

Studio e Progettazione del controllo sulla velocità di rotazione di un generatore eolico

Andrea Pagliaro , Alessio Susco Shanj Zaccaretti

September 12, 2016

1 Introduzione

Per lo studio e la progettazione di un controllore lineare che regoli la rotazione di una turbina eolica in modo che sia costante mediante il pitch , sono state prese in considerazione varie equazioni riguardanti il moto di un rotore e le relative potenze ricavate. Come le seguenti :

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^3 \quad (1)$$

Che rappresenta la quantità di potenza assorbita dal rotore della turbina eolica presa in considerazione. Il C_p è il coefficiente di potenza dipendente da λ e β . Dove a loro volta λ è dato da :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_w} \quad (2)$$

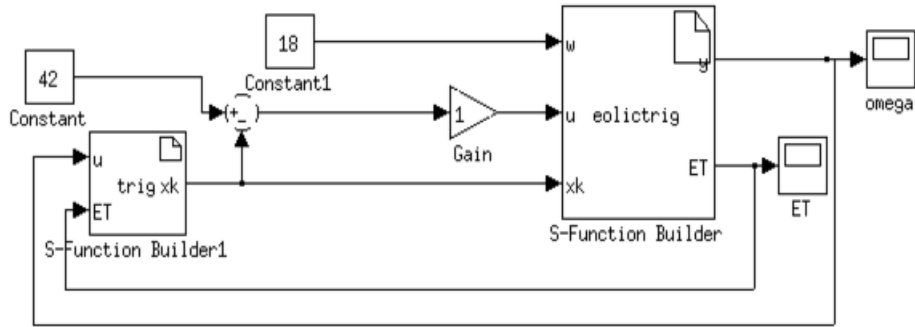
Che viene chiamato tip-speed ratio ed è dato dal rapporto tra la velocità angolare del rotore per il suo raggio e la velocità del vento. Mentre β rappresenta l'angolo di pitch relativo alle pale. Chiaramente la funzione del coefficiente di potenza comporta delle dinamiche non lineari dipendenti dalla geometria del rotore questo a sua volta si ripercuote sull'intero sistema che lo rende non lineare. Ora provando a linearizzare il sistema ci è risultato molto difficile e solo dopo aver letto alcune pubblicazioni sullo studio di turbine eoliche siamo riusciti a trovare alcune linearizzazioni compiute mediante metodi numerici, che ci hanno permesso di riscrivere il sistema nella seguente forma:

$$\dot{x}_1 = \frac{\gamma}{I_{rot}} x_1 + \frac{\sigma}{I_{rot}} \delta_\beta + \frac{\alpha}{I_{rot}} \delta_\omega \quad (3)$$

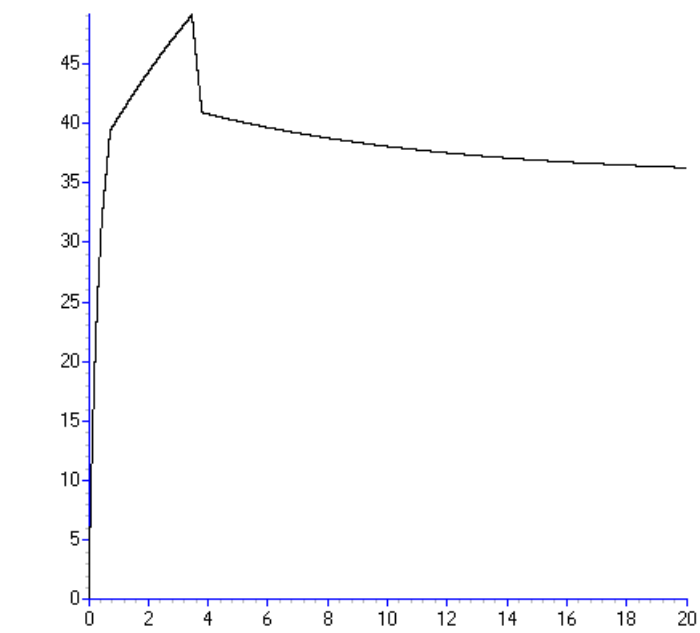
Dove x_1 , lo stato del sistema rappresenta la velocità angolare del rotore , δ_β è l'ingresso relativo alla perturbazione da parte del pitch, δ_ω è la perturbazione relativa alla velocità del vento. Quindi la nostra matrice di stato è data da $A = \frac{\gamma}{I_{rot}}$, e i coefficienti dei rispettivi ingressi: $B = \frac{\sigma}{I_{rot}}$ $\Gamma = \frac{\alpha}{I_{rot}}$ I_{rot} rappresenta inerzia del rotore. I valori γ , σ , α rappresentano le derivate parziali ricavate attraverso l'equazione dell'aerodinamica del rotore descritta in tal modo:

$$T_{aero} = T(\omega_0, \Omega_0, \beta_0) + \frac{\delta T_{aero}}{\delta \Omega} + \frac{\delta T_{aero}}{\delta \beta} + \frac{\delta T_{aero}}{\delta \omega} \quad (4)$$

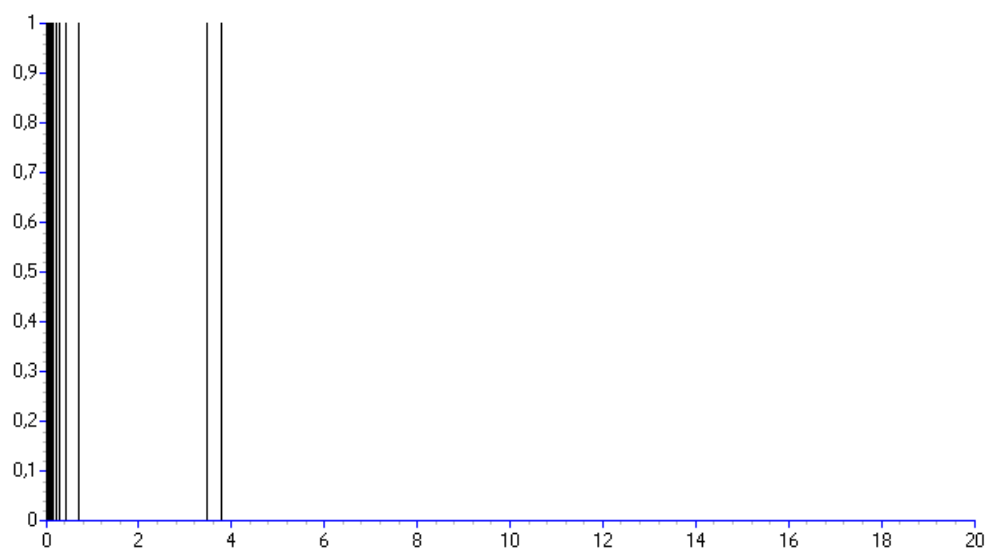
Dove i coefficienti $\gamma = \frac{\delta T_{aero}}{\delta \Omega} = -0.1205$, $\sigma = \frac{\delta T_{aero}}{\delta \beta} = -2.882$, $\alpha = \frac{\delta T_{aero}}{\delta \omega} = 0.0658$ sono già noti essendo stati ricavati dalla linearizzazione eseguita mediante un metodo numerico non descritto nella pubblicazione di cui si sta facendo uso per il progetto in questione. I valori degli stati iniziali sono dati da $\omega_0 = 18 \text{ m/s}$, $\Omega_0 = 42 \text{ RPM}$ e $\beta_0 = 12 \text{ deg}$. Detto questo siamo passati alla progettazione del controllore, ed è stato scelto un controllo con guadagno proporzionale per il momento. Successivamente si procederà ad inserire i guadagni giusti per un controllo proporzionale-integrativo (PI). Lo schema del sistema con relativo controllo e circuito di gestione per l'event triggering (estratto dal SIMULINK di matlab).



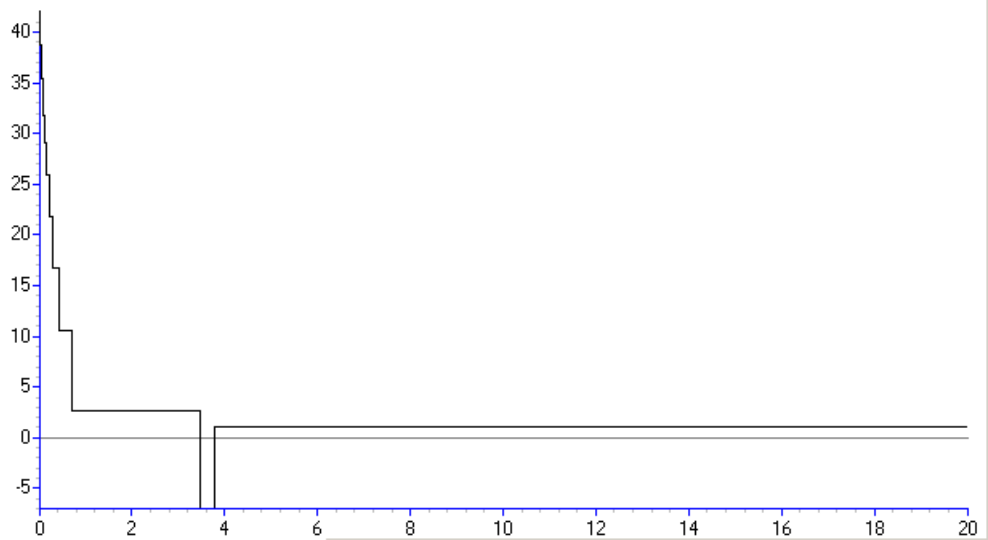
Per quanto riguarda le tecniche di controllo per l'event-triggering, è stato inserito un sistema che riceve l'uscita del nostro processo e il valore del trigger che viene calcolato all'interno dello stesso e che quindi effettua un cambio dello stato solo quando viene commutato il trigger. Avendo fatto le opportune ipotesi, l'intero sistema prima di essere descritto anche in SIMULINK è stato simulato attraverso il SIMNON. I risultati riportati dalla simulazione per velocità del vento = 18 e velocità di rotazione del rotore = 42 (riferimento) sono i seguenti.



Dove in questo grafico é mostrato l'andamento dell'uscita ovvero della velocità di rotazione del rotore che partendo da 0 raggiunge i 42 RPM in 20 secondi di simulazione. Si possono notare i picchi dovuti alla commutazione del trigger.



Nel seguente invece si sta facendo riferimento alle commutazioni avvenute nell'arco di 20 secondi.



L'ultimo grafico mostra un segnale discreto che è proprio l'ingresso del nostro processo in seguito alla controreazione ottenuta dopo un controllo di tipo proporzionale e dipendente dal trigger di fatto risulta essere un segnale discreto aperiodico. Per quanto riguarda il sistema generale mancano ancora i calcoli da effettuare per i coefficienti da inserire per il controllo dell'event-triggering poiché sono solo di prova ed utilizzati per la simulazione come anche quelli del guadagno proporzionale.

2 Controllo discreto con Event Triggering

In questa parte parleremo del controllo discreto con ET della velocità di rotazione di una pala eolica mediante un controllore PI.

Per iniziare calcoliamo i coefficienti di proporzionalità e di integrazione, partendo dal seguente modello di controllo:

$$u = u_r + K_p x + K_i \int_0^t x d\tau$$

Per farlo utilizzeremo la formula di Ackermann, ma abbiamo prima bisogno di esplicitare il modello dello spazio di stato in esame:

$$Plant: \begin{cases} \dot{I}_e = e \\ \dot{e} = ae + bu \end{cases}$$

Questo perché sappiamo che l'errore è dato da:

$$e = x - x_r$$

e la dinamica dello stato è:

$$\dot{x} = ax + bu + \gamma w_d$$

Quindi:

$$\dot{e} = \dot{x} = a(e + x_r) + bu + \gamma w_d \Rightarrow u = -\frac{\gamma}{b}w_d - \frac{a}{b}x_r$$

Arrivati a questo punto, dal modello di spazio stato

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_e \\ \dot{e} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_e \\ e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix} u$$

Esplicitiamo la matrice dinamica A:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a \end{pmatrix}$$

e la matrice ingresso-uscita B:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}$$

A questo punto per Ackermann abbiamo bisogno che la matrice di raggiungibilità abbia rango pieno, essendo quest'ultima il più grande sottospazio A-invariante contenuto nell'immagine di B.
Quindi:

$$\rho(\mathcal{R}) := \rho \left(\begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix} \right) \stackrel{?}{=} \rho_{max} = 2$$

Verifichiamo il tutto:

$$\begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & b \\ b & ab \end{bmatrix}$$

Essendo $b = -2.8818$ abbiamo che il determinante della matrice 2x2 in esame risulta essere diverso da 0, e quindi il rango è pieno e pari a 2.
Passiamo ad applicare la formula di Ackermann:

$$K = (K_1 \quad K_2) = (K_i \quad K_p) = - (0 \quad 1) (B \quad AB)^{-1} p(A)$$