

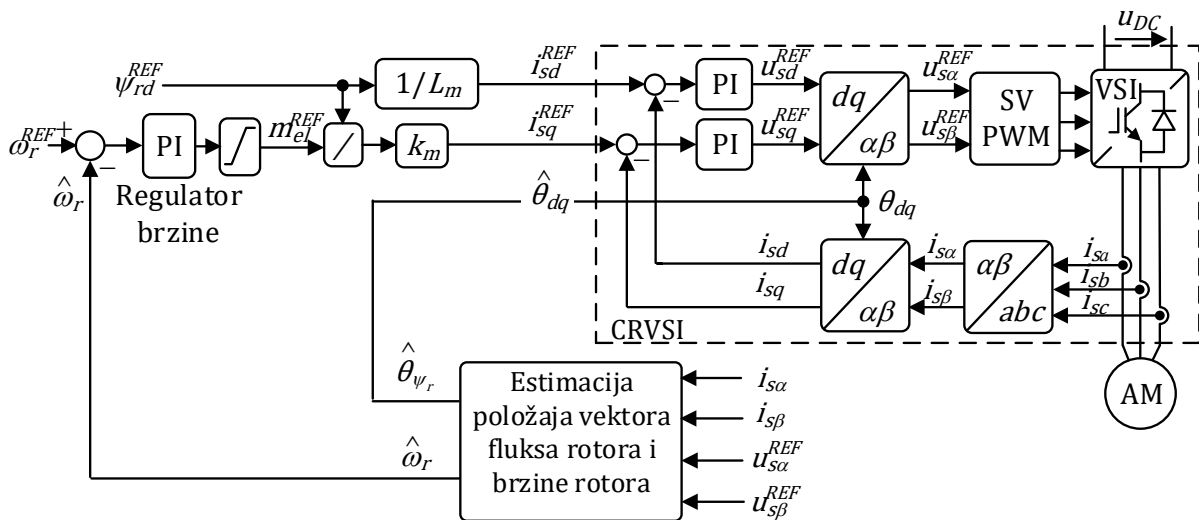
8.2. Algoritmi pogodni za upravljanje AM bez davača položaja

U prethodnom poglavlju je dat pregled metoda za procenu brzine i položaja rotora koje se primenjuju u pogonima sa AM koji ne poseduju davač na vratilu. U ovom poglavlju su opisane tri upravljačke šeme koje se uobičajeno koriste u ovoj vrsti pogona, a koje ostvaruju nezavisno upravljanje fluksom i momentom i omogućuju regulaciju brzine rotora. Dve šeme se baziraju na vektorskoj kontroli, a treća na direktnoj kontroli momenta.

8.2.1. Vektorska kontrola u pogonima sa AM bez davača položaja

Direktna vektorska kontrola (*Direct field oriented control – DFOC*) za procenu položaja vektora fluksa rotora ne koristi informaciju o brzini rotora, pa je samim tim prirodno da *DFOC* upravljan pogon sa AM radi bez davača brzine ili položaja na vratilu (*shaft-sensorless*). Kod pogona bez davača na vratilu polje $\hat{\theta}_{dq}$ se orijentiše na procenjeni ugao vektora rotorskog fluksa $\hat{\theta}_{\psi_r}$, a povratna sprega po brzini se zatvara po procenjenoj (estimiranoj) vrednosti $\hat{\omega}_r$.

Na slici 8.7 je prikazan blok dijagram vektorski upravljanoj pogona sa AM koji ne poseduje davač na vratilu ali je upravljano po brzini rotora. Pogon koristi klasičnu *DFOC* šemu za nezavisno upravljanje fluksom rotora i momentom AM, uz položaj fluksa rotora $\hat{\theta}_{dq} = \hat{\theta}_{\psi_r}$ koji je procenjen na osnovu terminalnih signala, tačnije referentnih napona i merenih struja. Šema poseduje blok za regulaciju brzine koji koristi informaciju o procenjenoj brzini rotora $\hat{\omega}_r$, koja je takođe dobijena na osnovu terminalnih veličina, pogl. 8.1.



Slika 8.7. Primena DFOC u pogonu sa AM regulisanom po brzini bez davača položaja

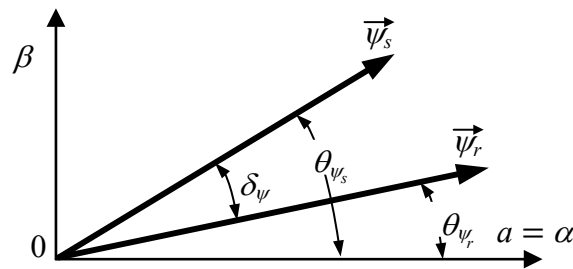
Indirektna vektorska kontrola (*Indirect field oriented control – IFOC*) za procenu položaja vektora fluksa rotora koristi informaciju o položaju rotora i ona je prvenstveno namenjena za pogone sa davačem na vratilu. Ali, *IFOC* je moguće primeniti i u pogonima bez davača položaja uz procenu ugla fluksa rotora $\hat{\theta}_{dq}$ na osnovu procenjene brzine rotora $\hat{\omega}_r$, koja se ujedno koristi i za zatvaranje povratne sprege po brzini, slika 8.8. Primena *IFOC* je posebno pogodna u kombinaciji sa *MRAS* estimatorom brzine, na čijem izlazu se dobija procenjena brzina rotora. Dodatna pogodnost primene *IFOC* sa *MRAS* procenom brzine je u tome što u tom slučaju orijentacija polja ne zavisi od parametra vremenske konstante rotora, [8_87].

$$m_{el} = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\vec{\Psi}_s| |\vec{\Psi}_r| \sin \angle(\vec{\Psi}_r, \vec{\Psi}_s). \quad (8.36)$$

Za polifazore fluksa statora i rotora u $\alpha\beta$ koordinatnom sistemu, slika 8.9, izraz se svodi na:

$$m_{el} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\vec{\Psi}_s| |\vec{\Psi}_r| \sin \delta_\psi, \quad (8.37)$$

gde je $\delta_\psi = \theta_{\psi_s} - \theta_{\psi_r}$ ugao između polifazora fluksa rotora i statora.



Slika 8.9. Polifazori fluksa statora i fluksa rotora u $\alpha\beta$ koordinatnom sistemu

Iz dobijenog izraza vidi se da moment koji AM razvija zavisi od amplituda vektora fluksa statora i rotora, kao i od ugla između njih. Pošto je fluks rotora sporopromenljiva veličina (jer je vremenska konstanta rotora T_r kaveznih AM obično velika), on se menja sporije u odnosu na fluks statora i može se smatrati da je njegova amplituda konstantna u kratkom vremenskom periodu. Kao rezultat, elektromagnetni moment je moguće promeniti u željenom smeru promenom ugla između polifazora fluksa statora i rotora δ_ψ , jer prvi vektor brže prati promenu ugla vektora napona. Dodatno, ako je neophodno menjati i amplitudu fluksa statora, onda je moguće polifazor napona statora kontrolisati tako da se istovremeno menjaju i ugao δ_ψ i dužina polifazora fluksa statora.

Zanemarujući pad napona na omskoj otpornosti statora, jednačina naponske ravnoteže statora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sistemu svodi se na oblik,

$$\vec{u}_s = \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_s, \quad (8.38)$$

iz kojeg se vidi da se polifazorom napona statora direktno utiče na polifazor fluksa statora, što je osnova DTC upravljanja. Diskretizacijom (8.38) u kratkom vremenskom intervalu ΔT , pri primeni polifazora napona $\vec{u}_s$, dobija se sledeća promena vektora fluksa statora,

$$\Delta \vec{\Psi}_s = \vec{u}_s \Delta T. \quad (8.39)$$

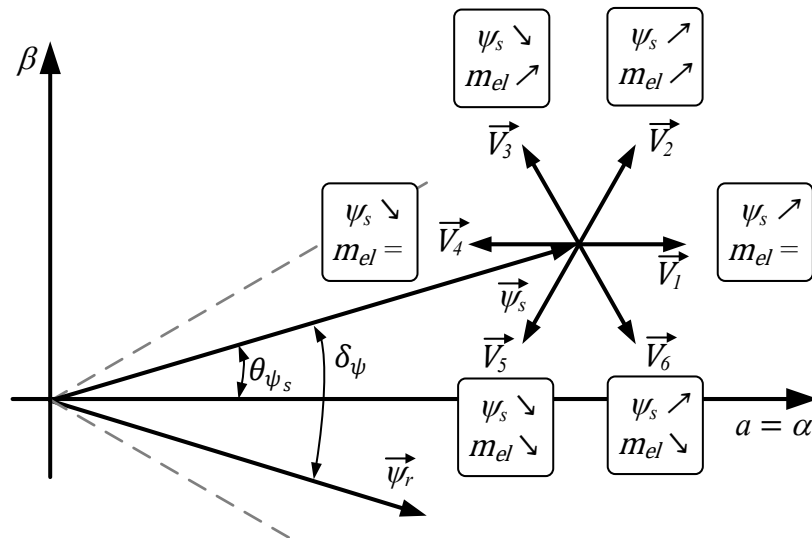
Jednačina (8.39) pokazuje da se tokom kratkog perioda ΔT inkrement polifazora fluksa statora $\Delta \vec{\Psi}_s$ pomera na isti način kao i polifazor napona $\vec{u}_s$ primenjen tokom tog perioda. Pošto kod trofaznog naponskog invertora sa SVPWM upravljanjem imamo 6 aktivnih i 2 nulta vektora napona, njihovim izborom možemo menjati inkrement fluksa statora, odnosno menjati mu amplitudu i okretati ga u željenom smeru. Ovo pomeranje fluksa statora u odnosu na fluks rotora dovodi do promene njihovog ugla, pa samim tim i promene momenta, a osim toga, promena amplitude fluksa statora vremenom dovodi i do promene amplitude fluksa rotora.

U narednim poglavljama biće opisane dve osnovne konfiguracije DTC upravljanja: jednostavna klasična direktna kontrola momenta primenom histerezisnih komparatora i diskretnih naponskih vektora, i direktna kontrola momenta sa modulacijom prostornog vektora (DTC-SVM) koja je složenija, ali ima bolje performanse.

8.2.2.2. Klasična direktna kontrola momenta

Klasična DTC metoda bazira se na histerezisnoj regulaciji fluksa statora i elektromagnetnog momenta AM primenom dva nezavisna histerezisna komparatora. Histerezisni komparatori porede stvarne (estimirane) vrednosti sa odgovarajućim referentnim vrednostima momenta i fluksa, te generišu znakove greške između zadatih i ostvarenih vrednosti koji se uvode u DTC prekidačku tabelu. Na osnovu znaka greške momenta i greške fluksa u prekidačkoj tabeli se odlučuje koji naponski vektor iz seta raspoloživih napona SVPWM-a treba dovesti motoru kako bi se obe greške umanjile. Ovaj postupak je prilično jednostavan, pa kod klasične DTC nema potrebe za obrtnim transformacijama, strujnom kontrolom, niti PWM modulacijom širine impulsa.

Na slici 8.10 je ilustrovana osnovna ideja klasičnog DTC pristupa, za polifazor fluksa statora $\vec{\Psi}_s$ u $\alpha\beta$ ravni koji se nalazi u prvom sektoru i koji se okreće u smeru suprotnom od kazaljke na satu. U istoj $\alpha\beta$ ravni nacrtani su i aktivni polifazori napona statora $\vec{V}_1 - \vec{V}_6$ dobijeni primenom SVPWM-a, koji rezultuju odgovarajućim inkrementima polifazora fluksa statora. Pretpostavlja se da se polifazor fluksa rotora $\vec{\Psi}_r$, kao sporopromenljiva veličina, neće promeniti tokom upravljačke periode ΔT .



Slika 8.10. Izbor vektora napona za vektora fluksa statora u prvom sektoru [8_115]

Za povećanje elektromagnetnog momenta potrebno je ubrzati polifazor fluksa statora $\vec{\Psi}_s$ u smeru obrnutom od smera kazaljke na satu, čime se povećava ugao δ_ψ u (8.37), a što se u slučaju prvog sektora postiže primenom vektora $\vec{V}_2$ ili $\vec{V}_3$. Ukoliko je pri tome potrebno povećati i amplitudu fluksa statora, bira se vektor napona $\vec{V}_2$, a ako ju je potrebno smanjiti, bira se vektor $\vec{V}_3$. Za smanjenje elektromagnetnog momenta potrebno je smanjiti ugao δ_ψ u (8.37), odnosno vektor fluksa statora pomeriti u smeru kazaljke na satu. To se postiže primenom vektora $\vec{V}_5$ ili $\vec{V}_6$, pri čemu vektor $\vec{V}_5$ ujedno i smanjuje amplitudu fluksa statora, a vektor $\vec{V}_6$ je povećava. Za

sve ostale sektore se mogu izvesti slična razmatranja za izbor vektora koji povećavaju ili smanjuju moment i fluks statora.

Ukoliko elektromagnetni moment treba da ostane nepromenjen, biraju se nulti vektori napona $\vec{V}_0$ ili $\vec{V}_7$ koji zaustavljaju obrtanje polifazora fluksa statora. Međutim, ako se nulti vektori drže previše dugo, polifazor fluksa rotora će preći polifazor fluksa statora i ugao između ova dva polifazora menja predznak, pa dolazi do promene smera momenta.

Klasična DTC se bazira na histerezisnim regulatorima fluksa i momenta i na DTC prekidačkoj tabeli načinjenoj za sve sektore na osnovu prethodno datog razmatranja. Referentne vrednosti amplituda prostornog vektora statorskog fluksa ψ_s^{REF} i elektromagnetnog momenta m_{el}^{REF} se u histerezisnim regulatorima porede sa estimiranim vrednostima $\hat{\psi}_s$ i $\hat{m}_{el}$, respektivno. Greška fluksa je uobičajeno diskretizovana u dva nivoa pomoću dvostepenog histerezisnog regulatora, dok je greška momenta diskretizovana u tri nivoa pomoću trostepenog histerezisnog regulatora:

$$e_\psi = \psi_s^{REF} - \hat{\psi}_s \quad e_m = m_{el}^{REF} - \hat{m}_{el}$$

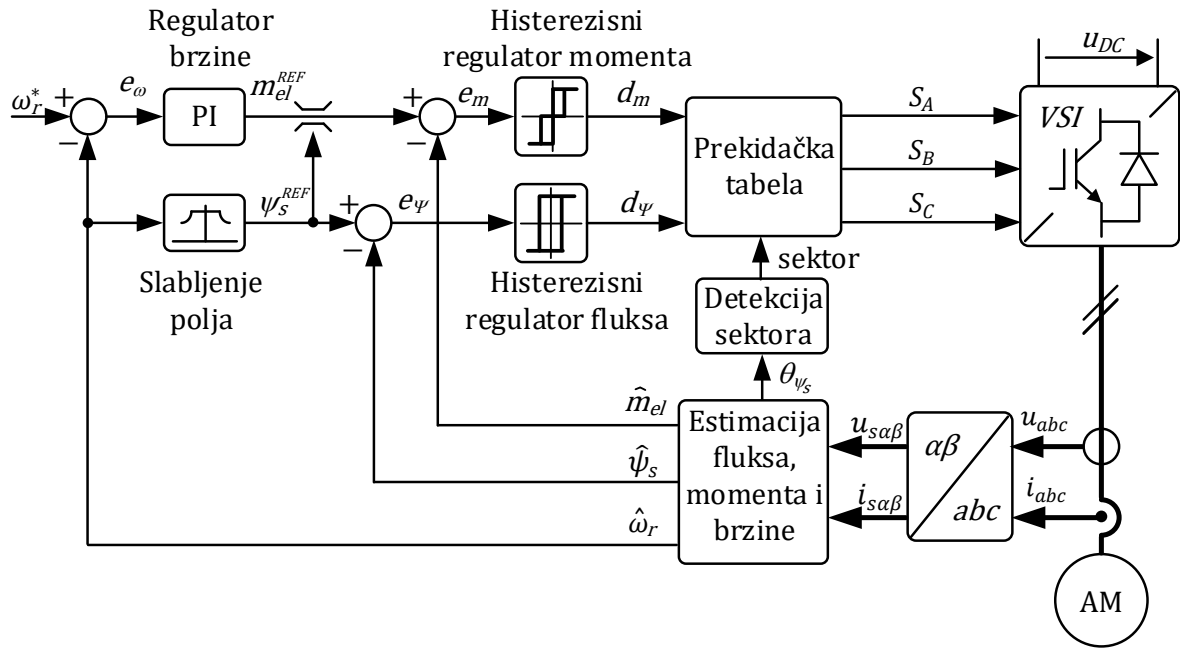
$$d_\psi = \begin{cases} -1, & e_\psi \leq -H_\psi \\ 1, & e_\psi \geq H_\psi \end{cases} \quad d_m = \begin{cases} -1, & e_m \leq -H_m \\ 0, & -H_m < e_m < H_m \\ 1, & e_m \geq H_m \end{cases}$$

DTC prekidačka tabela za sve sektore je prikazana u tabeli 8.1. Ulaz u tabelu su diskretna greška amplitude fluksa statora d_ψ i diskretna greška momenta d_m . U tabeli zahtevu za povećanje veličine ($\nearrow$) odgovara iznos 1, za smanjenje veličine ($\searrow$) odgovara -1 , a za zadržavanje veličine (=) odgovara izlaz 0.

Tabela 8.1. Prekidačka tabela za izbor optimalnog vektora napona statora

d_ψ	d_m	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6
1	1	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_1$
	0	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_0$
	-1	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_5$
-1	1	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$
	0	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_7$
	-1	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_4$

Na slici 8.11 je data blok šema REMP sa AM koji je regulisan po brzini i upravljan klasičnom DTC. Regulacija brzine se vrši preko linearnog PI regulatora čiji izlaz je referentni moment, dok se referentna vrednost fluksa statora dobija kao izlaz bloka za slabljenja polja. Fluks i moment se regulišu histerezisnim regulatorima. Sektor u kome se nalazi vektor fluksa statora se detektuje na osnovu ugla estimiranog polifazora fluksa statora i unosi u DTC tabelu koja za dati sektor i greške fluksa i momenta odgovarajući bira naponski vektor. Detekcija sektora u kome se fluks statora nalazi se vrši po algoritmu sličnom onom kod SVPWM, ali se umesto napona $u_{s\alpha}^{REF}$ i $u_{s\beta}^{REF}$ kao ulazi koriste koordinate estimiranog fluksa statora $\hat{\psi}_{s\alpha}$ i $\hat{\psi}_{s\beta}$.



Slika 8.11. Blok šema klasične DTC kontrole [4_4]

Na slici 8.11 je prikazan poseban blok za estimaciju fluksa, momenta i brzine AM. U ovom bloku se prvo procenjuju komponente vektora fluksa statora u stacionarnom $\alpha\beta$ sistemu ($\hat{\psi}_{s\alpha}$ i $\hat{\psi}_{s\beta}$) na osnovu vektora napona i struje statora AM, detaljnije u pogl. 8.1. Zatim se amplituda i položaj vektora fluksa statora AM računaju na osnovu tih koordinata,

$$|\hat{\psi}_s| = \sqrt{\hat{\psi}_{s\alpha}^2 + \hat{\psi}_{s\beta}^2}, \quad (8.40)$$

$$\hat{\theta}_{\psi_s} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\psi}_{s\beta}}{\hat{\psi}_{s\alpha}} \right), \quad (8.41)$$

s tim da je umesto (8.41) moguće koristiti PLL petlju. Konačno, moment koji AM razvija se estimira (procenjuje) kao vektorski proizvod vektora fluksa i struje statora,

$$\hat{m}_{el} = \frac{3}{2} p (\hat{\psi}_{s\alpha} i_{s\beta} - \hat{\psi}_{s\beta} i_{s\alpha}). \quad (8.42)$$

8.2.2.3. Direktna kontrola momenta modulacijom prostornog vektora

Direktnu kontrolu momenta je moguće realizovati i primenom modulacije prostornog vektora (DTC-SVM) u kojoj histerezisne regulatore i DTC tabelu zamenjuju dva PI regulatora koji kontrolišu koordinatate polifazora napona koji sada može da poprimi bilo koju amplitudu ili fazu, a ne samo 8 diskretnih vrednosti. Time se značajno smanjuju talasnost momenta i fluksa, a prekidačka učestanost invertora postaje kontrolisana i konstantna.

DTC-SVM algoritam se zasniva na jednačinama za fluks i moment u sinhrono rotirajućem dq sistemu osa vezanom za fluks statora. Ukoliko se d osa postavi u pravac polifazora fluksa statora, tada je $\psi_{sq(s)} \equiv 0$ i $\psi_s = \psi_{sd(s)}$, pa se jednačina naponske ravnoteže statora d ose u sinhrono rotirajućem dq sistemu vezanom za fluks statora svodi na,

$$u_{sd(s)} = R_s i_{sd(s)} + \frac{d}{dt} \psi_{sd(s)} \rightarrow \psi_s = \psi_{sd(s)} = \int [u_{sd(s)} - R_s i_{sd(s)}] dt, \quad (8.43)$$

odakle se vidi da se amplitudom fluksa statora upravlja samo preko komponente napona u d osi. Izražavanjem struje q ose iz naponske jednačine q ose statora,

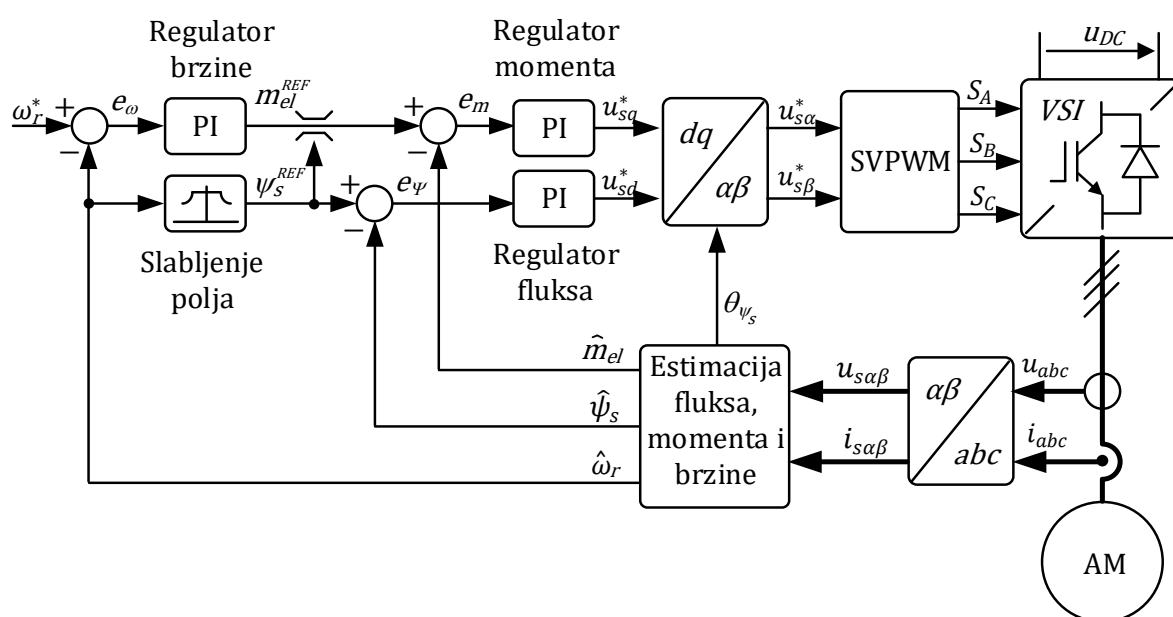
$$u_{sq(s)} = R_s i_{sq(s)} + \omega_s \psi_{sd(s)} \rightarrow i_{sq(s)} = \frac{u_{sq(s)} - \omega_s \psi_s}{R_s}. \quad (8.44)$$

dobija se da se momentom u sinhrono rotirajućem dq koordinatnom sistemu vezanom za stator može upravljati preko komponente napona u q osi,

$$m_{el} = \frac{3}{2} p \psi_s i_{sq(s)} = \frac{3}{2} p \frac{\psi_s}{R_s} (u_{sq(s)} - \omega_s \psi_s). \quad (8.45)$$

Relacije (8.43) i (8.45) su osnova nezavisne kontrole fluksa i momenta AM primenom DTC-SVM. Fluksom statora se upravlja komponentnom napona statora $u_{sd(s)}$ koja je kolinearna sa njim, a momentom komponentnom napona statora $u_{sq(s)}$ koja je ortogonalna na fluks statora.

Blok šema DTC-SVM pogona sa AM koji je regulisan po brzini je data na slici 8.12. Po ovoj šemi se povratna sprega po procenjenom fluksu i momentu zatvara primenom dva PI regulatora koji upravljaju komponentama vektora napona u dq sistemu vezanom za vektor fluksa statora, $u_{sd(s)}$ i $u_{sq(s)}$, i time nezavisno kontrolišu amplitudu fluksa statora (8.43) i ostvareni moment (8.45). Šema se bazira na dq sistemu koji je vezan za vektor fluksa statora čiji je položaj lakše proceniti nego položaj vektora fluksa rotora, što je njena važna komparativna prednost u pogonima bez davača položaja. Preostali deo šeme je sličan sa klasičnim vektorskim rešenjima, pogon je regulisan po brzini dodavanjem kaskadnog PI regulatora brzine koji upravlja sa m_{el}^{REF} , a blok za slabljenje polja upravlja fluksom statora ψ_s^{REF} , na sličan način kao blok za slabljenje fluksa rotora, i tim je omogućen rad na brzinama većim od nominalne.



Slika 8.12. Blok šema DTC sa modulacijom prostornog vektora (DTC-SVM) [4 4]