

Estimacija brzine vrtnje i položaja magnetskog toka sinkronog generatora vjetroagregata korištenjem Kalmanova filtra

Tomislav Lončarek

Vinko Lešić

Mario Vašak

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Eksperimentalni rezultati

Zaključak



23. ožujka 2015



Sadržaj

- 1 Motivacija i ciljevi rada
- 2 Upravljanje generatorom
- 3 UKF
- 4 Modeliranje SG
- 5 Simulacijski rezultati
- 6 Nadogradnja observera
- 7 Eksperimentalni rezultati
- 8 Zaključak

Motivacija i
ciljevi rada

Upravljanje
generatorom

UKF

Modeliranje
SG

Simulacijski
rezultati

Nadogradnja
observera

Eksperimentalni
rezultati

Zaključak

Motivacija i ciljevi rada

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

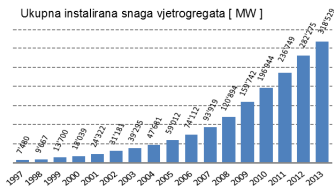
Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

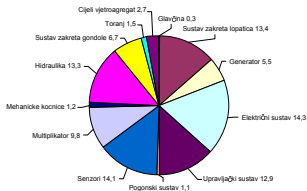
Ekperimentalni rezultati

Zaključak

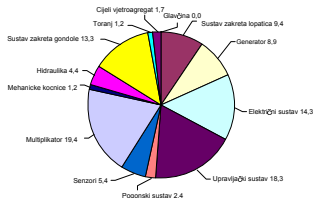


- povećanje instalirane snage vjetroelektrana
- srednja raspoloživost vjetroelektrana oko 98 %, zbog pouzdanosti i čestih intervencija održavanja

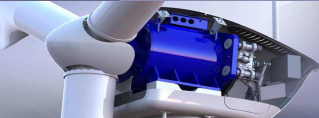
$$\bar{v} = \frac{t_b}{t_b + t_r}$$
- problem umjeravanja mjernog člana brzine vrtnje i kuta zakreta
- mogućnost povećanja raspoloživosti i tržišnih kompetencija



Broj kvarova [%]



Vrijeme popravka [%]



Motivacija i ciljevi rada

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

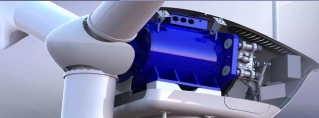
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

- vjetroagregati su postavljeni na udaljenim lokacijama
- upravljanjem generatorom oslanja se na precizno određenu poziciju magnetskog toka
- redoviti servisi na rotoru generatora zahtijevaju ponovnu kalibraciju mjerača brzine
- kalibracija je moguća samo pri malim brzinama vjetra, a testiranje kalibracije vrši se na velikim brzinama vjetra - produljivanje vremena servisiranja i do dva tjedna
- motivacija za **odbacivanje mjerača pozicije rotora generatora i uvođenje estimatora položaja magnetskog toka**



Motivacija i ciljevi rada

Motivacija i
ciljevi rada

Upravljanje
generatorom

UKF

Modeliranje
SG

Simulacijski
rezultati

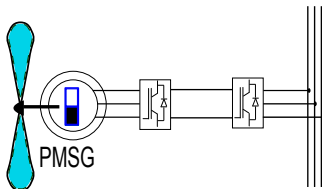
Nadogradnja
observera

Eksperimentalni
rezultati

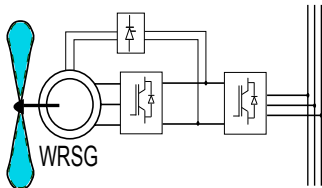
Zaključak

- Kalman filter observeri
 - dobre upravljačke karakteristike sa (d, q) modelom
 - bolje performanse na većim brzinama
 - proširenje raspona uz (α, β) model
- Observeri s ubrizgavanjem signala
 - prikladni za male brzine vrtnje
 - povratni signali su zašumljeni, filtriranje
 - dodatni PWM signal, gubici
- Ideja: ujediniti prednosti oba (d, q) i (α, β) modela u **kombinirani Kalman filter obsever**

Sustav vjetroagregata



Struktura vjetroagregata s PMSG-om



Struktura vjetroagregata s WRSG-om

- novija tehnologija, skuplja
- visoka koristnost
- bez multiplikatora
- WRSG: Enercon, Končar
- PMSG: Vestas, Goldwind, Gamesa, Siemens

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

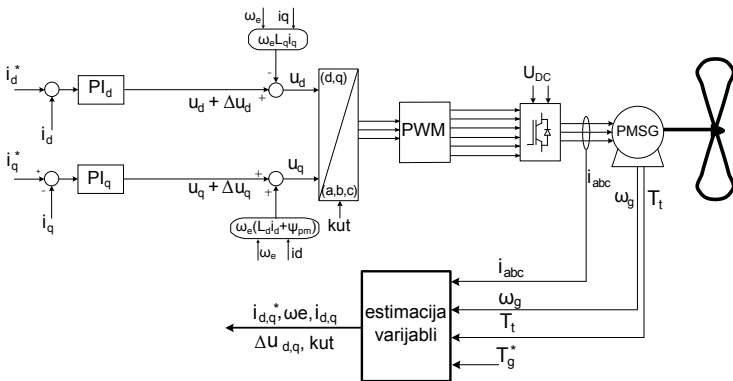
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Upravljanje generatorom vjetroagregata PMSG



Shematski prikaz vektorskog upravljanja sinkronim generatorom s permanentnim magnetima

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

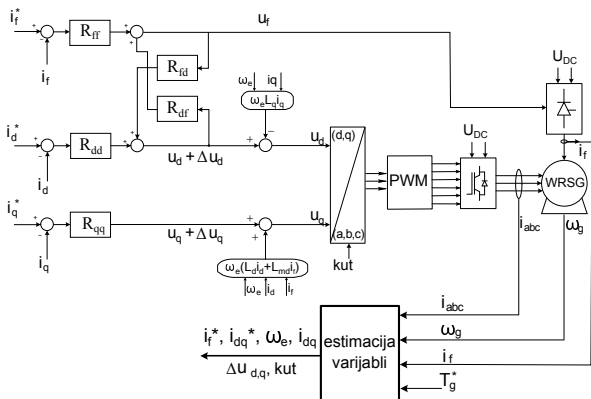
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Upravljanje generatorom vjetroagregata WRSG



Shematski prikaz vektorskog upravljanja sinkronim generatorom s uzbudnim namotima

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Nederivirajući Kalmanov filter

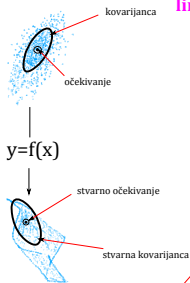
Sigma vektori koji propagiraju kroz nelinearnu funkciju

$$\chi_0 = \bar{x}$$

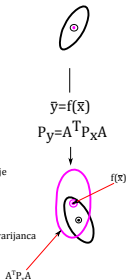
$$\chi_i = \bar{x} + \left(\sqrt{(L + \lambda_{ukf}) \mathbf{P}_x} \right)_i, \quad i = 1, \dots, L$$

$$\chi_i = \bar{x} - \left(\sqrt{(L + \lambda_{ukf}) \mathbf{P}_x} \right)_{i-L}, \quad i = L + 1, \dots, 2L$$

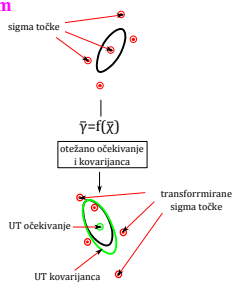
Stvarno uzorkovanje



Preslikavanje linearizacijom



UT



Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Nederivirajući Kalmanov filtar algoritam

Sigma vektori koji propagiraju kroz nelinearnu funkciju

$$\chi_{k-1}^a = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^a & \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^a + \gamma \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}^a} & \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^a - \gamma \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}^a} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Osvježavanje vremena
(jednadžbe predikcije)

$$\begin{aligned} \chi_{k|k-1}^x &= \mathbf{f} \left[\chi_{k-1}^x \quad u_{k-1} \quad \chi_{k-1}^v \right] \\ \hat{\mathbf{x}}_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \chi_{i,k|k-1}^x \\ \mathbf{P}_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \left[\chi_{i,k|k-1}^x - \hat{\mathbf{x}}_k^- \right] \cdot \\ &\quad \cdot \left[\chi_{i,k|k-1}^x - \hat{\mathbf{x}}_k^- \right]^T \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Upsilon_{k|k-1} &= \mathbf{h} \left[\chi_{k|k-1}^x \quad \chi_{k-1}^n \right] \\ \hat{\mathbf{y}}_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \Upsilon_{i,k|k-1} \end{aligned}$$

Osvježavanje mjerenja
(jednadžbe korekcije)

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{y}}_k^-, \hat{\mathbf{y}}_k^-} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \left[\Upsilon_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^- \right] \cdot \\ &\quad \cdot \left[\Upsilon_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^- \right]^T \\ \mathbf{P}_{x_k^-, y_k^-} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \left[\chi_{i,k|k-1}^x - \hat{\mathbf{x}}_k^- \right] \cdot \\ &\quad \cdot \left[\Upsilon_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^- \right]^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{x_k^-, y_k^-} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{y}}_k^-, \hat{\mathbf{y}}_k^-}^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \left(\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k^- \right) \\ \mathbf{P}_k &= \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{y}}_k^-, \hat{\mathbf{y}}_k^-} \mathbf{K}_k^T \end{aligned} \quad (3)$$

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

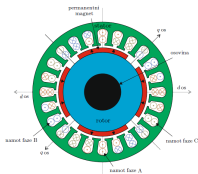
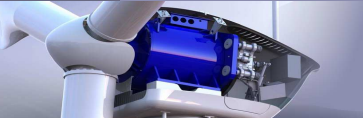
Nadogradnja observera

Eksperimentalni rezultati

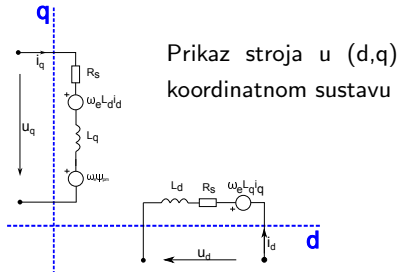
Zaključak

Sinkroni generatori u vjetroagregatima

PMSG



Presjek stroja s vanjskim magnetima



Prikaz stroja u (d,q) koordinatnom sustavu

Model u (d, q) koordinatnom sustavu

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d - R_s i_d + \Delta u_d)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (u_q - R_s i_q + \Delta u_q)$$

$$\frac{p}{dt} = p \cdot \omega_g$$

$$T_g = \frac{3}{2} p [\psi_{pm} i_q + (L_{sd} - L_q) i_d i_q]$$

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{J} (T_t - T_g)$$

Naponi raspredanja

$$\Delta u_d = L_q \omega_e i_q$$

$$\Delta u_q = -L_d \omega_e i_d - \psi_{pm} \omega_e$$

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Eksperimentalni rezultati

Zaključak

Sinkroni generatori u vjetroagregatima

PMSG

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Model stroja u stacionarnom (α, β) koordinatnom sustavu

$$u_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + \frac{d}{dt} \psi_{\alpha}$$

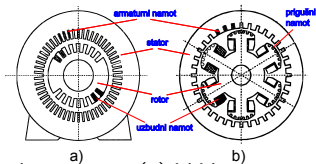
$$u_{\beta} = R_s i_{\beta} + \frac{d}{dt} \psi_{\beta}$$

(4)

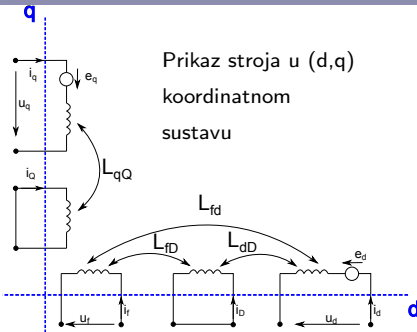
$$\psi_{\alpha} = (L_a + L_b \cos(2\rho)) i_{\alpha} + L_b \sin(2\rho) i_{\beta} + \psi_{pm} \cos(\rho)$$

$$\psi_{\beta} = L_b \sin(2\rho) i_{\alpha} + (L_a - L_b \cos(2\rho)) i_{\beta} + \psi_{pm} \sin(\rho)$$

Sinkroni generatori u vjetroagregatima WRSG



turbogenerator (a) i hidrogenerator (b)



Prikaz stroja u (d,q) koordinatnom sustavu

Model u (d,q) koordinatnom sustavu

$$u_d + \Delta u_d = R_s i_d + L_{ls} \frac{di_d}{dt} + \frac{L_{md}}{L_f} u_f - \frac{L_{md}}{L_f} R_f i_f$$

$$u_q + \Delta u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt}$$

$$u_f = R_f i_f + L_{lf} \frac{di_f}{dt} + \frac{L_{md}}{L_d} (u_d + \Delta u_d) - \frac{L_{md}}{L_d} R_s i_d$$

Naponi raspoređivanja

$$\Delta u_d = L_q \omega_e i_q$$

$$\Delta u_q = -L_d \omega_e i_d - L_{md} \omega_e i_f$$

- Motivacija i ciljevi rada
- Upravljanje generatorom
- UKF
- Modeliranje SG
- Simulacijski rezultati
- Nadogradnja observera
- Eksperimentalni rezultati
- Zaključak



Sinkroni generatori u vjetroagregatima

WRSG

Naponske jednadžbe u stacionarnom (α, β) koordinatnom sustavu

$$u_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + \frac{d}{dt} \psi_{\alpha}$$

$$u_{\beta} = R_s i_{\beta} + \frac{d}{dt} \psi_{\beta}$$

$$u_f = R_s i_f + \frac{d}{dt} \psi_f$$

$$\psi_{\alpha} = (L_a + L_b \cos(2\rho)) i_{\alpha} + L_b \sin(2\rho) i_{\beta} + L_{sf} d \cos(\rho) i_f$$

$$\psi_{\beta} = L_b \sin(2\rho) i_{\alpha} + (L_a - L_b \cos(2\rho)) i_{\beta} + L_{sf} d \sin(\rho) i_f$$

$$\psi_f = L_{sf} d \cos(\rho) i_{\alpha} + L_{sf} d \sin(\rho) i_{\beta} + L_f d i_f$$

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

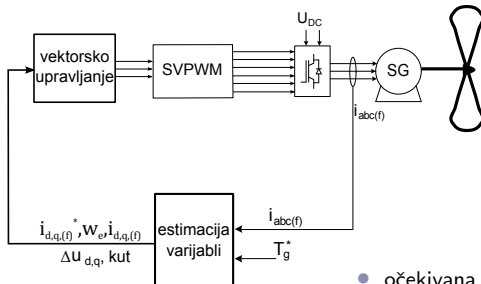
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Simulacijski rezultati



Blokovska struktura upravljanja

- očekivana promjena brzine vrtnje između dva vremena uzorkovanja je jako mala pa je opravdano uvesti jednadžbu:
$$\frac{d\omega_g}{dt} = 0 + v_\omega,$$
 v_ω - procesni šum
- za veću međusobnu povezanost jednadžbi modela generatora uvode se modeli u stacionarnom (α, β) koordinatnom sustavu

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

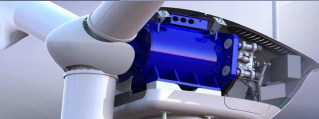
Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Simulacijski rezultati

PMSG



Motivacija i
ciljevi rada

Upravljanje
generatorom

UKF

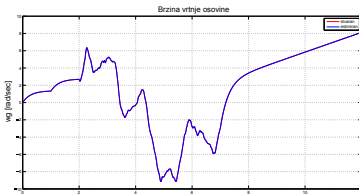
Modeliranje
SG

Simulacijski
rezultati

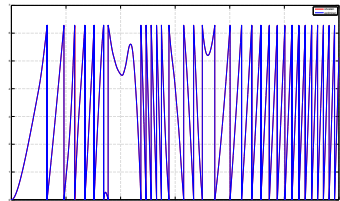
Nadogradnja
observera

Eksperimentalni
rezultati

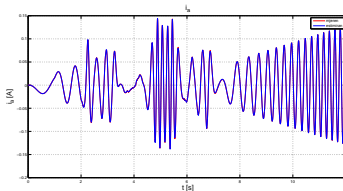
Zaključak



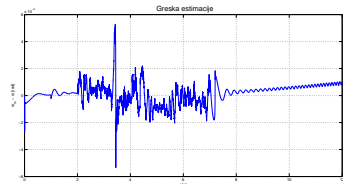
Brzina vrtnje generatora



Kut zakreta osovine



Struja statora i_a



Pogreška estimacije kuta zakreta

Simulacijski rezultati

WRSG

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

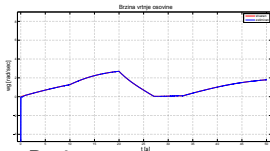
Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

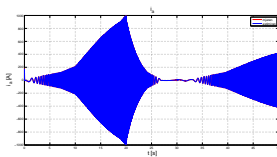
Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

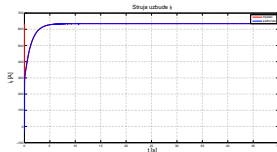
Zaključak



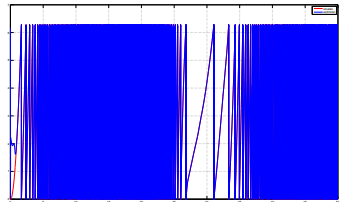
Brzina vrtnje generatora



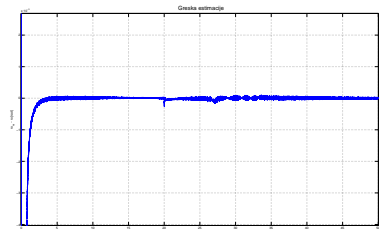
Struja statora i_a



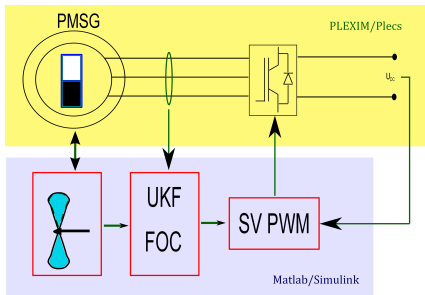
Struja uzbuđe i_f



Kut zakreta rotora



Pogreška estimacije kuta zakreta



Blokovska shema simulacije

- provjera algoritma estimacije i upravljanje prije eksperimentalnog testa
- programsko okruženje Plexim Plecs

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

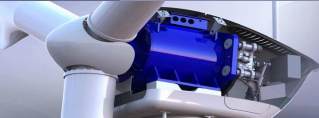
Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

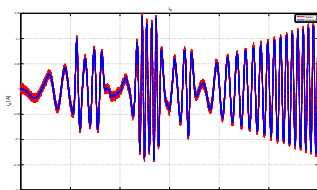
Eksperimentalni rezultati

Zaključak

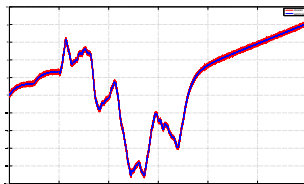


Simulacijski rezultati

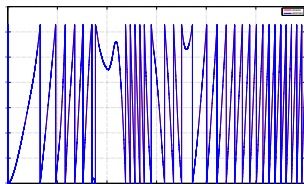
PMSG, Matlab/Simulink PLECS



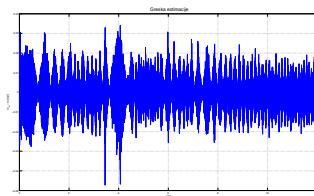
Struja statora i_a



Brzina vrtnje generatora



Kut zakreta generatora



Greška estimacije kuta zakreta

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

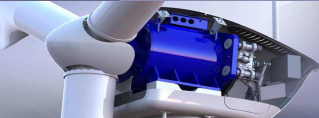
Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

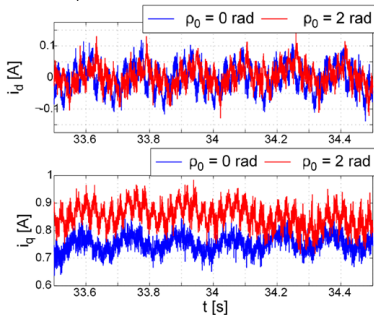
Zaključak



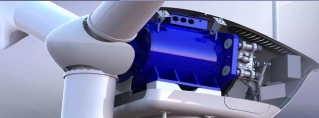
Nadogradnja observera

Karakteristike observera s (d, q) modelom

- jednostavan
- samo osnovni valni oblik, bez harmonika
- dobre upavljačke karakteristike sa PI regulatorima
- varijable su konstantne, lako ugađanje obser
- potrebno poravnavanje statorskih i rotorskih polova
- dobre karakteristike observera samo pri velikim brzinama



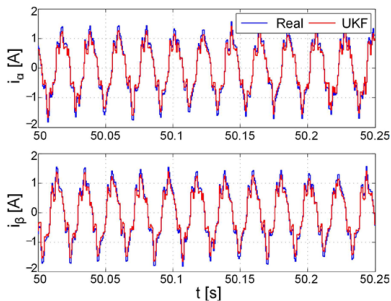
Estimacija struja pri poravnatim i neporavnatim polovima statora i rotora



Nadogradnja observera

Karakteristike observera s (α, β) modelom

- dobre karakteristike observera, jednačbe su usko vezane za fizikalnu sliku stroja
- netreba početnog poravnavanja polova statora i rotora
- složeni model
- loše upravljačke karakteristike
- sinusne varijable, otežano ugađanje observera



Slabe karakteristike observera, izobličenje struja zbog nedgovarajućeg ugađanja observera

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Eksperimentalni rezultati

Zaključak

Nadogradnja observera

- (α, β) model za estimaciju brzine i pozicije magnetskog toka
- (d, q) model za poboljšanje estimata pozicije magnetkog toka, izvlačenje osnovnog valnog oblika struja, Field-Oriented Control
- Dual-Kalman filter konfiguracija

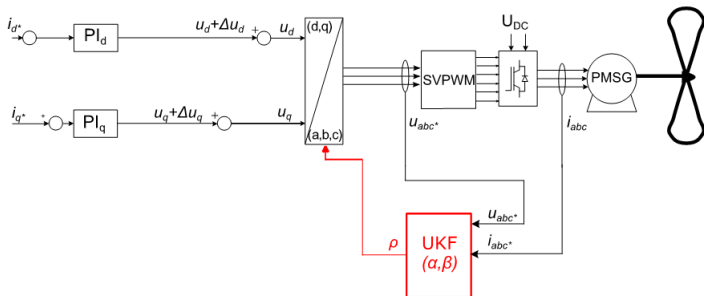
$$x_{\alpha,\beta} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \rho \\ \omega \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{flux position} \\ \text{flux position correction} \end{array} \quad x_{d,q} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$
$$\rho := (\rho + \varepsilon)$$

$$y = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \cos(\rho + \varepsilon) - i_q \sin(\rho + \varepsilon) \\ \frac{1}{2}(\sqrt{3}i_q - i_d) \cos(\rho + \varepsilon) + \frac{1}{2}(\sqrt{3}i_d - i_q) \sin(\rho + \varepsilon) \end{bmatrix},$$

$$\psi_{\alpha,\beta}(\rho) := \psi_{\alpha,\beta}(\rho + \varepsilon)$$

Nadogradnja observera

- početna konfiguracija s (α, β) modelom



Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

Simulacijski rezultati

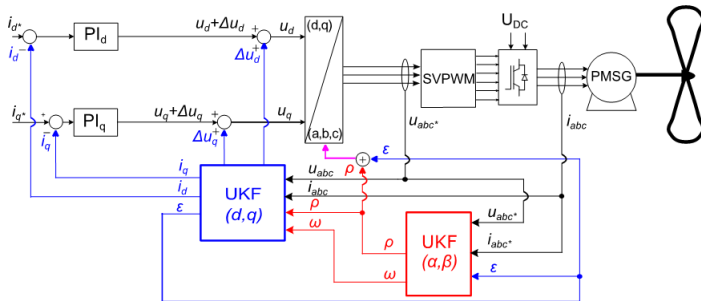
Nadogradnja observera

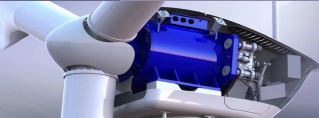
Ekperimentalni rezultati

Zaključak

Nadogradnja observera

- konačna Dual-Kalman filter konfiguracija s (α, β) i (d, q) modelom





Simulacijski rezultati Dual-Kalman filtar

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

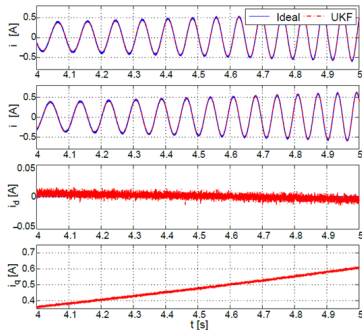
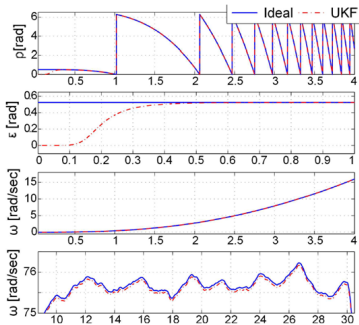
Modeliranje SG

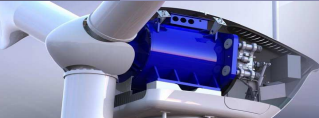
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak





Ekperimentalni rezultati Dual-Kalman filtar

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

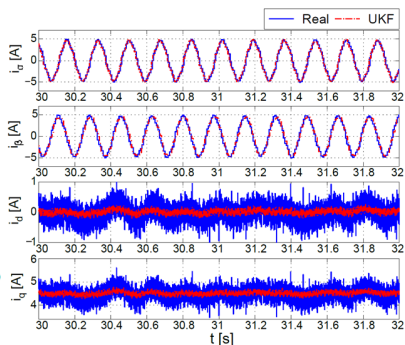
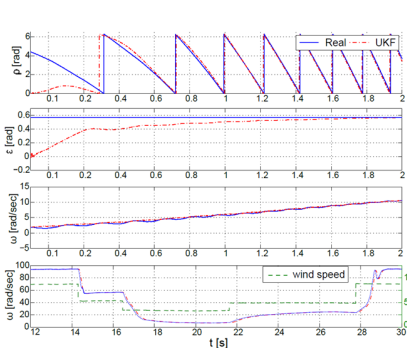
Modeliranje SG

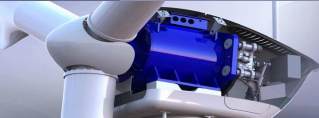
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak





Ekperimentalni rezultati Dual-Kalman filtar

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

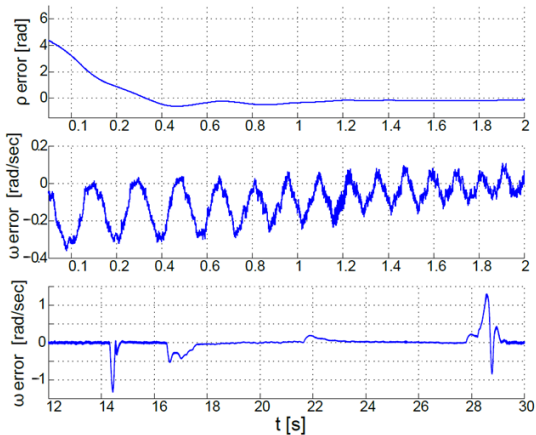
Modeliranje SG

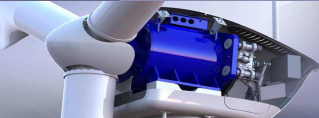
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

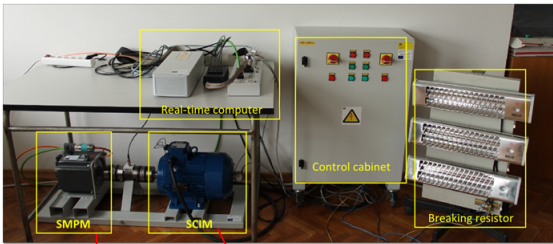
Zaključak





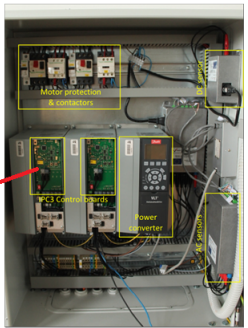
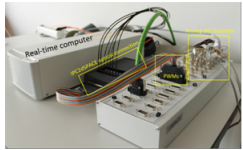
Ekperimentalni postav

- Motivacija i ciljevi rada
- Upravljanje generatorom
- UKF
- Modeliranje SG
- Simulacijski rezultati
- Nadogradnja observera
- Ekperimentalni rezultati
- Zaključak



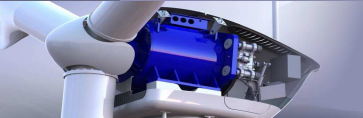
Generator
5.2kW, 2000 rpm
 $L_d \approx L_q$

Wind turbine emulation
5.5 kW, 1500 rpm



Open power converters

Cabinet interior



Zaključak

Motivacija i ciljevi rada

Upravljanje generatorom

UKF

Modeliranje SG

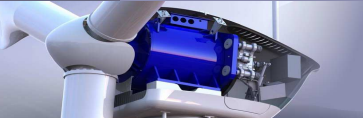
Simulacijski rezultati

Nadogradnja observera

Ekperimentalni rezultati

Zaključak

- brza konvergencija algoritma estimacije ka točnim vrijednostima, čak i u uvjetima turbulentnog vjetra
- neznatno sporija konvergencija pri eksperimentalnim rezultatima
- estimirane veličine sadrže manje šumove nego mjerene pa su pogodniji ulazi u upravljačke algoritme



Motivacija i
ciljevi rada

Upravljanje
generatorom

UKF

Modeliranje
SG

Simulacijski
rezultati

Nadogradnja
observera

Ekperimentalni
rezultati

Zaključak

Hvala na pozornosti!