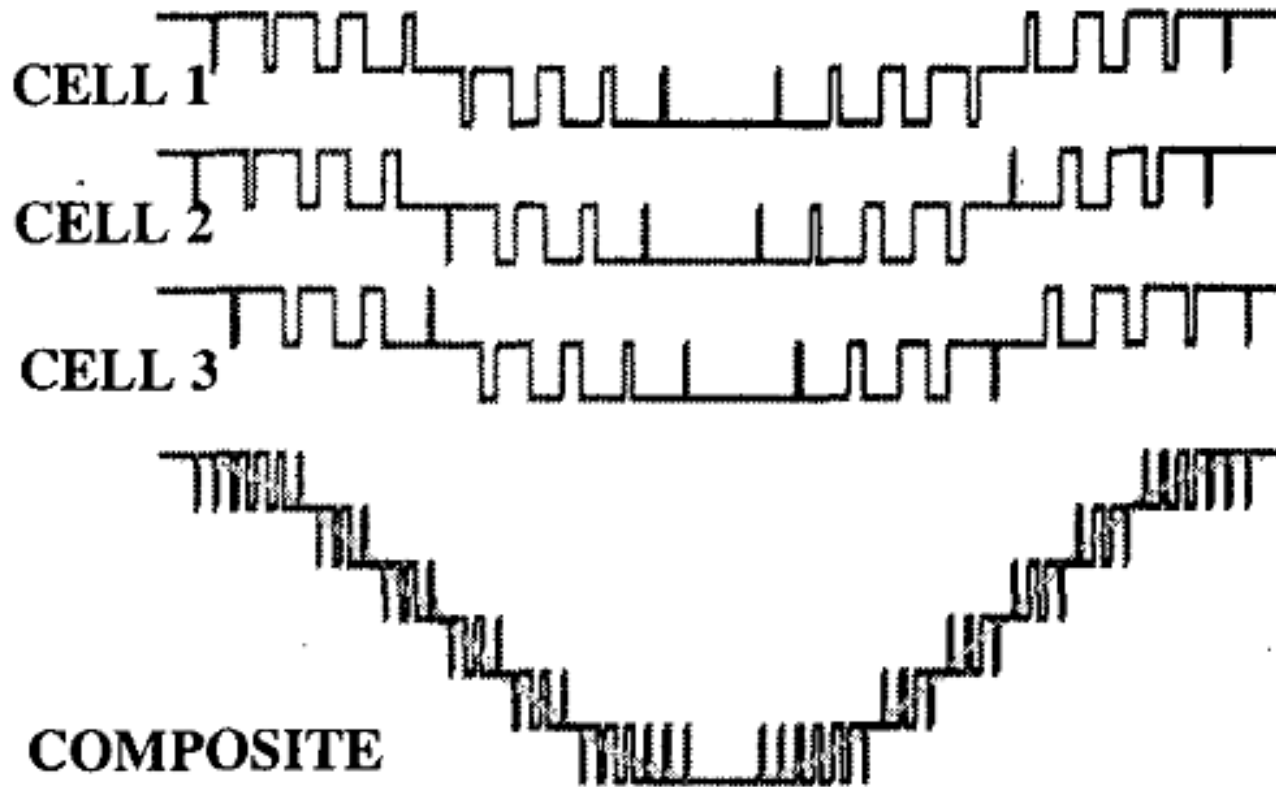
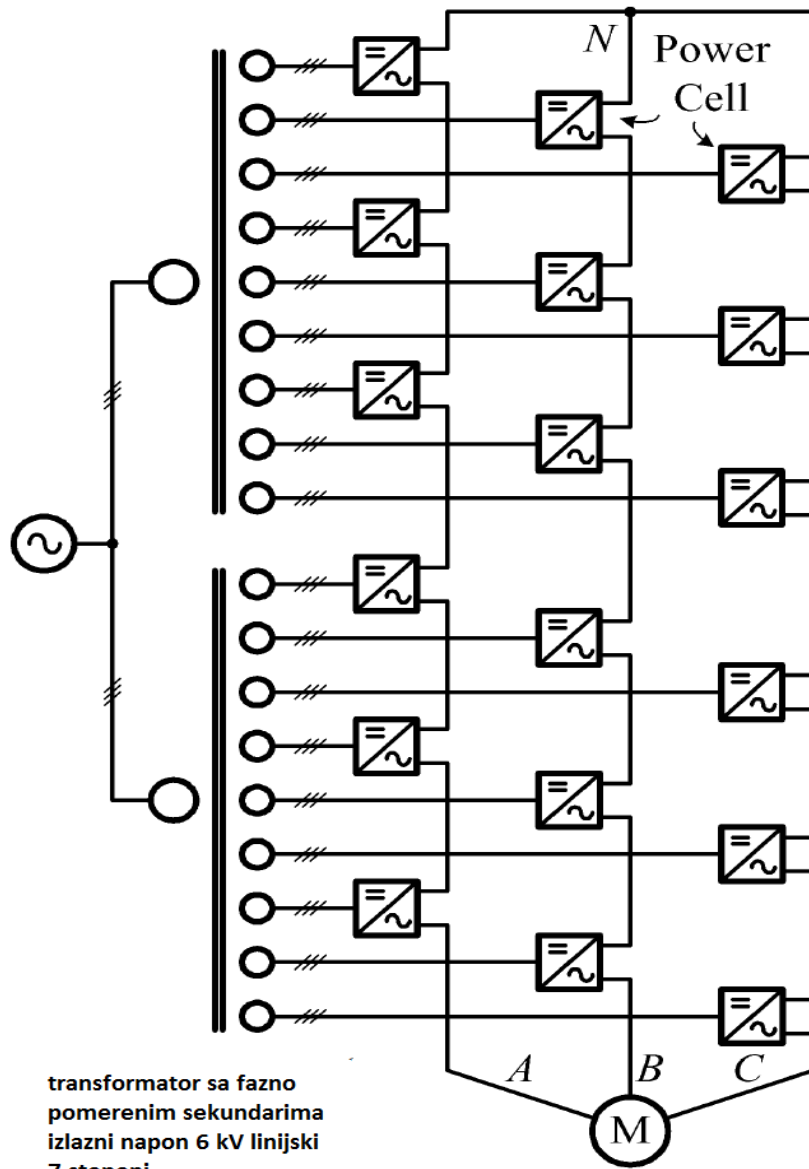


Figure 10 Harmonic Cancellation in Output Voltage

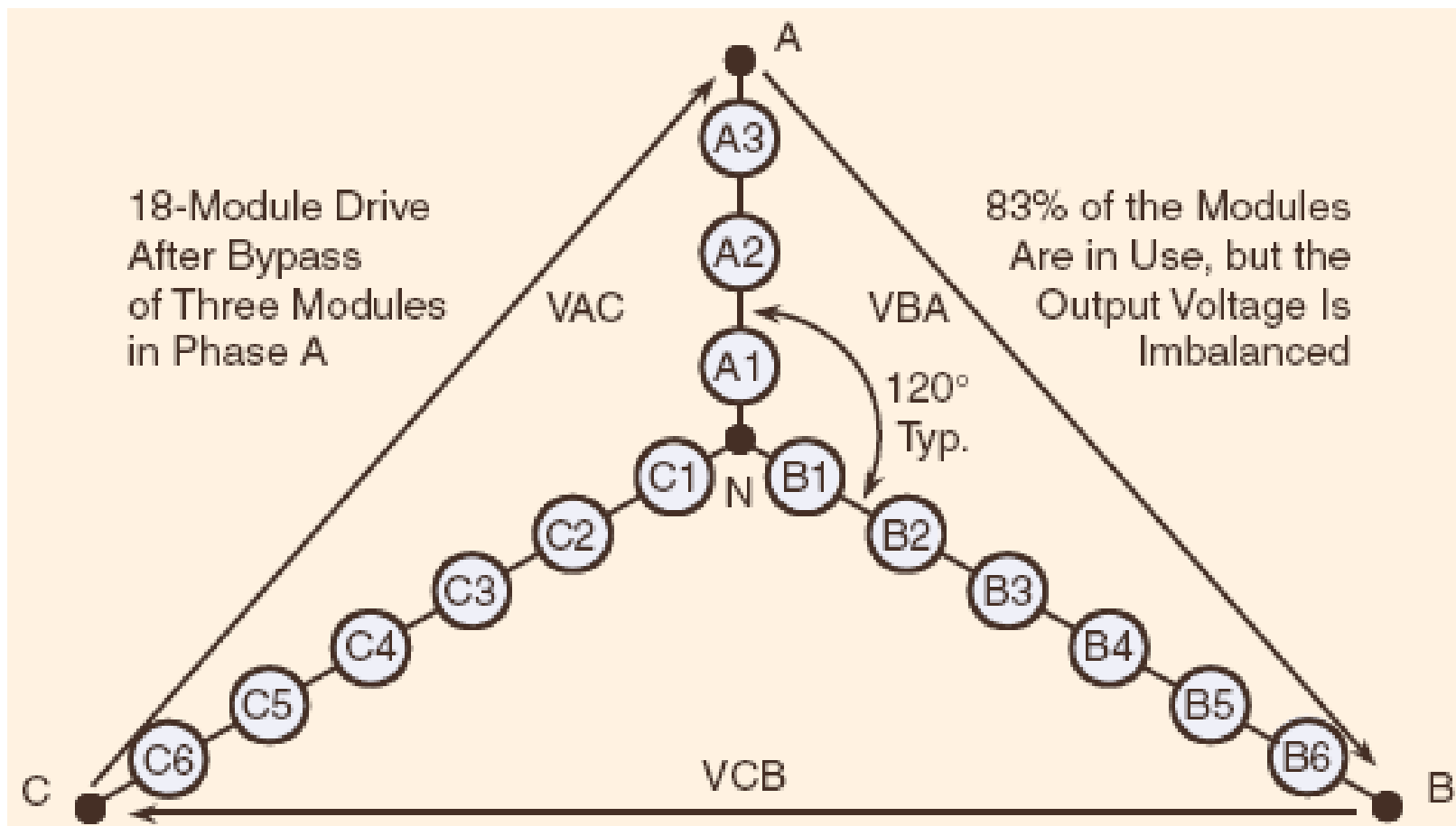


transformator sa fazno pomerenim sekundarima izlazni napon 6 kV linijski 7 stepeni

Osnovne prednosti ove topologije su:

- Izlazni napon u opsegu 2,3 – 13,8 kV je direktno raspoloživ;
- Ulazni filter ili kompenzacija faktora snage se ne zahtevaju;
- Velika redundansa obezbeđena ćelijskom strukturom pogona pri čemu se automatski isključuje neispravna ćelija u roku od 250 ms. Pri tome pogon može bez prekida da nastavi sa radom sa nešto sniženim naponom;
- Nema uticaja na izolaciju motora pošto je integrisan izolacioni transformator;
- Moguće je koristiti kako nove tako i postojeće asinrone ili sinhronne motore sa servisnim faktorom 1,0 bez posebnih zahteva;
- Nema značajnih pulsacija momenta čak ni pri malim brzinama;
- Nema potrebe za skupim fleksibilnim spojnicama;
- Nema ograničenja u dužini kablova (zbog refleksije talasa, ali ima zbog pada napona);
- Opseg izlazne snage je 0,2 – 100 MVA;
- Maksimalna izlazna frekvencija je 330 Hz

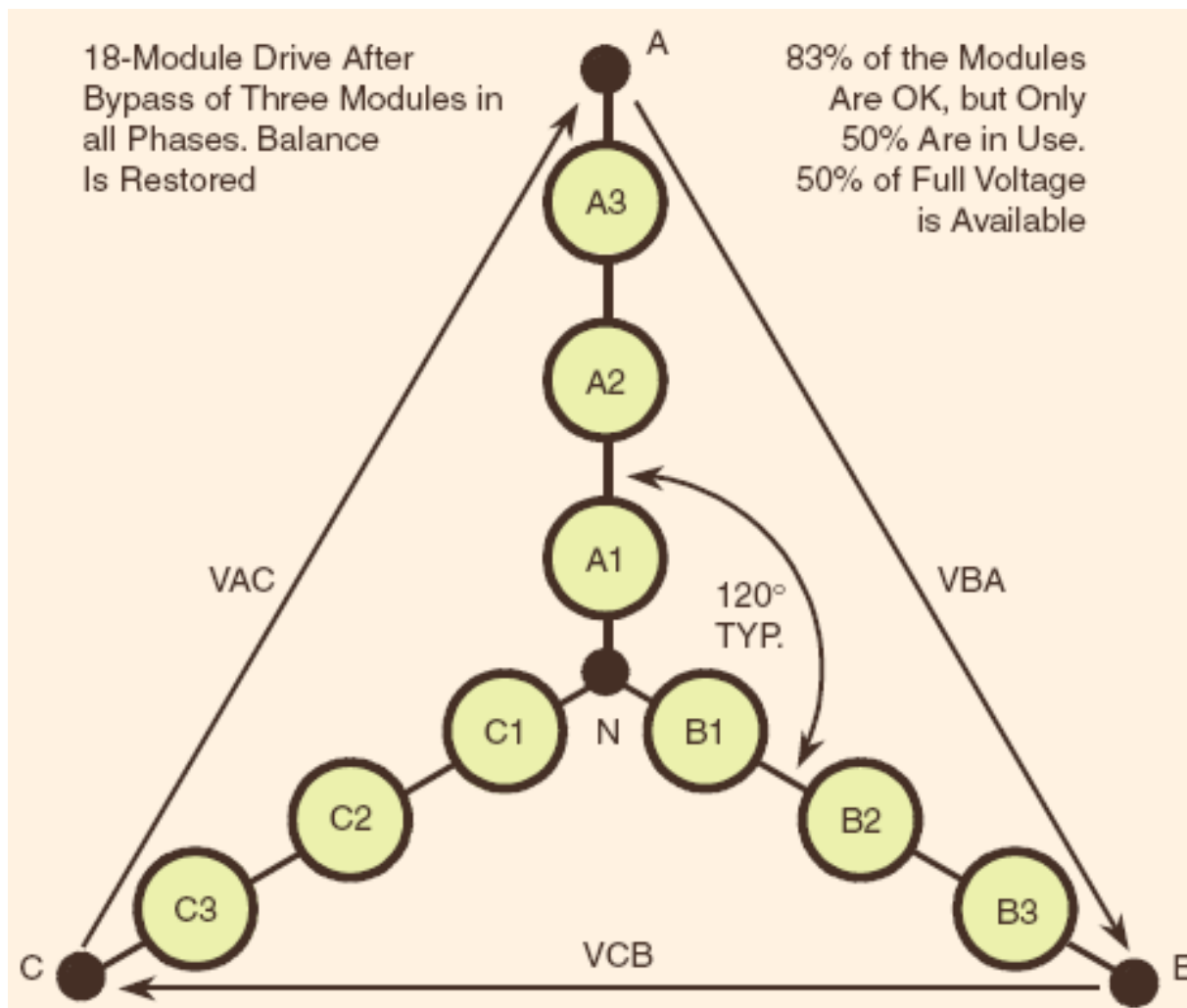
Način rada *multi power cell* topologije se može objasniti korišćenjem slike 13 na kojoj je prikazan slučaj kada je u invertoru sa 18 modula došlo do kvara na tri modula u fazi A.



Sl. 13: Pomeraj neutralne tačke u slučaju ispada tri ćelije invertora



Nakon toga je, radi uspostavljanja balansa, isključeno po tri modula iz preostale dve faze, tako da je raspoloživi napon 50% pri čemu pogon bez prekida nastavlja sa radom (slika 14).



Sl. 14: Pogon sa slike 13 nakon uspostavljenog balansa faza

Parametrisanje pogona je podržano odgovarajućim softverom proizvođača ...

PERFECT HARMONY 53

## CONTROL DRIVE TOOL

**Menu Structure Window**

- Drive parameters
- Speed setup
- Torque reference
- Speed-amp setup
- Control loop
- Spinning load
- Control loop setup
- Gain
- Spins handle
- Stability
- Input processing
- Output processing
- Line freq comp
- Flux control
- Speed loop
- Current loop
- Stator-resist
- Braking
- PI1 amp gain = 100.0
- PI1 output gain = 0.500
- Proportional-integral-derivative
- Output voltage scale = 0.000000
- Control loop test
- Slip constant = 1.50
- Dead time comp = 0.0100
- Field forward constant = 0.2
- Peak of rotor signal = 1.00V
- Carrier frequency = 10T.0Hz
- Aut
- Log
- Drive protect
- Monitor
- Communications
- Control
- Test mode function
- Show differences = Yes

**Graphics Window**

Per Unit

Seconds

**Drive Status Window**

Speed	Speed ref	Flux ref	Vd loss
None	20.75	20.75	0.5
0.5	0.5	0.5	1.1


ASI Robicon  
Industrial Power Control

Parametrisanje pogona je podržano odgovarajućim softverom proizvođača ...

PERFECT HARMONY 54

## CONTROL DRIVE TOOL

Edit a Parameter



The screenshot displays the 'Control Drive Tool' software interface. On the left, a tree view shows various drive parameters. A dialog box titled 'Parameter Edit' is open, showing the 'Pulse Frequency' parameter. The dialog includes fields for 'Current Value' (300.5), 'Minimum Value' (100.0), 'Maximum Value' (5000.0), and 'Default Value' (1735.1). A 'New Value' field is set to 300.5. The background shows a graph of 'Per Unit' vs 'Seconds' and a 'Status' section with various indicators.

Parameter	Value
Current Value	300.5
Minimum Value	100.0
Maximum Value	5000.0
Default Value	1735.1
New Value	300.5

ASI Robicon  
Industrial Power Control

Parametrisanje pogona je podržano odgovarajućim softverom proizvođača ...

## **CONTROL DRIVE TOOL**

### **Open Loop Sensorless Vector Control**

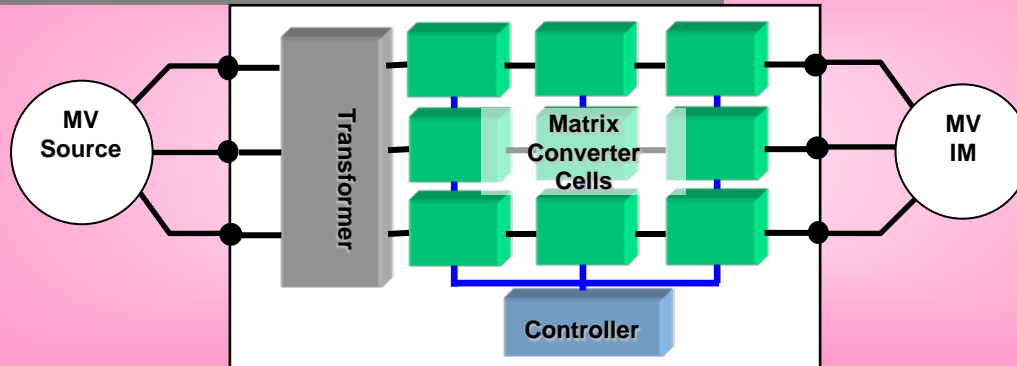
- **Motor-mounted Encoder NOT Required**
- **Duplicates Two Quadrant DC Operation**
- **Provides Precision Speed/Torque Control**
- **Fast Dynamic Response**
- **Low Speed/High Torque Capability**

Firma **Yaskawa** proizvodi multićelijske frekventne pretvarače i sa pretvaračkim ćelijama izrađenim u tehnologiji monofaznih matričnih konvertora, pa postoji mogućnost direktne rekuperacije energije nazad u napojnu mrežu.

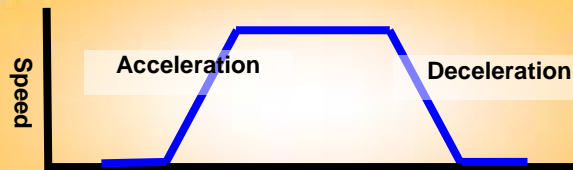
Naziv tih frekventnih pretvarača je Matrix Converter, prema matričnim konvertorima. Samo jedna firma nudi te pretvarače na tržištu.

# Šta je Matrix Converter ? - 2

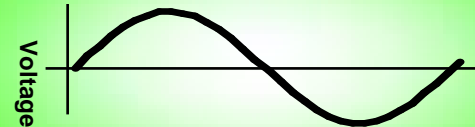
Medium Voltage Matrix Converter "FSDrive-MX1S"



Dynamic operation



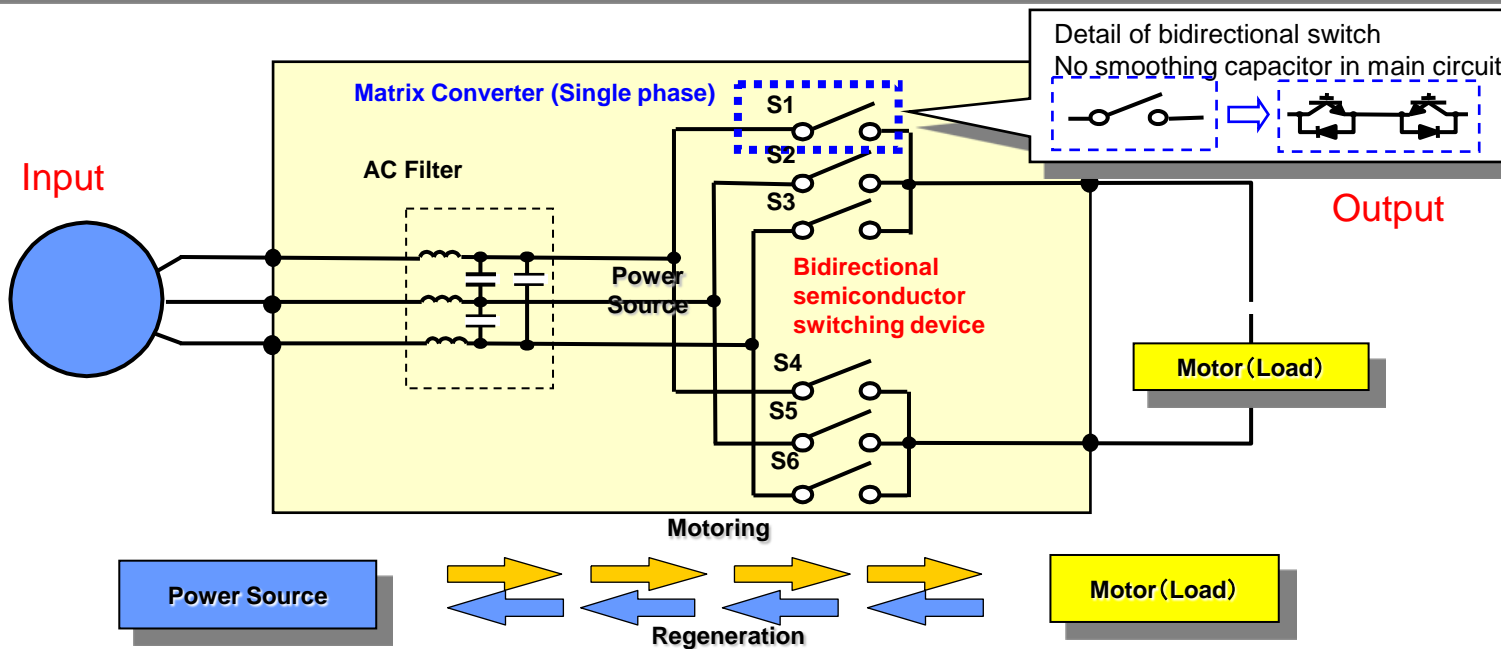
Low input harmonics and low surge voltage (Sinusoidal waveforms)



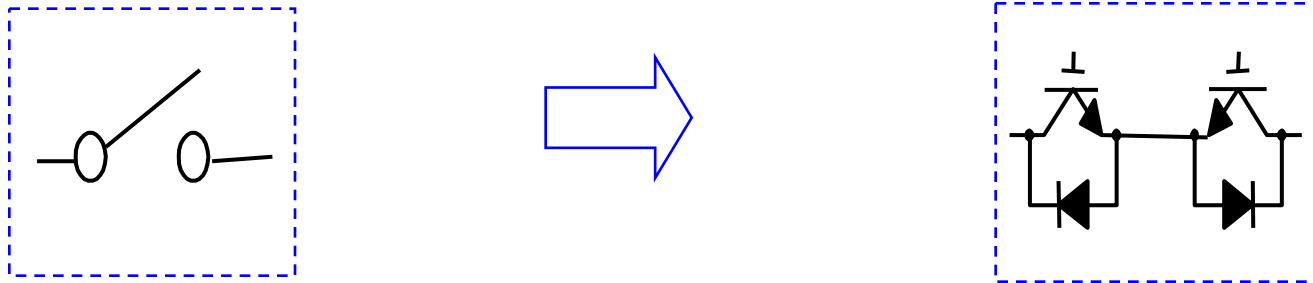
**Compatible of dynamic operation with sinusoidal waveforms.  
Matrix converter is suitable drive for any application / situation!!**

# Šta je Matrix Converter ? - 3

Matrix converter omogućava dobijanje proizvoljnog AC napona / frekvencije direktno iz napojne trofazne AC mreže. Smatra se da je "Next generation motor drive technology" zbog svojih izvrsnih karakteristika. AC-AC direktna konverzija bez jednosmernog međukola (potporni kondenzatori u jednosemrnom kolu pretvarača) omogućuje uštedu energije (mali gubici zbog prekidanja), dug životni vek pretvarača i uštedu u prostoru na mestu instalacije. Motorni i regenerativni režim rada između napojne mreže i motora se može jednostavno regulisati uključivanjem i isključivanjem bidirekcionih poluprovodničkih prekidača prema odgovarajućoj kontroli Impulsno Širinsko Modulacijom (Pulse Width Modulation - PWM). Metodi PWM modulacije za ovu namenu - Venturini i Laslo Huber.



# Bidirekcionni poluprovodnički prekidač

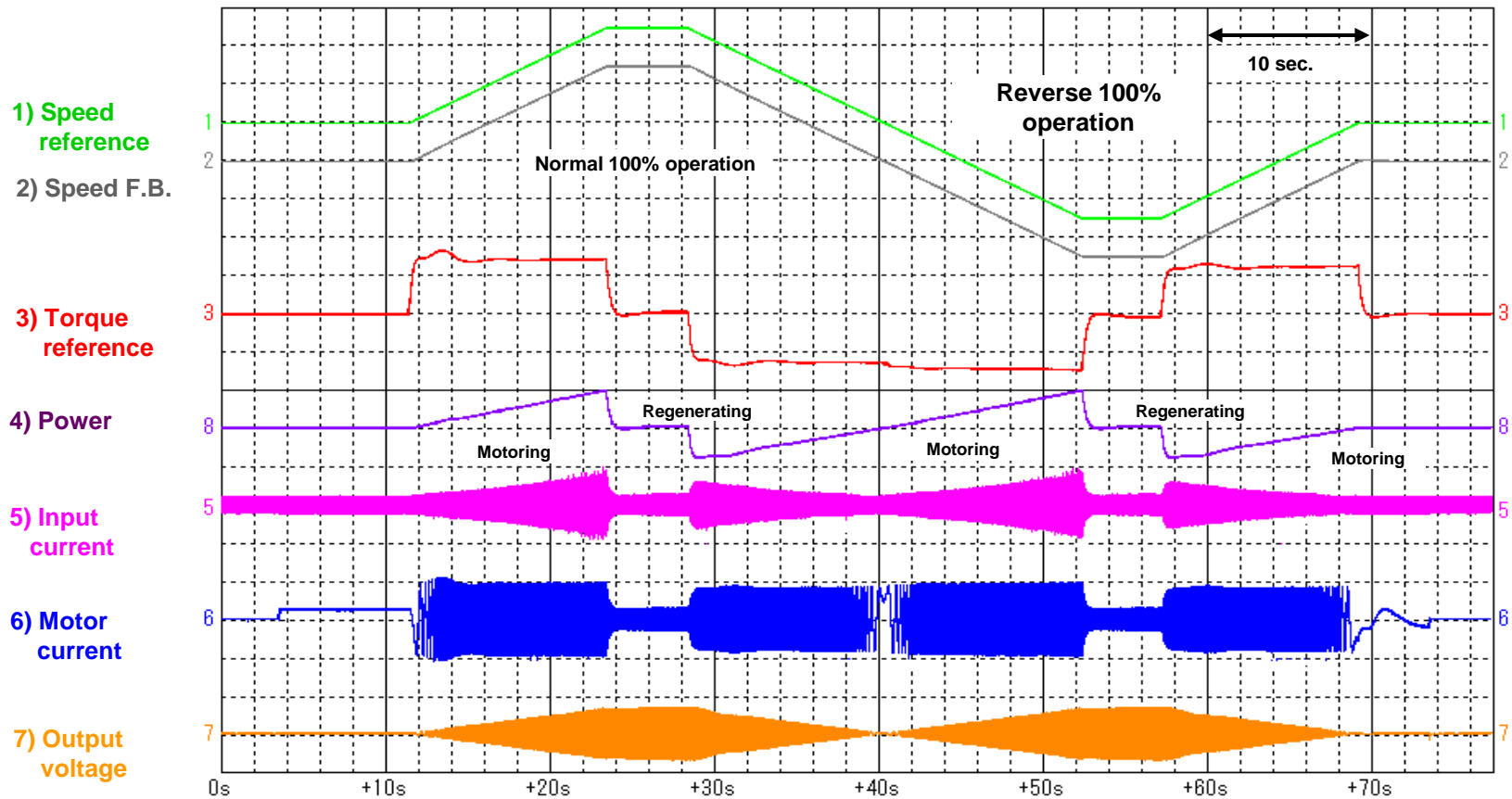


Realizacija sa dva HV IGBT tranzistora - znači duplo više poluprovodnika i veću cena u odnosu na neregenerativnu konfiguraciju.

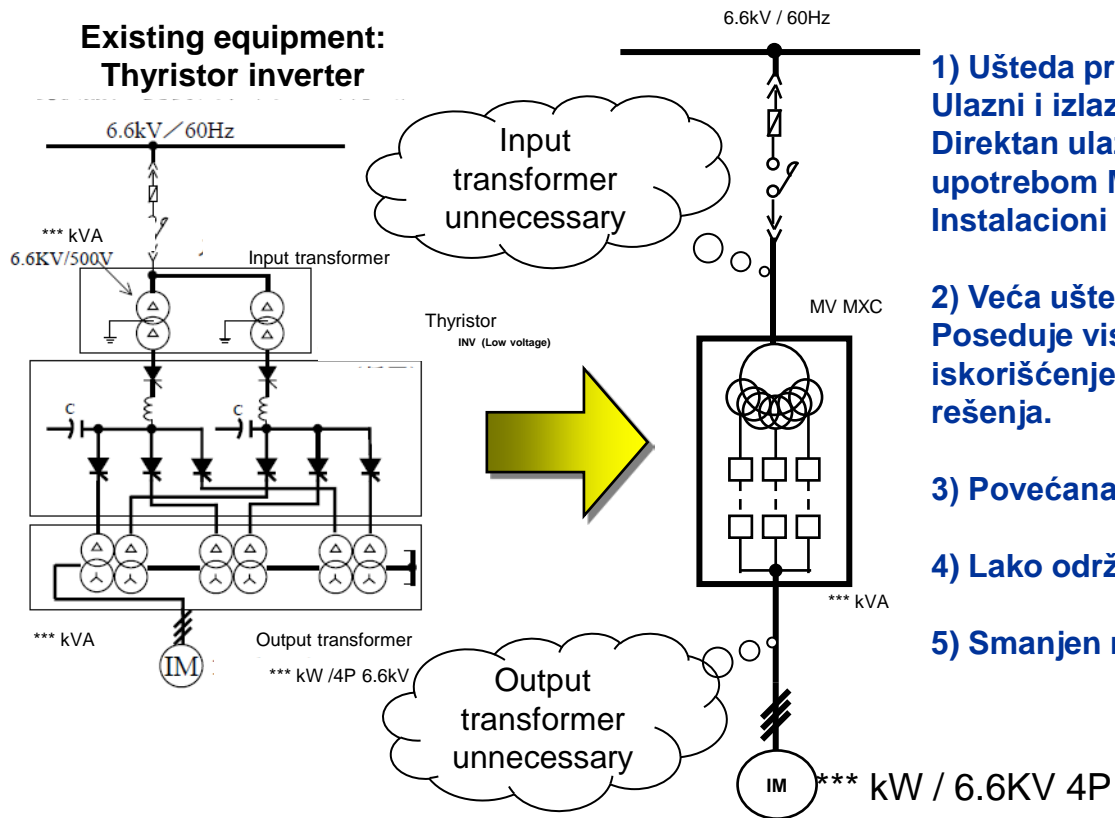


# Četvorokvadrantni rad

- Četvorokvadrantni rad
- Paralelna povratna veza do reference brzine (Dobre mogućnosti sleđenja brzine)
- Linearni (gladak) prelaz iz motornog režima rada u regeneraciju.



## Prednosti korišćenja Matrix converter-a



**1) Ušteda prostora**  
Ulazni i izlazni transformatori nisu potrebni. Direktni ulaz i izlaz srednjeg napona je moguć upotrebom MV matrix converter-a. Instalacioni prostor upola manji.

**2) Veća ušteda energije**  
Posедуje visoki ulazni faktor snage i visoko iskorišćenje u odnosu na stara tiristorska rešenja.

**3) Povećana pouzdanost**

**4) Lako održavanje**

**5) Smanjen nivo harmonika**

# Yaskawa



## Multilevel topologija srednjenaponskog pretvarača

- zasnovana *na invertorskim mostovima sa diodama klampovanom (naponski ograničenom) srednjom tačkom i višestepenom PWM modulacijom (složena struktura prekidača).*
- Poznati proizvođači su Siemens (SIMOVERT, SINAMICS) i ABB (ACS 2000).
- Kao naslednik SIEMENS-ove serije SIMOVERT izrađen je frekventni pretvarač SINAMICS GM150, projektovan kao univerzalni i jednostavni konvertor za jednomotorne aplikacije za pogonske mašine sa promenljivim i konstantnim momentom opterećenja, ali bez mogućnosti regeneracije u mrežu.
- Svaki prekidač, ovde HV IGBT tranzistor podnosi samo deo napona, a ne puni napon jednosmernog međukola.

3 AC 50/60 Hz 2,3 kV bis 36 kV

Leistungsschalter

Umrichtertransformator

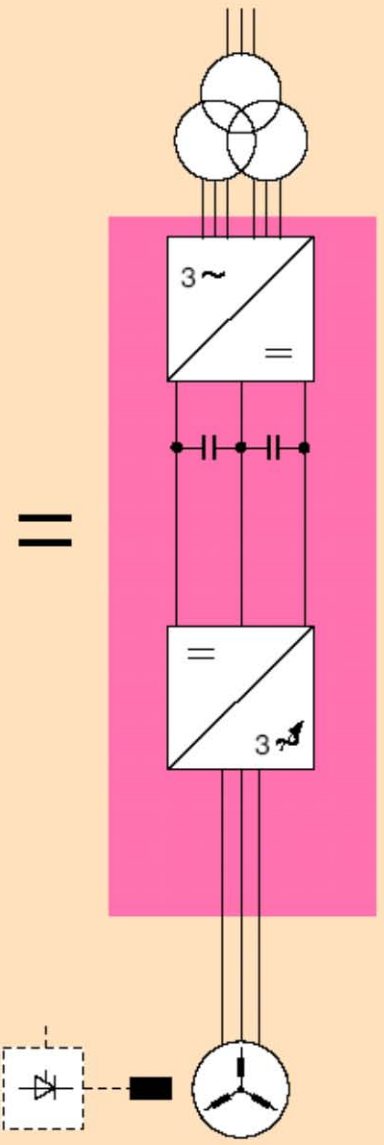
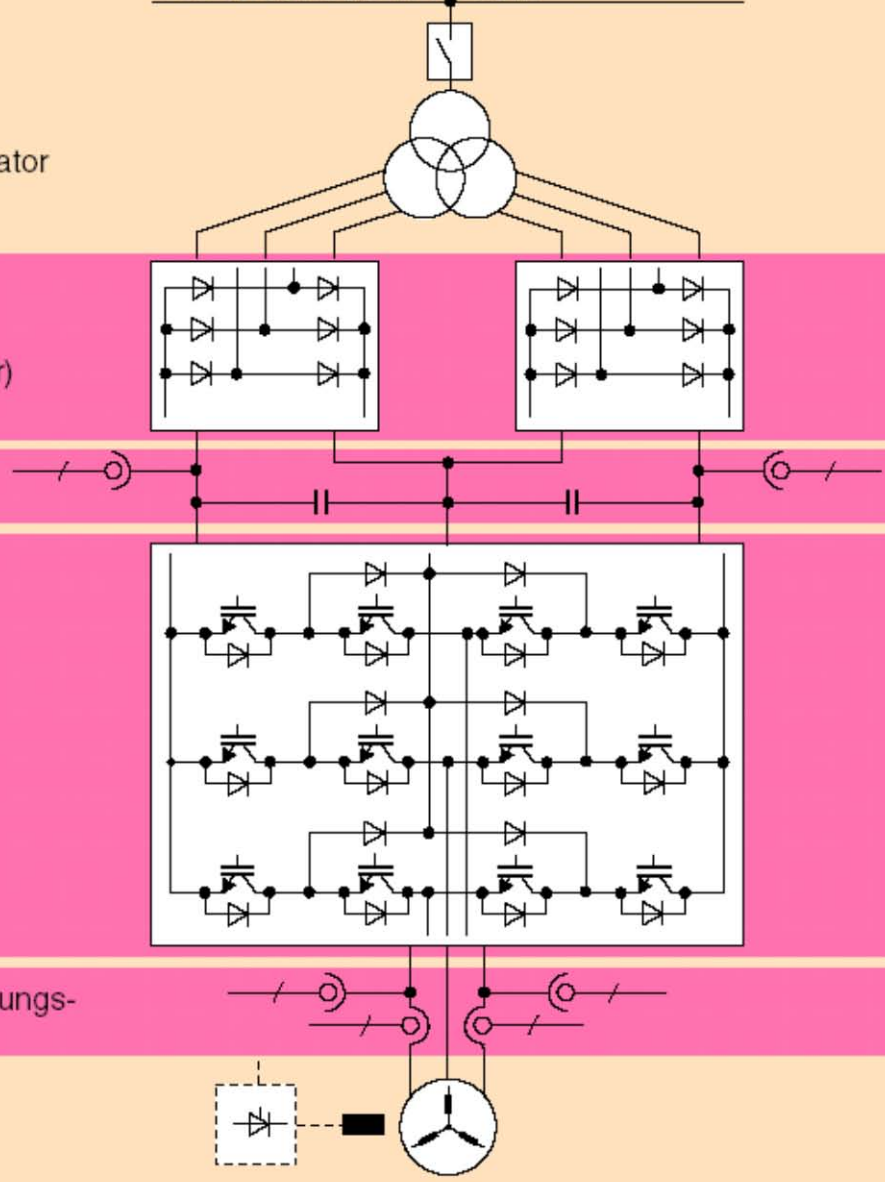
Basic Line Module  
(Diodengleichrichter)

Zwischenkreis-  
kondensatoren

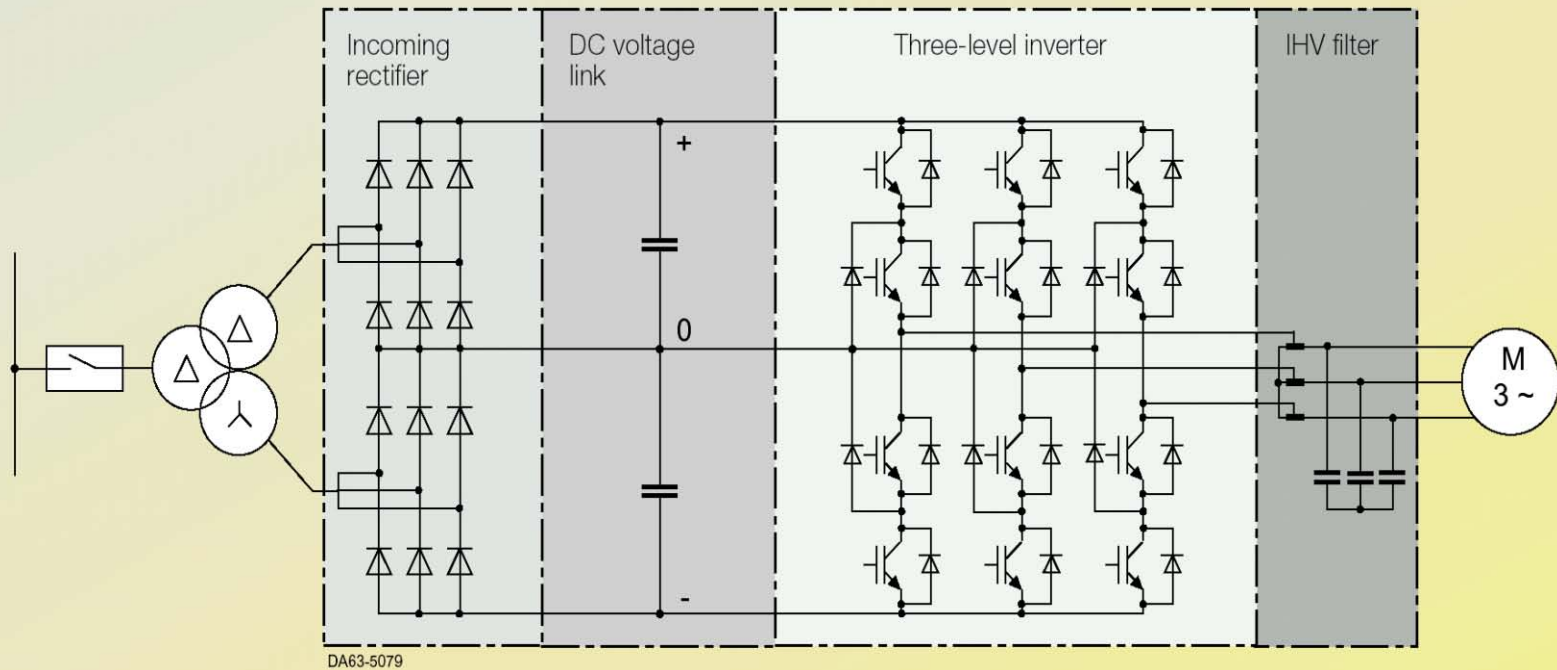
Motor Module  
mit HV-IGBTs

Motorseitige Spannungs-  
und Stromwandler

Motor



SINAMICS GM150 (IGBT) se može optimalno upotrebiti u zajednici sa srednjenaponskim asinhronim motorima za invertorsko napajanje, Siemensove proizvodnje. U tom slučaju sinusni filteri na izlazu konvertora nisu potrebni i tako se dobija vrlo kompetitivno, kompaktno i efikasno rešenje pogona. Sa opcionim sinusoidalnim izlaznim filterom konvertor ima najbolje mogućnosti za rad sa standardnim srednjenaponskim motorima i tako je optimalno prilagođen za rekonstruisane pogone stalne brzine koji treba da postanu pogoni promenljive brzine obrtanja sa već postojećim instalacijama. Energetska sekcija je izvedena sa HV-IGBT tehnologijom, tako da se mogu postići nazivne snage invertora do 10 MVA, dok se IGCT tehnologija poluprovodnika u invertoru koristi za nazivne snage od 10 MVA naviše do 28 MVA (oznaka SINAMICS SM150).

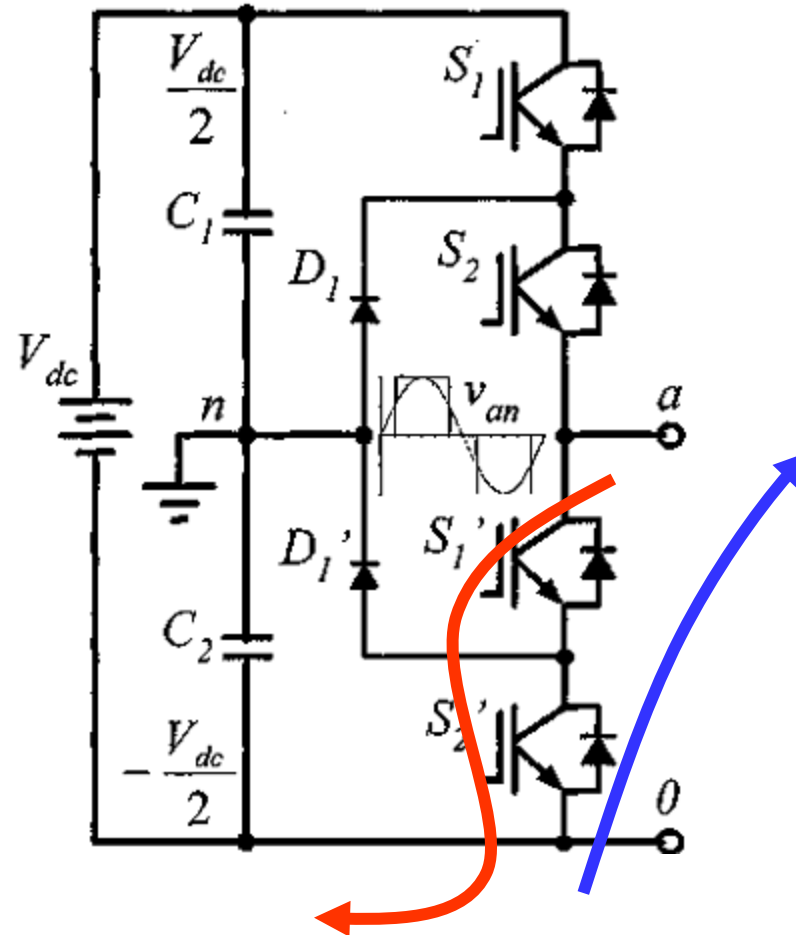


**Srednjenaponski *multilevel* pretvarač firme SIEMENS**

## Princip rada three-level mosta

$S_1'$  on,  $S_2'$  on

$$V_{a0} = 0$$



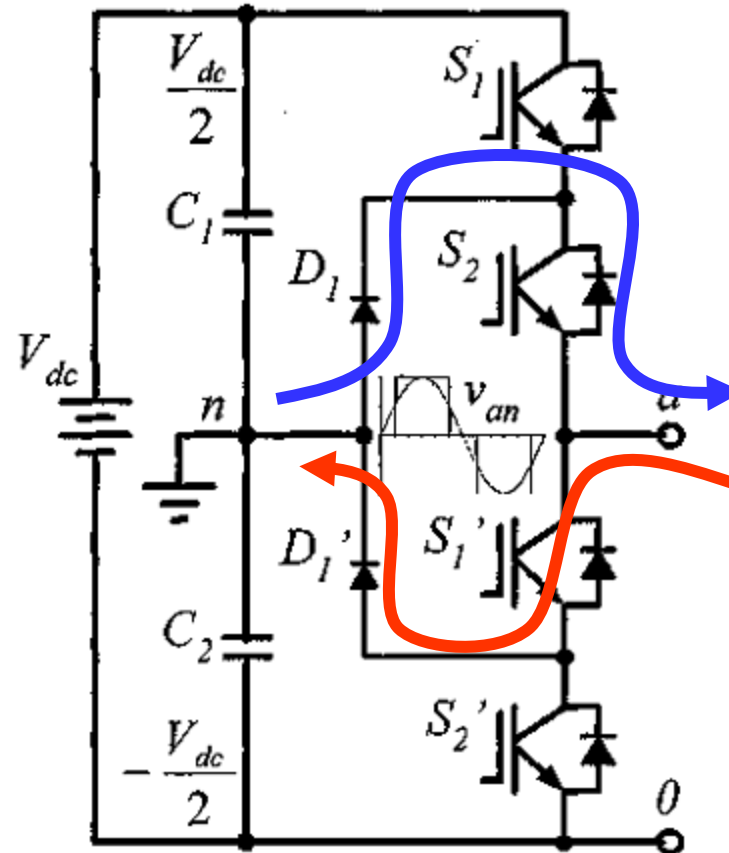
napon na prekidačima  $S_1$  i  $S_2$  ne može biti veći od  $V_{dc}/2$ , zbog dioda



## Princip rada three-level mosta

$S_1'$  on,  $S_2$  on

$$V_{a0} = V_{dc}/2$$

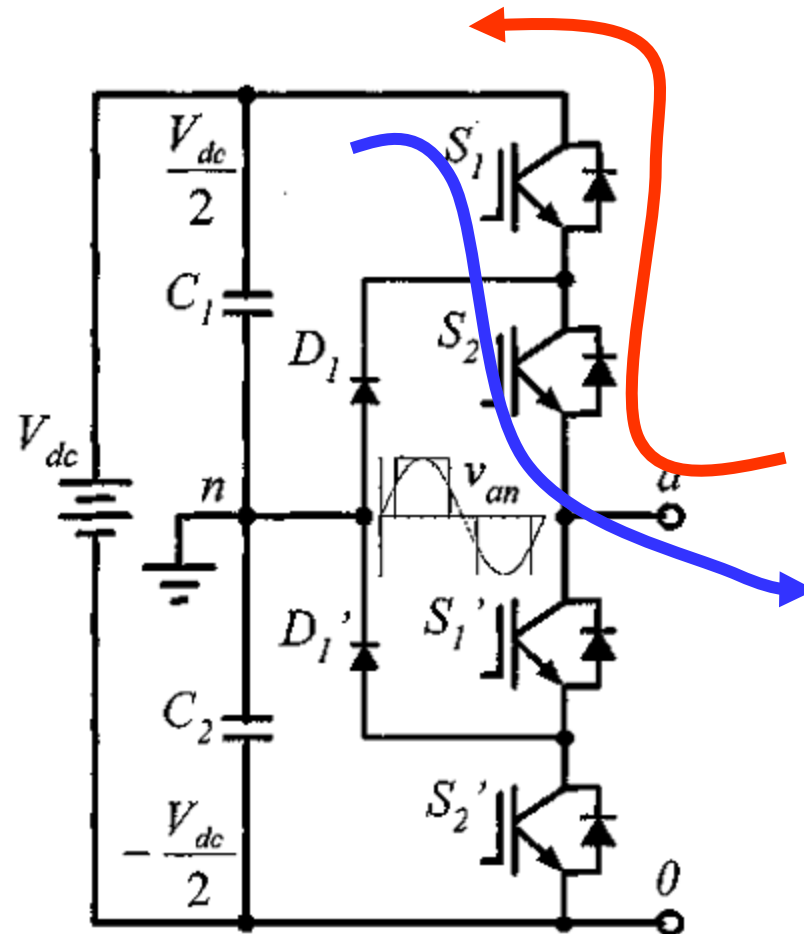


napon na prekidačima  $S_1$  i  $S_2'$  ne može biti veći od  $V_{dc}/2$ , zbog dioda

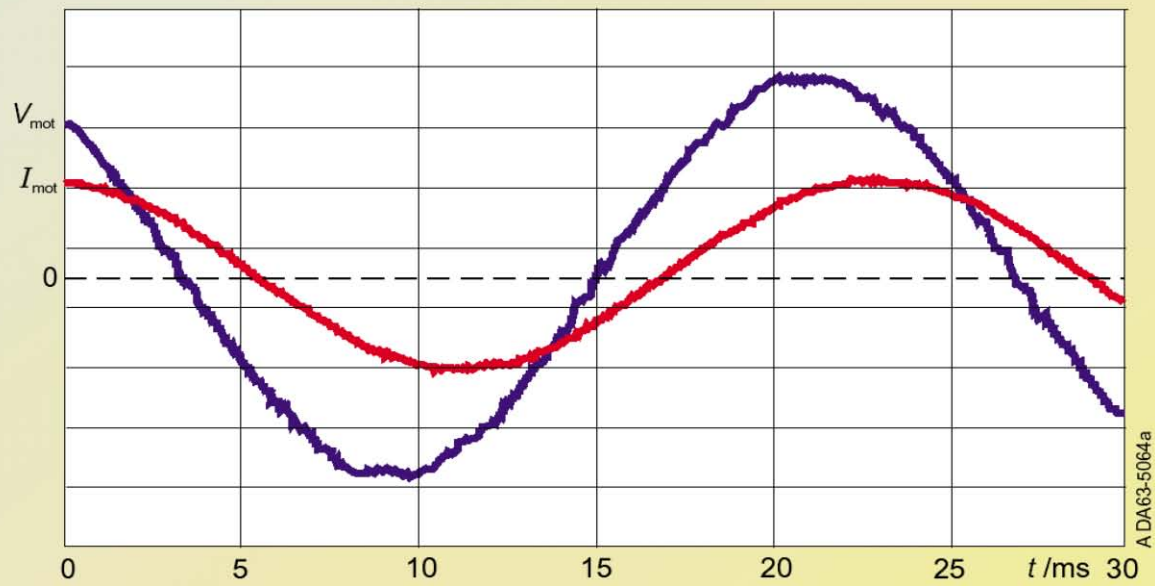
# Princip rada three-level mosta

$S_1$  on,  $S_2$  on

$$V_{a0} = V_{dc}$$



napon na prekidačima  $S_1'$  i  $S_2'$  ne može biti veći od  $V_{dc}/2$ , zbog dioda



**Talasni oblici struje i napona kod SIEMENS-ovog pretvarača**

- Tipične karakteristike navedenog pogona za naponski nivo 6 kV su:
- Ulazni napon pretvarača je 2x1,2 kV (ispred transformatora);
- Tolerancija ulaznog napona je  $\pm 10\%$ ;
- Frekvencija ulaznog napona je 50 Hz  $\pm 3\%$ ;
- Faktor snage ulaznog napajanja (prvi harmonik)  $>0,96$ ;
- Maksimalna izlazna frekvencija je 66 Hz;
- Tačnost brzine je  $0,4 \cdot f_{klizanja}$  (za  $n > 10\%$ ), odnosno  $f_{klizanja}$  (za  $n < 5\%$ );
- Tačnost momenta u opsegu konstantnog fluksa je 2,5% (za  $n > 10\%$ );
- Vreme uspostavljanja momenta je oko 8 ms (za  $n > 10\%$ );
- Talasnost izlaznog momenta je 2%.

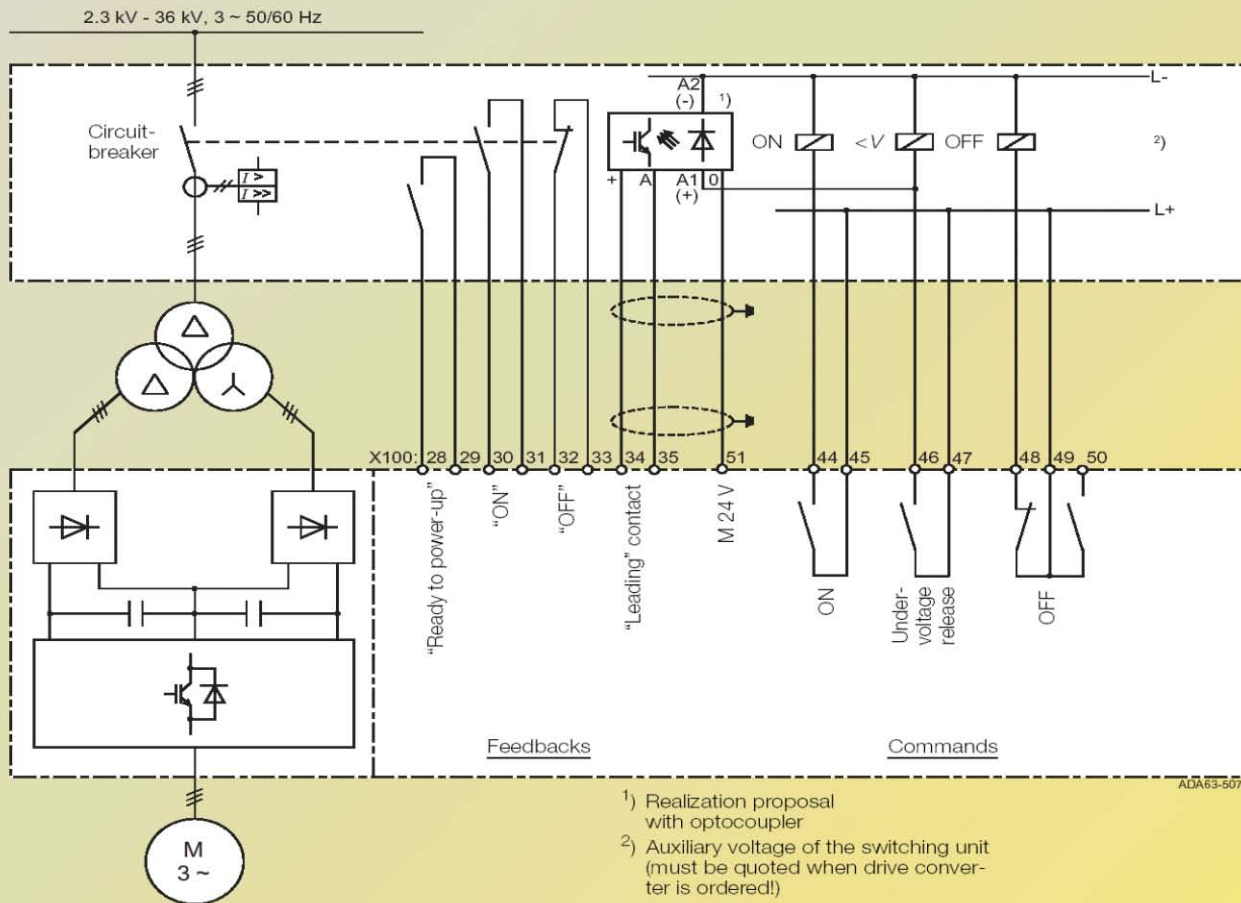
- Primenom navedenog pretvarača postojeći motori predviđeni za pogon sa stalnom brzinom obrtanja se mogu pretvoriti u pogone sa promenljivom brzinom obrtanja pri čemu se:
- Postojeći (standardni) srednjenaponski motor može napajati iz frekventnog pretvarača bez redukovanja nazivne snage pošto nema generisanja dodatnih gubitaka u motoru,
- Nema potrebe za bilo kakvim mehaničkim izmenama na pogonjenoj mašini,
- Koriste se postojeći kablovi, nema potrebe za bilo kakvim izmenama,
- Nema potrebe stavljati dodatne prigušnice na izlaz frekventnog regulatora kada se koriste dugi kablovi.

- Važno je uzeti u obzir da su SIEMENS-ovi srednjenaponski frekventni pretvarači predviđeni za upotrebu **samo** za pogone sa kvadratnom zavisnošću pogonskog momenta od brzine. Dozvoljeni opseg brzine je 1:10 pri čemu je maksimalna izlazna frekvencija 66 Hz. Nazivna frekvencija motora se mora nalaziti u opsegu od 30 Hz do 60 Hz.
- Pogoni sa kvadratnom zavisnošću momenta od brzine, kao što su pumpe i ventiltori, zahtevaju pun momenat na nazivnoj brzini. Kod takvih pogona se u principu ne javlja povišen polazni momenat ili udar tereta. Zbog toga se takav frekventni pretvarač ne dimenzioniše za preopterećenje u toku rada. Nazivna struja frekventnog pretvarača mora u tim pogonima biti takva da je najmanje jednaka struji motora koja se ima pri punom opterećenju u zadatoj radnoj tački.

- Ako pogon treba da radi sa frekvencijama napojnog napona **iznad nazivne frekvencije  $f_n$** , tad motor radi u režimu slabljenja polja. U tom slučaju raspoloživi momenat na vratilu motora opada približno sa **odnosom  $f_n / f$ , a momenat opterećenja ostaje konstantan**.
- Takođe, potrebno je zadržati marginu od oko 30% u odnosu na prevalni momenat motora, koji takođe opada prema  $(f_n / f)^2$ .
- Izbor frekventnog pretvarača i motora za pogon stalnog momenta ( $T_e = \text{const.}$ ) je najbolje uraditi ako nema drugog zahteva tako da se polazeći od dozvoljenog momenta **za pogon tipa S1 predvidi preopterećenje od 50% koje može da traje do 60 sec**. To znači da ima dovoljno rezerve za momenat ubrzavanja. Na taj način, osnovna struja kojom je opterećen frekventni pretvarač treba da bude najmanje jednaka struji motora pri punom momentu u tako zahtevanoj radnoj tački.

- Brzi pogoni napajani iz konvertora, sa dvopolnim motorima zahtevaju preduzimanje specijalnih mera koje zavise od karakteristika menahičkog dizajna (granična i kritična brzina, ležajevi, dizajn rotora, pričvršćenje za temelje). Pri upotrebi takvih motora za pogone promenljive brzine obrtanja mora se dobiti mišljenje proizvođača motora. **Pri rekonstrukciji postojećeg pogona motor ne sme da poseduje mehaničke rezonantne frekvencije u opsegu frekvencija od interesa. Ako je potrebno, određeni opsezi brzina mogu biti preskočeni.** Kao kod NN regulisanih pogona.





## Povezivanje spoljnih signala u kolo isključenja prekidača

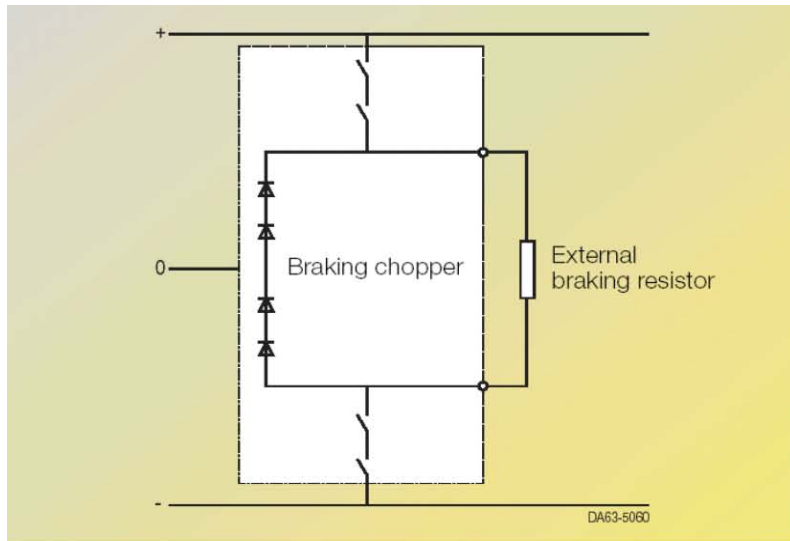


Fig. 6/14  
Block diagram of braking chopper with braking resistor

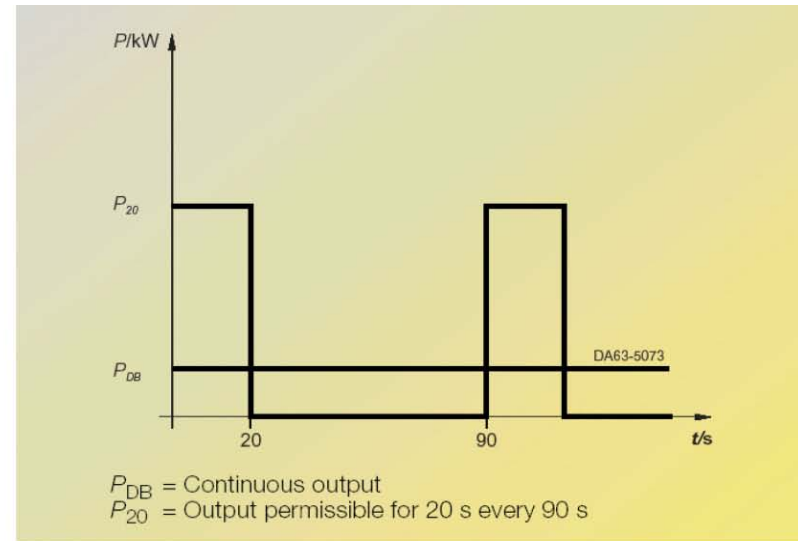
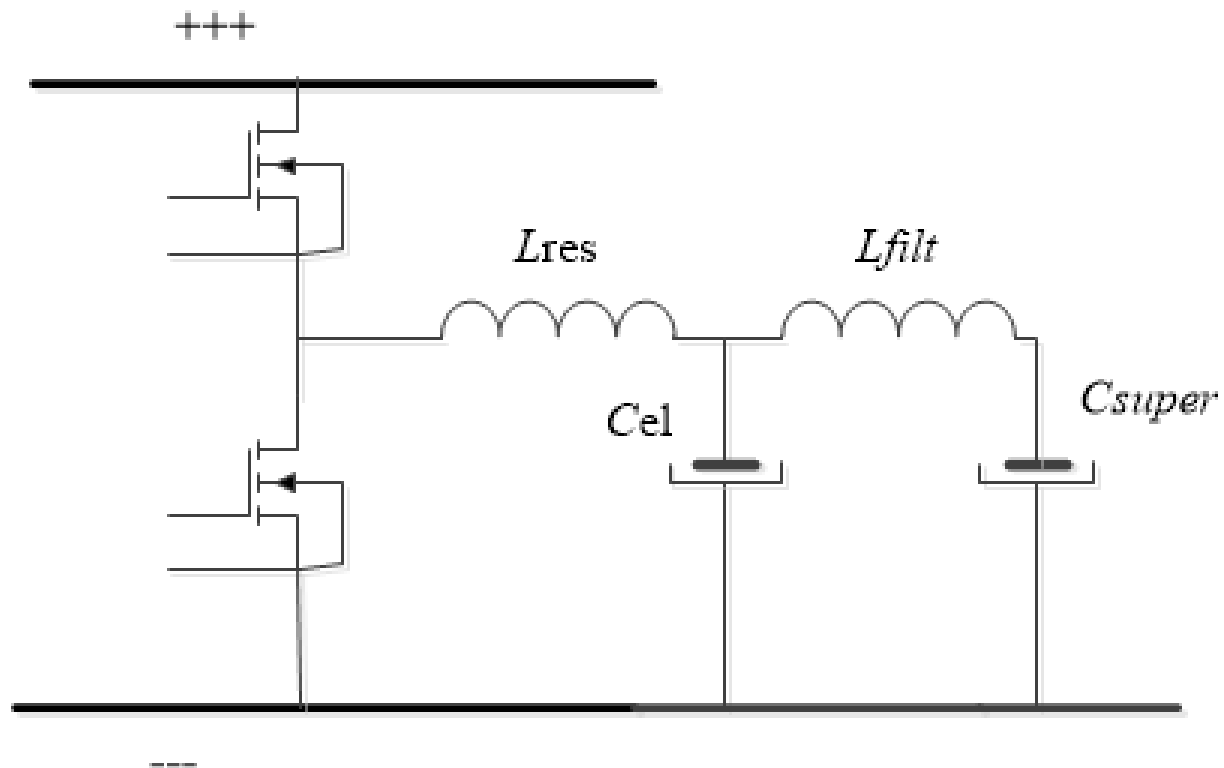


Fig. 6/15  
Load diagram

**Blok dijagram čopera za kočenje (levo) i dijagram opterećenja (desno). Dosta proizvođača ne predviđa mogućnost povezivanja otpora za kočenje, što je inače standardni pristup u NN regulisanim pogonima.**

**Sada umesto čopera za kočenje stavljaju superkapacitore i rezonantne čopere, bidirekciono, radi uštede energije, doduše na NN.**



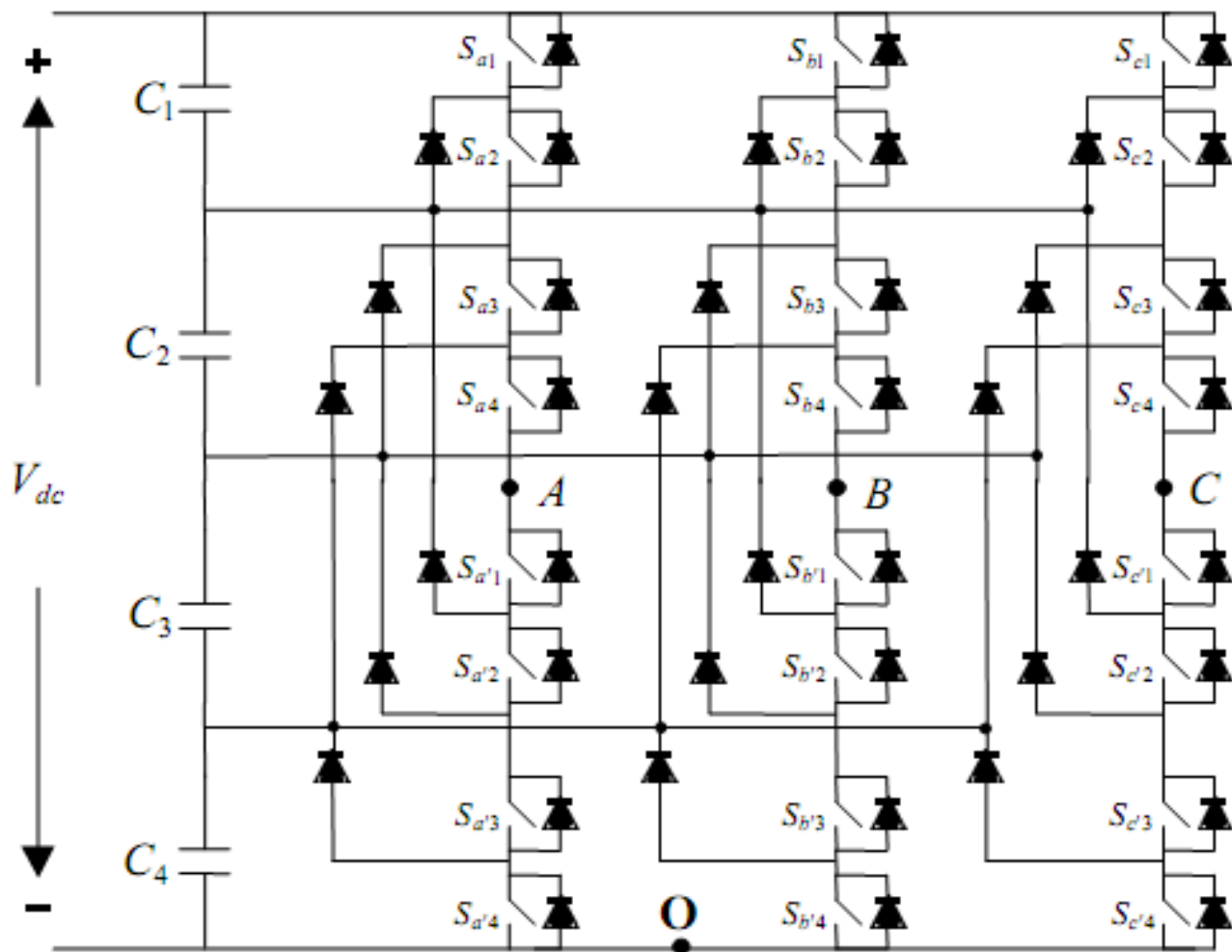
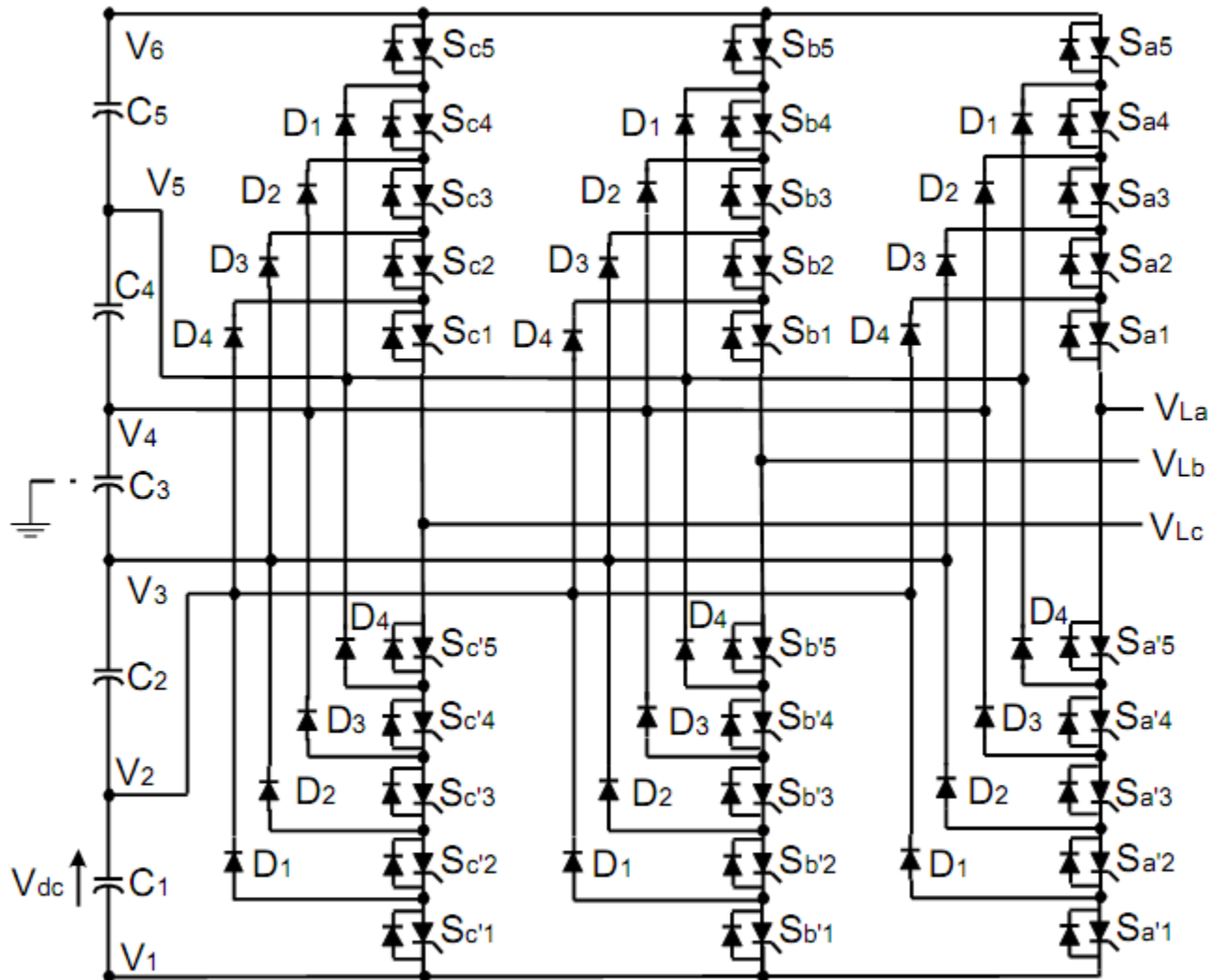


Figure 1.5 A three-phase five-level diode-clamped inverter.

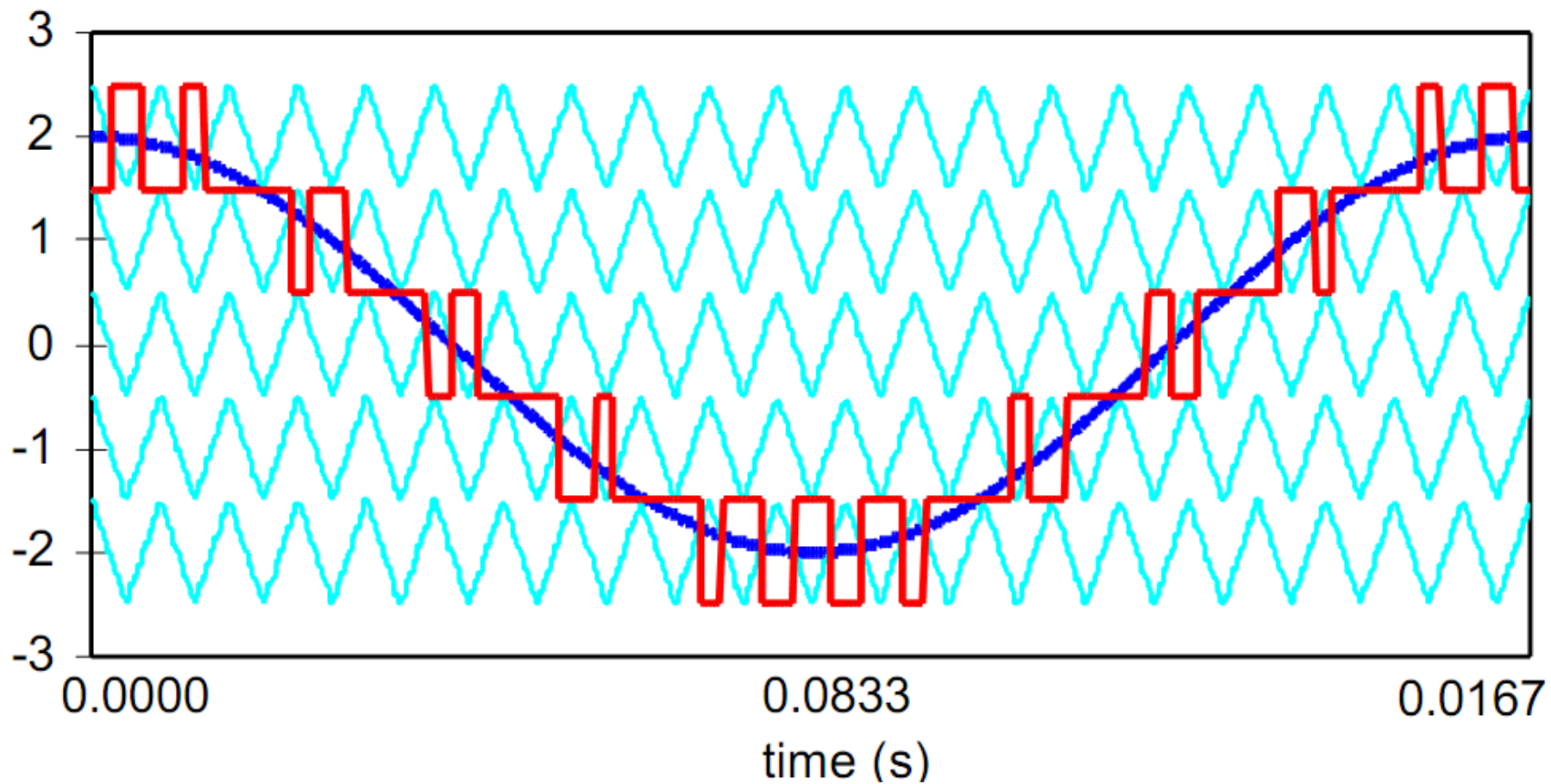
Table 1.2 Diode-clamped five-level inverter voltage levels and their switch states.

Output $V_{AO}$	Switch State							
	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	$S_{a'1}$	$S_{a'2}$	$S_{a'3}$	$S_{a'4}$
$V_5=V_{dc}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_4=3V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
$V_3=V_{dc}/2$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_2=V_{dc}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
$V_1=0$	0	0	0	0	1	1	1	1

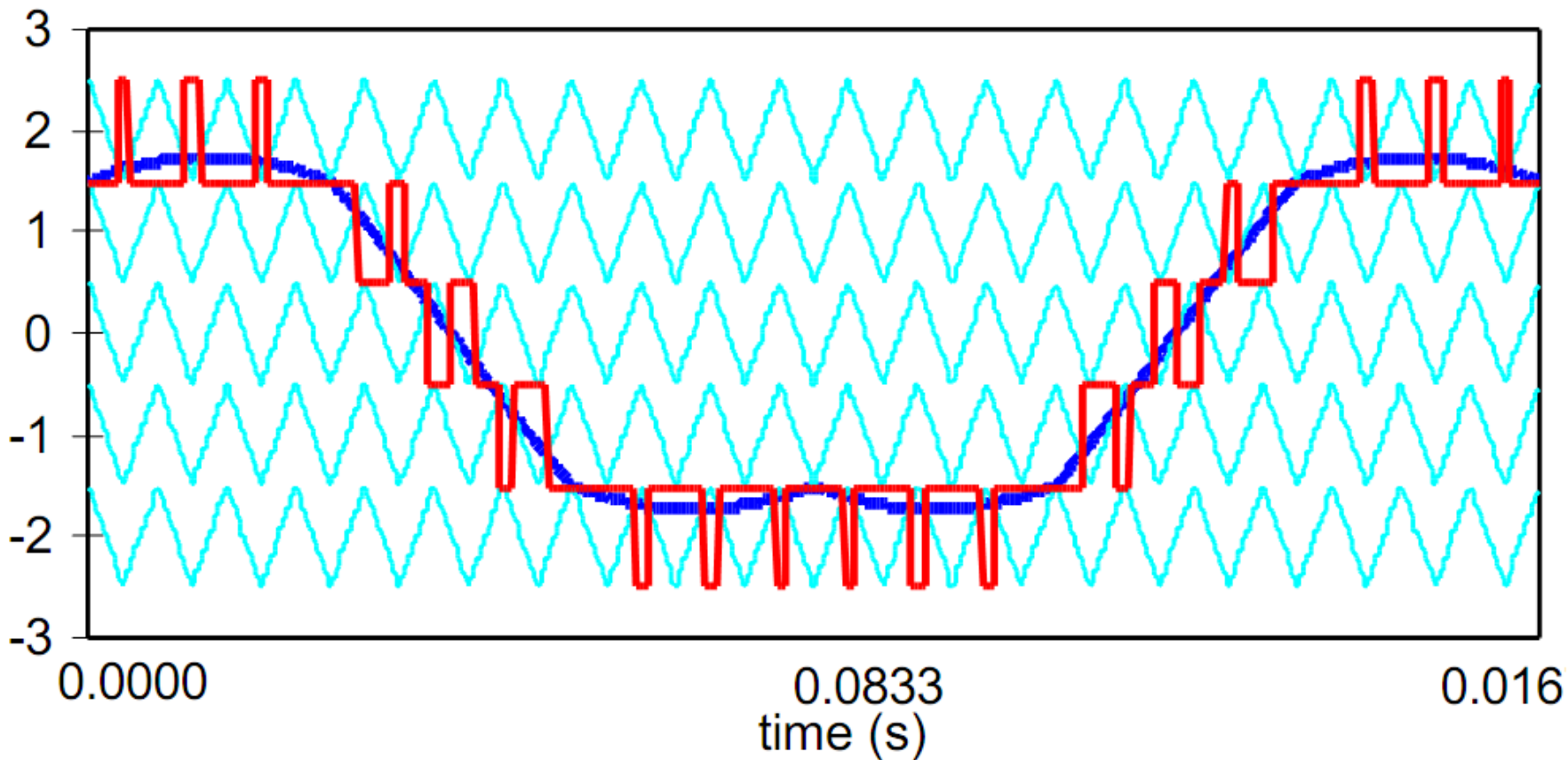
# Energetska šema invertora sa 6 nivoa



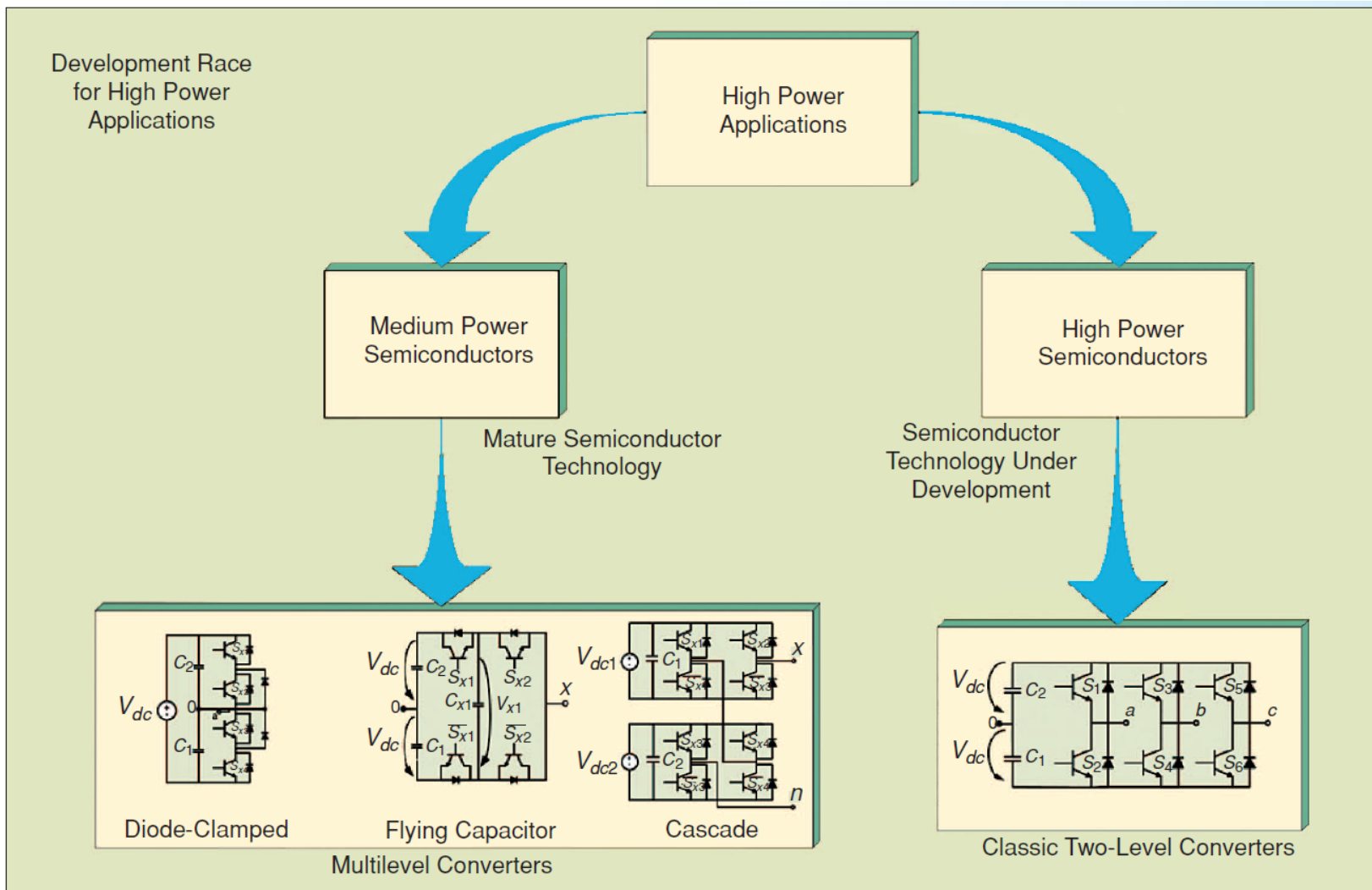
# Princip generisanja PWM modulacionih signala za inverter sa 6 nivoa, sinusni referentni napon



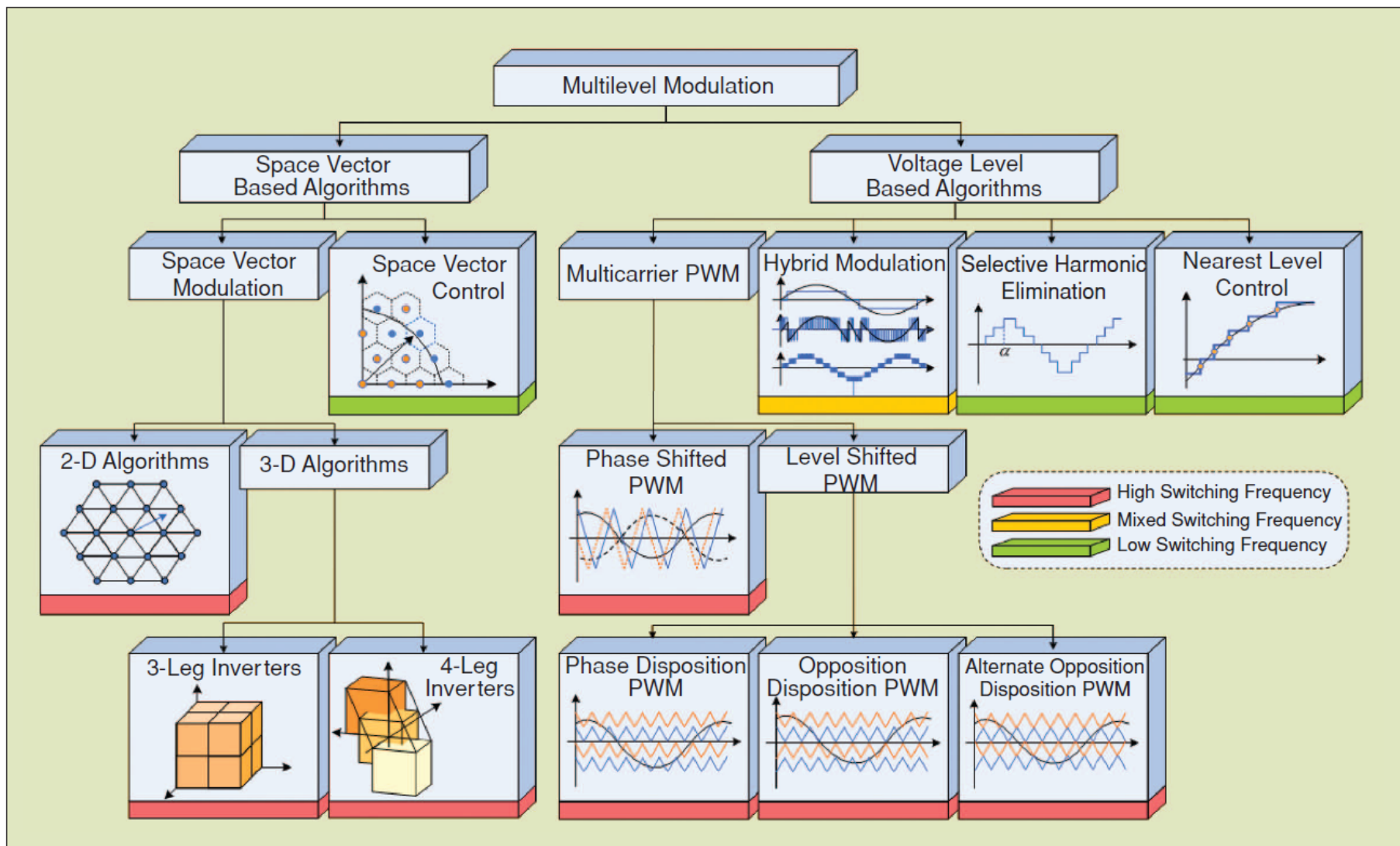
Princip generisanja PWM modulacionih signala za inverter sa 6 nivoa, optimalna modulacija "space vector modulation"...







Na slici je prikazan odnos multi level i two level konvertora. Tehnologije se takmiče u zoni velikih snaga.



Načini modulacije napona kod raznih multi level konvertora.

## STRUJNI INVERTORI ZA POGON SREDNJE NAPONSKE MOTORA

Firma ROCKWELL AUTOMATION (USA) nudi danas na tržištu interesantno rešenje sa strujnim PWM inverterom (CSI-PWM), zasnovano na novoj poluprovodničkoj komponenti SGCT (simetrično blokirajući tiristor komutovan gejtom). Ova komponenta omogućava primenu frekventnog pretvarača naponskog nivoa 6,6 kV bez upotrebe izolacionog transformatora i direktno priključenje novog ili postojećeg motora napona 6 kV bez dodatnog filtra (tzv. *Direct-to-Drive* tehnologija).

- Neki put SGCT se referiše kao simetrično blokirajući GCT. Tada je sa GCT označen tiristor koji ima antiparalelnu brzu povratnu diodu.

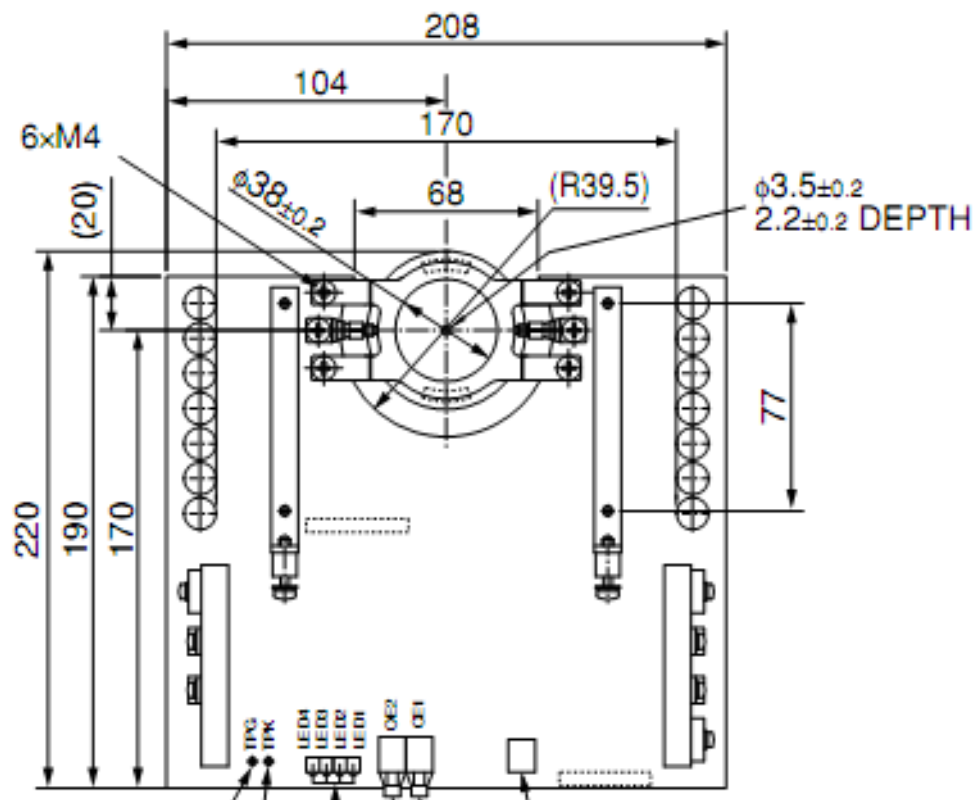
- Značajni proizvođači:



**GCU04AA-130**



- Symmetrical GCT unit
- GCT and gate driver are connected
- $I_{TQRM}$ : Repetitive controllable on-state current ..... 400A
- $I_{T(AV)}$ : Average on-state current ..... 180A
- $V_{DRM}$ : Repetitive peak off-state voltage ..... 6500V
- $V_{RRM}$ : Repetitive peak reverse voltage ..... 6500V
- $T_j$ : Operation junction temperature ..... 125°C



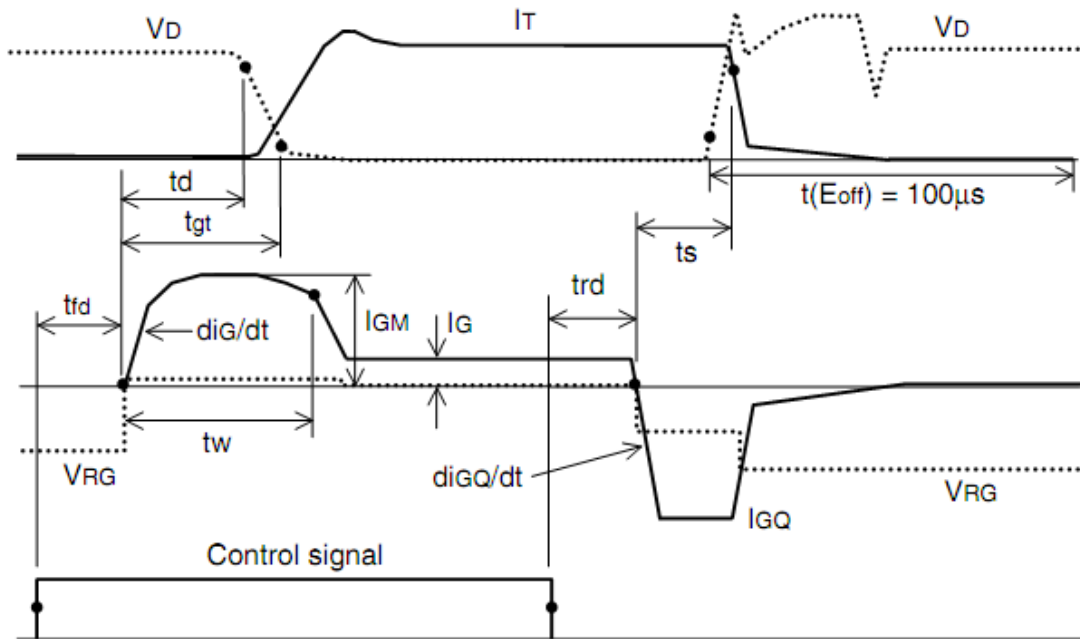
GATE TEST POINT  
 CATHODE TEST POINT

20V POWER SUPPLY INPUT  
 (MSTB2.5/2-G-5.08AU)

LED4 : POWER SUPPLY OK (GREEN)  
 LED3 : G-K OK (GREEN)  
 LED2 : GATE ON (YELLOW)  
 LED1 : GATE OFF (RED)

FIBER OPTIC INPUT (HFBR-2521)  
 FAULT SIGNAL OUTPUT (HFBR-1521)

# Karakteristični talasni oblici pri paljenju i gašenju



- $t_d$  ;  $0V_{RG} \sim 0.9V_D$
- $t_{gt}$  ;  $0V_{RG} \sim 0.1V_D$
- $t_s$  ;  $0V_{RG} \sim 0.9I_T$
- $diG/dt$  ;  $0.1I_{GM} \sim 0.9I_{GM}$
- $t_w$  ;  $0V_{RG} \sim 0.9I_{GM}$
- $diGQ/dt$  ;  $0.1I_{RG} \sim 0.9I_{RG}$
- $t_{rd}$  ; 50% on signal  $\sim 0V_{RG}$
- $t_{rd}$  ; 50% off signal  $\sim 0V_{RG}$
- Integration area for  $E_{off}$  ;  $5\%V_D \sim$  until  $100\mu s$

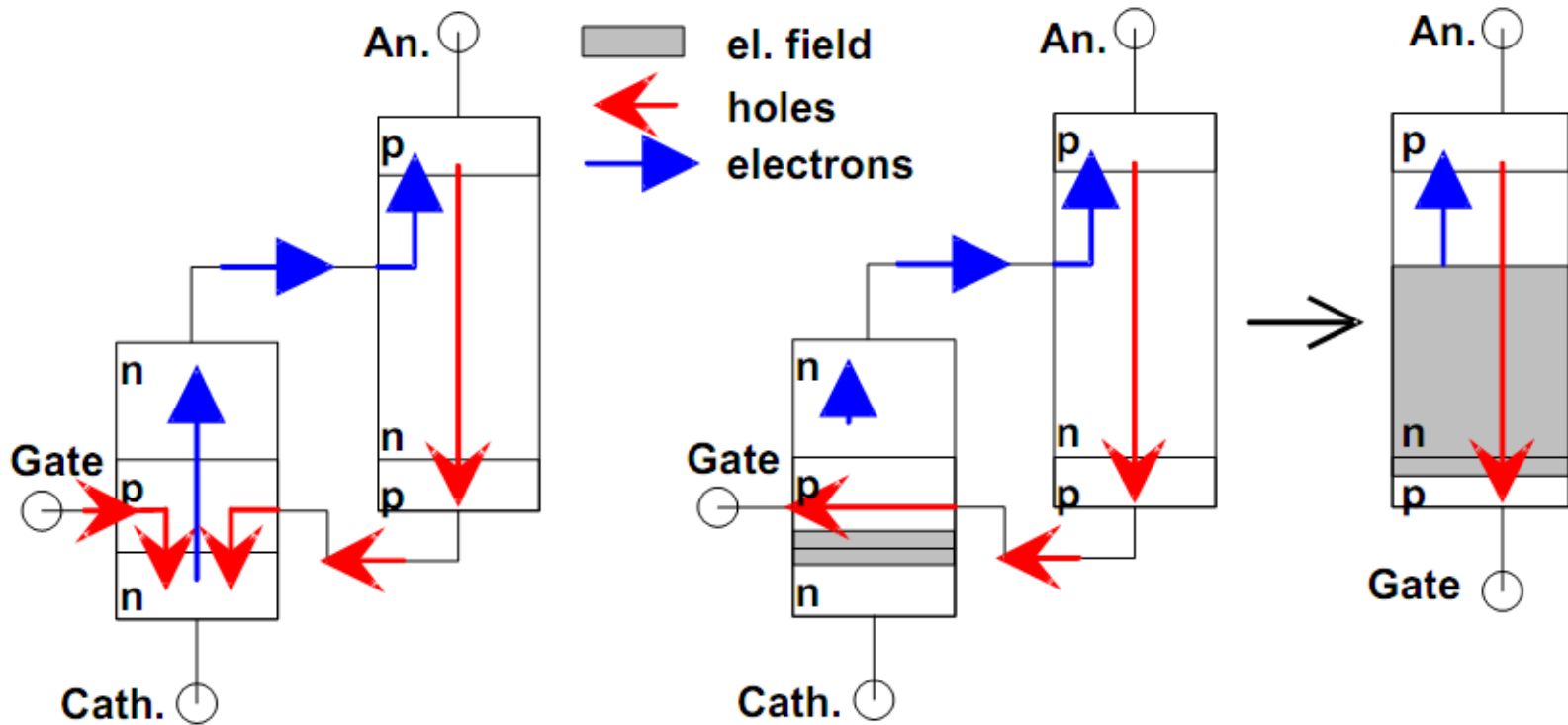
## Kako se GCT tiristor pali i gasi ...

- Da bi se ugasio GCT tiristor, kompletna struja katode se prebacuje na gejt (kao kontrastruja) u vremenu kraćem od  $1 \mu\text{s}$  (to radi drajver koji je veoma blizu poluprovodničkog diska i predstavlja neodvojivi deo prekidača).
- Na takav način je sprečeno formiranje strujnih niti tokom gašenja (sekundarni proboj).
- Tokom gašenja postoji samo p-base - n-base - anode emitter – pnp tranzistor aktivan tokom gašenja.

# Kako se GCT tiristor pali i gasi ...

on-state (thyristor)

turn-off (transistor mode)





## Prednosti u odnosu na GTO prekidače

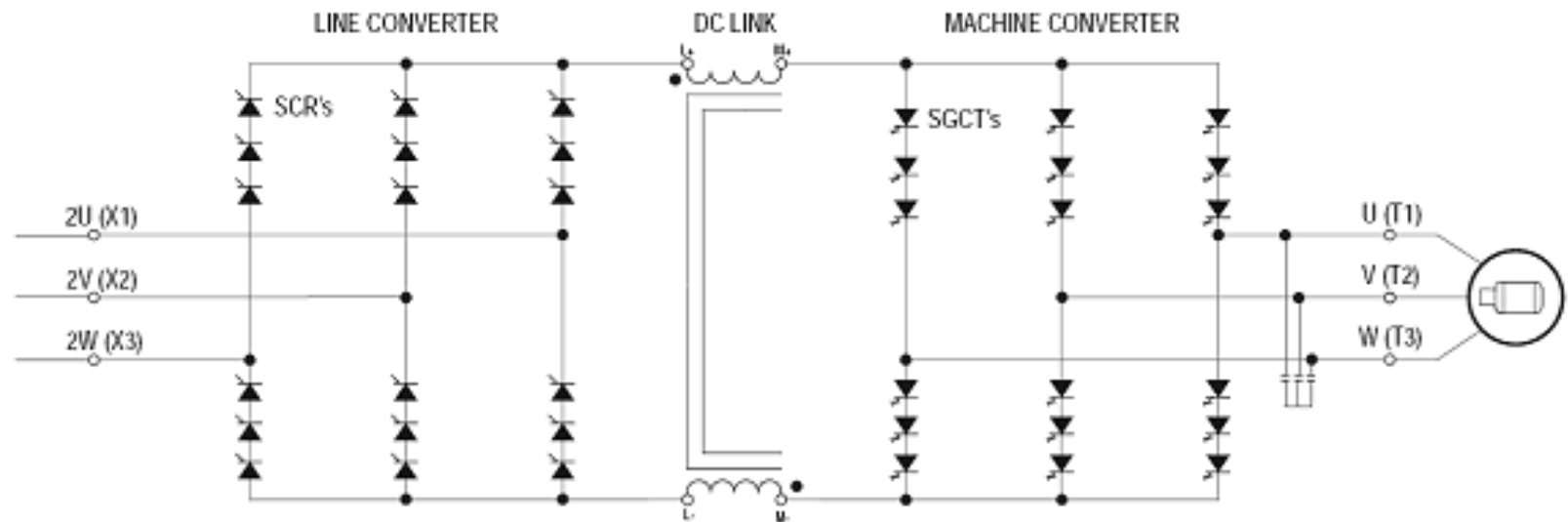
Novi Gate Commutated Thyristor i prateća prstenasta dioda sa “mekim oporavkom” (soft recovery) koji su razvijeni poseduju superiorne prekidačke karakteristike u odnosu na konvencionalne GTO prekidače koje zamenjuju.

Podnošenje većeg gradijenta struje ( $di/dt$ ) i rad bez prigušnih kola (snabera) su postignuti zajedno sa redukcijom ukupnih gubitaka (gubici u poluprovodničkom prekidaču + gubici u prigušnom kolu + gubici u induktoru) na pola u odnosu na konvencionalne GTO.

Znači, konvencionalni GTO prekidači su postali zastareli, i zamenjuju ih SGCT i GCT tiristori.

GCT i SGCT tiristor se zajedno isporučuje sa integrisanom pločicom drajvera koji prima signale preko fibera (optički izolovano). Naravno, i napajanje drajvera mora biti adekvatno izolovano. (Na 6 kV izolacioni razmak u vazduhu je 20 cm!!!)

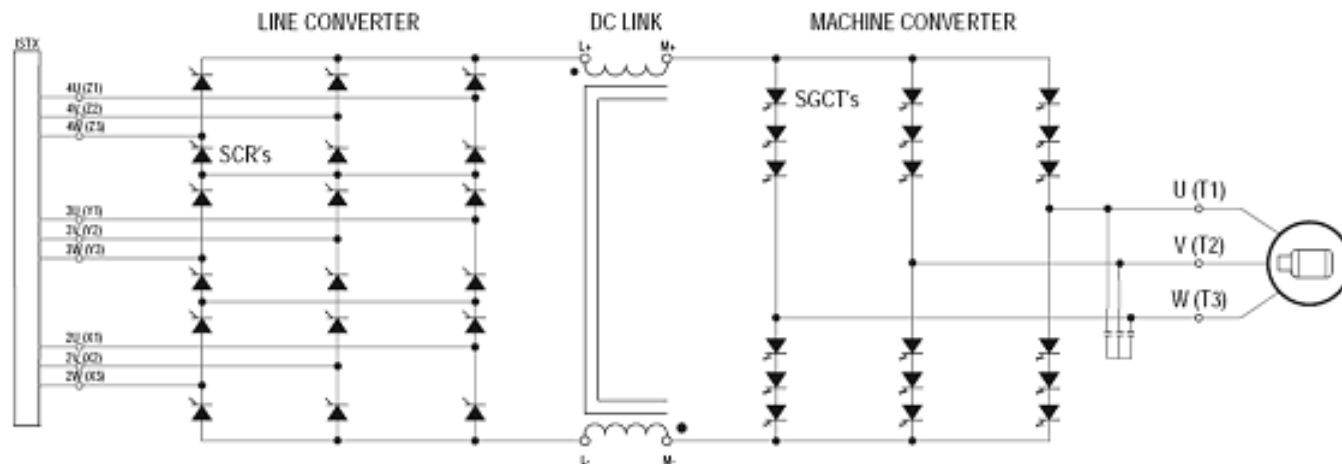
# 6 – impulsni ulazni ispravljač – ulazna struja veoma izobličena



6000-6600 Volt – 6 Pulse

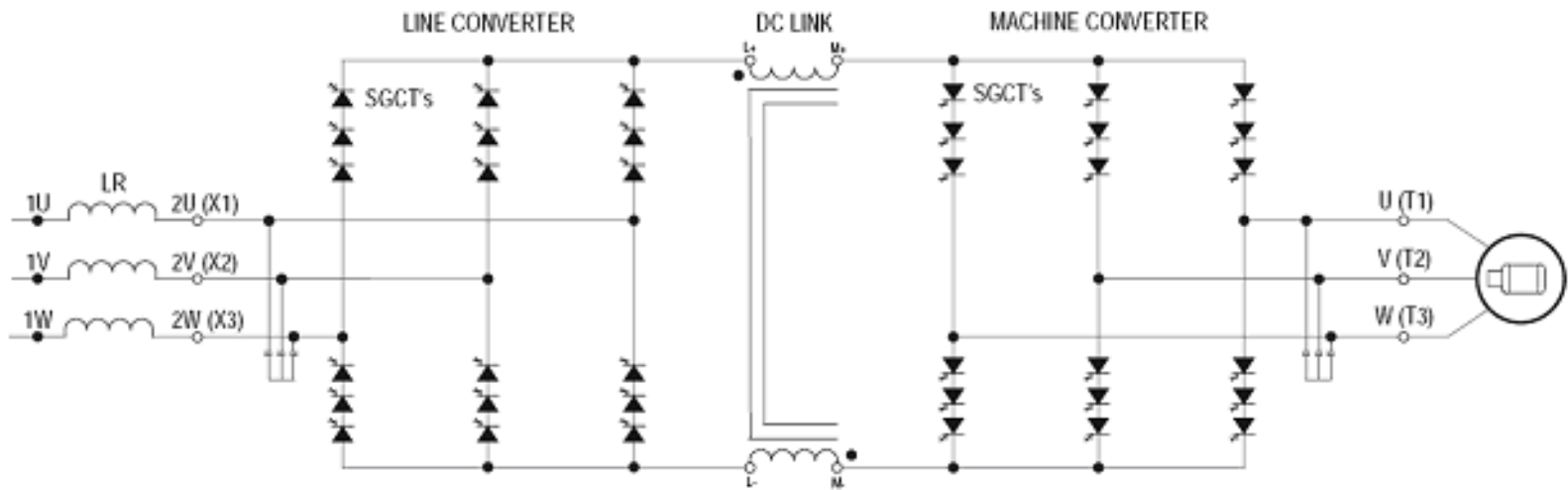
# 18 – impulsni ulazni ispravljač – ulazna struja manje izobličena

## 3.3 6600 Volt



6000-6600 Volt – 18 Pulse

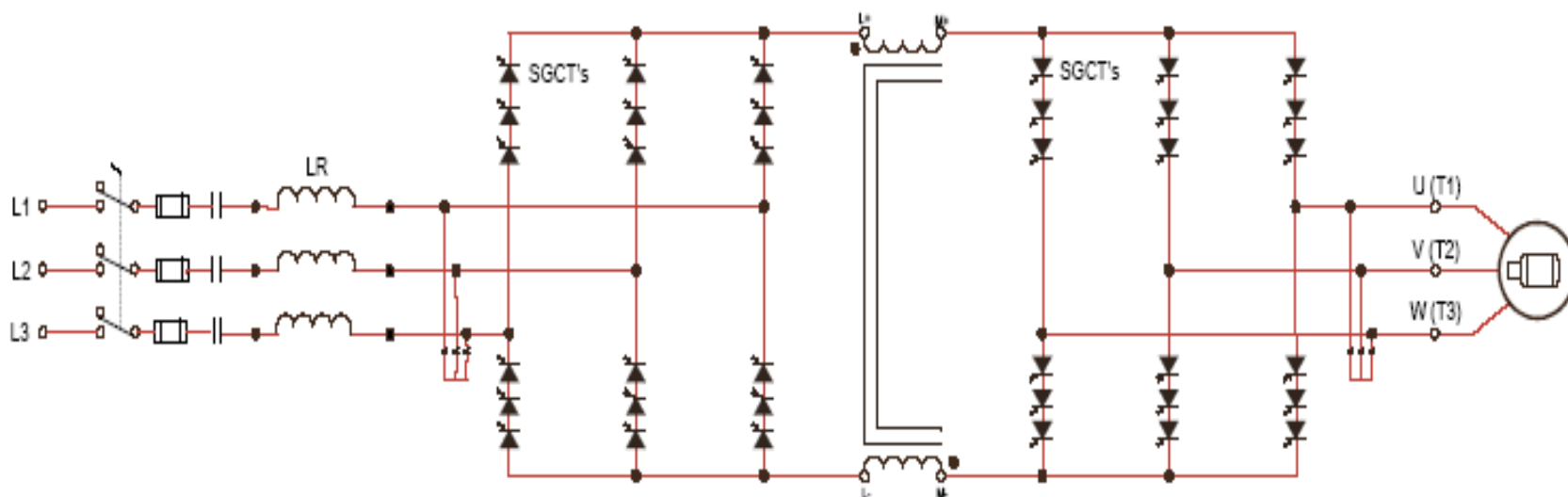
# PWM modulisani ulazni ispravljač – ulazna struja skoro sinusoidalna



6000-6600 Volt – PWM

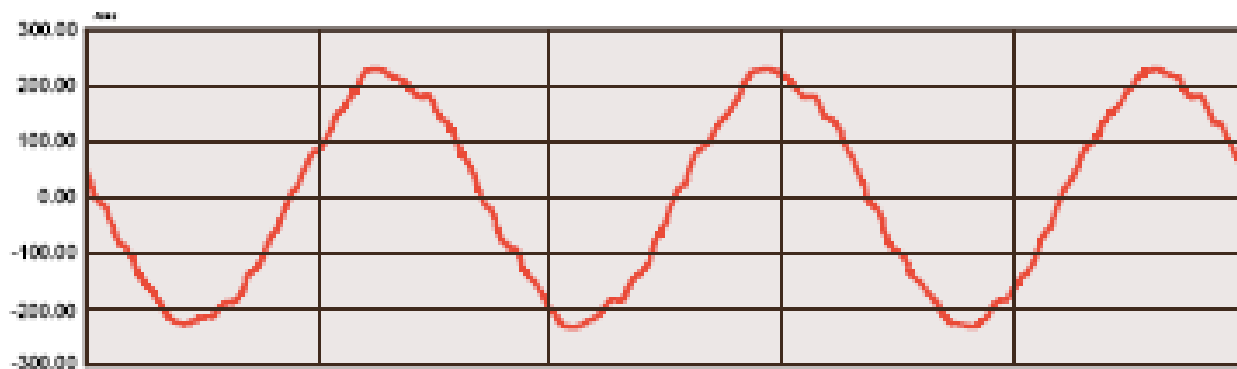
\* Optional isolation transformer configuration available.

Na sledećoj slici je prikazan blok dijagram energetskeg dela frekventnog pretvarača za napon do 6600 V, sa integrisanom ulaznom prigušnicom i prekidačem koji je razmatran za upotrebu na tračnom transporteru (snaga 400 kVA).

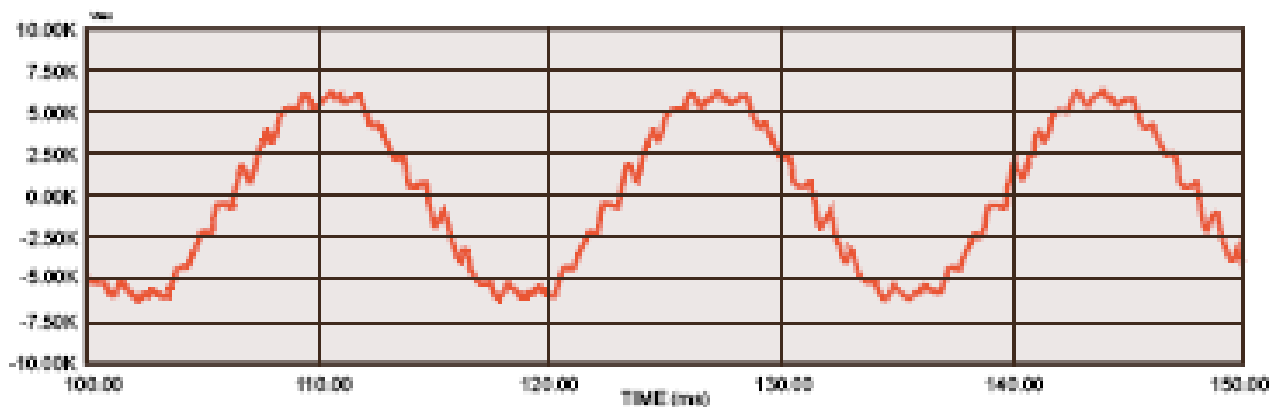


Ulazna prigušnica obezbeđuje dodatno filtriranje i ograničenje struje pri kratkim spojevima na napojnoj strani frekventnog pretvarača. Na sledećoj slici su prikazani talasni oblici struje i napona motora pri punom opterećenju i nominalnoj brzini.

a)



b)

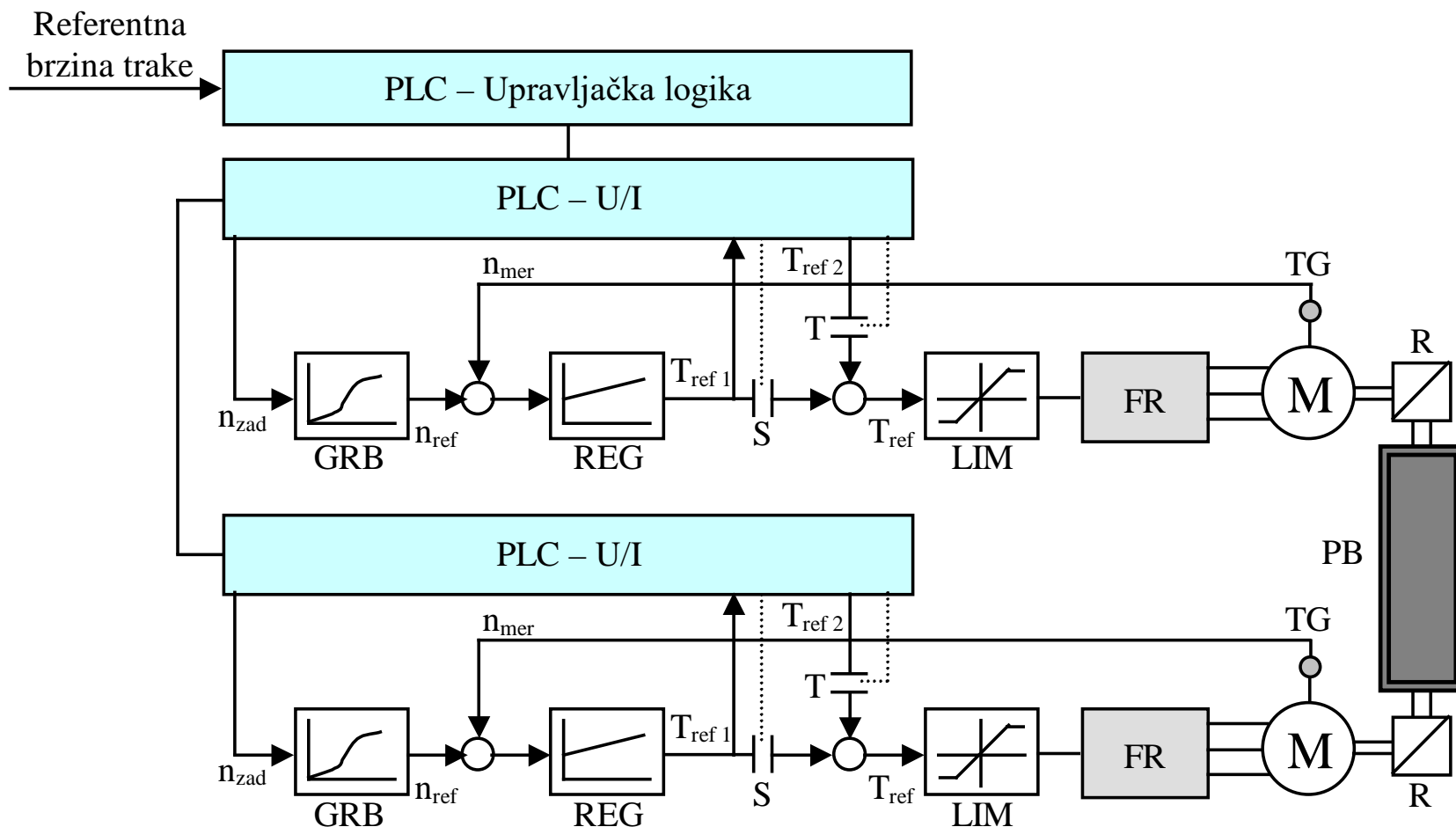


- Ukupni faktor izobličenja struje (THD) je oko 4,5%, dok je ukupni faktor izobličenja linijskog napona 1,5% i funkcija je impedanse sistema. Ulazni faktor snage kod topologije sa PWM ispravljačem je blizu jedinice pri brzini motora u opsegu 30-100% i opterećenja sa promenljivim momentom.
- PWM ispravljač omogućava primenu selektivne eliminacije harmonika, metode koja se koristi kod invertora, kako bi se uklonili 5-ti, 9-ti i 11-ti harmonik.
- Ulazni kondenzatori se biraju tako da smanje harmonike struje višeg reda, pri čemu se rezonantna učestanost filtra podešava tako da bude ispod 300 Hz gde ne postoje preostali harmonici.
- Ovim je sprečeno pobuđivanje sistema učestanostima viših harmonika.

- Temperatura motora priključenog na frekventni pretvarač je tipično 3°C veća nego u slučaju kada je direktno spojen na napojnu mrežu.
- Priraštaj napona ( $du/dt$ ) u talasnom obliku napona je manji od 10V/ $\mu$ s.
- Vršni napon koji će se pojaviti na izolaciji je jednak nominalnoj efektivnoj vrednosti napona pomnoženoj sa 1,41.



- Pogon sa CSI-PWM invertorom se uspešno primenjuje na pogonima trakastih transportera.
- Kako pogon transportera pokreće više motora (obično četiri, tj. po 2 na svakom pogonskom bubnju), potrebno je obezbediti precizno deljenje opterećenja između motora što se postiže primenom više frekventnih pretvarača koji rade u režimu sa zadavanjem brzine (glavni pogon) i sa zadavanjem (praćenjem) referentnog momenta (podređeni pogoni).
- Da bi se upravljalo raspodelom opterećenja, jedan pogon se određuje kao glavni i reguliše brzinu i moment sa kojim drugi (podređeni) pogoni treba rade.
- Sinhronizacija između pojedinih pogona se vrši pomoću odgovarajućih komunikacionih protokola (SCANbus™, Remote I/O™ ili DeviceNet™). Na sledećoj slici je prikazan blok dijagram navedene upravljačke šeme.

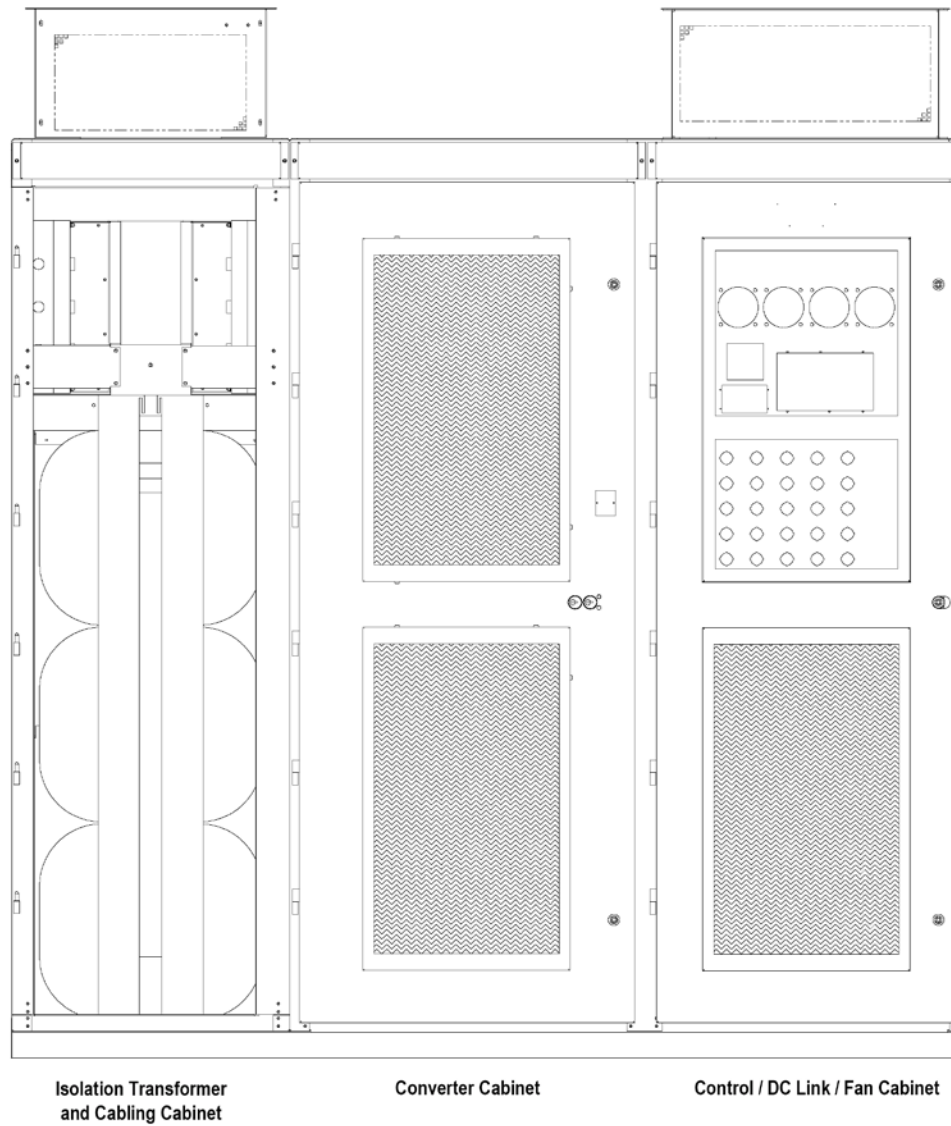


Blok dijagram upravljanja višemotornim pogonom trakastog transportera sa frekventnim pretvaračem PowerFlex 7000A

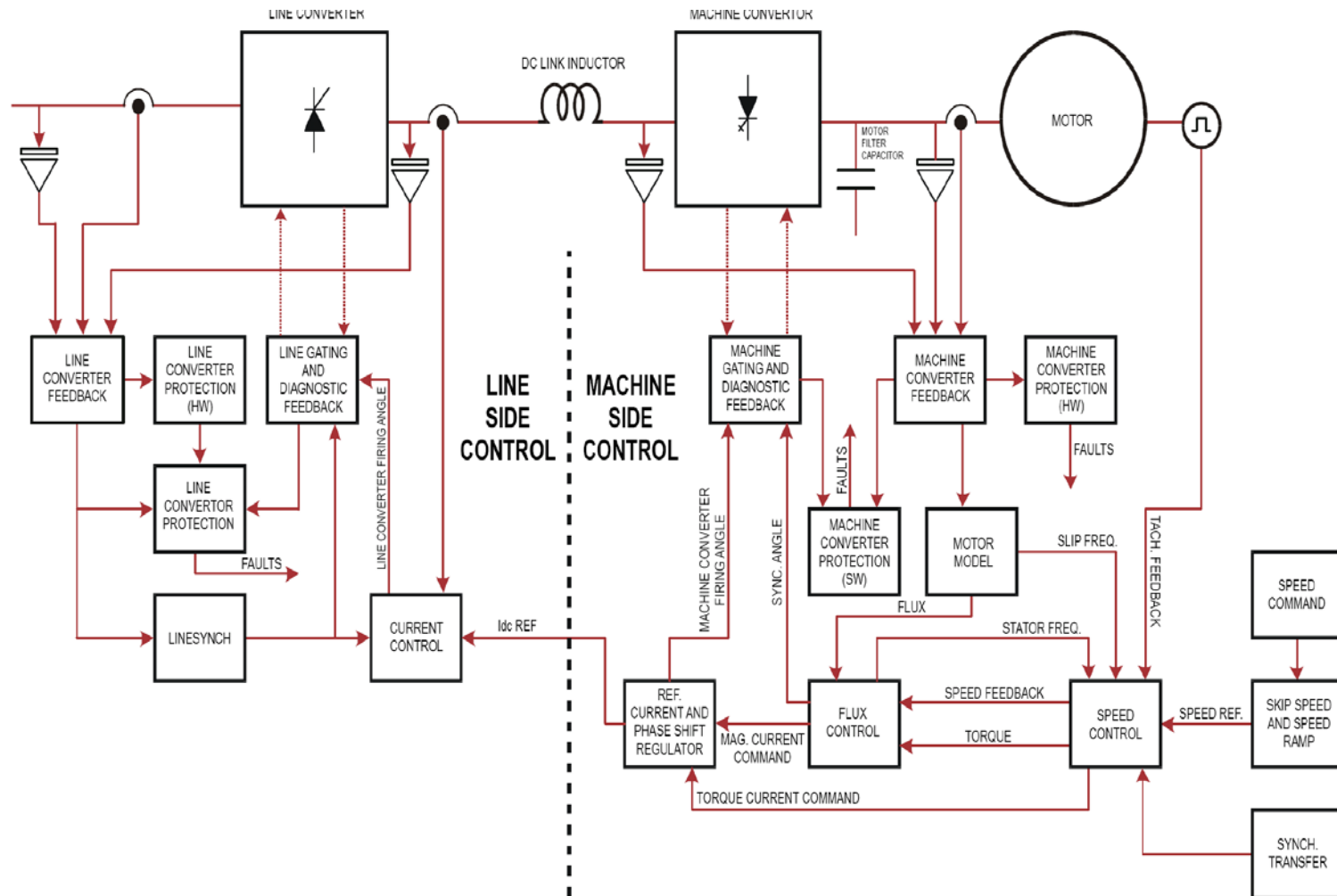
- Uloga generatora referentne brzine je da minimizira mehanička opterećenja na transporteru naročito na reduktorima, koja se naročito javljaju u slučajevima kada je traka znatno opterećena materijalom (ugljem, jalovinom), pojedini segmenti trake zaleđeni ili pogon priljučen na slabiji sistem napajanja.
- Ovo se postiže postupnim ubrzavanjem transportera sve do zadate radne brzine tako što se referenca brzine postepeno povećava po S-krivoj.
- Ovim se postiže da motor pri startovanju ne povlači više od 150% nominalne struje opterećenja, pri čemu je moment motora 150% od nominalnog, čime se sprečavaju nagle promene zatezanja trake i ograničava zatezanje trake između donjeg i gornjeg pogonskog bubnja.

# Osnovne prednosti navedene tehnologije su:

- Nema potrebe za izolacionim transformatorom.
- Nema potrebe za ugradnjom filtra kojim bi se motor zaštitio od naponskih skokova ( $du/dt$ ).
- Nema potrebe za povećanom izolacijom kako motora tako i napojnih kablova, neophodnom za zaštitu sistema od neželjenih prenapona.
- Nema potrebe za dodatnom rashladnom tehnikom neophodnom za hlađenje izolacionog transformatora.
- Pogon se isporučuje kao jedinstvena jedinica kako bi se pojednostavila instalacija i smanjili troškovi ugradnje.
- Poboljšana efikasnost sistema kao posledica ne korišćenja izolacionog transformatora čime su izbegnuti gubici u transformatoru.
- Harmonijska izobličenja su u saglasnosti sa važećim standardima (IEEE 519, EN61000-2-4 i G5/4).
- Moguće je koristiti nove i postojeće motore pri čemu dužina kabla od frekventnog regulatora do motora može da bude do 15 km.
- Manje dimenzije i težina frekventnog pretvarača, jer se ne koristi izolacioni transformator koji povećava dimenzije sistema za 30-50% a ukupnu težinu za 50-70%.
- Invertor sa SGCT poluprovodnikom ima najmanji broj komponentni u odnosu na topologije sa drugim poluprovodnicima (GTO, IGBT, IGCT).



## Kabineti srednjenaponskog frekventnog regulatora Powerflex 7000

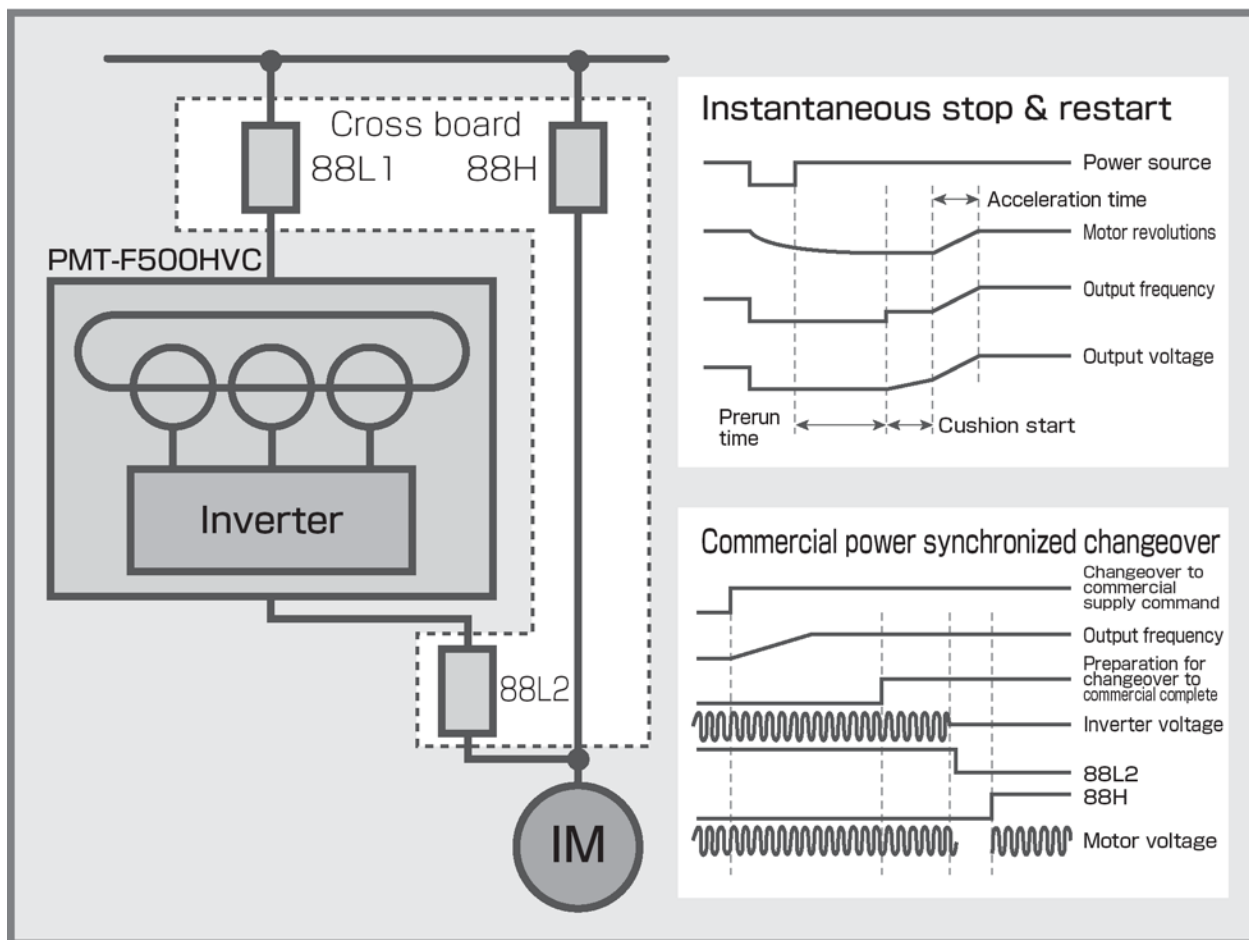


**Blok diagram sistema upravljanja uređaja Powerflex 7000**

- Primenjeni metod upravljanja je direktna vektorska kontrola, što znači da je struja statora podeljena na komponentu koja proizvodi obrtni magnetni fluks i komponentu koja proizvodi momenat motora. Na taj način je moguće brzo promeniti momenat motora bez uticaja na obrtni magnetni fluks. Ovaj metod upravljanja se koristi bez povratne sprege preko tahometra za aplikacije koje zahtevaju neprekidnan rad iznad 6 Hz i polazni momenat manji od 100% polaznog momenta.
- Potpuna vektorska kontrola se može postići sa tahometarskom povratnom vezom do 0,2 Hz i do 150% polaznog momenta. Bilo koji od ova dva vektorska upravljačka metoda je superiorniji od  $U/f = const.$  metoda. Propusni opseg kola za regulaciju brzine je 5 – 25 radijana u sekundi, dok je propusni opseg za regulaciju momenta 15 – 50 radijana u sekundi.

# SINHRONI TRANSFER MOTORNOG NAPAJANJA SA SREDNJE NAPONSKOG FREKVENTNOG PRETVARAČA NA MREŽU

(Mitsubishi, Rockwell)



**Sekvence komandnih signala i talasni oblici napona frekventnog regulatora i asinhronog motora u toku sinhronog prebacivanja motora na mrežu**



Iz modela asinhronog motora u d-q koordinatnom sistemu, izjednačavanjem statorskih struja sa nulama, što odgovara gubitku napajanja, i pogodnim izborom osa, lako se dobija da se amplituda napona na statorskim namotajima menja

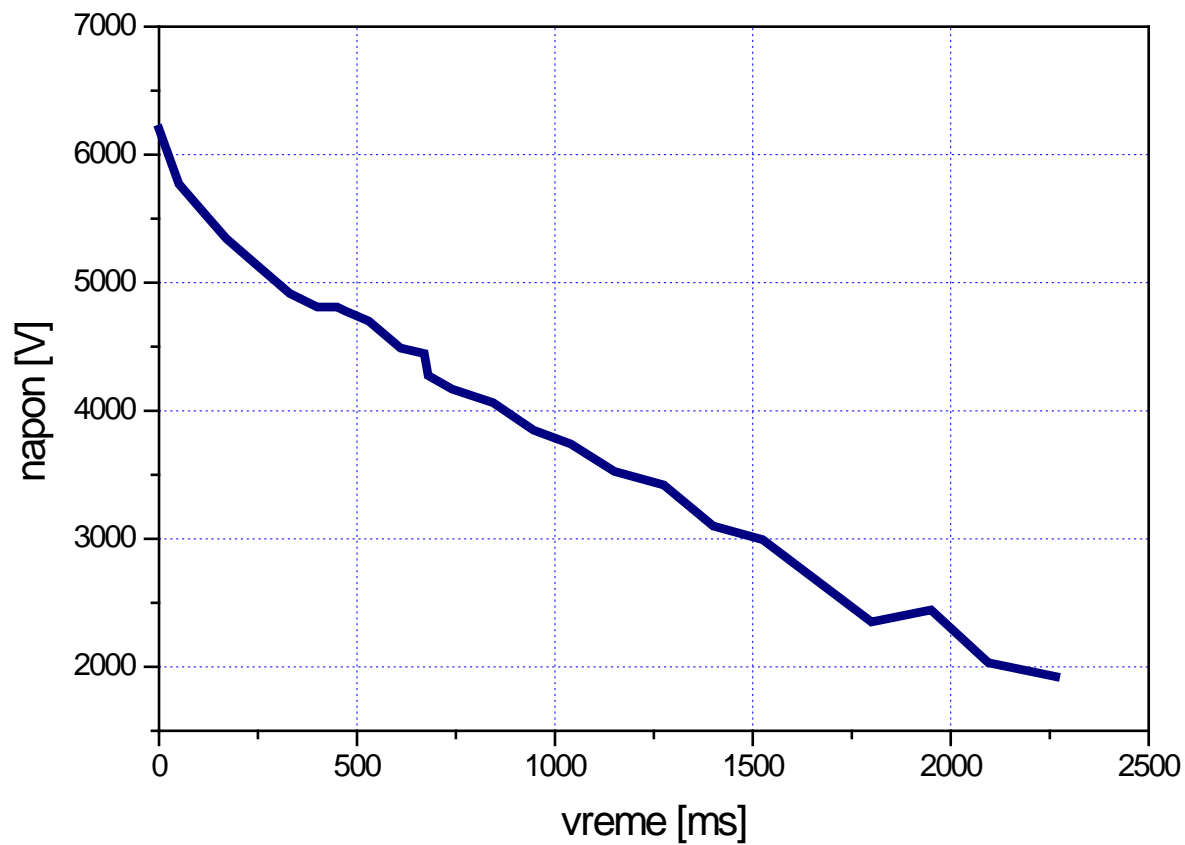
po zakonu:

$$U_s = \sqrt{u_{ds}^2 + u_{qs}^2} = \Psi_{ds0} e^{-\frac{t}{T_R}} \sqrt{\frac{1}{T_R^2} + \omega^2}$$

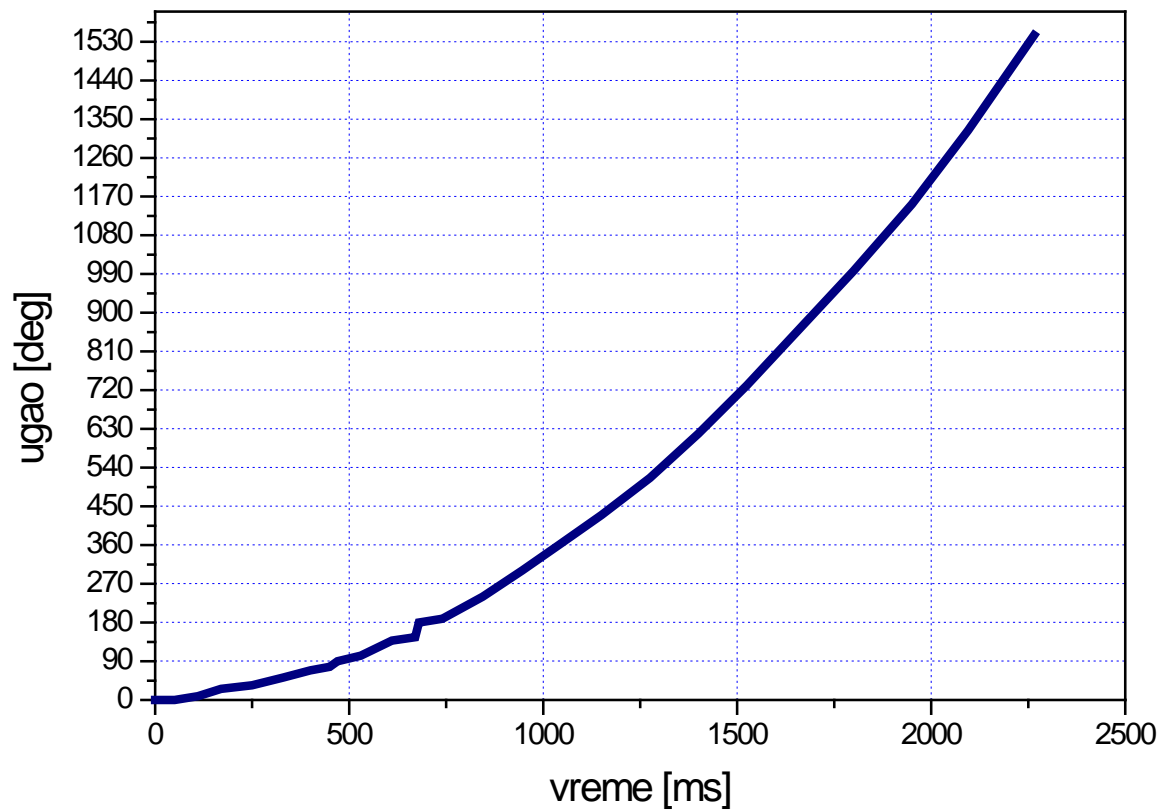
$T_R$  - vremenska konstanta rotora

ako se pretpostavi da je moment opterećenja konstantan u vremenskom intervalu od interesa dobija se da se frekvencija linearno menja

$$\frac{d\omega}{dt} = K$$

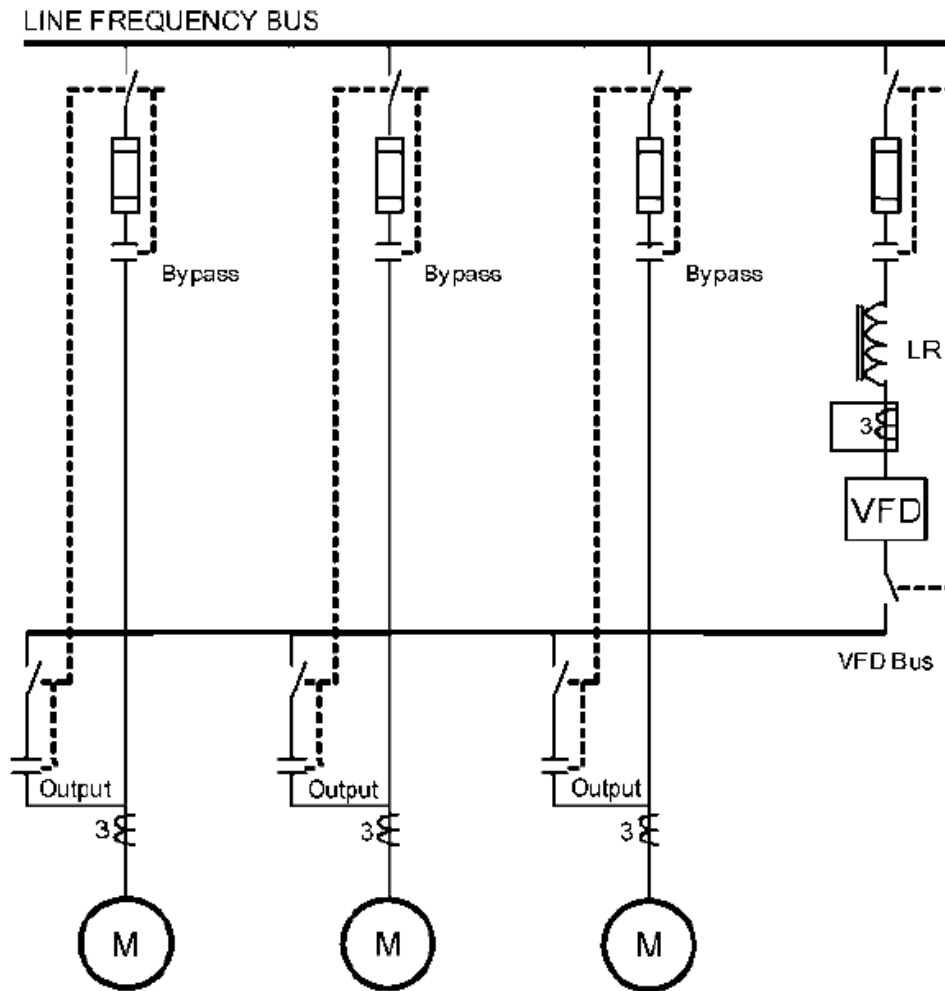


*Promena napona motornih sabirnica 6 kV pri gašenju polja motora – TENT A*



*Promena faznog ugla napona motornih sabirnica 6 kV pri gašenju polja motora – TENT A*

- vreme kašnjenja vakuumskih prekidača je oko 60 ms,
- ali sa uračunavanjem tog kašnjenja može se lako postići pauza pri preklapanju od 5 ms do 20 ms, a za to vreme ne dolazi do značajne promene napona motora, zbog polja rotora niti do značajne promene frekvencije, zbog inercije pogona



*Figure 10 : MV Drive System Capable of Synchronous Motor Transfer*

# OSNOVNI PODACI

PODACI

TENT A, BLOK 6:

TRI PUMPE,  
SNAGE MOTORA 630 kW  
POTISKUJU KONDENZAT  
IZ KONDENZATORA  
U NAPOJNI REZERVOAR

**SULZER**

TIP PUMPI:

SULZER HPCV RE 1 et. 43 + 6 et. 40 – 20

REGULACIONI ZATVARAČ:

6RM14



# KARAKTERISTIKE

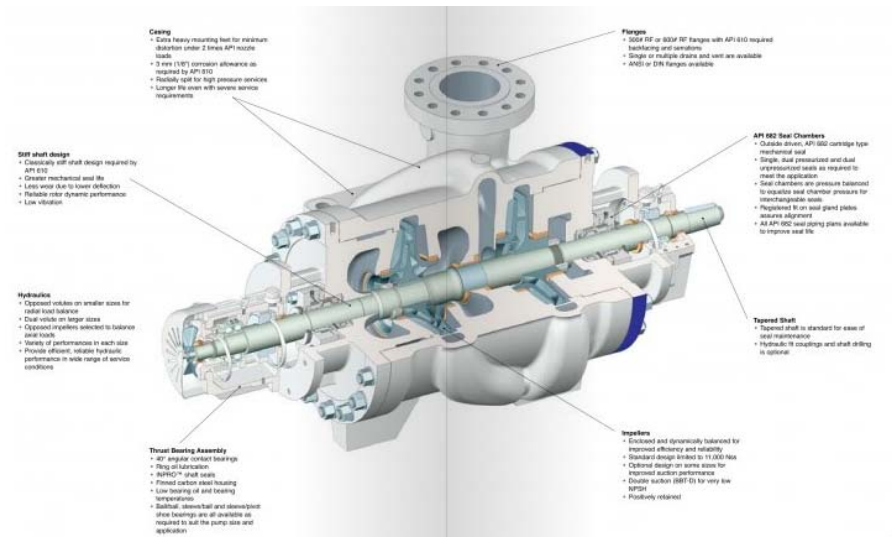
## KARAKTERISTIKE

### PUMPA :

- $Q_n = 140 \text{ l/s}$
- $H_n = 328 \text{ m}$

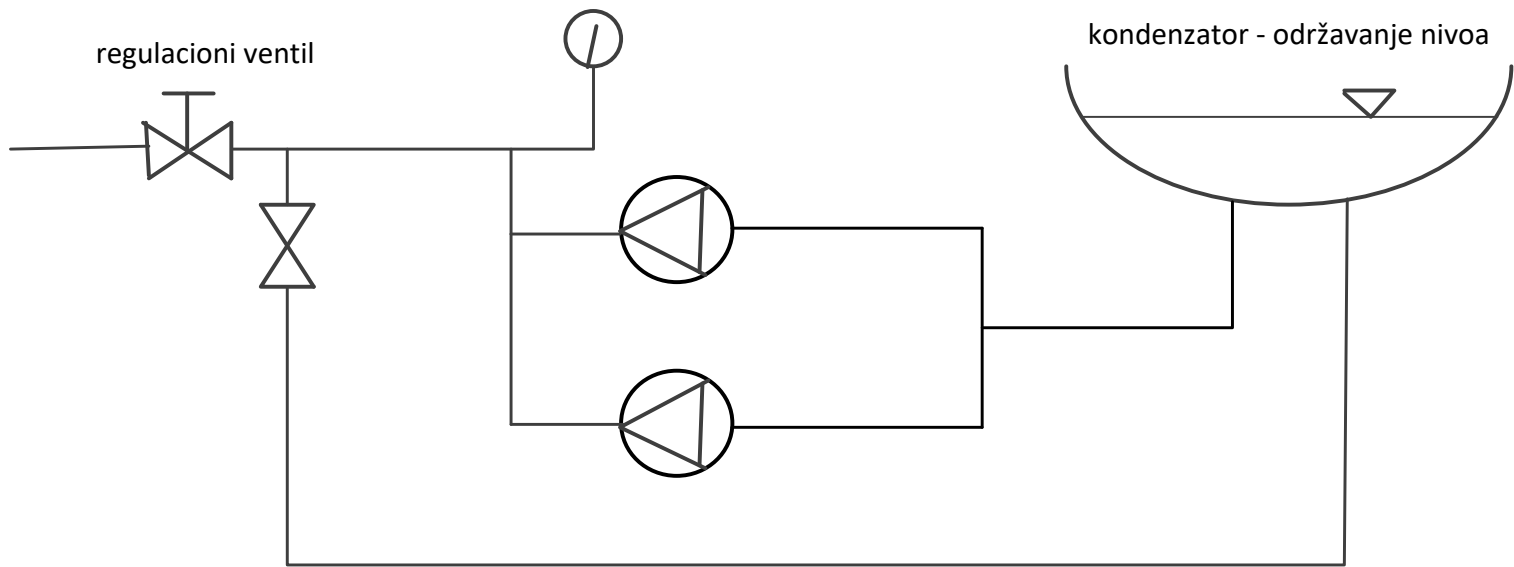
### MOTOR :

- $U_n = 6 \text{ kV}$
- $P_n = 630 \text{ kW}$
- $\eta_{em} = 0,92$

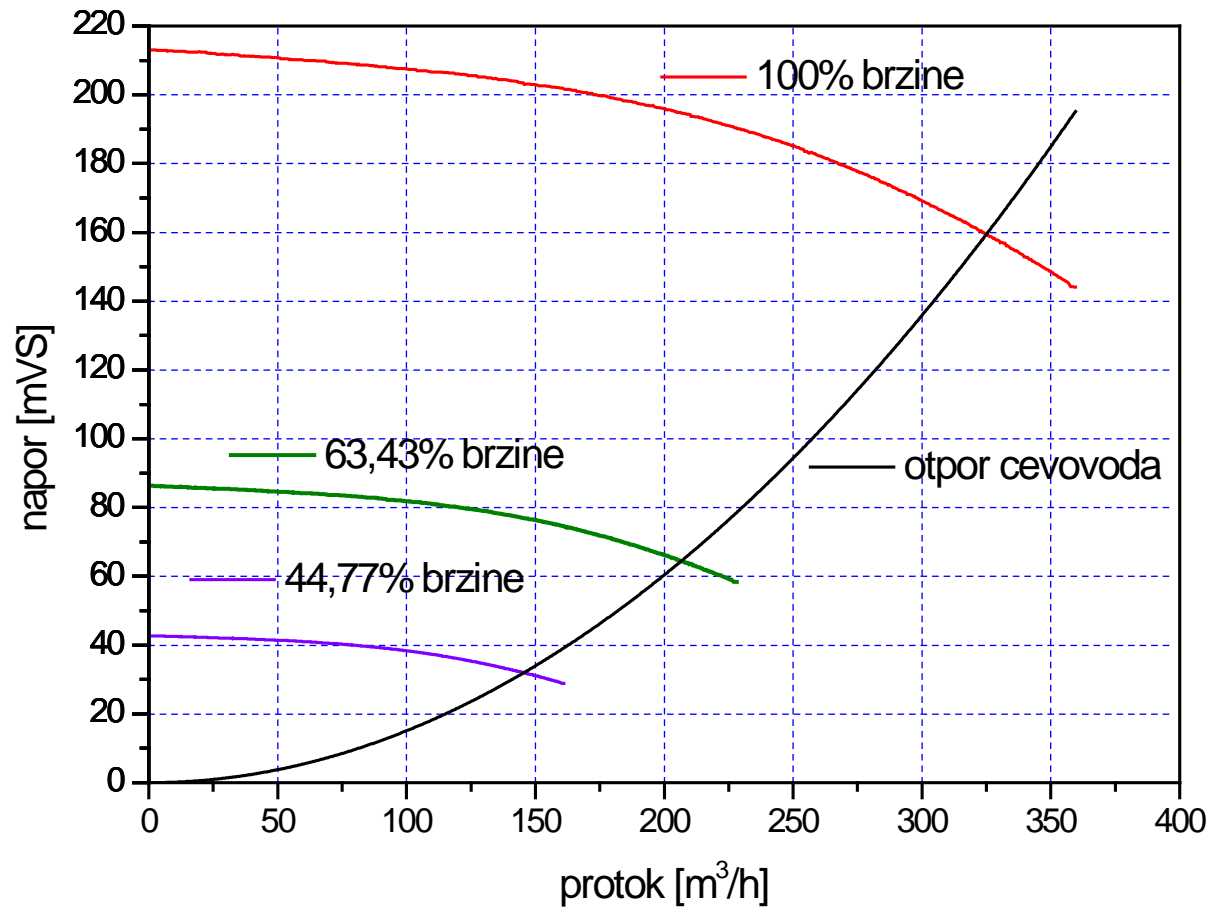




Cilj regulacije ovog pogona je održanje nivoa kondenzata u kondenzatoru, pri različitim protocima naponje vode kotla. U kondenzator se ne sliva samo kondenzovana voda iz TNP nego i ostala voda iz TVP i TSP koja se kondenzovala u raznim izmenjivačima toplote, znači SVA napojna voda.



Principijelna veza kondenz pumpe. Regulacioni ventil sada održava nivo kondenzata u kondenzatoru



Upravljanje protokom kondenzata. Frekventni regulatori koji menjaju brzinu obrtanja pumpi sada održava nivo kondenzata u kondenzatoru

# RADNE TAČKE ZA PRORAČUN

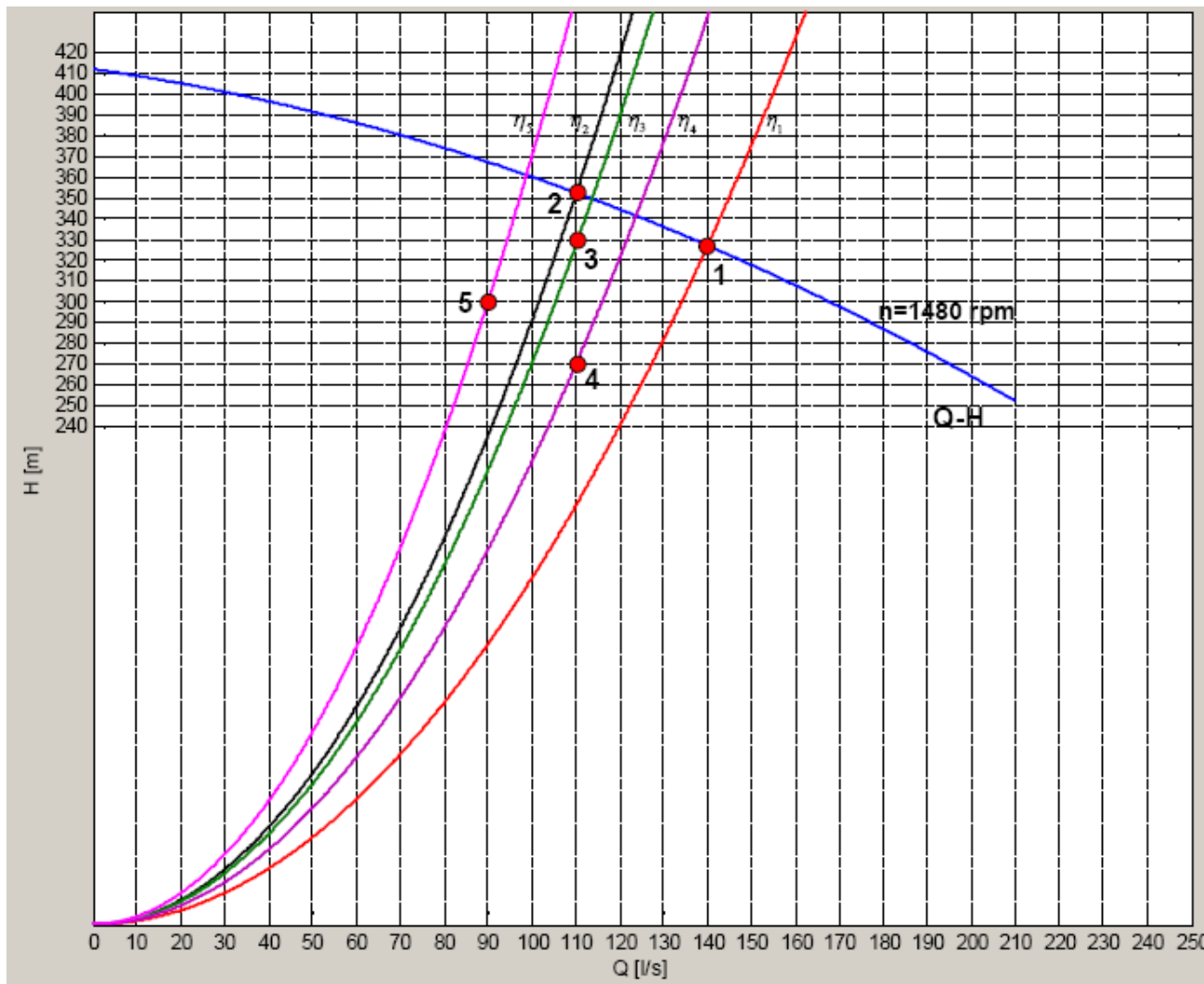
## RADNE TAČKE

Radna tačka	Q (l/s)	H (m)
1	140	328
2	110	352
3	110	328
4	110	270
5	90	300

- Radna tačka 1 : nominalna radna tačka
- Radna tačka 2 : stvarna tačka sa ventilom
- Radna tačka 3 : stvarna tačka bez ventila
- Radna tačka 4 : po zahtevu korisnika
- Radna tačka 5 : po zahtevu korisnika

# QH KRIVA PUMPE

QH KRIVA



# PRORAČUN SNAGE

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_{PM} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{FR}}$$

$\rho$  = GUSTINA MEDIJA

$g$  = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$H$  = NAPOR PUMPE (PRITISAK)

$Q$  = PROTOK

STEPEN KORISNOG DEJSTVA:

$\eta_{PM}$  PUMPE I MEHANIČKOG SISTEMA

$\eta_{EM}$  ELEKTROMOTORA

$\eta_{FR}$  FREKVENTNOG PRETVARAČA



# REZULTAT

Radna tačka	Protok	Napor	Broj obrtaja	Frekv.	Stepen korisnog dejstva			Snaga	Godišnja potrošnja	Ušteda	Ušteda
					$\eta_{PM}$	$\eta_{EM}$	$\eta_{FR}$				
1	140	328	1480	50	0,78	0,92	-	628	4.519.818	-	
2	110	352	1480	50	0,68	0,92	-	607	4.371.597	0	0%
3	110	328	1439	48	0,72	0,92	0,96	557	4.007.527	364.070	8%
4	110	270	1320	44	0,74	0,92	0,96	446	3.209.720	1.161.877	27%
5	90	300	1350	45	0,65	0,92	0,96	461	3.321.948	1.049.649	24%

$\rho = 1000 \text{ kg / m}^3$   
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Dana = 300  
 Sati = 24

REZULTAT

# ZAKLJUČAK

UGRADNJOM FREKVENTNOG PRETVARAČA  
OSTVARILE BI SE GODIŠNJE UŠTEDE OD  
364 MWh DO 1162 MWh (8% DO 27%)

PORED TOGA:

SMANJENI ELEKTRIČNI, MEHANIČKI I  
HIDRAULIČKI UDARI

MANJE HABANJE (VENTIL I PUMPA)

REDUKOVANI TROŠKOVI ODRŽAVANJA





# ZAKLJUČAK

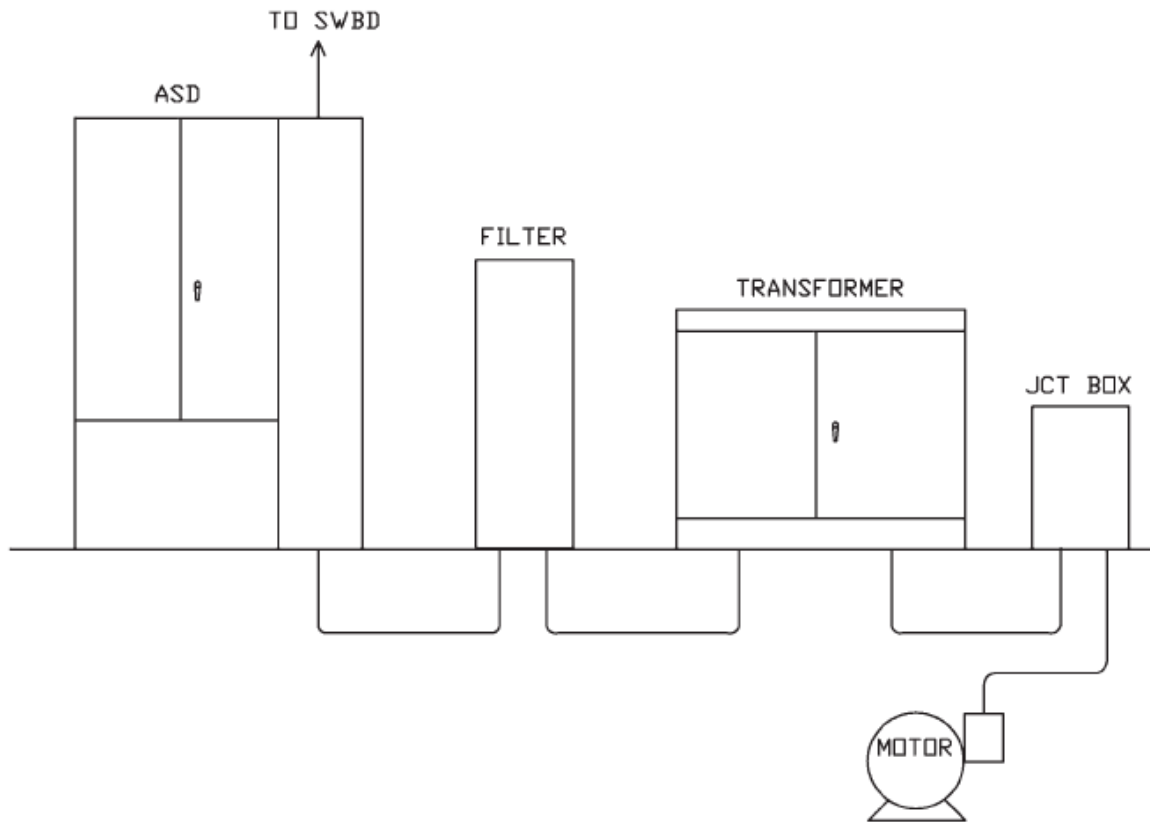
UGRADNJOM FREKVENTNOG PRETVARAČA  
OSTVARUJU SE I DODATNE POGODNOSTI:

- TAČNIJA REGULACIJA
- BRŽI ODZIV
- NOVE MOGUĆNOSTI (INTERESANTNE ZA  
PRELAZNE REŽIME RADA)
- SISTEM JE DALEKO FLEKSIBILNIJI

ZAKLJUČAK

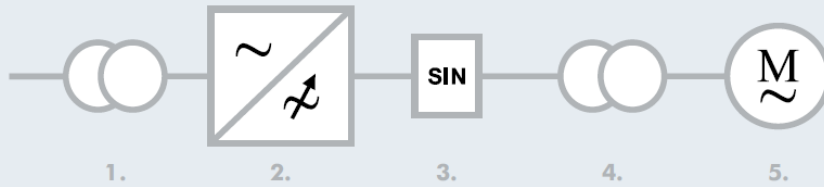


# Supplying MV Motors From LV Adjustable-Speed Drives



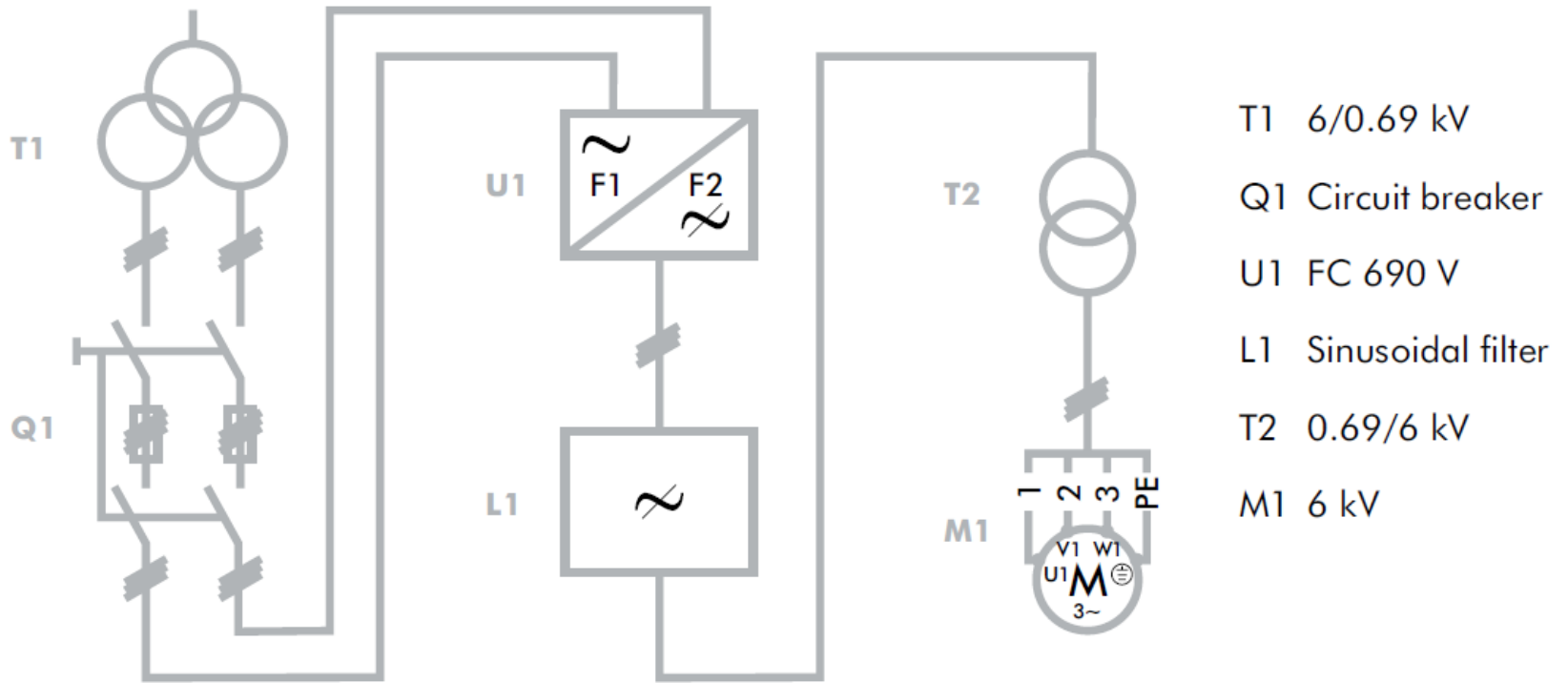
The step-down transformer is for a 12- or 6-pulse rectifier.

**Basic connection for a 6 kV AC motor and low voltage frequency converter**



1. Step-down transformer 6/0.4 kV or 6/0.69 kV
2. Vacon CXC frequency converter
3. Vacon sinus filter
4. Step-up transformer 0.4/6 kV or 6/0.69 kV
5. 6 kV motor

**Typical Vacon step-down step-up solution for 6 kV - 690 V - 6 kV**



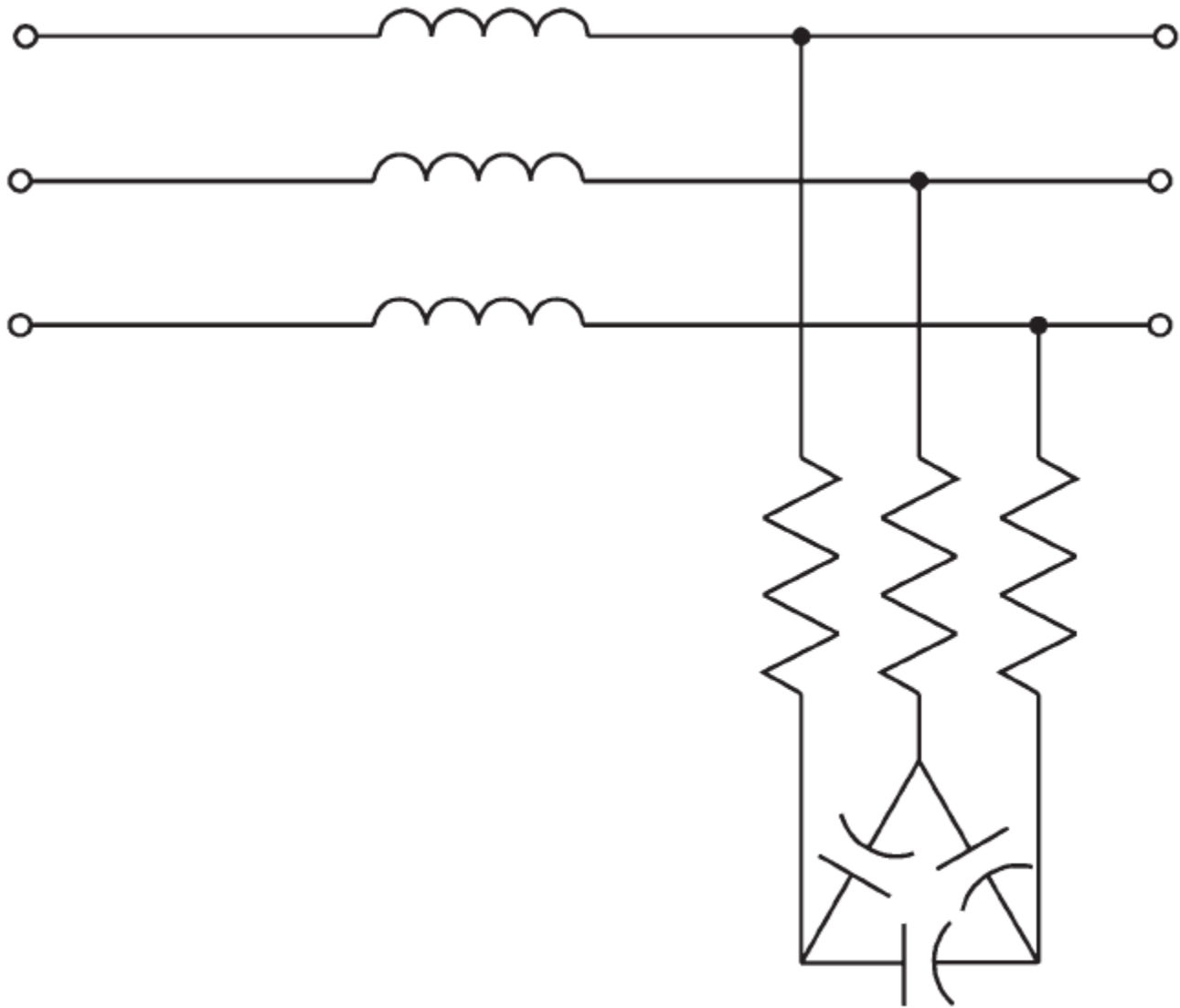


Fig. 3. ASD output filter.

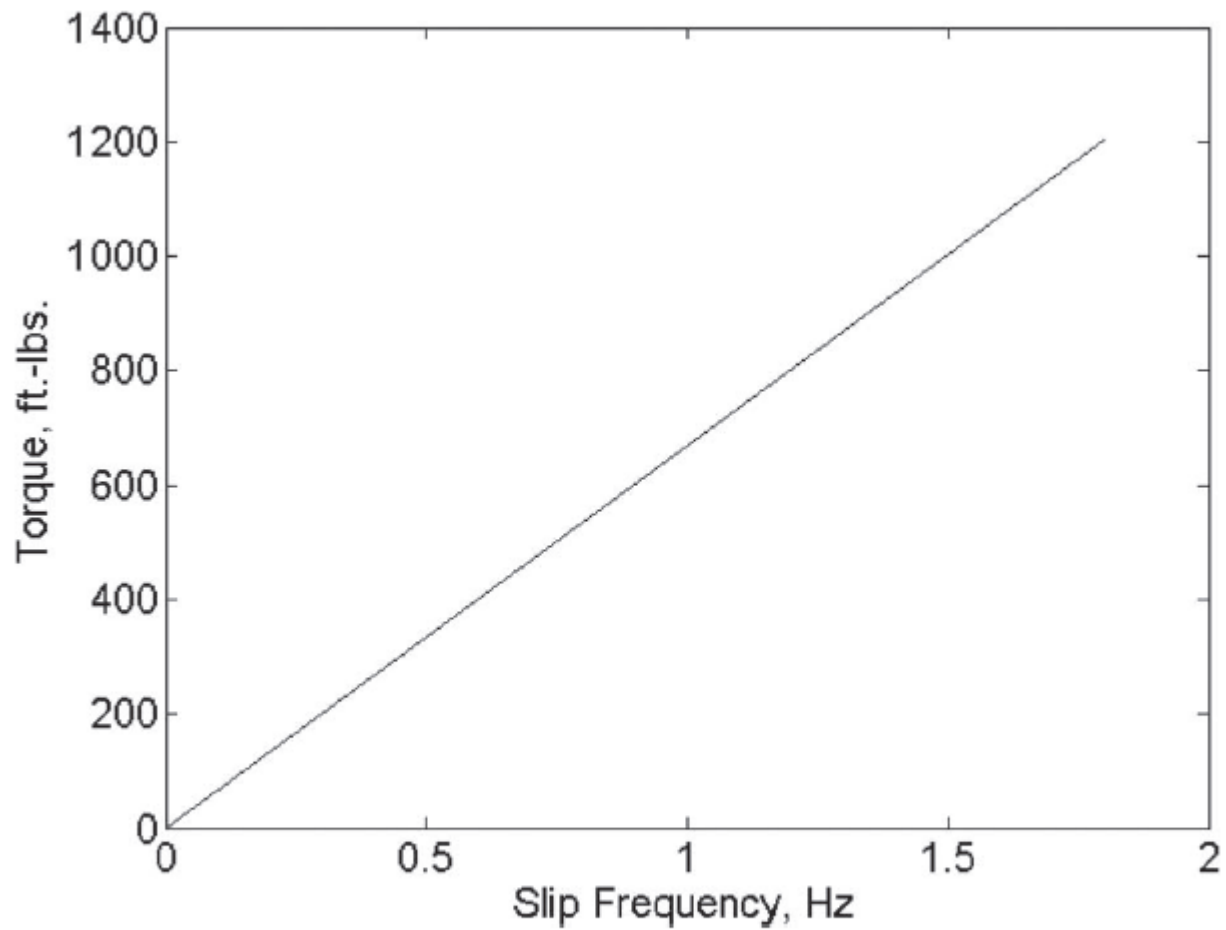


Fig. 5. Starting torque as a function of slip frequency.

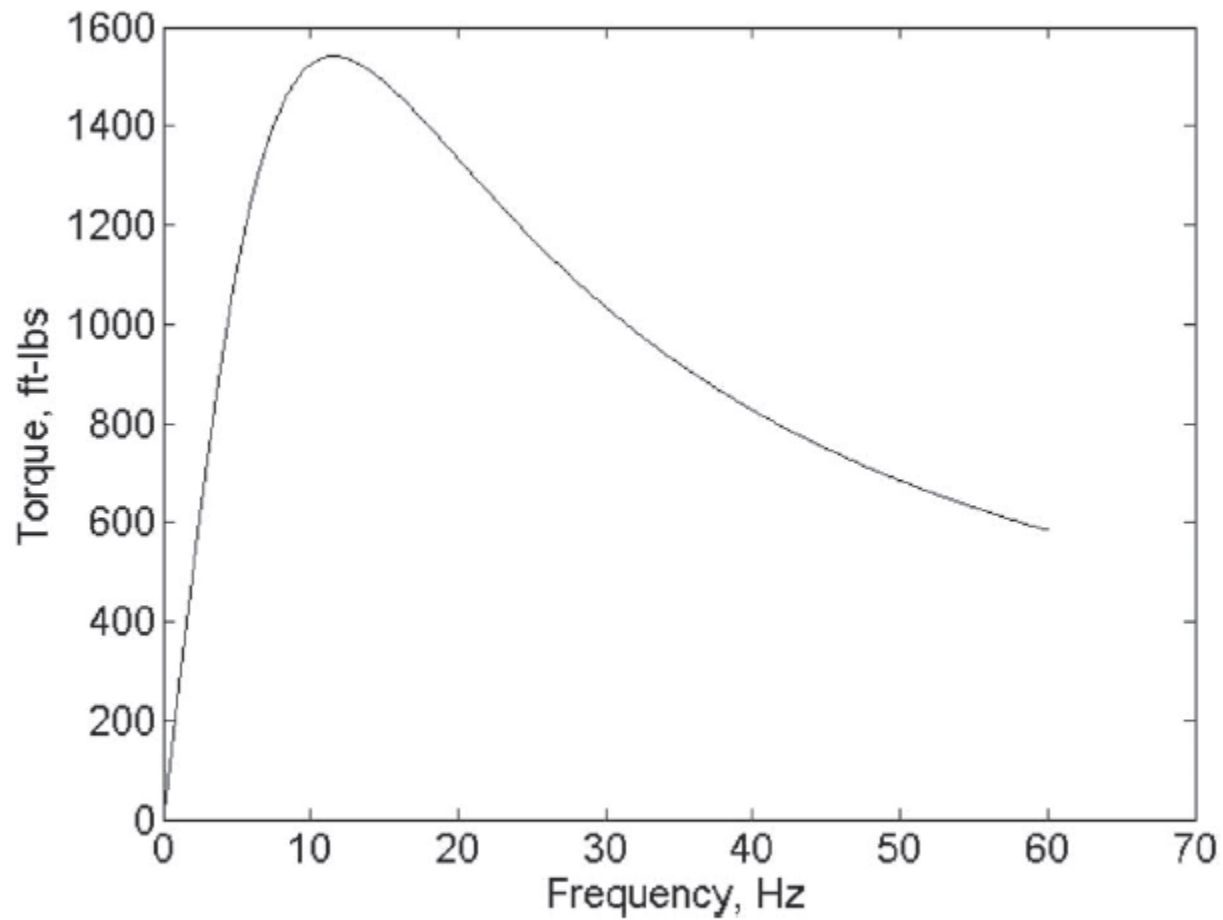
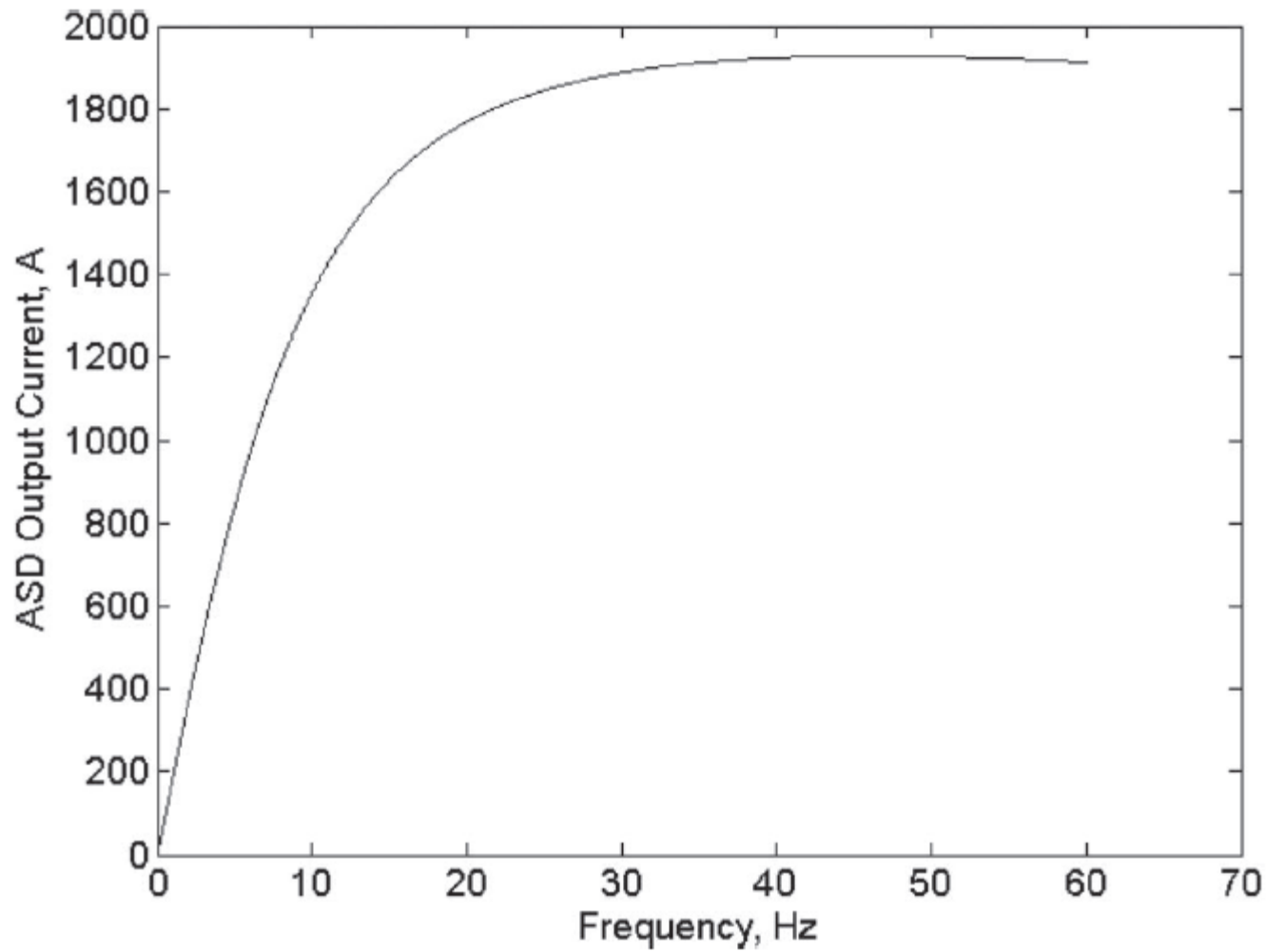


Fig. 6. Motor locked rotor torque as a function of frequency.





The analysis and observations from the case study suggest some guidelines for evaluating systems where an LV ASD supplies an MV motor:

- 1) A transformer kilovoltampere rating and a drive horsepower rating equal to 125% of the motor horsepower are reasonable choices for designing a system.
- 2) The transformer low-side winding should be delta, and the high-side winding should be grounded wye. Overcurrent protection (internal fuses or external devices) provides no protective benefit unless the motor is to be operated with the drive bypassed, and overcurrent protection is required for compliance with the National Electrical Code.
- 3) An ASD output filter rated for the drive overload current and capable of providing output voltage total harmonic distortion of no more than 5% is recommended.

4) Systems designed to not exceed 5% voltage drop from the drive output to the motor are expected to provide satisfactory service, but meeting this limit may not be possible because of the transformer impedance. Even if the voltage drop exceeds 5%, voltage at the motor may still be well within the limit of 90% of the rated voltage.

If voltage drop analysis indicates excessive drop, the transformer tap can be set to a higher position, or a lower impedance transformer can be specified.

5) If the motor develops torque exceeding the load breakaway torque and the drive output current is less than the limit, the motor will be able to start turning the load. If the breakaway torque is less than the rated running torque, a properly sized ASD should have no difficulty starting the load unless system impedance is excessive. If the breakaway torque is higher than the rated running torque, the starting analysis will provide an indication whether the drive overload capability is sufficient or whether a larger drive is required.