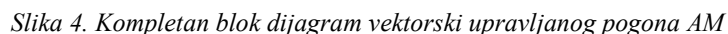


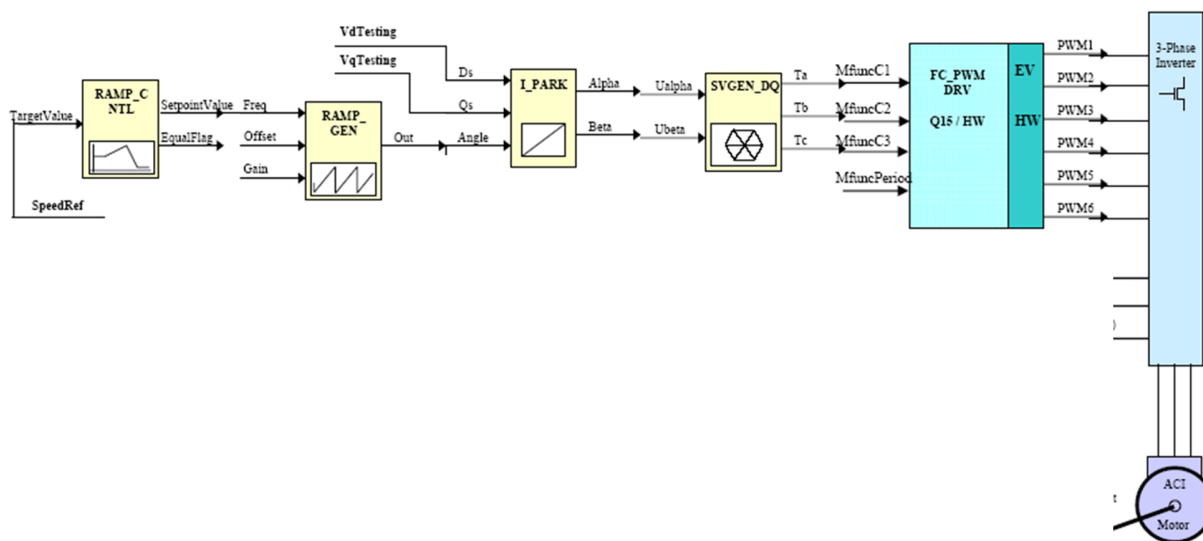
Na *Slici 4* je prikazan kompletan blok dijagram vektorskog pogona AM.



- Test VSI – SVPWM modulacija, V/f u otvorenoj sprezi
- Test CRVSI – Strujni regulatori, metod za podešavanje pojačanja PI regulatora
- Test FOC – IFOC testiranje, rotor zakočen – koliko q toliko i me, detuning...
- Test Brzinska petlja – metoda

Od softverskih modula vektorskog kontrolera uključeni su samo blokovi za transformaciju koordinata napona iz dq i $\alpha\beta$ (**IPARK**) kao i već pomenuti SVPWM (**SVGEN_DQ**). Generatorom reference vektora napona zadaju se komponente vektora napona u dq koordinatnom sistemu **VdTesting** i **VqTesting** kao i referentna učestanost **Freq** u *normalizovanim vrednostima u odnosu na njihove bazne vrednosti*. Nadređeni blokovi za orijentaciju polja i strujnu regulaciju su otklonjeni u ovom slučaju. Pošto orijentacija i strujna regulacija nisu aktivirani pogon AM se faktički upravlja putem V/f algoritma sa promenljivim odnosom. Na osnovu **VdTesting**, **VqTesting** i **Freq** proračunavaju se u vremenu komponente napona u $\alpha\beta$ koordinatnom sistemu. Ove komponente predstavljaju ulaze u SVGEN_DQ blok, koji po algoritmu modulacije putem prostornih vektora proračunava vremena provođenja u granama invertora **Ta**, **Tb** i **Tc**. Izlazni signali iz SVGEN_DQ bloka predstavljaju ulaze za PWM periferiju **FC_PWM** koja, na osnovu unapred određene periode PWM signala **MfuncPeriod** daje PWM signale odgovarajućih faktora ispunje, **PWM1 –PWM6** kojima se utiskuje u AM referentni vektor napona statora.

1



Slika 5. Blok dijagram pogona za testiranje faze I algoritma VU – VSI/SVPWM test

Pogona AM se pušta neopterećen, te nakon izvršenog zaleta se mogu snimiti vrednosti brzine obrtanja rotora i momenta. Ukoliko je pogon neopterećen, rotor AM će se vrteti sa brzinom obrtanja bliskom sinhronom. Povećanjem opterećenja brzina će se posledično smanjivati i klizanje između obrtnog polja i rotora će se povećavati. Snimanjem parova momenat/brzina za radne tačke na eksploatacionoj karakteristici AM može se snimiti linearni deo momentne karakteristike AM. To predstavlja prvi rezultat testa **VSI**.

Observacijom signala **Ta**, **Tb** i **Tc** kao izlaza iz SVPWM bloka može se zaključiti nekoliko bitnih stvari:

- (Analogni) Signali vremena vođenja faza iz SVPWM predstavljaju *offset*-ovane kvazisinusoidalne signale, sastoje se od zbira *offset*-a, sinusoide osnovnog harmonika i trećeg harmonika čija je amplituda specifičnog odnosa u odnosu na amplitudu prvog harmonika
- Treći harmonik signala koji je nultog redosleda simetrije je prisutan jedino u faznom signalu, međufazni signal ima samo osnovni harmonik
- Maksimalna vrednost napona u linearnom SVPWM opsegu je $V_{dc}/\sqrt{3}$ gde je V_{dc} napon jednosmernog međukola pretvarača, maksimalna vrednost napona koji se može modulirati je $2/3 \cdot V_{dc}$ u regionu nadmodulacije
- U zavisnosti od vrednosti faktora ispunje $m = V/V_{MAX}$ relativni odnos amplituda osnovnog i trećeg harmonika se menja; taj specifični odnos u svakom slučaju omogućuje maksimalno iskorišćenje naponskih mogućnosti pretvarača

Na Slici 6 prikazan je izgled signala vremena vođenja faza iz SVPWM bloka, međufaznih signala kao i frekvencijski spektar istih.

Slika 6. Izgleda signala a) vremena vođenja faza SVPWM b) međufaznih signala c) FFT faznih d) FFT međufaznih signala

Test CRVSI:

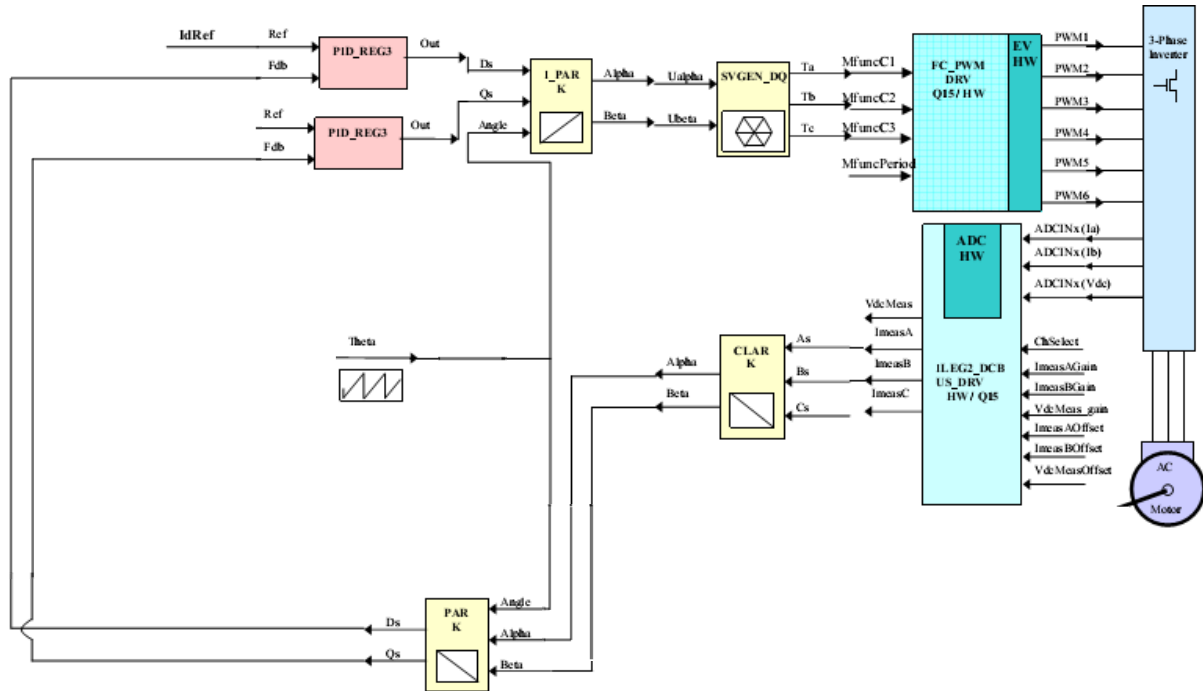
Vektorska kontrola je specijalan vid strujne kontrole kod koje se upravlja pored amplitude i faznim stavom struje u odnosu na referentni fluks rotora. Iz tog razloga jako je važno obezbediti strujnu regulaciju u pogonu u slučaju da se energija dobija iz naponskog invertora. Koncept strujno regulisanog naponskog izvora tzv. CRVSI se može obezbediti ukoliko dinamika uvedene strujne petlje u okviru kontrolnog algoritma značajno ubrza odziv struje u odnosu na prirodnu dinamiku uspostavljanja iste.

U fokusu testa CRVSI je utiskivanje vektora struje određenog faznog stava sa što većim vremenom reakcije i bez greške stacionarnog stanja PI regulatora d i q grana. Strujna regulaciona petlja kao ulaz ima reference struje u d i q osi **IdRef** i **IqRef** umesto napona, dok su prethodni međurezultat dobijen sa izlaza iz strujnih regulatora **PID_REG**. Naponi **Ds** i **Qs** se dobijaju na osnovu greške između referentnih struja i povratnom vezom izmerenih i procesuiranih dq komponenti **Fdb**. Upravljačka struktura dalje procesuirala naponski signal na identičan način putem transformacija koordinata sa signalom ugla **Theta** i SVPWM. Važno je naglasiti da je test CRVSI neophodno raditi utiskivanjem jednosmerne veličine u AM kako bi

se zabranilo obrtanje rotora i suzbio uticaj EMS u regulacionoj petlji struje. Signal ugla za transformacije **THETA** je neophodno postaviti na konstantnu vrednost čime se utiskuje stojeći vektor napona promenljive amplitude.

Dodatak u odnosu na test opisan na *Slici 5* jesu blokovi sa regulatorima struje u dq granama kao i povratna veza kojom se ostvaruje detekcija, merenje i procesuiranje signala struje sa strujnih senzora do regulatora. Prvi deo povratne sprege meri struje I_a i I_b u dve faze mašine. Ovi signali ulaze u blok **ADC_HW** koji ih konvertuje u digitalne ekvivalente **ImeasA** i **ImeasB**. Procenom treće fазne struje **ImeasC** ($I_{measC} = -I_{measA} - I_{measB}$) dalje procesuiranje signala uključuje dve transformacije koordinata redom: dvofazna Klark transformacija (blok **CLARK**) iz abc domena u $\alpha\beta$ sa izlaznim signalima **Alpha** i **Beta CLARK**; i rotaciona Park transformacija (blok **PARK**) sa dodatnim ulazom **Angle** za transformaciju $\alpha\beta$ komponenti u dq komponente **Ds** i **Qs PARK**.

Celokupna konfiguracija za testiranje CRVSI je prikazana na *Slici 7*.



Slika 7 Blok dijagram pogona za testiranje faze II algoritma VU – CRVSI test

Primenom sinteze parametara regulatora struje po *Dahlin* kriterijumu moguće je podesiti CRVSI blok za utiskivanje vektora struje statora u vektorski pogon sa željenim propusnim opsegom. Dodatnom manuelnom modifikacijom pojačanja u okviru pogona mogu se suzbiti svi nemodelovani efekti koji nisu uzeti u obzir pri sintezi parametara putem *Dahlin* kriterijuma.

Test FOC:

Treća test faza vektorskog pogona AM podrazumeva kalibraciju bloka za orijentaciju polja dq koordinatnog sistema na fluks rotora. Pokazano je da se orijentisanjem sistema na fluks rotora dobija raspregnuta kontrola fluksa i momenta u pogonu putem upravljačkih komponenti vektora struja statora. Uz prethodno testiran CRVSI ovim je omogućena minimalna konfiguracija vektorskog kontrolera elektromotornog pogona sa AM.

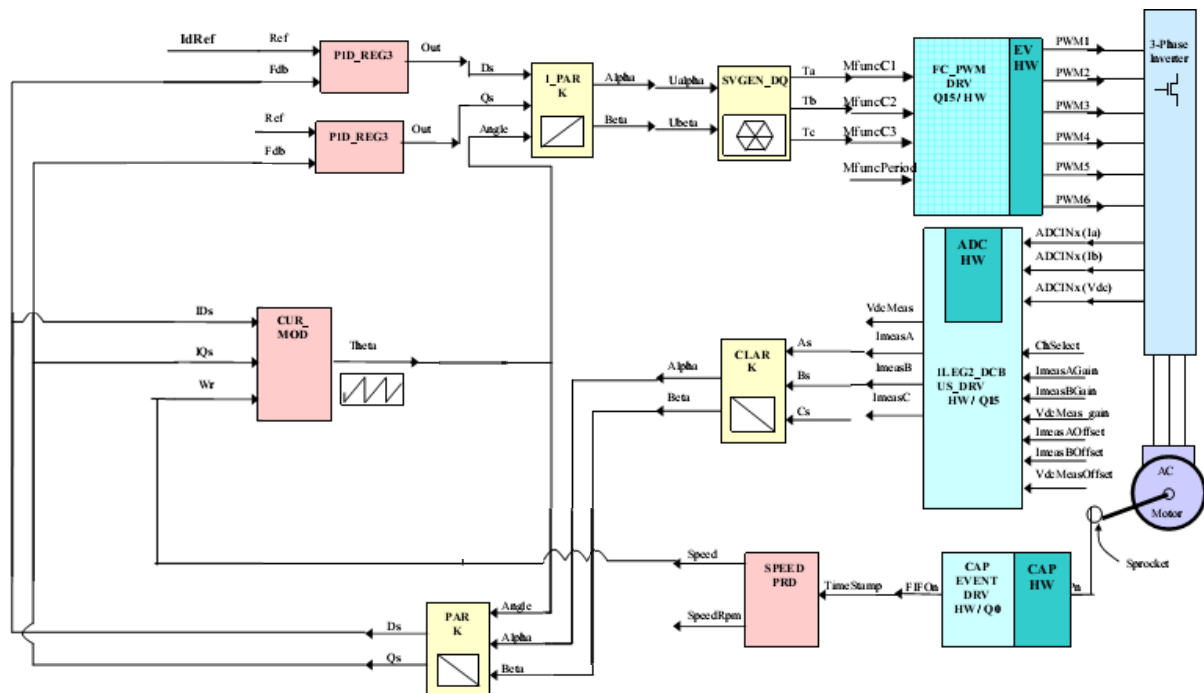
Ova faza pored prethodnih blokova uključenih u okviru testa CRVSI uključuje i blokove za kalkulaciju signala ugla dq sistema **Theta** (blok **CUR_MOD**) kao i skup blokova koji sačinjavaju povratnu spregu po brzini obrtanja **CAP_HW** i **SPEED_PRD**. Na *Slici 8* uključeni su svi relevantni blokovi neophodni za orijentaciju polja u smislu postizanja vektorskog pogona.

Cilj testa je omogućiti kalibraciju bloka za proračun signala **THETA** kojim se pozicionira referentni sistem i veličine u njemu u odnosu na fluks rotora. Pod kalibracijom bloka **CUR_MOD** se podrazumeva interaktivna promena vrednosti parametra inverzne vremenske konstante kako bi se ostvarila linearna korelacija između momenta AM i komponente statora po q osi pri ukočenom rotoru AM. U osnovi bloka **CUR_MOD** jeste indirektan proračun klizanja dq koordinatnog sistema na osnovu izmerenih signala vektora struje statora **IDs** i **IQs**. Učestanost klizanja srazmerna odnosu komponentni vektora struje statora po q i d osi se dodaje na postojeći signal brzine **Speed** kao dodatni ulaz u isti blok, te se zbirni signal integriro za potrebe transformacija koordinata. Ukoliko se parametar inverzne vremenske konstante rotora u mikrokontroleru poklopi

sa istim parametrom u stvarnom pogonu, postići će se linearna zavisnost između momenta AM i q komponente struje statora pri konstantnoj d komponenti. Promena struje statora d ose će rezultovati samo promenom fluksa rotora u mašini, promena q komponente struje statora će direktno menjati momenat AM. Neophodno je napomenuti da je ovaj test potrebno raditi pri ukočenom rotoru, tj. u stanju kratkog spoja pogona. Ovim se onemogućuje obrtanje rotora AM te ne postoji opasnost da se mašina usled značajnih vrednosti postignutom momenta pokrene. Treći ulaz u blok CUR_MOD Speed može se izjednačiti sa nulom u tom slučaju te je učestanost napajanja jednak učestanosti klizanja pogonu.

Pošto često nije dostupan senzor magnetnog polja/fluksa pribegava se merenju momenta putem kočione mašine. Koraci za kalibraciju su redom:

- Postavljanje d komponente vektora struje statora na vrednost ekvivalentne nazivne struje magnetenja mašine
- Čekanje na uspostavljanje fluksa u mašini, pod pretpostavkom da mikrokontroler poseduje tačnu vrednost inverzne vremenske konstante koja odgovara onoj u stvarnom pogonu
- Zatim se daje profil skokovite reference komponente struje po q osi u ekvidistantnim vremenskim intervalima i beleži vrednost momenta sa merne kočnice
- Na osnovu podataka o vrednostima q komponente struje rotora, izračunatih odgovarajućih klizanja (odgovaraju učestanostima napajanja) kao i momenata AM neophodno je sačiniti linearnu korelaciju
- Mera odstupanja od linearne korelacije (standardna devijacija, modus/medijana...) treba da obezbedi mehanizam za adaptaciju parametra inverzne vremenske konstante na način da se ponovnim ponavljanjem prethodnih koraka ista smanji
- U slučaju pronalaska kalibracionog parametra inverzne vremenske konstante rotora kojom je mera odstupanja linearne zavisnosti momenta od klizanja minimalna postupak se terminira a vrednost parametra se proglašava za pravom vrednošću kojom se ostvaruje pravilna orijentacija u smislu vektorske kontrole



Slika 8 Blok dijagram pogona za testiranje faze III algoritma VU – FOC test

Test Brzinska petlja:

Poslednji test vektorskog pogona AM upravljanog po brzini obrtanja rotora jeste zatvaranje povratne sprege po brzini. Blok dijagram pogona za ovaj test je već prikazan na *Slici 4*.

Povratna veza po brzini je već bila uključena testu koji je prethodio tekućem – test *IFOC*, ovde se ista dodatno koristi za zatvaranje sprege po brzini obrtanja. Signal **Speed** dobijen procesuiranjem sa senzora brzine/pozicije AM, pored dovođenja u IFOC blok za proračun vektorske orijentacije polja, se dovodi i na ulaz regulatora brzine **PID_REG Speed**. Na osnovu signala reference brzine **SpeedRef** i signala brzine **Speed**, generiše se signal greške brzine koji pogoni brzinski regulator generišući signal reference q komponente struje statora. Ovaj signal je direktno srazmeran željenom momentu AM koji treba da grešku brzine obrtanja svede na nulu ako je prethodni test uspešno izvršen. Uz dodatno podešeni signal reference d

struje statora na željenu nominalnu struju magnećenja dalje procesuiranje signala se vrši u skladu sa procesuiranjem u pojedinim već opisanim fazama testa.

Ulazni parametri koje je neophodno podesiti u okviru ovog testa su parametri regulatora brzine. U principu se bira regulator *PI* tipa kojim se ostvaruju dobre dinamičke i statičke performanse u vektorskom pogonu. Izbor parametara regulatora brzine zavisi od zahteva aplikacije, željenih performansi koje se postavljaju pred pogon, domene primene... Ono što je svakako važno jeste poznavanje parametra mehaničkog momenta inercije pogona J odnosno mehaničke vremenske konstante T_m ukoliko se odziv u pogonu želi kvalitetno podesiti.

Test brzinske petlje stoga najpre podrazumeva sprovođenje metode za merenje dominantne mehaničke vremenske konstante. Metode zaustavljanja, zaleta sa konstantnim momentom itd pri neopterećenom stanju u pogonu mogu da posluže u svrhe proračuna ovog parametra. Nakon merenja momenta inercije moguće je nekom od analitičkih metoda za proračun parametara regulatora brzine dobiti vrednosti proporcionalnog i integralnog pojačanja kojim se obezbeđuju željeni zahtevi pogona.

Primer zaleta pogona sa konstantnim elektromagnetnim momentom m_{e_const} u neopterećenom stanju $m_{opt} = 0$ može da posluži kao način za račun mehaničke vremenske konstante T_m :

$$m_{e_const} - 0 = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$J = \frac{m_{e_const}}{\frac{d\omega}{dt}} \approx \frac{m_{e_const}}{\frac{\Delta\omega}{\Delta t}} = \frac{m_{e_const}}{\frac{\omega_{stop}}{t_{stop}}} \quad (1)$$

$$T_m = J \frac{\omega_b}{M_b}$$

gde su redom:

- ω_{stop} – krajnja brzina u testu
- t_{stop} – vremenska dužina primene konstantnog momenta
- ω_b – bazna vrednost brzine za skaliranje u pogonu
- M_b – bazna vrednost momenta za skaliranje u pogonu

Neophodno je naglasiti nekoliko bitnih stvari vezanih za proračun parametara *PI* regulatora brzine na osnovu gore izmerenog momenta inercije pogona.

- Izračunat momenat inercije važi za *neopterećen* pogon:

U tom slučaju je potrebno poznavati momenat inercije opteretne mašine kao i prenosne odnose mehaničkih zupčastih prenosa ili sprovesti ogled sa priključenom opteretnom mašinom uz poznavanje profila momenta opterećenja/brzina za opteretnu mašinu. Time se robusnost metode za proračun parametara može značajno redukovati usled osetljivosti i parametarske nesigurnosti koja se tada ispoljava.

- Nesigurnost prilikom odabira vrednosti za zaletni momenat pogona:

U slučaju zadavanja prevelikog momenta opterećenja imaju se nagli mehanički udari u pogonu koji mogu da dovedu do oštećenja mehanike pogona. Dodatno, pogon se može razleteti ukoliko zaštitna oprema nije podešena da adekvatno reaguje u isključi pogon sa napajanja.

- Problemi vezani za diferenciranje brzine u vremenu $\Delta\omega/\Delta t$:

Izvod brzine u vremenu se aproksimira diferencijalom i računa na osnovu krajnje zaletne brzine ω_{stop} i vremenske instance kada se pogon isključuje sa napajanja t_{stop} . Ovim proračunom se zanemaruju mehanički gubici usled trenja i ventilacije te se preciznost metode narušava.

Ukoliko se ne mogu kompenzovati prethodni problemi, neophodno je pribеći eksperimentalnim metodama za proračun parametara regulatora brzine kojima se direktno, utiskivanjem signala i merenjem odziva mogu odrediti parametri regulatora brzine bez prethodnog proračuna momenta inercije pogona.