

Università Politecnica delle Marche
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di studi in Ingegneria Elettronica



Modulazione Σ - Δ in convertitori AC-AC a matrice diretta per turbine eoliche con generatore sincrono a magneti permanenti

Σ - Δ modulation for AC-AC direct matrix converter for permanent magnet synchronous generator wind turbines

Relatore:
Chiar.mo Prof Simone Orcioni

Tesi di Laurea di
Nisi Lorenzo

Indice

Anno accademico 2022/2023

Introduzione.....	3
1. Turbina eolica.....	4
1.1.Descrizione generale.....	4
1.2.Generazione di potenza.....	5
1.3.Sistema proposto.....	6
2. Generatore sincrono a magneti permanenti.....	7
2.1.Descrizione generale.....	7
2.2.Principio di funzionamento.....	7
2.3.Trasformata DQ0.....	8
2.4.Modello del generatore sincrono a magneti permanenti.....	9
3. Convertitore a matrice.....	10
3.1.Descrizione generale.....	10
3.2.Principio di funzionamento.....	10
3.3.Filtro di ingresso.....	11
3.4.Modulazione Σ - Δ	13
3.4.1. Filtro di noise-shaping.....	14
3.4.2. Funzione errore in tensione.....	15
3.4.3. Funzione errore potenza reattiva.....	15
3.4.4. Minimizzazione funzione errore combinato.....	16
4. Controllo.....	17
4.1.Descrizione generale.....	17
4.2.Controllo della potenza reattiva.....	17
4.3.Controllo proporzionale-integrale (PI).....	18
5. Simulink.....	20
6. Simulazioni.....	21
6.1.Vento e potenza reattiva costanti.....	21
6.1.1. Qualità della corrente.....	22
7. Conclusioni.....	23
Bibliografia.....	24

Introduzione

Le turbine eoliche sono di notevole importanza nel panorama energetico di molti paesi. Contribuiscono a diversificare le fonti di generazione di energia e a mitigare l'impatto ambientale, generano energia elettrica sfruttando l'energia cinetica del vento, senza l'uso di combustibili fossili. Questo riduce le emissioni di gas serra e favorisce la transizione verso fonti di energia sostenibili e a basse emissioni di carbonio. La loro natura rinnovabile si basa sulla disponibilità costante della risorsa vento.

L'introduzione delle turbine eoliche nel mix energetico consente una maggiore diversificazione delle fonti di energia. Questa diversificazione è fondamentale per ridurre la dipendenza da fonti di energia non rinnovabili, migliorando così la resilienza e la robustezza del sistema energetico complessivo.

Le turbine eoliche favoriscono l'indipendenza energetica dei paesi, riducendo la dipendenza da fonti energetiche importate. La presenza di risorse eoliche in diverse regioni del mondo consente la produzione di energia in loco, promuovendo la sicurezza e la stabilità energetica [1].

In conclusione, le turbine eoliche giocano un ruolo chiave nella transizione verso un sistema energetico più sostenibile, contribuendo alla riduzione dell'impatto ambientale e alla mitigazione dei cambiamenti climatici.

In questo documento viene presentato il progetto delle componenti elettriche ed elettroniche di una turbina eolica con generatore sincrono a magneti permanenti concentrandosi principalmente sulla modulazione ed il controllo della potenza generata.

1. Funzionamento di una turbina eolica

1.1. Descrizione generale

Una turbina eolica opera sfruttando l'energia cinetica del vento per la generazione di energia elettrica. Questo processo segue un principio di conversione che trasforma prima l'energia cinetica in energia meccanica e successivamente in energia elettrica tramite un generatore.

Il cuore del funzionamento di una turbina eolica comprende diversi elementi chiave:

- Le pale del rotore costituiscono un grande elemento rotante progettato per catturare l'energia cinetica del vento. La loro forma e lunghezza sono ottimizzate per massimizzare l'efficacia nella cattura dell'energia eolica.
- Le pale del rotore sono collegate a un asse centrale, che trasferisce il movimento rotatorio al generatore. Quest'ultimo è fondamentale, in quanto converte l'energia meccanica in energia elettrica. Solitamente, si utilizzano generatori elettrici sincroni o asincroni.
- Le turbine eoliche sono dotate di sistemi di controllo automatico che monitorano la velocità del vento e regolano l'orientamento delle pale per ottimizzare le prestazioni e proteggere la turbina da venti troppo forti o dannosi.

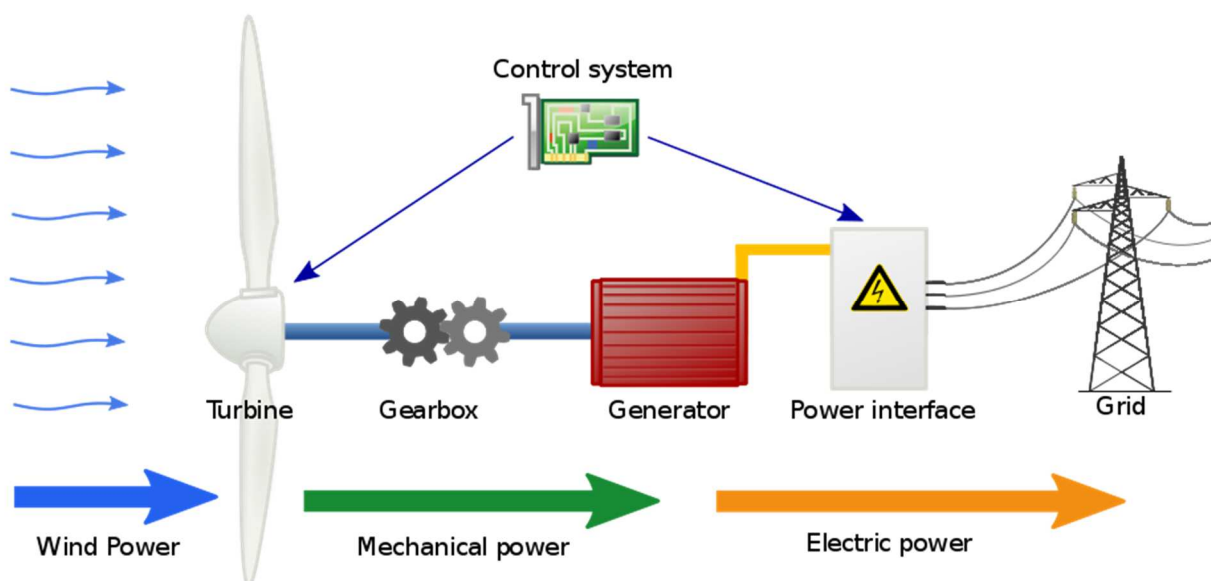


Figura 1.1 Schema di funzionamento di una turbina eolica [2].

- L'energia elettrica prodotta dal generatore viene inviata attraverso un sistema di trasmissione elettrica, tipicamente composto da cavi e trasformatori, per essere distribuita alla rete elettrica.
- Infine, le turbine eoliche sono dotate di sistemi di monitoraggio che controllano le condizioni operative, segnalando eventuali problemi. La manutenzione periodica è necessaria per garantire un funzionamento efficiente nel tempo.

In sintesi, una turbina eolica compie una sequenza di operazioni complesse che convertono l'energia cinetica del vento in energia elettrica, coinvolgendo pale del rotore, asse del rotore, generatore e altri componenti elettrici e di controllo.

1.2. Generazione di potenza

La potenza generata in uscita da una turbina eolica viene espressa come:

$$P_T = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta_p) \cdot v_w^3 \quad (1)$$

Dove:

- A è l'area spazzata dalle pale;
- ρ è la densità dell'aria;
- C_p è il coefficiente di potenza;
- λ è il rapporto tra la velocità sulla punta della pala e la velocità del vento;
- β_p è l'angolo di pitch delle pale;
- V_{wind} è la velocità del vento.

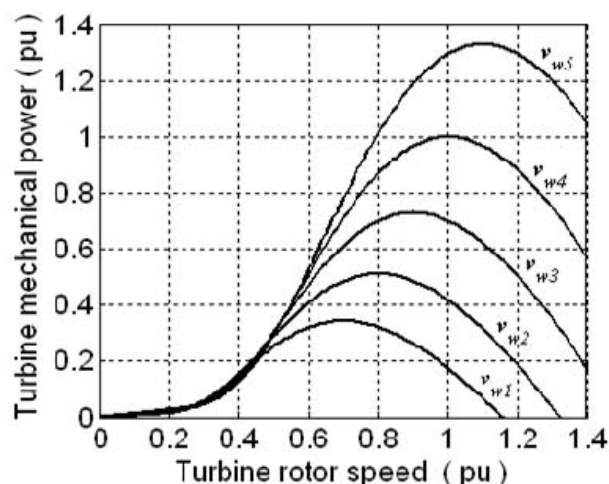


Figura 1.2 Potenza meccanica della turbina in funzione della velocità del rotore a vari livelli velocità del vento [3].

1.3. Sistema proposto

La turbina eolica presa in considerazione per questa trattazione è di medie dimensioni, ad asse orizzontale, con angolo di pitch delle pale fissato a $\beta_p = 0^\circ$ e a velocità variabile.

Il generatore scelto è un generatore trifase sincrono a magneti permanenti (PMSG). Ciò è dovuto al fatto che rispetto ad un generatore ad induzione a gabbia di scagliatolo (SCIG) il PMSG necessita di minore manutenzione e abbia una maggiore densità di potenza [4].

Nella scelta di un circuito di conversione si è optato per l'uso di un convertitore a matrice diretta AC-AC. Ciò semplifica la struttura del circuito perché non necessita di effettuare delle trasformazioni AC-DC e DC-AC di corrente per mezzo di grandi ed ingombranti condensatori [5].

La scelta di un sistema di modulazione della matrice convertitrice è ricaduta su una "modulazione Σ - Δ " per la sua semplicità realizzativa [6].

Infine, per la scelta di un sistema di controllo, viene realizzato un controllore proporzionale integrativo (PI) che lavora con le correnti del generatore al fine di regolare la potenza reattiva [7].

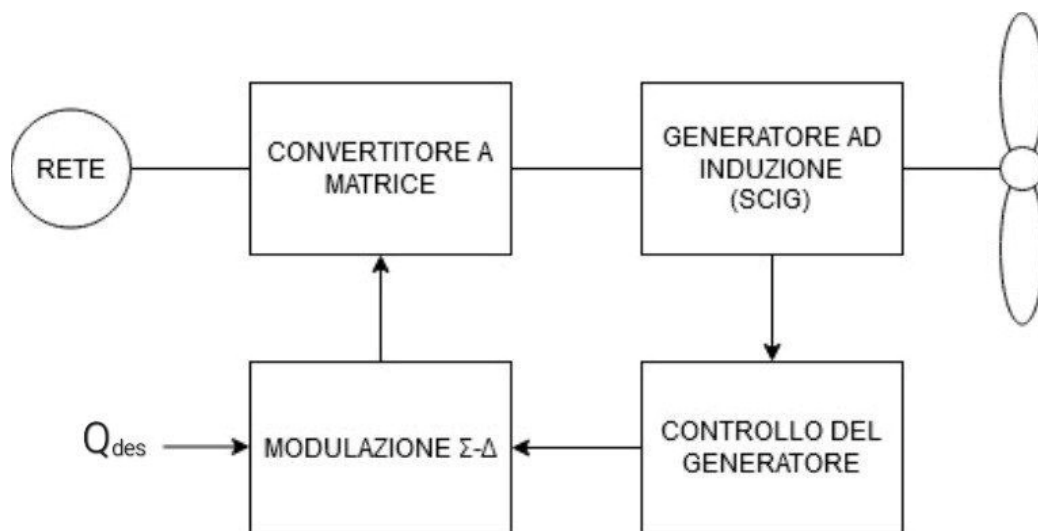


Figura 1.3 Schema del sistema proposto. Q_{des} è il riferimento della potenza reattiva desiderata [8].

2. Generatore sincrono a magneti permanenti

2.1. Descrizione generale

I due elementi principali di un generatore trifase sono lo statore ed il rotore [9].

Lo statore è costituito da avvolgimenti trifase dove la corrente in uscita viene indotta.

Il rotore consiste di un albero che ruota collegato alle pale della turbina, al quale sono attaccati magneti permanenti.

2.2. Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di un generatore si basa sulla legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday. Un generatore converte l'energia meccanica in energia elettrica attraverso questo processo. Il dispositivo essenziale in un generatore è una bobina di filo conduttore avvolta attorno a un nucleo magnetico. Quando la bobina è soggetta a un movimento relativo rispetto al campo magnetico o viceversa, si induce una corrente elettrica nella bobina [10].

Quando il rotore ruota, le linee del campo magnetico attraversano la bobina. Il cambiamento del flusso magnetico attraverso la bobina induce una forza elettromotrice (FEM) o tensione elettrica nella bobina, secondo la legge di Faraday. Questa tensione indotta crea una differenza di potenziale, e se è fornito un percorso conduttore chiuso, si crea una corrente elettrica [10].

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

$$\Phi = B \cdot A \quad (3)$$

Dove:

- ε è la forza elettromotrice (FEM);
- Φ è il flusso magnetico;
- t è il tempo;
- B è l'induzione magnetica;
- A è l'area attraverso cui il flusso magnetico passa.

In sintesi, il generatore sfrutta il movimento relativo tra un campo magnetico e una bobina di filo conduttore per generare corrente elettrica. Questo principio è alla base di molti dispositivi e sistemi che forniscono energia elettrica, come generatori nelle centrali elettriche, turbine eoliche e generatori portatili.

2.3. Trasformata DQ0

Nei circuiti trifase, per semplificarne la trattazione, si ricorre alla trasformata DQ0, derivata dalle trasformate di Park e di Clarke [11]. Ciò consiste di descrivere una terna trifase bilanciata e simmetrica per mezzo di due sole componenti, quella diretta e quella in quadratura.

$$\bar{f}_{dq0} = K_s \cdot \bar{f}_{abc} \quad (4)$$

Dove:

$$\bar{f}_{abc} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}, \quad \bar{f}_{dq0} = \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix}$$

$$K_s = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta(t)) & \sin\left(\theta(t) - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta(t) + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos(\theta(t)) & \cos\left(\theta(t) - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta(t) + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega d\tau \quad (6)$$

Scegliendo come velocità per la trasformata la velocità di rotazione del generatore studiato consente di ottenere segnali che possono essere considerati delle grandezze in DC.

2.4. Modello del generatore sincrono a magneti permanenti

Il generatore può essere descritto elettricamente dalle seguenti equazioni [7]:

$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{L_{sd}} (v_{sd} + R_s i_{sd} - \omega_r L_{sq} i_{sd}) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{L_{sq}} (v_{sq} + R_s i_{sq} - \omega_r L_{sd} i_{sq}) \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_m i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}) \quad (9)$$

Dove:

- v_{sd} e v_{sq} sono le tensioni dello statore;
- i_{sd} e i_{sq} sono le correnti dello statore;
- L_{sd} e L_{sq} sono le induttanze dello statore;
- R_s è la resistenza dello statore;
- λ_m è l'ampiezza del legame di flusso prodotto dai magneti permanenti;
- p è il numero di coppie di poli.

Inoltre, è importante anche la velocità di rotazione, poiché è da essa che dipende la potenza generata [12].

$$P = T_e \cdot \omega_r \quad (10)$$

3. Convertitore a matrice

3.1. Descrizione generale

Il convertitore a matrice è un dispositivo che converte un segnale in ingresso AC in un segnale in uscita AC attraverso una matrice 3x3 di interruttori bidirezionali. Questa matrice è utilizzata per manipolare il valore efficace, la frequenza e la fase del segnale desiderato in uscita [13].

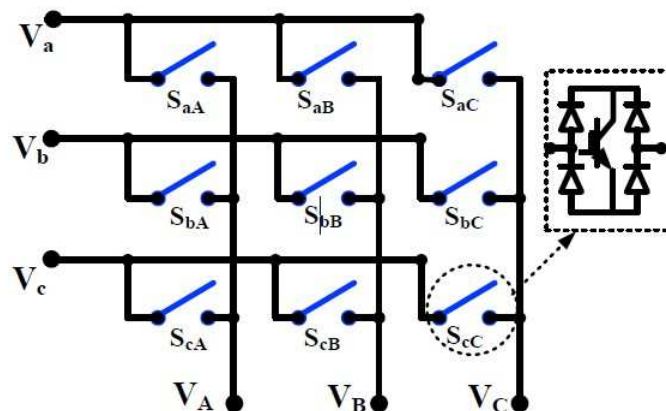


Figura 3.1 Schema elettrico della matrice con dettaglio dell'interruttore [5].

3.2. Principio di funzionamento

Iniziando lo studio delle grandezze elettriche in ingresso ed in uscita, si prendano in considerazione le tensioni come vettori:

$$\bar{v}_{abcI}(t) = \begin{bmatrix} v_{aI}(t) \\ v_{bI}(t) \\ v_{cI}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_{in} \begin{bmatrix} \sin(\omega_{in}t) \\ \sin(\omega_{in}t + 120^\circ) \\ \sin(\omega_{in}t + 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\bar{v}_{abcO}(t) = \begin{bmatrix} v_{aO}(t) \\ v_{bO}(t) \\ v_{cO}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_{out} \begin{bmatrix} \sin(\omega_{out}t + \varphi_{out}) \\ \sin(\omega_{out}t + 120^\circ + \varphi_{out}) \\ \sin(\omega_{out}t + 240^\circ + \varphi_{out}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Si faccia lo stesso con le correnti.

Si definiscano poi i singoli interruttori della matrice indicando con i la riga, e con j la colonna di riferimento

$$s_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{interruttore chiuso} \\ 0, & \text{interruttore aperto} \end{cases} \quad \text{per } i, j = 1, 2, 3 \quad (13)$$

Dalla (10) si vede che la matrice convertitrice presenta 2^9 soluzioni diverse. Per evitare combinazioni di cortocircuito della sorgente e circuiti aperti sul carico, si prendano in considerazione sole le soluzioni che rispettano la seguente condizione:

$$s_{i1} + s_{i2} + s_{i3} = 1, \quad \text{per } i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

Si potrà poi definire come “matrice di commutazione istantanea” S_k , che rappresenterà ognuna delle k -esime possibili combinazioni utilizzate dagli interruttori [13].

$$\bar{v}_{abcI}(t) = S_k \bar{v}_{abc0}(t) \quad (15)$$

$$\bar{i}_{abcI}(t) = S_k^T \bar{i}_{abc0}(t) \quad (16)$$

Con:

$$S_k = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.3. Filtro di ingresso

In questa trattazione si riprende il filtro di ingresso presentato in [6] al fine di rimuovere il rumore ad alta frequenza generato dalla commutazione degli interruttori.

Fondamentalmente l'utilizzo di un filtro passa-basso di tipo LC è finalizzato ad ottenere un'attenuazione di 40 dB/decade nella banda oscura, mantenendo contemporaneamente una dissipazione di potenza attiva pari a zero. Tuttavia, questo filtro, caratterizzato dalla presenza di due poli in parte complessa coniugata, presenta un picco di risonanza eccessivamente elevato. Per mitigare questo problema, si decide di aggiungere in parallelo una rete di smorzamento. Tale rete è

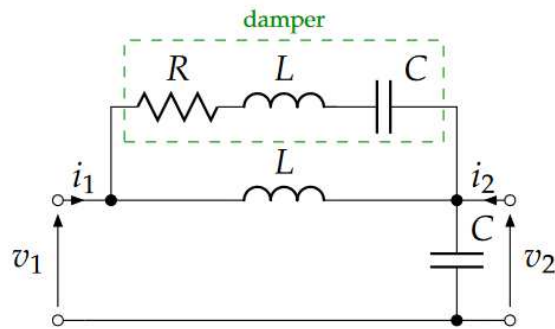


Figura 3.2 Filtro LC con damper [6].

composta da una serie di un resistore, un'induttanza e un condensatore.

Interessante notare che gli ultimi due componenti della rete di smorzamento hanno valori identici a quelli corrispondenti nel filtro precedente (come illustrato nella Figura 3.2).

Ciò consente di ridurre l'effetto della risonanza senza generare un elevato consumo di potenza attiva. Infatti, grazie alla presenza della rete LC in serie, il ramo in questione assume un carattere fortemente resistivo solo nelle vicinanze della frequenza di risonanza. Questa configurazione risulta particolarmente efficace nel diminuire il picco risonante nella regione di interesse.

Il guadagno del filtro proposto è:

$$A_v(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{1+sRC+2s^2LC}{1+sRC+3s^2LC+s^3LC^2R+s^4L^2C^2} \quad (18)$$

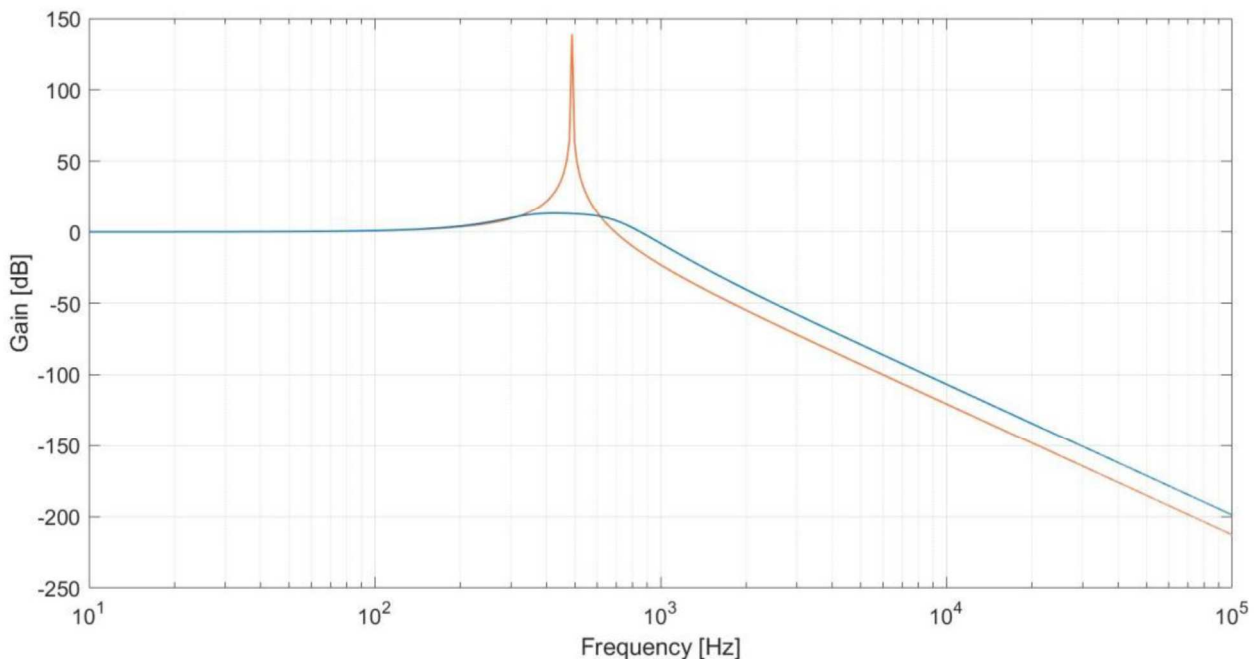


Figura 3.3 Diagramma di Bode del modulo del filtro. In arancione il filtro LC senza dumper, in blu il filtro proposto [6].

3.4. Modulazione Σ - Δ

La strategia di modulazione adottata per il controllo degli interruttori segue le indicazioni fornite in [6]. Tale approccio prevede la selezione di una delle 27 combinazioni possibili degli interruttori in ogni istante, con la scelta basata sulla minimizzazione di una specifica funzione errore. Questa funzione errore è definita in relazione alle grandezze controllate e a quelle campionate. Il componente del circuito responsabile di queste operazioni è il quantizzatore, illustrato nella Figura 3.4. Il campionamento è eseguito mediante la tecnica nota come " Σ - Δ ", che sfrutta il sovracampionamento attraverso un upsampler e il noise-shaping tramite un filtro digitale. Ciò consente di ridurre il rumore di quantizzazione nel sistema.

Si procederà con il controllo della tensione in uscita e della potenza reattiva alla sorgente (ovvero prima del filtro). L'obiettivo è ottenere una approssimazione vicina tra la tensione media in uscita $\bar{v}_{abcO}(t)$ e la tensione desiderata $\bar{v}_{des}(t)$, così come tra la potenza reattiva Q_I e la potenza reattiva desiderata Q_{des} . A tale scopo, vengono campionate la corrente in uscita dalla matrice e la tensione al suo ingresso.

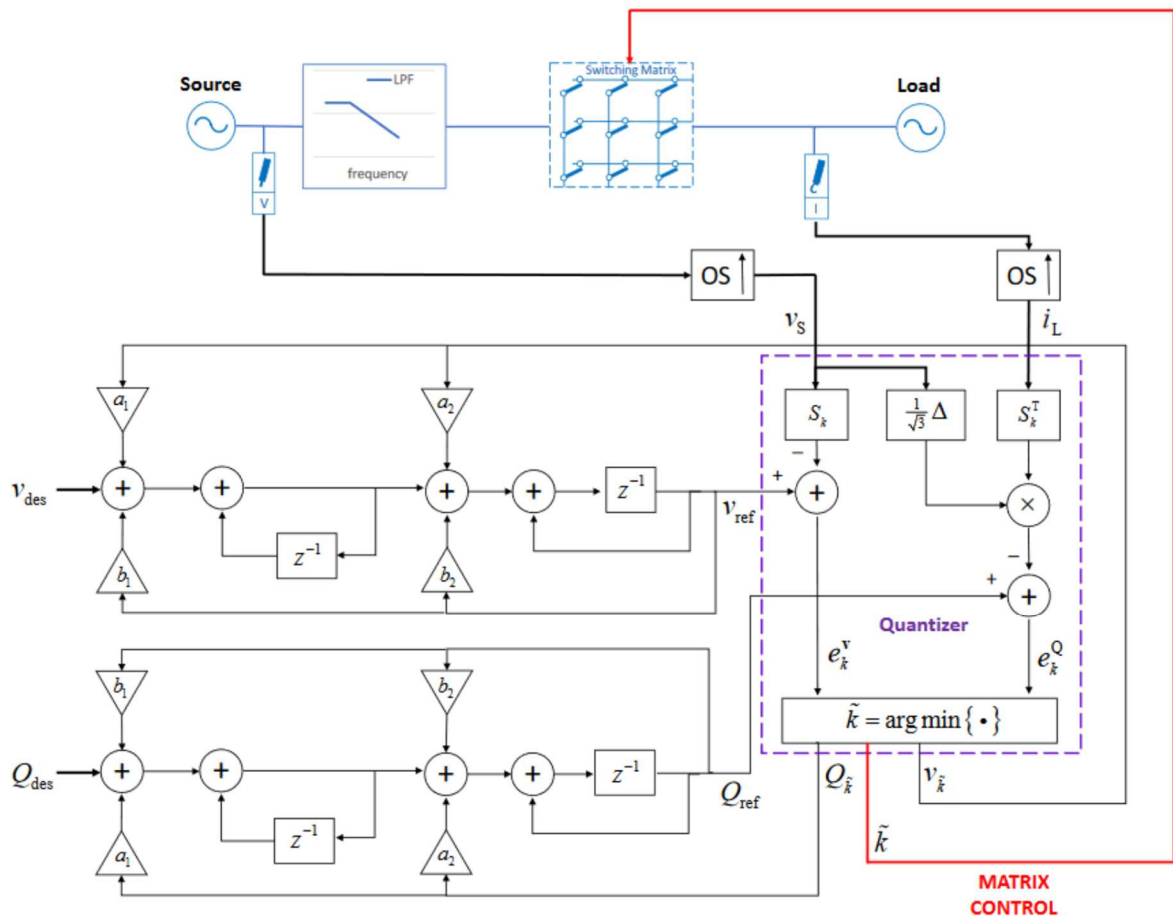


Figura 3.4 Schema del modulatore Σ - Δ [6].

Tuttavia, considerando che il filtro in ingresso agisce solo sulla riduzione del rumore ad alta frequenza e non sulla tensione alla frequenza di linea, è possibile effettuare il campionamento direttamente sulla tensione alla sorgente. Questo approccio è giustificato dal fatto che:

$$\bar{v}_{abcS}(t) \cong \bar{v}_{abcI}(t) \quad (19)$$

3.4.1. Filtro di noise-shaping

Il filtro di noise-shaping ha il compito di ridurre il rumore di quantizzazione e facilita il calcolo dei valori di riferimento destinati al quantizzatore. Esso riceve in input il valore desiderato e la funzione errore precedente, come illustrato dalle seguenti formulazioni:

$$\bar{v}_{ref} = STF(z)\bar{v}_{des} + NTF(z)e^V \quad (20)$$

$$Q_{ref} = STF(z)Q_{des} + NTF(z)e^Q \quad (21)$$

Dove e^V rappresenta l'errore sulle tensioni in uscita, e^Q rappresenta l'errore della potenza reattiva ingresso, $STF(z)$ rappresenta la funzione di trasferimento del modulatore, mentre $NTF(z)$ indica la funzione di trasferimento del rumore quantizzato.

$STF(z)$ e $NTF(z)$ sono così definite:

$$STF(z) = \frac{z}{z^2 + z(2 + b_1 + a_1 + b_2 + a_2) + 1 + b_2 + a_2} \quad (22)$$

$$NTF(z) = \frac{z^2 - z(2 + b_1 + b_2) + 1 + b_2}{z^2 + z(2 + b_1 + a_1 + b_2 + a_2) + 1 + b_2 + a_2} \quad (23)$$

3.4.2. Funzione di errore in tensione

La funzione di errore in tensione può essere espressa nel dominio del tempo discreto come:

$$\bar{e}_k^V[n] = \bar{v}_{ref}[n] - \bar{v}_{abcO}[n] \quad (24)$$

Campionando la tensione in ingresso al filtro, è possibile dedurre attraverso le equazioni (12) e (16) che:

$$\bar{v}_{abcO}[n] \cong S_k \bar{v}_{abcS}[n] \quad (25)$$

Da ciò, è possibile ottenere la funzione di errore in tensione come:

$$\bar{e}_k^V[n] = \bar{v}_{ref}[n] - S_k \bar{v}_{abcS}[n] \quad (26)$$

3.4.3. Funzione errore potenza reattiva

La funzione di errore della potenza reattiva può essere espressa come:

$$e_k^Q[n] = Q_{ref}[n] - Q_I[n] \quad (27)$$

La potenza reattiva istantanea può essere calcolata utilizzando il seguente metodo [15]:

$$Q_I[n] \cong \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{aL}[n]i_{aL}[n] + v_{bL}[n]i_{bL}[n] + v_{cL}[n]i_{cL}[n]) \quad (28)$$

Dove v_{aL} , v_{bL} e v_{cL} rappresentano le tensioni concatenate alla sorgente, ottenute a partire dalle tensioni stellate mediante l'utilizzo della matrice Δ .

$$\bar{v}_{abcL}(t) = \begin{bmatrix} v_{aL}(t) \\ v_{bL}(t) \\ v_{cL}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & +1 & -1 \\ -1 & 0 & +1 \\ +1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{aS}(t) \\ v_{bS}(t) \\ v_{cS}(t) \end{bmatrix} = \Delta \bar{v}_{abcS} \quad (29)$$

Quindi, si deduce che:

$$Q_I[n] \cong \frac{1}{\sqrt{3}} (\Delta \bar{v}_{abcS}) \cdot \bar{i}_{abcI}[n] \quad (30)$$

Dove il simbolo " \cdot " rappresenta l'operazione di prodotto scalare e v_{abcS} è già noto grazie al campionamento effettuato per il calcolo dell'errore in tensione.

La corrente in ingresso può essere ottenuta campionando quella in uscita e utilizzando l'equazione (13):

$$\bar{i}_{abcI}[n] = S_k^T \bar{i}_{abcO}[n] \quad (31)$$

E di conseguenza, è possibile ottenere la funzione di errore nella potenza reattiva come:

$$e_k^Q[n] = Q_{ref}[n] - \frac{1}{\sqrt{3}} (\Delta \bar{v}_{abcS}) \cdot (S_k^T \bar{i}_{abcO}[n]) \quad (32)$$

3.4.4. Minimizzazione funzione errore combinato

Per individuare la combinazione di interruttori appropriata, le due funzioni di errore trovate vengono normalizzate e combinate in un'unica funzione. Si procede quindi alla ricerca del valore ottimale di k per il quale tale funzione risulta minima.

Gli errori normalizzati si ottengono come:

$$\varepsilon_k^V[n] = \frac{\|\bar{e}_k^V[n]\|}{V_{des} - V_s} \quad (33)$$

$$\varepsilon_k^Q[n] = \frac{|e_k^Q[n]|}{|Q_{des}|} \quad (34)$$

Il valore di k che minimizza l'errore combinato si ottiene mediante:

$$k[n] = \underset{k \in [1,27]}{\operatorname{argmin}} \left\{ (\varepsilon_k^V[n])^2 + (\varepsilon_k^Q[n])^2 \right\} \quad (35)$$

4. Controllo in controreazione

4.1. Descrizione generale

In situazioni reali la velocità del vento che muove le pale della turbina eolica non è costante, questo fa sì che al variare della velocità varierà anche la potenza meccanica generata, che di conseguenza farà variare le grandezze elettriche del generatore.

Il controllo si occupa di regolare i valori delle correnti in diretta ed in quadratura dal lato del generatore. Ciò è realizzato attraverso un confronto in controreazione delle correnti campionate.

Le correnti di riferimento da confrontare con quelle campionate sono state scelte al fine di ottenere la massima potenza generata.

Un'altra funzione molto importante di un sistema di controllo è quella di assicurarsi che il sistema da esso controllato eroghi la massima potenza, a questo scopo si può utilizzare un sistema che tracci il punto di massima potenza al variare delle condizioni ambientali.

L'obiettivo del MPPT (Maximum Point Power Tracking) è garantire che la turbina operi intorno alla sua potenza massima, facendo uso delle informazioni dalla caratteristica di potenza statica e di un minimo di informazioni provenienti dal sistema. La caratteristica di potenza del rotore della turbina è completamente sconosciuta, ma le caratteristiche generali della turbina, come la potenza nominale, la velocità di rotazione nominale, l'inerzia totale dell'albero, e così via, sono considerate note. L'unica misurazione disponibile dal sistema è la velocità di rotazione e la potenza attiva del generatore [14].

4.2. Controllo della potenza reattiva

La regolazione della potenza reattiva è ottenuta utilizzando il Punto di Massima Potenza ricavato utilizzando il metodo MPPT. In questa equazione, la coppia elettromagnetica dipende principalmente dalle correnti in diretta e in quadratura.

Questa dipendenza è più significativa con la corrente in quadratura (i_{sq}), poiché il termine i_d è soggetto a un fattore pari alla differenza tra le induttanze L_{sd} e L_{sq} , a sua volta determinata dalla salienza ai poli del rotore.

Pertanto, la corrente di riferimento nell'asse diretto è impostata a zero, $i_{sd\ ref} = 0$, mentre la corrente di riferimento nell'asse in quadratura, è determinata da [7]:

$$i_{sq\ ref} = \frac{2P_{mppt}(v_w)}{3\omega_r\lambda_m} \quad (36)$$

Dove:

- P_{mppt} è la potenza ottenuta dalla turbina pilotata dal MPPT;
- v_w è la velocità del vento.

Una volta che i valori di riferimento delle correnti negli assi d e q sono stati determinati, il controllore raggiungerà e manterrà le correnti a quei valori modificando le tensioni nei terminali di uscita del convertitore a matrice.

4.3. Controllo proporzionale-integrale (PI) [7]

Modificando le equazioni (5) e (6) si otterrà:

$$L_{sd} \frac{d}{dt} i_{sd} - R_s i_{sd} = u_d \quad (37)$$

$$L_{sq} \frac{d}{dt} i_{sq} - R_s i_{sq} = u_q \quad (38)$$

$$u_d = v_{sd} - \omega_r L_{sq} i_{sq} \quad (39)$$

$$u_q = v_{sq} - \omega_r \lambda_m + \omega_r L_{sd} i_{sd} \quad (40)$$

u_d e u_q si possono ottenere per mezzo di un processo proporzionale-integrativo applicato al controllo sulle correnti in diretta ed in quadratura:

$$e_d = i_{sd\ ref} - i_{sd} \quad (41)$$

$$e_q = i_{sq\ ref} - i_{sq} \quad (42)$$

$$K_d(s) = \frac{L_d}{\tau} + \frac{R_s}{\tau} \frac{1}{s} \quad (43)$$

$$K_q(s) = \frac{L_q}{\tau} + \frac{R_s}{\tau} \frac{1}{s} \quad (44)$$

Le equazioni (37) e (38) rappresentano le dinamiche induttive e resistive del PMSG rispettivamente lungo l'asse d e q. Queste possono essere sostituite da un PI che fornisce risultati equivalenti. Ciò fa sì che si possano implementare due anelli di retroazione per controllare indipendentemente le correnti i_{sd} e i_{sq} .

Una volta che le variabili ausiliare di controllo sono state ottenute, è necessario applicare un disaccoppiamento dinamico per mezzo delle equazioni (39) e (40), poiché entrambe le correnti sono dipendenti l'una dall'altra.

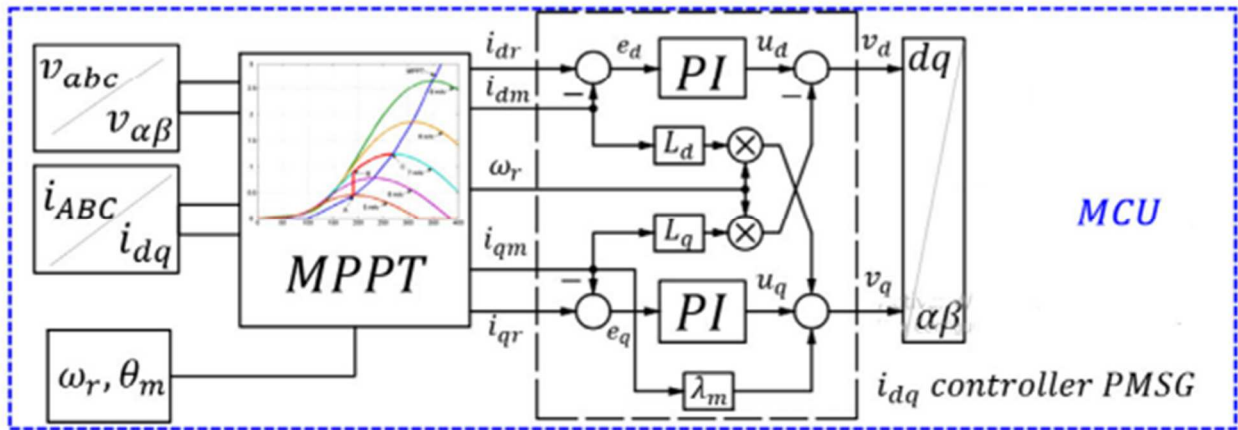


Figura 4.1 Controllore PI [7].

5.Simulink

Un modello Simulink completo del sistema viene sviluppato, facendo uso della libreria "Simscape Specialized Power Systems". Questo approccio consente di valutare le prestazioni complessive del sistema attraverso simulazioni dettagliate.

Si sceglie come rete elettrica una tensione stellata $V_{IN} = 707.11$ V ad una frequenza $f = 50$ Hz. La turbina eolica viene presa di dimensioni tali da generare un massimo di potenza elettrica di 75 kVA, ad una velocità del vento di $v_{wind} = 12$ m/s e velocità di rotore uguale alla velocità ottimale, pari a 350 rad/s [4]. Per quanto riguarda le grandezze elettriche utilizzate per la modulazione e per il controllo, sono campionate ad una frequenza $f_s = 9$ kHz e sovracampionate dall'upscaler fino a $f_{up} = 100$ kHz.

Al posto di un sistema di controllo che implementi i parametri ricavati da un MPPT si utilizzerà una ω_{opt} ricavata da [3] per condizioni costanti del vento.

I parametri del generatore, del filtro di ingresso e del controllo sono descritti nelle seguenti tabelle.

Tabella 1 Parametri elettrici del generatore.

R_s [m Ω]	L_d [μ H]	L_q [μ H]	λ_m [mV · s]
100	150	150	119.4

Tabella 2 Parametri meccanici del generatore

J [g · m ²]	F [μ N · m · s]	p
2.7	492.5	4

Tabella 3 Valori filtro d'ingresso

R [Ω]	L [mH]	C [μ F]	f_{cut} [Hz]
20	4	26.4	978

Tabella 4 Valori sistema di controllo

$i_{sd\ ref}$ [A]	ω_{opt} [rad/s]	τ [s]
0	350	0.01

6. Simulazioni

Viene effettuata una simulazione a regime presi V_{wind} e Q_{des} costanti.

6.1. Vento e potenza reattiva costanti

Viene simulato il sistema a regime quando sia la velocità del vento che la potenza reattiva richiesta dalla rete sono costanti.

Vengono scelti $V_{wind} = 11$ m/s e $Q_{des} = 10$ kVAR.

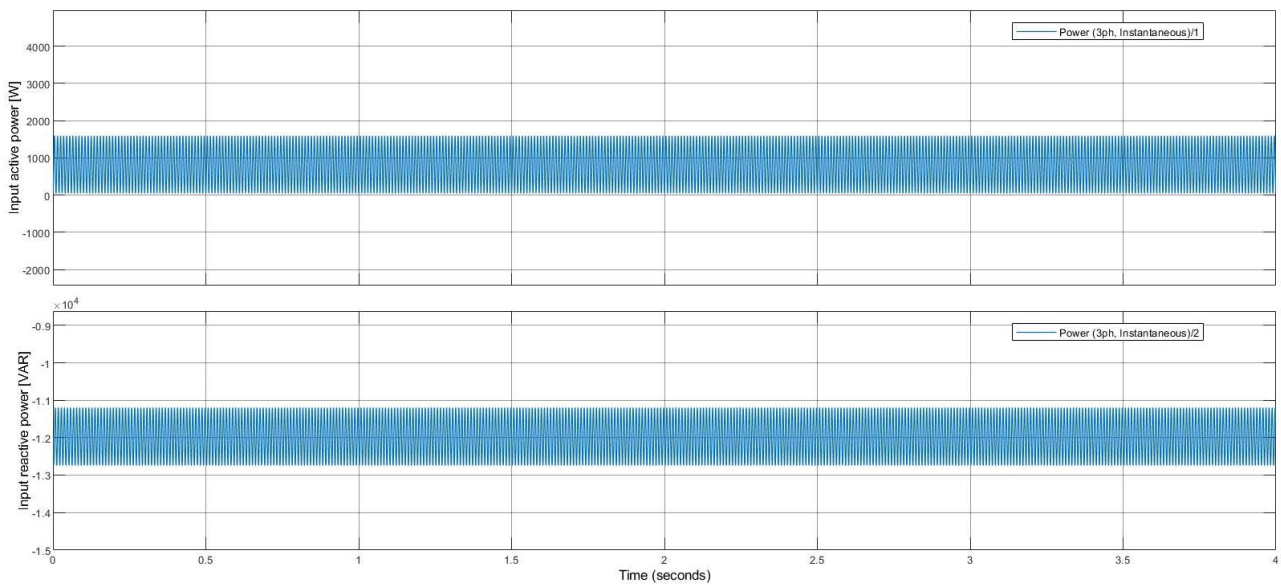


Figura 6.1 Potenza attiva e reattiva con vento e potenza reattiva fisse.

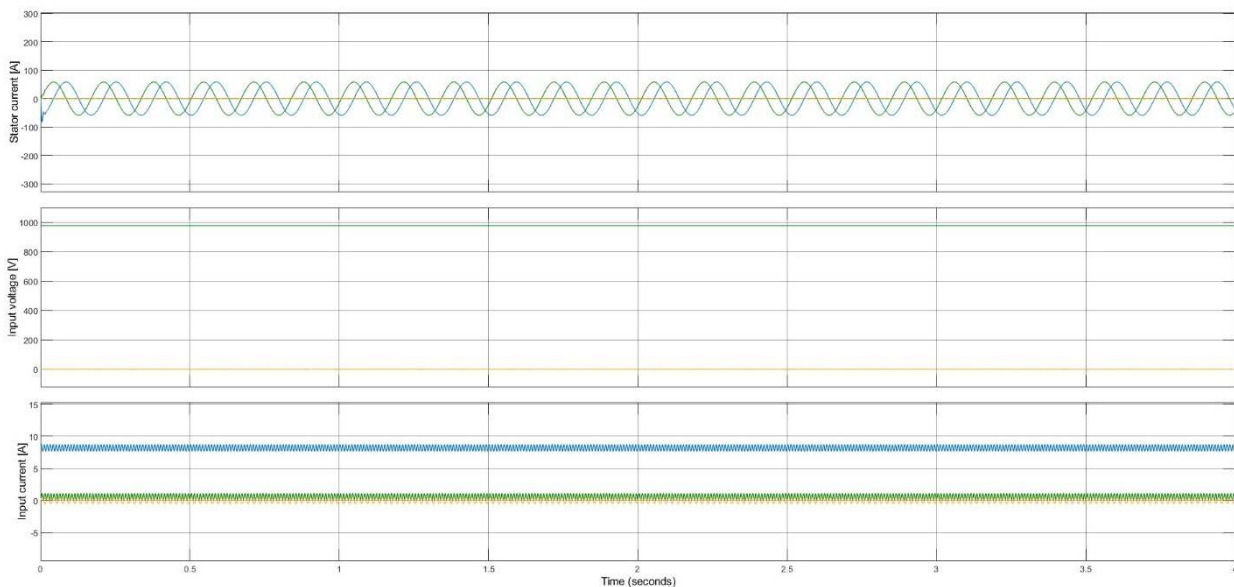


Figura 6.2 Corrente sullo statore, tensione sulla rete e corrente sulla rete con vento e potenza reattiva fisse. In verde è rappresentata la componente diretta, in blu la componente in quadratura e in arancio la componente zero.

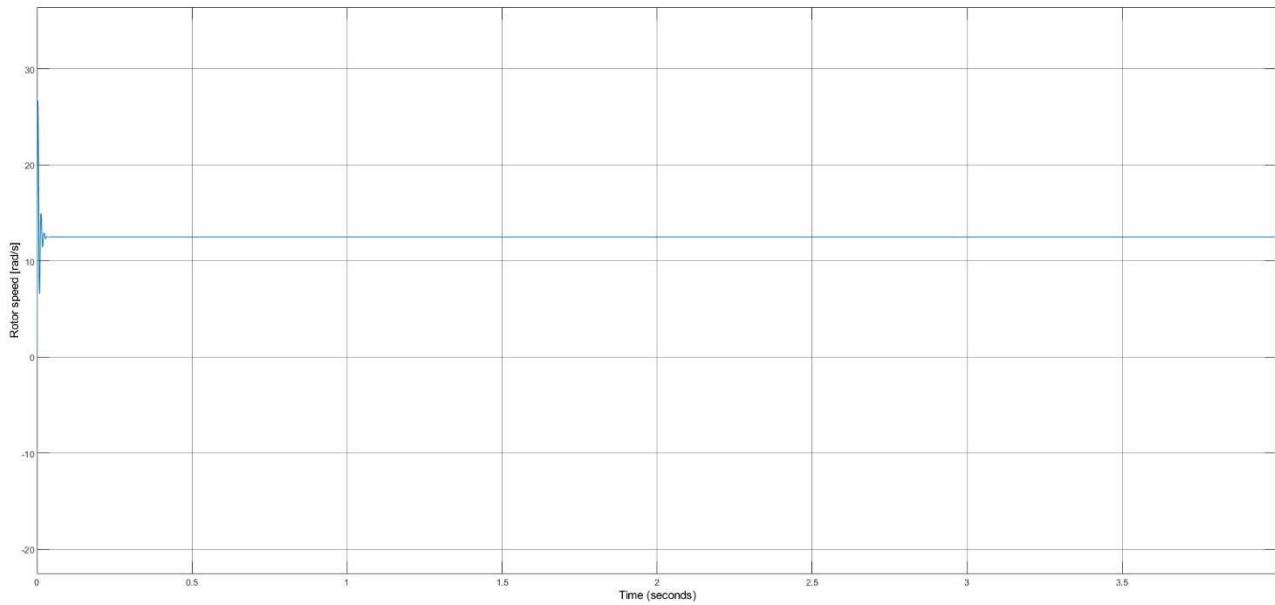


Figura 6.3 Velocità del rotore con vento e potenza reattiva fisse.

Dalla figura 6.1 si nota che con questi valori viene generata una potenza di 817 W con un ripple di circa 774 W. Dalla figura 6.3 si vede che questo corrisponde ad una velocità del rotore di 12.5 rad/s con un ripple nullo una volta arrivato a regime.

6.1.1. Qualità della corrente

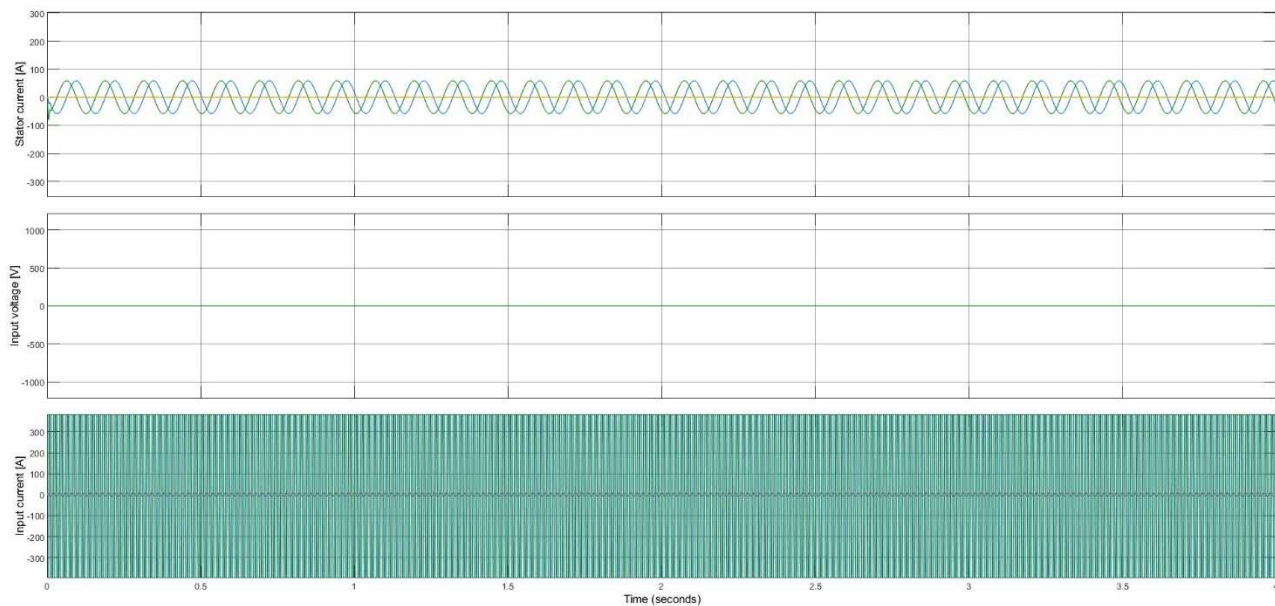


Figura 6.4 Corrente sullo statore, tensione sullo statore e corrente sulla rete rappresentazione trifase con vento e potenza reattiva fisse.

7. Conclusioni

Una turbina eolica con generatore a magneti permanenti che utilizza una conversione AC-AC diretta con modulazione Σ - Δ , un controllo del generatore in controreazione in corrente è stata presentata.

Nella realizzazione di un modello Simulink di tutto il sistema, utilizzando la libreria "Simscape Specialized Power Systems", si ottiene che il controllo PI con la modulazione Σ - Δ produce dei risultati stabili per condizioni ambientali stabili, e che sono necessarie ulteriori modifiche, come la progettazione ed implementazione di un controllo MPPT, per rendere efficace questo setup in condizioni variabili.

Bibliografia

- [1] “Tutti i vantaggi dell’energia eolica”
<https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-eolica/vantaggi-energia-eolica> (accessed Feb. 04, 2024).
- [2] “Wind turbine schematics,” Wikipedia, the free encyclopedia
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wind_turbine_schematic.svg (accessed Feb. 04, 2024).
- [3] J. S. Thongam, R. Beguenane, A. F. Okou, M. Tarbouchi, A. Merabet and P. Bouchard, "A method of tracking maximum power points in variable speed wind energy conversion systems," International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy, 2012, pp. 1095-1100, doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264578.
- [4] Thoshihiro Tsuda, Tadashi Fukami, Yasunori Kanamaru and Toshio Miyamoto, “Effects of the built-in permanent magnet rotor on the equivalent circuit parameters of a PMIG,” IEEE transactions of energy conversion, vol. 22, no. 3, september 2007, doi: 10.1109/TEC.2007.902674.
- [5] Kotb B. Tawfiq, Arafa S. Mansour, Haitham S. Ramadan, Mohamed Becherif, E.E. El-kholy, “Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review,” Energy Procedia 162(2009) 38-47, doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.005.
- [6] S. Orcioni, G. Biagetti, P. Crippa, and L. Falaschetti, “A driving technique for AC-AC direct matrix converters based on sigma-delta modulation,” Energies, vol. 12, no. 6, pp. 1-18, 2019, doi: 103390/en12061103.

- [7] Diego Armando Gutiérrez-Torres, Juan M. Ramirez, José M. Lozano-Garcia, "Implementing a simplified power controller with a direct matrix converter for a PMSG-based WECS", IET Power Electronics 2023, 1-10, doi: 10.1049/pel2.12601.
- [8] Stacchiotti Luca, "Modulazione Sigma-Delta in convertitori a matrice per turbine eoliche," Università Politecnica delle Marche, 2020.
- [9] T.Wildi, Electrical machines, Drives, and Power Systems, 2002.
- [10] Alexandra Von Meier, Electric Power System, 2006.
- [11] "Implement abc to dq0 transform," MathWorks.
<https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/ref/parktransform.html> (accessed Feb. 04, 2024).
- [12] H. Ahmed and A. Bhattacharya, "PMSG based constant power delivery standalone WECS using SST with bidirectional buck-boost BESS," 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner, India, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/POWERI.2016.8077238.
- [13] M. Kazerani and B. T. Ooi, "Direct AC-AC matrix converter based on three-phase voltage-source converter modules," Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Maui, HI, USA, 1993, pp. 812-817 vol.2, doi: 10.1109/IECON.1993.338976.
- [14] A. Nadhir and T. Hiyama, "Maximum Power Point Tracking Based Optimal Control Wind Energy Conversion System," 2010 Second International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, Jakarta, Indonesia, 2010, pp. 41-44, doi: 10.1109/ACT.2010.38.