



Progetto InSITE: INtelligent energy management of Smartgrids based on IoT and edge/cloud Technologies

D.3.1 - SOTA of system identification techniques of loads and generators in smart grids

Versione: 1.0
Data: 23/02/2023

Finanziato a valere sul fondo di finanziamento della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (Fondo RdS) Piano Triennale (PT) 2019-2021 – Bando b – progetto “InSITE - INtelligent energy management of Smartgrids based on IoT and edge/cloud Technologies”, riferimento Prog. CSEAB_00320





1. Introduzione	3
2. Identificazione dei modelli di carico e generatore	4
2.1. Identificazione parametrica di modelli di carico/generatore.....	5
2.2. Identificazione a scatola nera di modelli di carico/generatore	10
3. Tecniche di identificazione parametrica di macchine sincrone a magneti permanenti	13
3.1. Metodi offline	15
3.2. Metodi online.....	19
3.3. Metodi non-intrusivi per PMSM integrati nei sistemi IoT	41
4. Conclusioni.....	47
5. Bibliografia.....	48

1. Introduzione

In questo documento è riportato un resoconto dettagliato dello stato dell'arte delle tecniche di identificazione dei modelli di carichi e generatori tipicamente presenti nelle Smart Grids (SG). Nel secondo capitolo del documento sono state riportate le tecniche di identificazione di modelli di carico e generatore con l'ipotesi di poter disporre soltanto di misure di potenza attiva e reattiva e di tensione. Queste tecniche sono utili ad ottenere modelli che legano la potenza attiva e reattiva del carico e/o generatore o di modelli compositi con diverse tipologie di carico e generatore, alla tensione del bus della rete a cui tali componenti sono collegati. Tra i carichi sono considerati sia carichi statici che carichi dinamici, tra i quali l'esponente oggetto di maggior analisi è il motore ad induzione. Infatti, questo risulta essere tra i motori più diffusi in ambito industriale per la sua robustezza e semplicità di regolazione. Tuttavia, un'altra tipologia di macchina elettrica che si sta diffondendo rapidamente, è la macchina sincrona a magneti permanenti, in inglese Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM). Si tenga conto infatti che il mercato dei motori ad induzione ha raggiunto un valore di circa 14.76 miliardi di dollari nel 2021 con tasso di crescita annuo previsto del 3.72% per i successivi anni [1], mentre il mercato dei PMSM ha raggiunto il valore di 23.77 miliardi di dollari nel 2022 con un tasso di crescita annuo previsto del 15.4% [2]. La loro diffusione è sostenuta anche da piani regolatori varati nell'Unione Europea, Stati Uniti e Cina che prevedono di soddisfare obbligatoriamente requisiti di crescente efficienza energetica nelle nuove installazioni [3]. Infatti, tali macchine sono caratterizzate "elevata densità di energia, buona prestazione dinamica ed elevata efficienza" [4]. Pertanto, nel terzo capitolo sono state prese in esame le tecniche di identificazione parametrica delle macchine sincrone a magneti permanenti, le quali sono impiegate sia come carichi (motori impiegati ad esempio nei servoazionamenti) che come generatori (turbine eoliche, cogeneratori, ecc.) e pertanto costituiscono un importante attore nelle smart grids.

2. Identificazione dei modelli di carico e generatore

I modelli di carico e generatore descrivono la relazione tra la potenza attiva e reattiva del carico e/o generatore e la tensione del bus su cui si attesta il componente e giocano un ruolo importante nell'analisi dei sistemi di potenza, nel loro esercizio e controllo. Molto spesso ci si riferisce a modelli di carico compositi, che includono carichi e generatori di varia natura, sia statici che dinamici.

Le problematiche dell'identificazione di questi modelli riguardano sia la determinazione della loro struttura che dei loro parametri al fine di descrivere come variano le potenze in seguito a variazioni della tensione. Si possono distinguere due diversi approcci per l'identificazione dei modelli di carico: il metodo basato sui componenti che è basato sulla composizione dei modelli e delle caratteristiche dei singoli componenti ed il metodo basato sulle misure che consente di determinare i parametri del carico usando i dati di campo senza richiedere informazioni dettagliate sul carico da identificare.

Il primo approccio richiede di disporre di modelli fisici dei componenti e di informazioni aggiuntive sui suoi parametri e risulta poco applicabile nella pratica a causa della complessità dei moderni sistemi elettrici. Il secondo invece risulta più flessibile e di più semplice applicazione. Generalmente gli approcci basati sulle misure richiedono di affrontare un problema di ottimizzazione per determinare i parametri del sistema. Definita una struttura per il modello del carico, si ricerca la combinazione ottima dei parametri che minimizza l'errore tra la potenza ottenuta dal modello e la potenza misurate a fronte dello stesso set di dati di tensione in ingresso. In tal caso si parla di identificazione a scatola grigia. In particolare, con lo sviluppo dell'edge computing nelle smart grids, le risorse computazionali terminali possono giocare un ruolo importante in questo ambito [5]. Questi dispositivi si assumono il compito di registrare i dati, di effettuare l'identificazione parametrica e di caricare gli esiti verso il centro di dispacciamento invece dei dati completi. In tal modo si riduce la pressione sui centri di dispacciamento e sulla rete di comunicazione [8]. In altri casi possono essere usati modelli di approssimazione delle relazioni potenze-tensione la cui struttura e dimensione non è nota a priori. In tal caso si parla di identificazione a scatola nera. I metodi di identificazione parametrica (a scatola grigia) e i metodi di identificazione a scatola nera saranno presentati separatamente nel resto del capitolo.

2.1. Identificazione parametrica di modelli di carico/generatore

Questo problema considera una struttura preassegnata che descrive il modello matematico del carico/generatore con dei parametri che hanno un significato fisico. Il problema è dunque quello di stimare i parametri.

In [5], viene proposto un metodo per identificare un modello composto di carico in una rete elettrica composto da un carico statico e un carico dinamico costituito da un motore a induzione, come illustrato in Fig. 1. Il carico statico viene detto modello ZIP, ossia con un carico ad impedenza costante, un carico a corrente costante ed un carico a potenza costante. Il metodo proposto punta ad identificare un sotto insieme dei parametri, altri vengono supposti noti (e pari ai valori nominali) usando i dati di 4 punti operativi, di cui uno ottenuto dopo un calo di tensione, uno prima e uno dopo il recupero della tensione ed un altro dopo il ristabilimento dello stato stazionario.

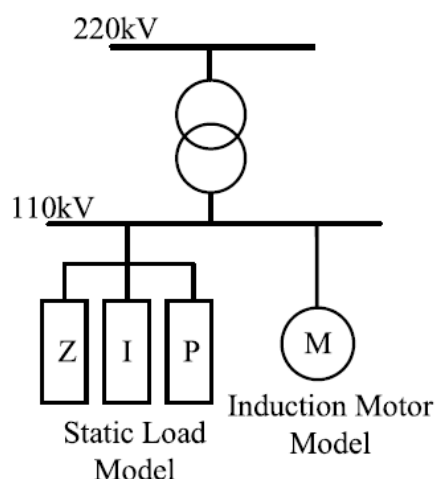


Fig. 1 – Modello di carico composito [5].

In [6] il modello in Fig. 1 viene identificato considerando non solo le misure di tensione, potenza reattiva e attiva disponibili nel bus del carico da identificare, ma usando le misure di tutti i bus della rete. In particolare, le incertezze di stima vengono affrontate definendo un problema probabilistico in cui l'obiettivo è quello di calcolare la funzione densità di probabilità condizionale per ogni stima ottenuta sulla base delle stime e misure precedenti. Per calcolare questa funzione viene proposta una architettura nota come *deep generative architecture* (DGA). In [7], il modello in Fig. 1 viene identificato considerando una relazione non lineare tra la il vettore dei parametri al passo corrente, i vettori dei parametri ai passi precedenti e le misure ai passi precedenti. Il numero di passi considerati per il vettore dei parametri e delle misure viene determinato con un algoritmo di apprendimento supervisionato. In particolare, anche in questo caso, per identificare i

parametri del carico/generatore in un bus, vengono considerate anche le misure degli altri bus. Per determinare la relazione non-lineare tra i parametri e le misure di tutti i bus, viene utilizzata una architettura di pattern recognition nota come *multi-modal long short-term memory*, illustrata in Fig. 2.

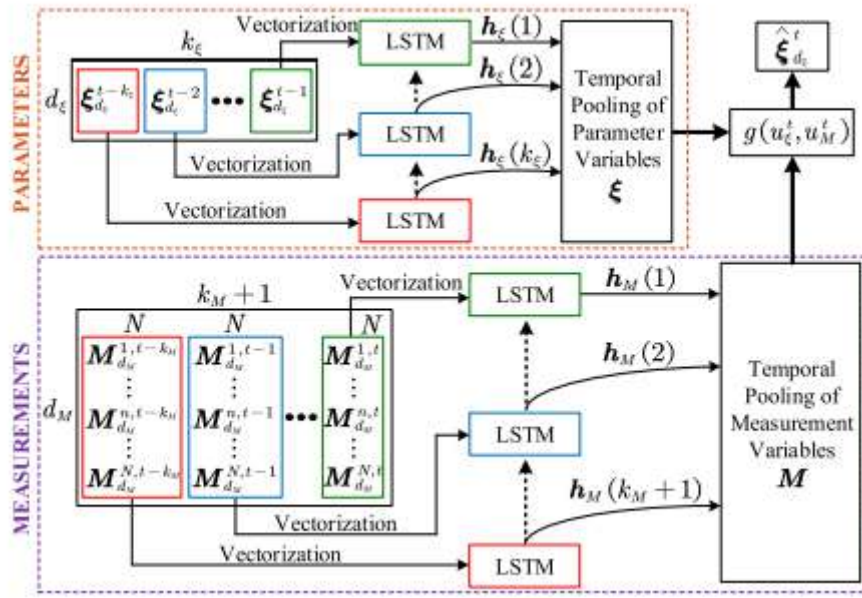


Fig. 2 – Struttura di un multi-modal long short-term memory [7].

In [8], viene proposto un metodo di identificazione dei parametri di un modello di carico/generatore più complesso che include un modello composito del carico con generazione distribuita, come mostrato in Fig. 3. I parametri ottimali vengono identificati mediante un algoritmo di ricerca ispirato ad una tecnica di deep reinforcement learning evolutivo. La ricerca è coadiuvata da una analisi di sensitivity avente la funzione di calcolare dei pesi che riflettono l'influenza dei parametri sulla dinamica del modello. Lo schema generale dell'algoritmo è illustrato in Fig. 4. In [10] viene considerato lo stesso modello riportato in Fig. 3. In particolare, viene affrontato dapprima il problema di determinare la composizione ottimale del carico composito usando un metodo noto come double deep Q-learning. Successivamente i parametri di questo modello ottimo vengono determinati con il metodo Monte Carlo.

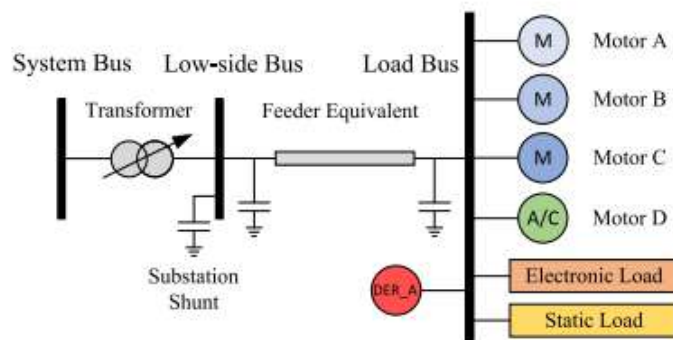


Fig. 3 – Modello di carico composito con modello di generazione distribuita [9].

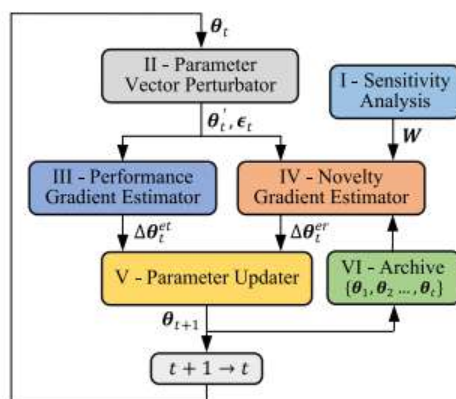


Fig. 4 – Algoritmo di identificazione parametrica basato su deep reinforcement learning evolutivo e analisi di sensitivity [9].

In [11], viene considerato lo stesso problema precedente, ma si considerano disturbi ed errori nelle misure di tensione e potenza attiva e reattiva. Queste problematiche di qualità dei dati vengono affrontate proponendo un algoritmo robusto di stima dei parametri del modello composito del carico. In particolare, gli outliers nelle misure vengono sottopesati con un metodo noto come *Projection Statistics*, influenza in misura minore le stime dei parametri rispetto alle misure considerate affidabili. I parametri, dunque vengono stimati usando un algoritmo basato sul metodo dei minimi quadrati pesati, come mostrato in Fig. 5. In [12], viene proposta una strategia di identificazione innovativa di un modello di carico come quello illustrato in Fig. 6, che include un trasformatore, un modello ZIP ed un motore ad induzione. La strategia prevede di semplificare il modello considerando i parametri che più influiscono sull'uscita del modello. Per determinare questi parametri vengono calcolati due indici noti come *Indice di sensitivity del primo ordine* (FSI) e *Indice di sensitivity totale* (TSI). Questi indici vengono calcolati usando il metodo di Sobol basato sull'approccio Monte Carlo. I parametri vengono dunque identificati con un algoritmo genetico.

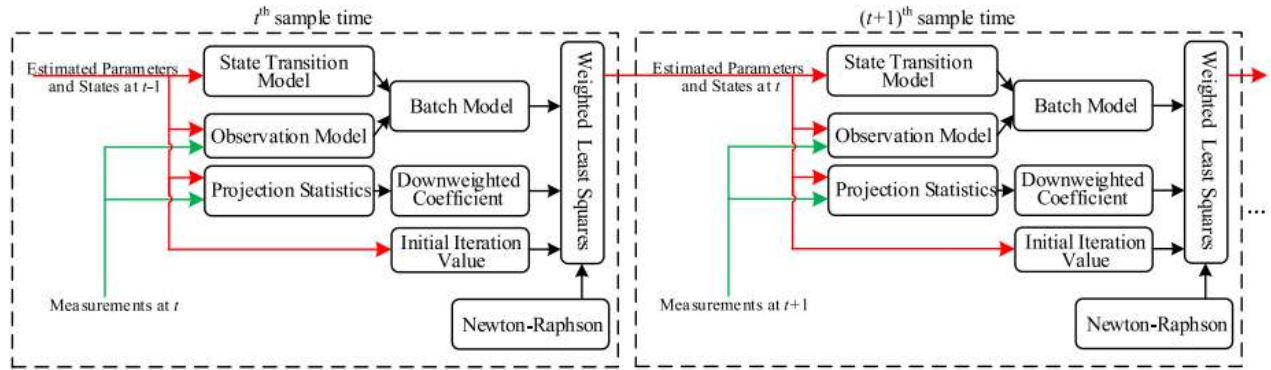


Fig. 5 – Schema di stima parametrica robusto basato su Projection Statistics [11].

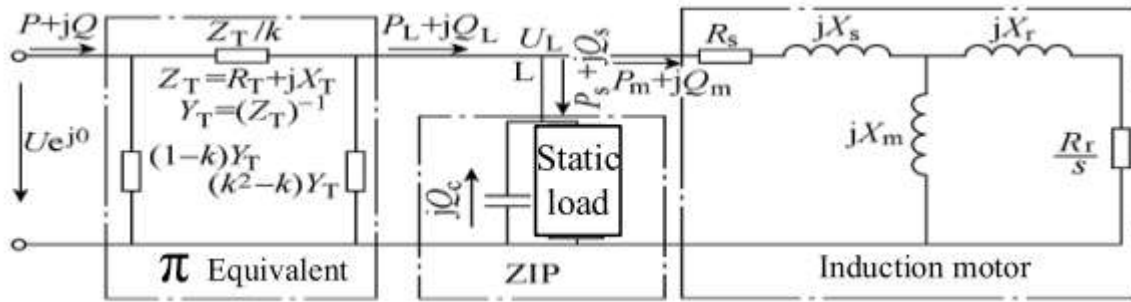


Fig. 6 – Modello di carico con trasformatore [12].

In [13] viene invece considerato un modello esponenziale del tipo:

$$\begin{aligned}
 T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r &= P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_s} - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t} \\
 P_l &= P_r + P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t}
 \end{aligned} \quad (1)$$

where

- V_0 and P_0 voltage and power consumption before a voltage change;
- P_r active power recovery;
- P_l total active power response;
- T_p active load recovery time constant;
- α_t transient active load-voltage dependence coefficient;
- α_s steady state active load-voltage dependence coefficient.

Il vantaggio di questo modello è che riduce il numero di parametri e consente di limitare l'onere computazionale necessario per la stima di questi. Pertanto, risulta più facile implementare algoritmi di stima parametrica real-time. I parametri vengono identificati con un Unscented Kalman Filter considerando un modello discretizzato con il metodo di Runge-Kutta del secondo ordine.

2.2. Identificazione a scatola nera di modelli di carico/generatore

Questi metodi prevedono di identificare i modelli senza disporre di modelli fisici a priori. Quindi la struttura e/o la dimensione del modello sono oggetto del problema di identificazione.

In [14] il modello di carico viene identificato usando una rete di modelli locali, in inglese *local model network*. Questa rete è composta da local model networks lineari e non richiede di disporre di modelli predefiniti del carico ma individua autonomamente una approssimazione della relazione dinamica tra tensione e potenza attiva e reattiva dei vari carichi della rete, sulla base delle misure raccolte. Uno schema di questa rete è illustrato in Fig. 7. Ogni modello locale costituisce un neurone della rete. Per l'addestramento di tale rete si utilizza un algoritmo noto come albero binario gerarchico il quale genera nuovi modelli locali finché non si ottengono le prestazioni desiderate. Quindi la dimensione della rete non è prefissata ma viene determinata in modo ottimale da questo algoritmo.

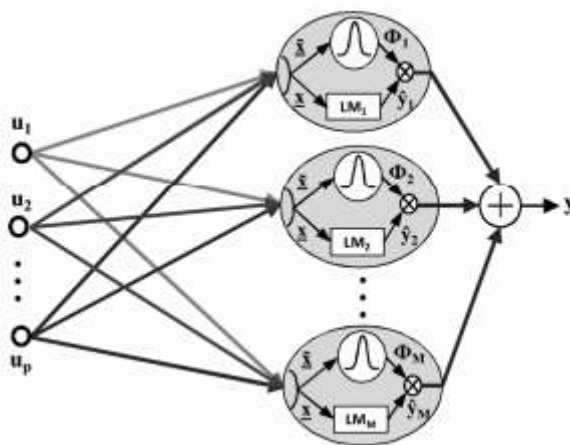


Fig. 7 – Rete di modelli locali [14].

In [15] vengono utilizzati dei modelli di Hammerstein per identificare dei modelli di carico composti costituiti da generatori distribuiti, sistemi di accumulo e carichi concentrati, come mostrato in Fig. 8. Il modello di Hammerstein considerato è illustrato invece in Fig. 9. I parametri di questo modello non-lineare vengono identificati minimizzando l'errore quadratico di predizione della potenza.

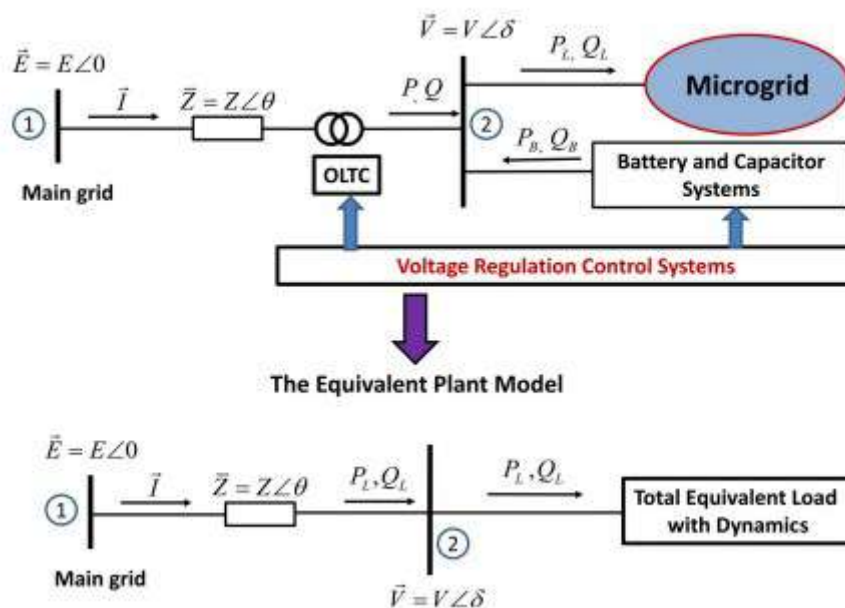


Fig. 8 – Modello composito costituito da carichi, generatori e sistemi di accumulo [15].

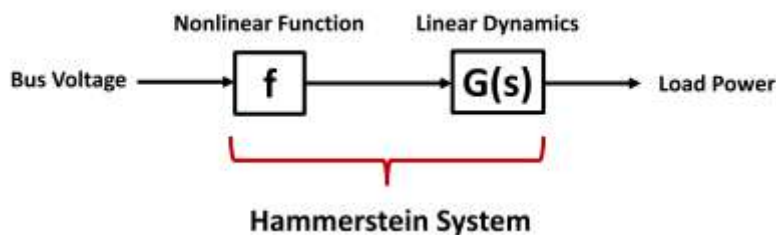


Fig. 9 – Modello di Hammerstein per un modello di carico [15].

In [16], il problema di identificare il modello più performante per il carico viene risolto utilizzando un approccio Bayesianico ricorsivo. Una serie di sotto-modelli basati su reti neurali con funzione a base radiale sono disponibili in un framework e vengono addestrati online sulla base di misure raccolte durante eventi di disturbo. Le predizioni di queste reti vengono confrontate con le uscite misurate, ossia le potenze attive e reattive del carico. Sulla base dell'errore di predizione le uscite vengono pesate e composte con dei pesi calcolati mediante l'approccio Bayesianico ricorsivo. Lo schema in Fig. 10 rappresenta il framework di sotto-modelli proposto.

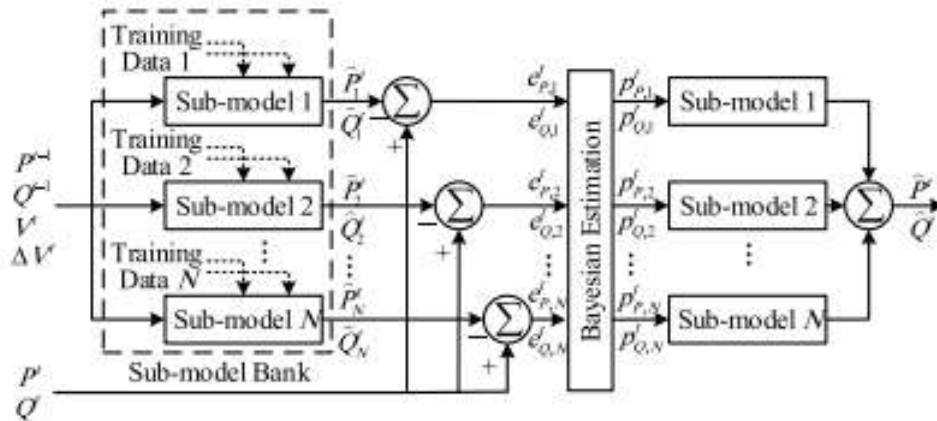


Fig. 10 – Framework di sotto-modelli composti con l'approccio Bayesiano ricorsivo [16].

In [17], viene proposto modello di carico dinamico adattivo di ordine ottimo per catturare le dinamiche di carichi aggregati, come mostrato in Fig. 11. In particolare, viene usato un modello di carico esponenziale il cui ordine ottimale viene determinato usando un metodo noto come *Singular Value Decomposition*. Successivamente vengono stimati i parametri di questo modello usando dei dati prefiltrati con un metodo noto come *Wavelet Denoising Technique*.

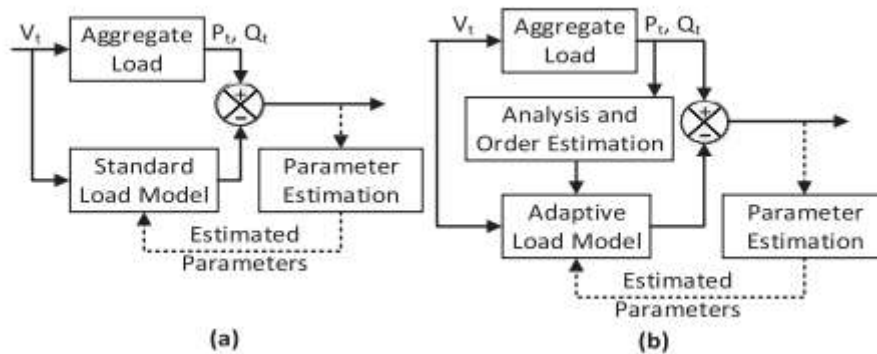


Fig. 11 – Approcci basati sulle misure: (a) approccio a scatola grigia tradizionale, (b) approccio a scatola nera adattivo [17].

3. Tecniche di identificazione parametrica di macchine sincrone a magneti permanenti

Il modello tempo-continuo di un PMSM generalmente impiegato per affrontare i problemi di identificazione parametrica è quello in coordinate rotanti dq [18], [19]:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_{pm} \end{cases} \quad (1)$$

dove t esprime il tempo, u_d, u_q sono le tensioni di asse d e q , i_d, i_q sono le correnti di asse d e q , ω_r è la velocità elettrica del rotore e ψ_{pm} , R_s , L_d ed L_q sono i quattro *parametri elettrici* della macchina, rispettivamente: flusso generato dei magneti permanenti di rotore concatenato con gli avvolgimenti di statore, denominato per semplicità *flusso rotorico*; resistenza degli avvolgimenti di statore; induttanze statoriche di asse d e q .

Per i motori a magneti permanenti superficiali (SPMSM), i quali costituiscono la tipologia più diffusa di PMSM [20], il modello si può semplificare come segue durante un controllo a $i_d = 0$ [21]:

$$\begin{cases} u_d = -\omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r \psi_{pm} \end{cases} \quad (2)$$

Si noti che per queste macchine vi è un parametro in meno da identificare poiché risulta $L_q = L_d$ [22]. Per le macchine a magneti permanenti interni (IPMSM) invece le induttanze di asse d e q sono tra loro diverse e generalmente vengono controllate a $i_d \neq 0$. Si noti che parametri elettrici sono particolarmente difficili da identificare essendo questi funzione delle condizioni operative delle macchine. In particolare, la resistenza di statore varia con la temperatura e la frequenza di alimentazione del motore, il flusso rotorico varia con la temperatura e l'intensità delle correnti d e q , le induttanze variano con le correnti d e q a seguito dei fenomeni di saturazione propria e mutua.

Alle equazioni elettriche si può aggiungere l'equazione di equilibrio meccanico:

$$\frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - b \frac{\omega_r}{n_p} - C_r \quad (3)$$

dove J è il momento di inerzia complessivo, n_p è il numero di coppie polari, C_e è la coppia elettromagnetica, b è il coefficiente di attrito viscoso e C_r è la coppia di carico. Si noti che il numero di coppie polari è un parametro facilmente identificabile mediante il rapporto tra la frequenza delle correnti di fase e la velocità meccanica del motore. Pertanto, questo non viene generalmente considerato nei problemi di identificazione

parametrica. Il momento di inerzia può essere esclusivamente identificato sfruttando dati della macchina in condizioni di transitorio meccanico ed è un parametro che non varia al variare delle condizioni operative. Infine, il coefficiente di attrito viscoso, legato essenzialmente alla natura dei cuscinetti del motore, è anch'esso un parametro che non varia al variare delle condizioni operative del motore.

I metodi di identificazione parametrica dei PMSM possono essere suddivisi in metodi offline e metodi online in base al tempo di svolgimento dell'identificazione rispetto a quello di raccolta dei dati. A questi due approcci classici è possibile aggiungere un terzo innovativo basato su metodi non-intrusivi di identificazione di macchine integrate nei sistemi Internet of Things (IoT).

3.1. Metodi offline

Con metodi di identificazione offline, i dati di misura sono prima raccolti e poi elaborati per stimare i parametri. Si noti che, convenzionalmente, i metodi offline richiedono di effettuare test ad hoc a rotore fermo [23] o necessitano della presenza di operatori esperti e di “*strumentazione addizionale, la quale incrementa la complessità del sistema e del tempo di test, oltre a richiedere che la macchina lavori senza carico a causa di problematiche di sicurezza in fase di misura*” [24]. I metodi offline possono a loro volta essere classificati in metodi nel dominio della frequenza, metodi nel dominio del tempo e metodi agli elementi finiti.

Metodi nel dominio della frequenza

I metodi nel dominio della frequenza sono prevalentemente basati sulla risposta in frequenza a macchina ferma. Per esempio, in [25], le induttanze di asse d e q vengono misurate indirettamente partendo dalle misure di impedenza e da una misura di resistenza. Le misure di impedenza vengono fatte allineando il rotore con la fase A della macchina e alimentando le fasi con tensioni alternate sinusoidali con un alimentatore esterno, come illustrato in Fig. 12. La resistenza elettrica viene invece misurata a temperatura ambiente mediante il metodo volt-amperometrico.

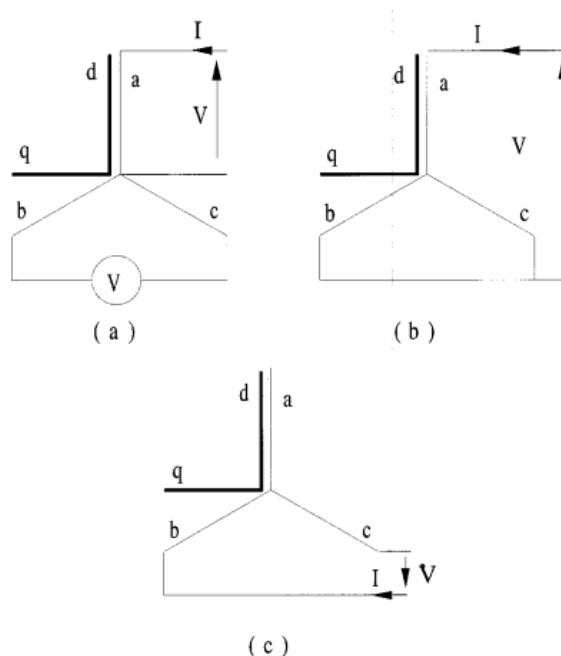


Fig. 12 – Posizionamento rotore e alimentazione delle fasi della macchina per i test in frequenza: (a) Fase di allineamento con la fase a, (b) Schema di alimentazione per misurare l’impedenza di asse d , (c) Schema di alimentazione per misurare l’impedenza di asse q [25].

In [26], la macchina a rotore bloccato viene alimentata con un amplificatore lineare per eseguire dei test in frequenza mentre in [27], viene utilizzata una procedura in cui è lo stesso inverter a tensione impressa (in inglese, *voltage source inverter* (VSI)) che alimenta la macchina durante il suo funzionamento ordinario ad eccitare correttamente la macchina per identificare i parametri. In questo, l'inverter eroga una tensione alternata sinusoidale prima lungo l'asse d e poi lungo l'asse q e la macchina viene tenuta ferma iniettando una componente continua di corrente lungo l'asse d , come mostrato in Fig. 13.

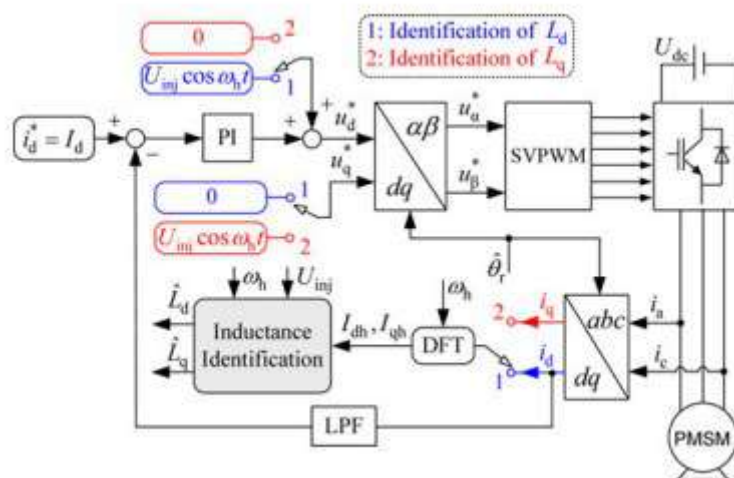


Fig. 13 – Schema di identificazione delle induttanze statoriche mediante alimentazione da inverter [27].

Metodi nel dominio del tempo

I metodi nel dominio del tempo sono basati sull'analisi nel dominio del tempo delle risposte a segnali di perturbazione o eccitazione con macchina ferma o a velocità costante usando bobine esploratrici [28], test a carico [29]-[30], test con misura delle tensioni di fase [31], test a corrente alternata a macchina ferma [32]-[33], test a rotore bloccato [34]-[35], test con iniezione di segnali a corrente alternata con componente continua [36]-[38] e test di coppia [39]-[41].

- Il metodo delle bobine esploratrici richiede di fissare più bobine attorno allo statore per misurare il flusso dei magneti. In particolare, *“per garantire il massimo grado di libertà durante la fase di test”*, si usano generalmente 12 bobine [28]. Durante il test a carico, *“il PMSM viene mantenuto a velocità costante mentre il carico viene variato e si usano le componenti fondamentali della tensione e della corrente per identificare il flusso concatenato* [4]. In particolare, per garantire l'accuratezza

dell'identificazione parametrica, *"tutti i test devono essere eseguiti alla stessa temperatura operativa"* [29].

- Il test con misura delle tensioni di fase consente di determinare le induttanze statoriche di asse d e q. I test a corrente alternata con macchina ferma consentono di determinare le induttanze statoriche di asse d e q. In particolare, *"una delle fasi della macchina è eccitata da una singola sorgente a corrente alternata e la corrente di fase e la tensione indotta in una delle altre due fasi della macchina vengono misurate in differenti posizioni del rotore"* [32].
- I test a rotore bloccato consentono di determinare i parametri usando misure di flusso. *"I flussi concatenati dipendenti dalle correnti possono essere determinati da test sperimentali eseguiti a rotore bloccato quando il motore è alimentato dal VSI controllato"* [35].
- Il test con iniezione di segnali a corrente alternata con componente continua consente di *"dividere la caratteristica di magnetizzazione in sezioni infinitesimali"*. *"Attorno a ciascuna sezione, la curva è assunta lineare e la sua pendenza, che corrisponde all'induttanza della macchina, è stimata mediante l'iniezione di un segnale a corrente alternata"* [36]. Anche la resistenza di statore può essere identificata con un metodo simile *"usando l'iniezione di un segnale di corrente a bassa frequenza lungo l'asse d"* e *"l'algoritmo di identificazione viene eseguito ogni semionda del segnale di test"* [38].
- I test di coppia prevedono di applicare una coppia nota alla macchina e di misurarne correnti e posizione. In [39], *"la procedura di test è svolta mediante un alimentatore a corrente continua che applica e mantiene una corrente costante durante alla macchina da testare. Tale macchina è meccanicamente accoppiata mediante un sensore di coppia ad un motore primo che la porta in rotazione a velocità costante durante il test"*. In [41], *"è proposta l'identificazione dell'intera mappa dei flussi concatenati di asse d e q di un PMSM in differenti condizioni di carico"*. In particolare, *"per ogni condizione di carico, due set di dati della macchina corrispondenti a due diverse velocità sono registrati e salvati in memoria"* e sono dunque utilizzati da un algoritmo di ottimizzazione basato sull'algoritmo genetico per l'identificazione della mappa dei flussi.

Metodi basati sull'analisi agli elementi finiti

Questi metodi richiedono un'accurata conoscenza della struttura, geometria e materiali del PMSM. Tra i metodi utilizzati vi sono:

- I metodi basati sull'energia magnetica immagazzinata. Per esempio, in [42], *"l'induttanza di fase è calcolata dall'equazione dell'induttanza efficace, la quale è definita come il doppio della energia immagazzinata nel campo magnetico divisa per il quadrato della corrente circolante negli avvolgimenti."*
- I metodi duali basati sull'energia. Per esempio, in [43], le induttanze di asse d e q sono calcolate con questo metodo, *"il quale considera sia la condizione di carico che l'angolo di fase della corrente"*. L'aspetto più importante di questo metodo è che consente di trasformare problemi non-lineari in problemi lineari immagazzinando le permeabilità magnetiche ottenute con l'analisi non-lineare".
- I metodi basati sul vettore potenziale magnetico [44].
- I metodi basati sulla perturbazione dell'energia. Questi metodi prevedono di calcolare le auto e mutue induttanze della macchina con *"le derivate parziali dell'energia globalmente immagazzinata rispetto a varie perturbazioni della corrente negli avvolgimenti statorici"* [45].

I metodi agli elementi finiti possono essere utilizzati per dedurre informazioni locali sul comportamento magnetico e termico dei PMSM difficilmente ottenibili con studi analitici a causa della complessa geometria delle macchine. Inoltre, i metodi basati sulla analisi agli elementi finiti possono anche essere utilizzati per stimare i parametri in condizioni di guasto. Per esempio, in [46], *"è stata utilizzata una analisi agli elementi finiti 2-D per la modellazione di un PMSM con magneti montati sulla superficie del rotore in condizioni di guasto dell'isolamento delle spire. L'analisi agli elementi finiti è stata utilizzata per lo studio del campo magnetico e per determinare i parametri della macchina in condizioni di guasto (come le induttanze e le forze controelettromotrice indotte dai magneti)".* In [47], *"gli autori presentano un modello debolmente accoppiato ottenute mediante analisi agli elementi finiti per determinare le induttanze elementari delle diverse bobine delle fasi di statore. Un metodo appropriato dunque determina dunque le corrette auto e mutue induttanze del circuito equivalente della macchina in condizioni di guasto."*

3.2. Metodi online

Con i metodi di identificazione online, le stime parametriche sono svolte contestualmente all'acquisizione dei dati di misura durante il funzionamento ordinario della macchina, mediante algoritmi che vengono eseguiti dalla stessa unità di controllo dell'azionamento elettrico. In particolare, i dati di misura necessari per identificare i parametri sono per la maggior parte acquisiti dalla stessa unità di controllo, limitando dunque l'utilizzo di strumentazione di misura aggiuntiva e l'alterazione del funzionamento della macchina stessa. Ciò rende i metodi online meno intrusivi dei metodi offline, superando le problematiche legate ai costi, tempo e fermi macchina. Tuttavia, i metodi online sono generalmente caratterizzati da una minore accuratezza rispetto ai metodi offline a causa di diverse problematiche:

- La misura delle tensioni realmente applicate alla macchina non viene generalmente effettuata negli azionamenti elettrici.
- Il numero dei parametri da identificare è superiore al numero di equazioni della macchina disponibili in ciascun passo di campionamento (carenza del rango del problema di identificazione parametrica).
- La qualità delle misure disponibili nell'azionamento elettrico è inferiore rispetto a quella delle misure ottenibili con strumentazione da laboratorio.

3.2.1 Stima delle non-linearità introdotte dall'inverter

Poiché le tensioni applicate alla macchina non sono misurate negli azionamenti elettrici, si utilizzano come loro stima le cosiddette tensioni di riferimento u_{dq}^* fornite dai regolatori delle correnti dq . Come si può osservare dalla Fig. 14, le tensioni di riferimento u_{dq}^* calcolate dall'unità di controllo vengono convertite in tensioni di riferimento di fase per l'inverter, il quale le attua alimentando il motore. Tuttavia, queste tensioni risultano essere distorte rispetto alle tensioni applicate alla macchina a causa delle non-linearità introdotte dall'inverter. Infatti, negli inverter controllati con la tecnica nota come Pulse Width Modulation (PWM), *"vi è una distorsione di tensione o un guadagno di tensione non lineare tra le tensioni di riferimento e la tensione di uscita"* [48]. In particolare, queste non-linearità sono causate da fenomeni quali *"il dead-time, i tempi di accensione-spegnimento e le cadute di tensione degli interruttori statici e dei diodi"* [49]. In sede di identificazione parametrica, la distorsione tra tensioni di riferimento e tensioni in uscita dall'inverter può causare una riduzione della precisione delle stime dei parametri.

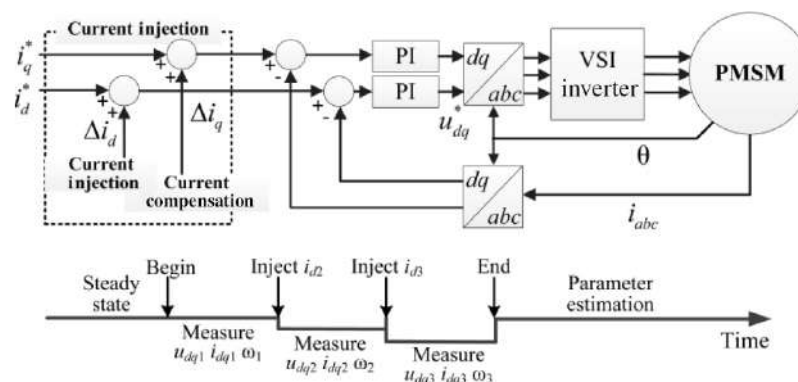


Fig. 14 - Schema di controllo di un motore sincrono a magneti permanenti.

Nello specifico, è stato dimostrato che nella identificazione parametrica di macchine a magneti permanenti superficiali (SPMSM), le non-linearità introdotte dall'inverter causano errori di stima della resistenza e del flusso rotorico particolarmente importanti alle basse velocità di rotazione [50]. Infatti, come si può vedere dalla Fig. 15, le stime di flusso e resistenza subiscono una variazione non trascurabile quando le non-linearità dell'inverter vengono compensate.

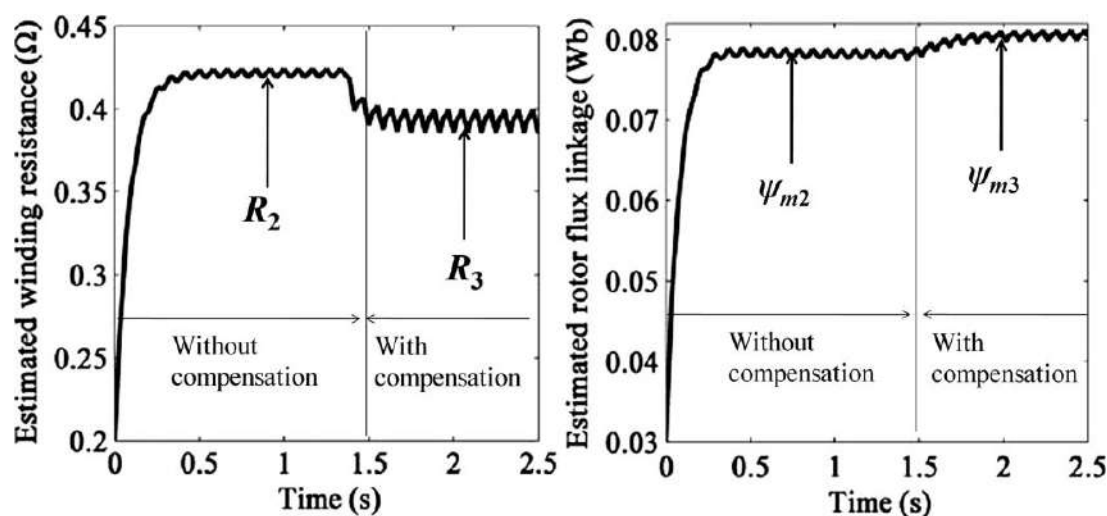


Fig. 15 – Stima della resistenza statorica e del flusso rotorico con e senza compensazione delle non-linearità introdotte dall'inverter [50].

Ci sono due diverse tipologie di approcci per correggere le tensioni di riferimento. Il primo è un *approccio controllistico* basato sulla compensazione diretta delle non-linearità introdotte dall'inverter mediante algoritmi di controllo del PMSM i quali hanno l'obiettivo di ottenere tensioni di riferimento non affette da

distorsioni causate dall'inverter. Il secondo è un *approccio identificativo* basato sull'introduzione di un ulteriore parametro da identificare, la cosiddetta *tensione distorta*, nel modello matematico del PMSM.

Approccio controllistico

Un metodo appartenente a questa tipologia di approccio è stato proposto in [51], dove, come si può vedere in Fig. 16, “*dei controllori ripetitivi (RRC) sono disposti in serie con i controllori proporzionali-integrali (PI) di corrente e le componenti continue degli errori di tensione causate dal dead-time sono compensate con un azione di controllo in avanti delle tensioni di riferimento nel sistema di riferimento dq*”.

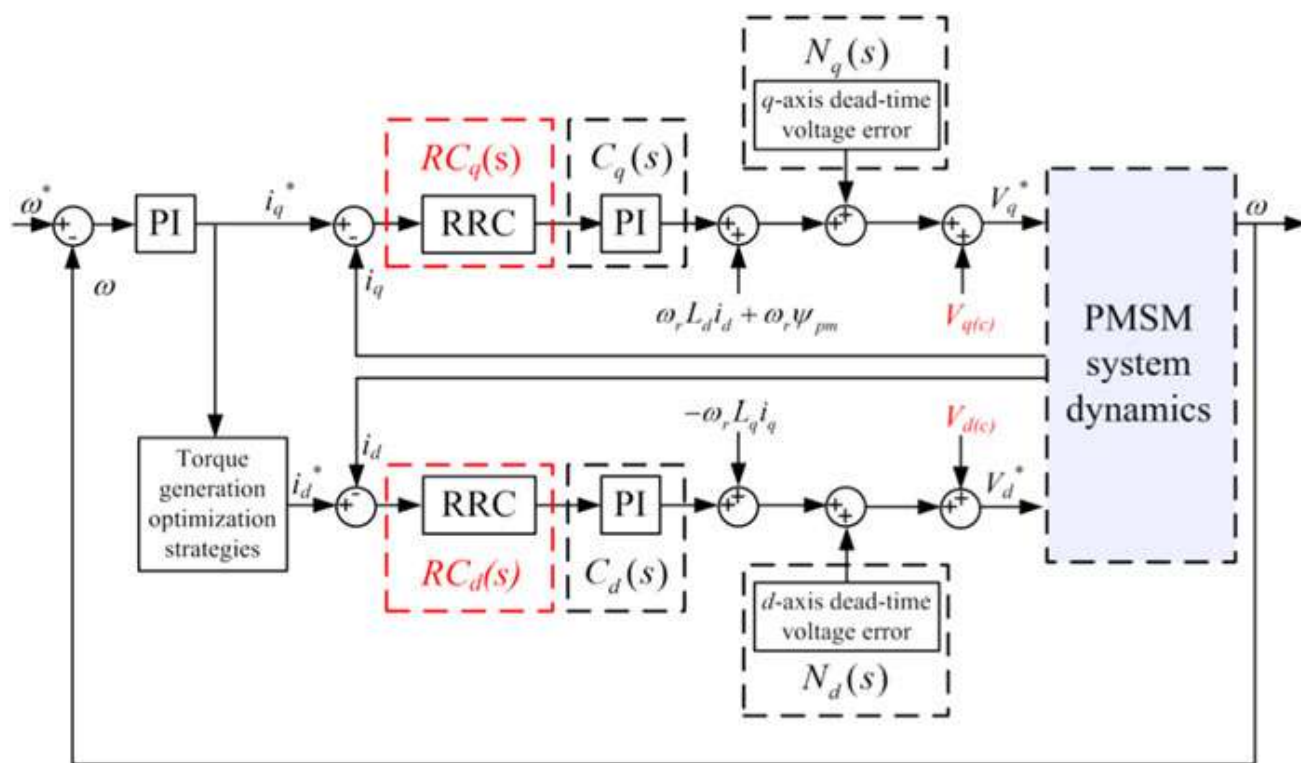


Fig. 16 – Diagramma a blocchi del controllo ad orientamento di campo di un PMSM con compensazione del dead-time basato su controllori ripetitivi [51].

Un altro metodo è invece basato sull'estrazione delle componenti armoniche di ordine 6 delle correnti dq generate dalle non-linearità introdotte dall'inverter mediante una trasformata di Fourier approssimata [52]. Queste armoniche sono poi compensate mediante dei regolatori proporzionali integrali, come mostrato in Fig. 17. Come si può vedere in Fig. 18, il controllore che compensa le componenti di sesta armonica fornisce delle tensioni di compensazione che sono aggiunte alle tensioni di riferimento per ottenere delle tensioni di riferimento corrette.

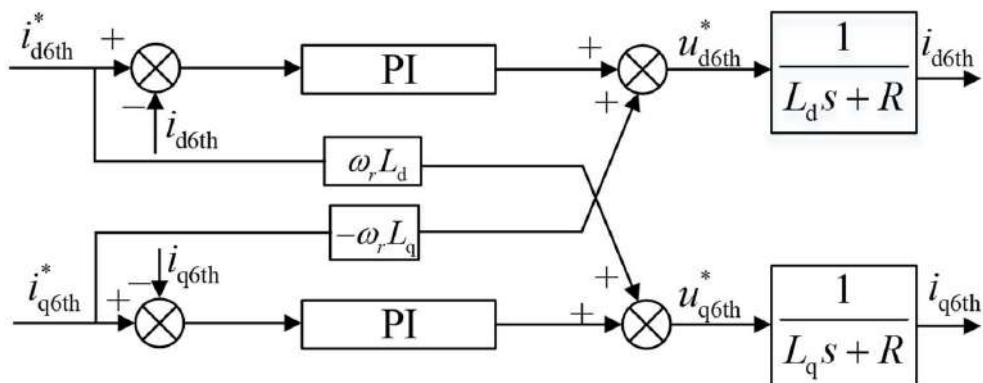


Fig. 17 – Diagramma a blocchi della compensazione delle componenti di sesta armonica delle correnti dq mediante regolatori PI [52].

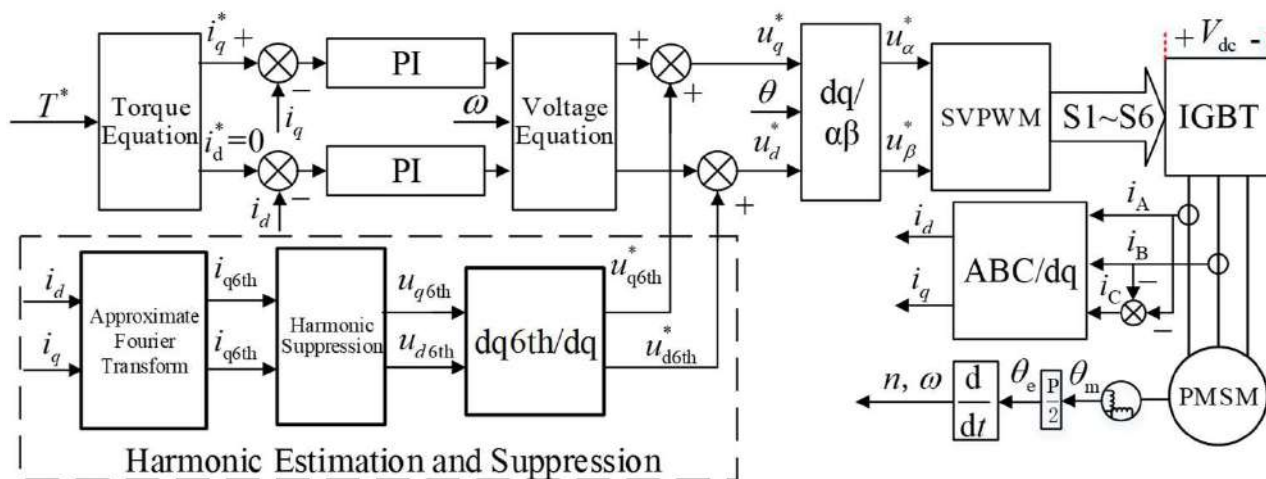


Fig. 18 – Diagramma a blocchi del controllo del PMSM con compensazione delle non-linearità dell'inverter [52].

Un altro metodo è basato su un controllore che agisce sulla componente di sesta armonica del segnale in uscita dal regolatore PI di corrente di asse d [49]. Infatti, questa componente armonica viene rilevata mediante operazioni di integrazione. Il segnale ottenuto viene inoltrato in ingresso ad un regolatore integrale, il quale fornisce dei segnali di compensazione alle tensioni di riferimento dq, per ottenere delle tensioni di riferimento dq corrette, come mostrato in Fig. 19.

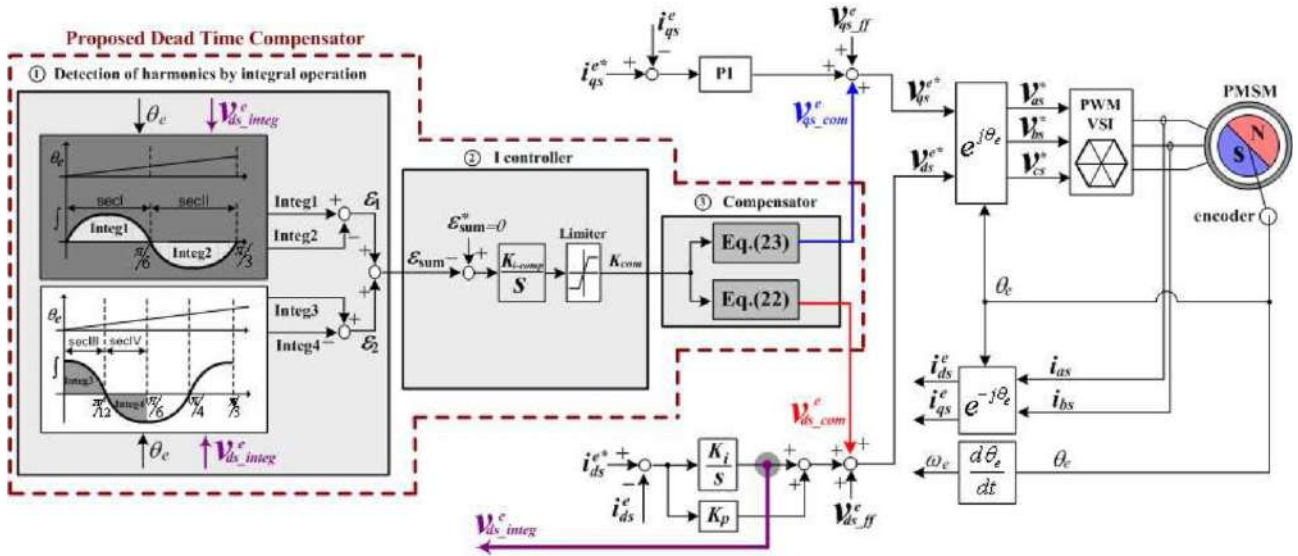


Fig. 19 – Diagramma a blocchi del controllo del PMSM con la logica di compensazione della non-linearità dell'inverter basato sul rilevamento delle armoniche con operazioni di integrazione [49].

Approccio identificativo

Con questo approccio si considera il seguente modello stazionario, tempo-discreto del PMSM, in cui le tensioni realmente applicate alla macchina vengono sostituite dalle tensioni di riferimento e vengono introdotte le componenti distorte della tensione [53]:

$$\begin{cases} u_d^*(k) = -\omega_r(k)L_q i_q(k) - D_d(k)V_{dead} \\ u_q^*(k) = R_s i_q(k) + \omega_r(k)\psi_{pm} - D_q(k)V_{dead} \end{cases} \quad (4)$$

dove D_d e D_q sono i cosiddetti coefficienti distorti i quali sono facilmente misurabili, essendo funzioni delle correnti di fase e della posizione del rotore; V_{dead} è la tensione distorta dell'inverter, ossia il parametro aggiuntivo da identificare legato al dead-time, tempi di accensione-spegnimento e le cadute di tensione degli interruttori statici e dei diodi. Vi è una formula che consente di legare la tensione distorta dell'inverter a questi parametri [54]:

$$V_{dead} = \frac{T_{dead} + T_{on} + T_{off}}{T_c} (U_{dc} - U_{ce} + U_d) + \frac{U_{ce} + U_d}{2} \quad (5)$$

dove T_{dead} è il dead-time dell'inverter, T_{on} e T_{off} sono i tempi di accensione e spegnimento degli interruttori statici, T_c è il periodo del segnale portante PWM, U_{dc} è la tensione di alimentazione del DC-link dell'inverter ed infine U_{ce} e U_d sono le cadute di tensione sugli interruttori statici e sui diodi. Ottenere V_{dead} mediante la misura di questi parametri è difficile e peraltro non efficace in quanto questi parametri variano al variare delle condizioni operative dell'azionamento elettrico, essendo molto sensibili sia alla corrente erogata

dall'inverter che alla temperatura. A causa di questo è necessario utilizzare dei metodi di stima diretta di V_{dead} . Per esempio, in [21], il problema della stima di V_{dead} è risolto mediante la minimizzazione di una funzione di costo basata sull'equazione di asse d del PMSM e sulla stima dell'induttanza di asse q . La minimizzazione viene effettuata mediante un algoritmo genetico quantistico progettato per stimare online anche gli altri parametri del PMSM. La procedura di stima completa risulta dunque essere quella mostrata in Fig. 20.

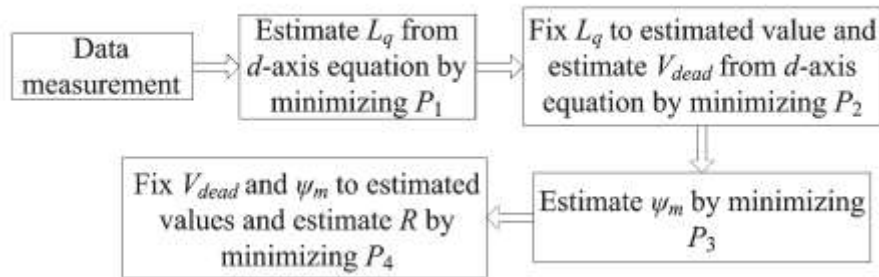


Fig. 20 – Procedura di stima dei parametri di un PMSM basata sull'algoritmo genetico quantistico [21].

Come si può notare la procedura online, ad ogni passo di campionamento, prevede di svolgere le quattro operazioni di stima dei parametri in cui è inclusa la stima della tensione distorta dell'inverter.

Un altro approccio proposto in [55] è basato sull'utilizzo di un Model Reference Adaptive System (MRAS) basato sull'equazione di asse d del PMSM e su stime a priori dell'induttanza di asse q e della resistenza di statore, come mostrato in Fig. 21. Questo approccio si dimostra particolarmente robusto alle incertezze di stima dei due parametri.

Un metodo alternativo invece impiega una rete neurale di tipo Adaline (Adaptive Linear Element) addestrata mediante campioni del coefficiente distorto di asse d D_d e delle componenti in alta frequenza della tensione di riferimento di asse d , le quali sono state ottenute come illustrato in Fig. 22. L'equazione di aggiornamento del peso della rete neurale Adaline, coincidente con la tensione distorta da stimare, è la seguente:

$$\hat{V}_{dead}(k+1) = \hat{V}_{dead}(k) - 2\eta D_d(k)(d(k) - O(k)) \quad (6)$$

dove η rappresenta il tasso di apprendimento, $d(k)$ è la componente ad alta frequenza della tensione di riferimento di asse d e $O(k) = -D_d(k)\hat{V}_{dead}(k)$.

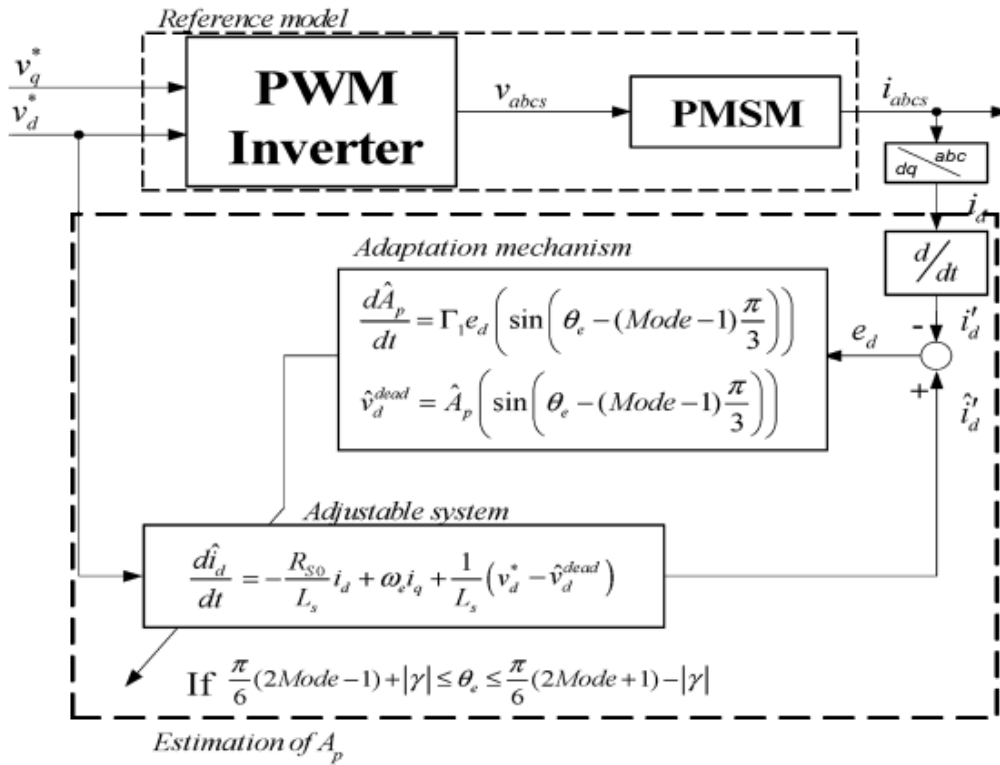


Fig. 21 – Procedura di stima dei parametri di un PMSM basata sull’algoritmo genetico quantistico [55].

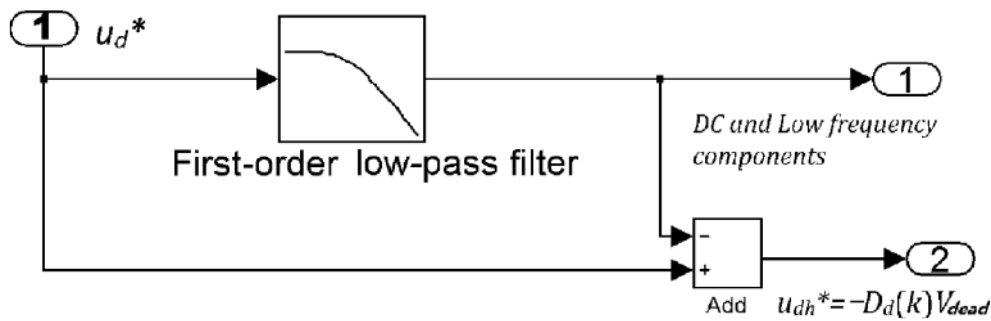


Fig. 22 – Schema per ottenere le componenti in alta frequenza della tensione di riferimento di asse d [56].

3.2.2 Metodi online basati sulla parziale conoscenza dei parametri della macchina

Una soluzione proposta per superare il problema della carenza del rango del problema di identificazione parametrica è basata sul fissare uno o più dei parametri incogniti al loro valore nominale, generalmente disponibile nella scheda tecnica del motore o sulla base di misure precedentemente svolte [57]. Per esempio, in [58], l’induttanza di asse q viene dapprima misurata offline mentre l’induttanza di asse d , la resistenza statorica ed il flusso rotorico vengono stimati mediante il metodo dei minimi quadrati ricorsivi. Come illustrato in Fig. 23, le stime sono basate sull’utilizzo delle tensioni di riferimento senza la compensazione

delle non-linearità dell'inverter e sono utilizzate per migliorare le performance di un controllo di tipo sensorless della velocità del motore (IPMSM).

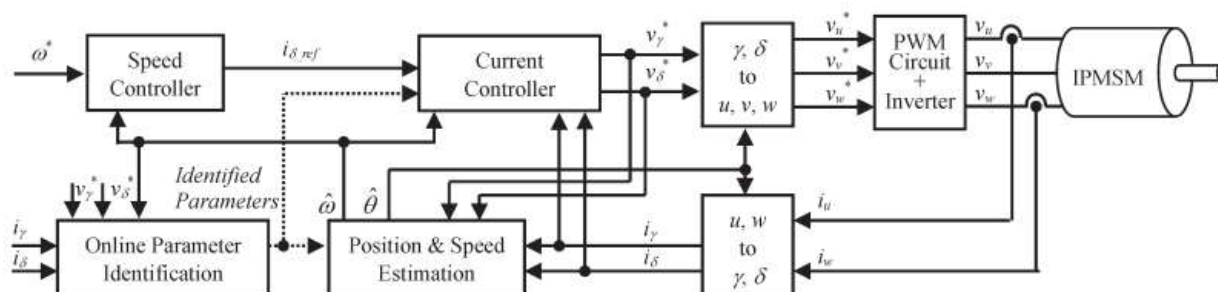


Fig. 23 – Position and speed sensorless drive system for the IPMSM combined with online parameter identification [58].

In [59] viene proposto un filtro di Kalman Esteso (EKF) per stimare il flusso rotorico di un SPMSM mentre l'induttanza e la resistenza sono fissati ad i loro valori di targa. Anche in questo caso, come si può osservare dalla Fig. 24, il filtro è basato sull'utilizzo delle tensioni di riferimento in uscita dai regolatori PI e sulle misure di corrente.

Un altro metodo prevede invece di utilizzare un Model Reference Adaptive System per la stima dell'induttanza e della resistenza statorica mentre il flusso viene supposto noto [60]. Come illustrato in Fig. 25, questo metodo prevede di minimizzare l'errore tra le correnti misurate e le correnti stimate mediante un modello del motore basato sui parametri stimati. Si noti come anche in questo caso vengano usate le tensioni di riferimento per la stima dei parametri.

In [61] invece viene proposto l'utilizzo di una Ottimizzazione a Sciame di particelle, in inglese Particle Swarm Optimization (PSO) per identificare la resistenza e la coppia di carico di un PMSM mentre gli altri parametri vengono supposti noti. Fig. 26 mostra che il PSO viene utilizzato per aggiornare i parametri di un modello di riferimento le cui uscite vengono confrontate con le misure provenienti dal PMSM reale. La maggior problematica di questi metodi risiede nel fatto che i valori di targa non sono sempre disponibili, e che misure di alcuni parametri potrebbero non essere fattibili. Inoltre, l'accuratezza di questi metodi è inficiata dal fatto che i parametri della macchina variano al variare delle sue condizioni operative. Per cui, i valori di targa o misure precedentemente effettuate potrebbero non rispecchiare i valori effettivi durante il funzionamento del motore, generando errori di stima sui parametri identificati online.

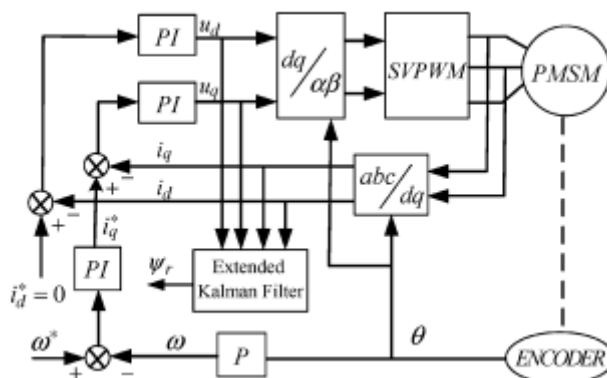


Fig. 24 – Position and speed sensorless drive system for the IPMSM combined with online parameter identification [59].

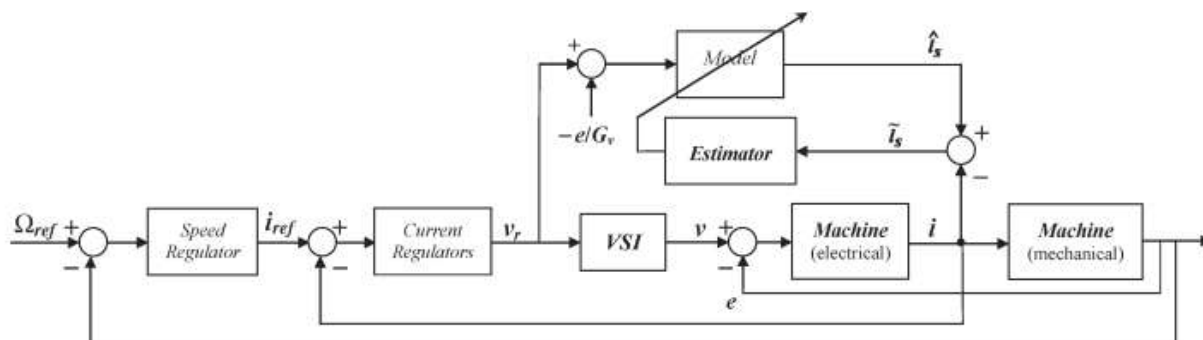


Fig. 25 – Algoritmo di identificazione basato sul MRAS [60].

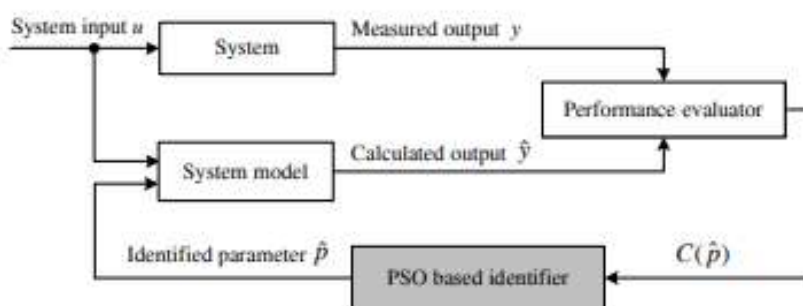


Fig. 26 – Algoritmo di identificazione basato PSO [61].

3.2.3 Metodi basati sull'iniezione di segnale

Una soluzione alternativa al problema della carenza di rango è quella di introdurre segnali di perturbazione durante il funzionamento ordinario della macchina, al fine di ottenere ulteriori stati stazionari della macchina. Aumentando il numero di stato stazionari è possibile aumentare il numero di equazioni della macchina, aumentando di conseguenza il rango del problema di identificazione parametrica.

Vi sono vari tipi di perturbazioni, in base al tipo di segnale introdotto e al loro andamento nel tempo:

- Perturbazioni di corrente sinusoidali
- Impulsi di corrente
- Armoniche di tensione
- Perturbazione del punto di lavoro
- Offset di posizione

Perturbazione di corrente sinusoidale

In [62], per esempio, viene iniettata una corrente di asse d sinusoidale per identificare il flusso e la resistenza statorica in condizioni stazionarie della macchina, mentre l'induttanza viene supposta nota a priori. In [63] viene iniettata una corrente di asse d sinusoidale per stimare tutti i parametri elettrici di un IPMSM con il metodo dei *Minimi Quadrati Ricorsivi*, in inglese Recursive Least Squares (RLS), come mostrato in Fig. 28.

Impulsi di corrente

In [64], vengono identificati tutti i parametri elettrici di un SPMSM controllato con corrente di asse d $i_d = 0$. In questo metodo come illustrato in Fig. 28, viene inietto per un breve intervallo di tempo una corrente di asse d negativa per ottenere un secondo stato stazionario della macchina. Le misure ottenute con $i_d = 0$ e $i_d \neq 0$ vengono poi utilizzate da uno stimatore basati su reti neurali Adaline, come mostrato in Fig. 29, progettate sulla base delle equazioni elettriche di macchina e aventi come ingresso le correnti e velocità misurate e come uscite le tensioni stimate. In [24], viene proposto un metodo simile ma vengono anche compensati gli errori introdotti dalla non-linearità dell'inverter e le variazioni del flusso rotorico in seguito all'applicazione dell'impulso di corrente di asse d .

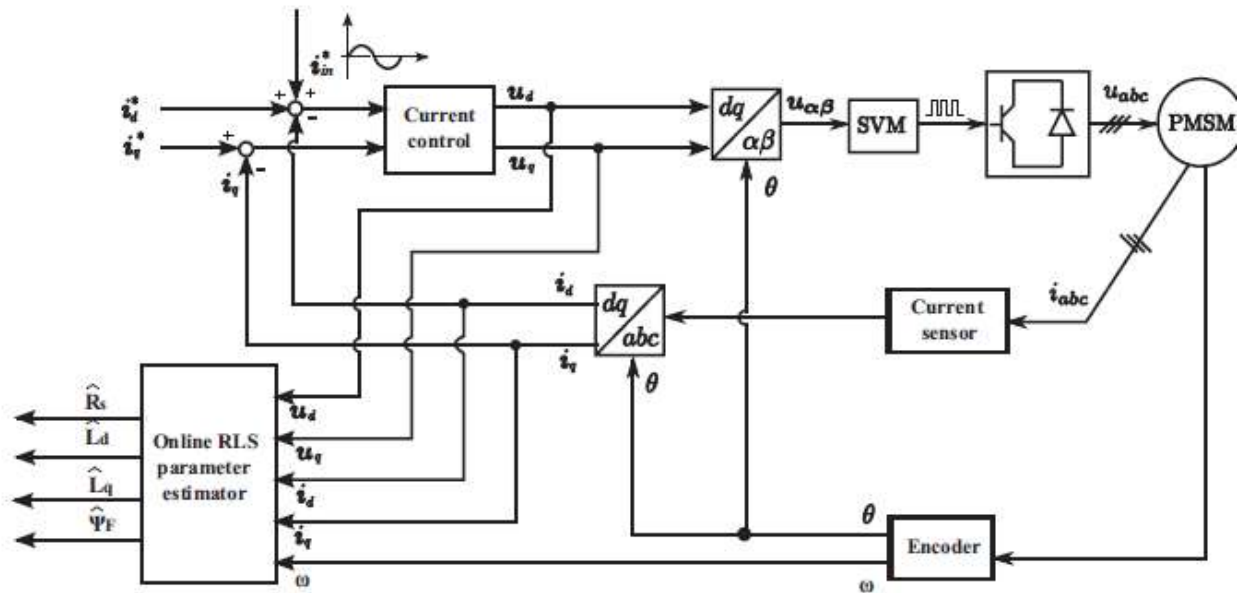


Fig. 27 – Iniezione di corrente sinusoidale di asse d e stima con RLS [63].

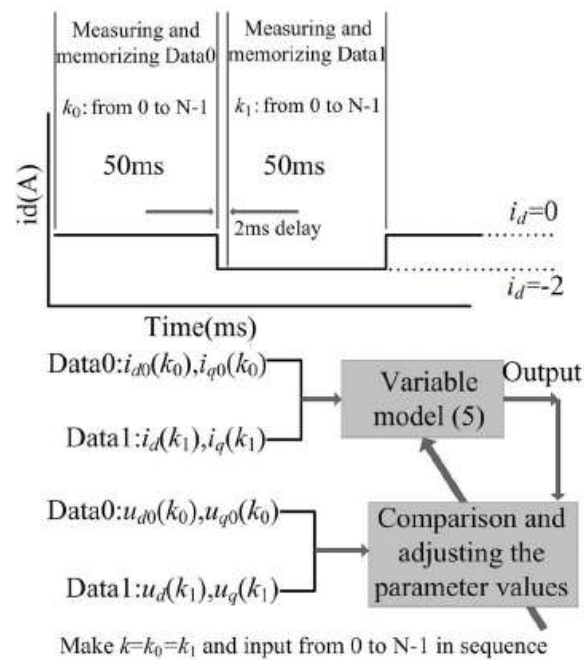


Fig. 28 – Iniezione di impulsi di corrente di asse d [64].

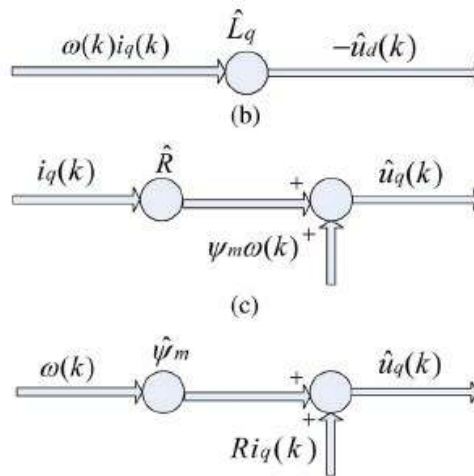


Fig. 29 – Reti neurali Adaline usate per stimare i parametri [64].

In [65] vengono stimati tutti i parametri elettrici di un IPMSM iniettando impulsi di corrente negativi di asse d di varia intensità per ottenere un ampio set di diversi stati stazionari della macchina, come mostrato in Fig. 30. I dati corrispondenti a questi stati stazionari vengono poi utilizzati da uno stimatore basato sul metodo RLS. In [66] viene utilizzato un metodo simile ma viene anche compensata la non-linearità introdotta dall'inverter per ottenere stime più precise.

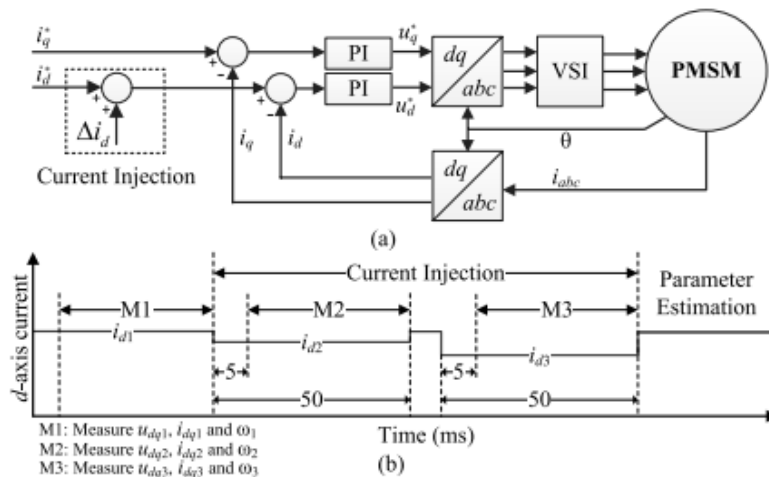


Fig. 30 – Iniezione di impulsi di corrente di asse d di varie intensità [65].

In [67] viene iniettata una corrente di asse d per ottenere due stati stazionari di un SPMSM. I dati corrispondenti a questi due stati stazionari vengono poi elaborati da uno stimatore basato su Ottimizzazione a sciame di particelle dinamica, che identifica tutti i parametri elettrici. Un metodo simile viene proposto

anche in [68], dove però vengono anche compensati gli errori legati alle non-linearità introdotte dall'inverter, come mostrato in Fig. 31. In [19], viene ancora utilizzato un metodo analogo, ma vengono identificati anche i parametri meccanici e la tensione distorta come mostrato in Fig. 32. In [21], viene iniettata una corrente di asse d per stimare l'induttanza di asse d di un IPMSM, mentre gli altri parametri vengono stimati usando i dati generati durante il funzionamento a velocità variabile del motore usando un algoritmo genetico quantistico.

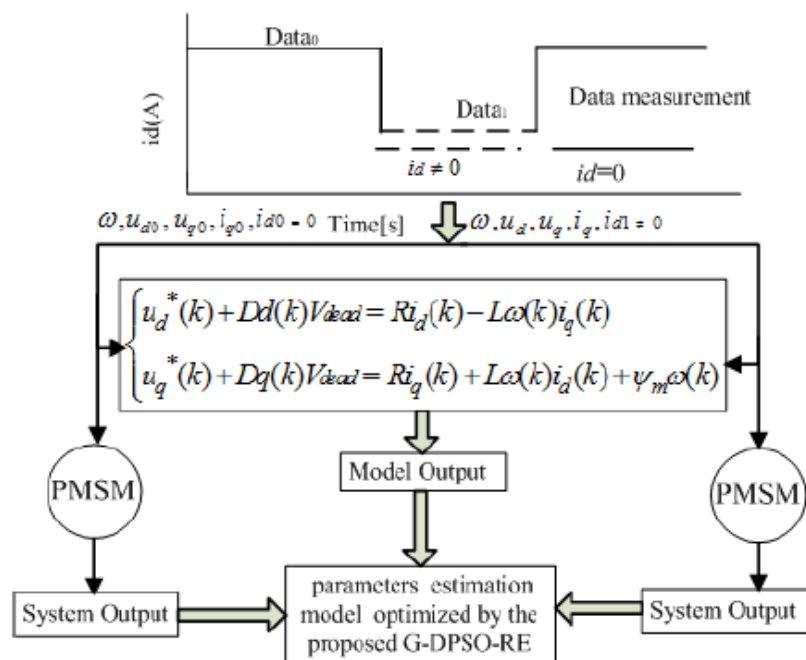


Fig. 31 – Schema di identificazione dei parametri elettrici e meccanici basato su PSO dinamico [68].

In [69], vengono iniettati piccoli gradini di corrente di asse d . I dati ottenuti vengono dunque processati da due algoritmi basati su RLS. Il primo con dinamica più veloce viene usato per identificare le induttanze dq durante i transitori mentre il secondo più lento viene usato per identificare flusso rotorico e resistenza statorica durante gli stati stazionari con le iniezioni di corrente, come illustrato in Fig. 33.

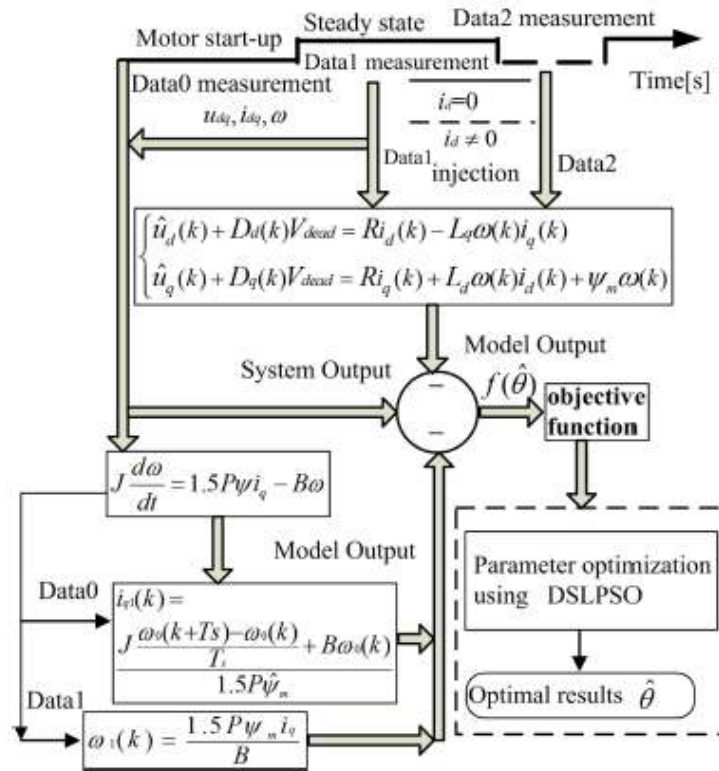


Fig. 32 – Schema di identificazione dei parametri elettrici e meccanici basato su PSO dinamico [19].

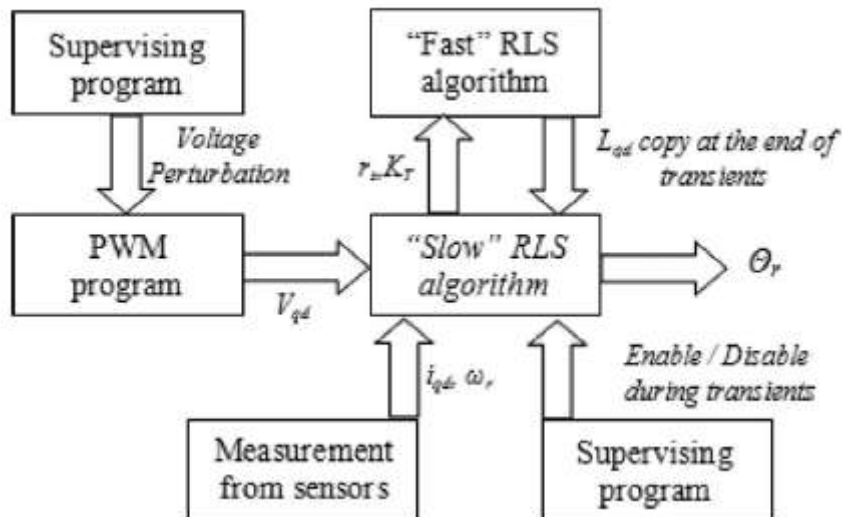


Fig. 33 – Schema di identificazione basati su due RLS [69].

Armoniche di tensione

In [70], vengono iniettate armoniche di tensione di asse d e q quando la macchina si trova in stato stazionario. In questo modo vengono ottenute equazioni di macchina aggiuntive per identificare le induttanze di asse d e q di un IPMSM, mentre la resistenza viene supposta misurata con l'ausilio di sonde di temperatura (Fig. 34).

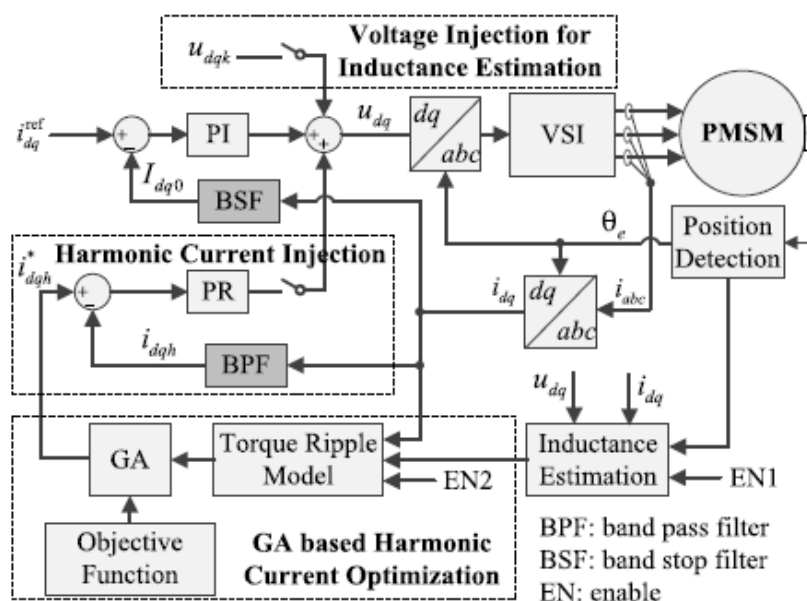


Fig. 34 – Schema di controllo di un IPMSM con iniezione di armoniche di tensione [70].

Perturbazione del punto di lavoro

In [71] il punto di lavoro stazionario viene perturbato con una nuova condizione operativa in cui viene mantenuta la stessa coppia e la stessa velocità di funzionamento ma vengono modificate le correnti di asse d e q , come mostrato in Fig. 35. In tal modo vengono ottenuti due diversi stati stazionari che consentono di identificare i parametri elettrici di un IPMSM mediante l'uso di un algoritmo basato su RLS.

Offset di posizione

In [72], per ottenere due diversi stati stazionari necessari per identificare la resistenza statorica ed il flusso rotorico di un SPMSM, vengono introdotti due offset di posizione di segno opposto per brevi periodi di tempo durante lo stato stazionario del motore, come illustrato in Fig. 36. I dati di questi due stati stazionari vengono dunque processati da due reti neurali di tipo Adaline per identificare i parametri. In [73] viene proposto un metodo simile ma i dati ottenuti vengono utilizzati per minimizzare delle funzioni costo mediante un algoritmo genetico quantistico per identificare la resistenza statorica, il flusso rotorico e l'induttanza di asse

q di un IPMSM controllato con corrente di asse d uguale a zero, come illustrato in [73]. In [74], viene utilizzato un metodo analogo per identificare il flusso rotorico mediante una rete neurale di tipo Adaline durante il funzionamento a carico della macchina. In seguito, con il motore senza carico viene introdotta una perturbazione sinusoidale di velocità per stimare l'attrito viscoso e il momento di inerzia mediante uno stimatore MRAS.

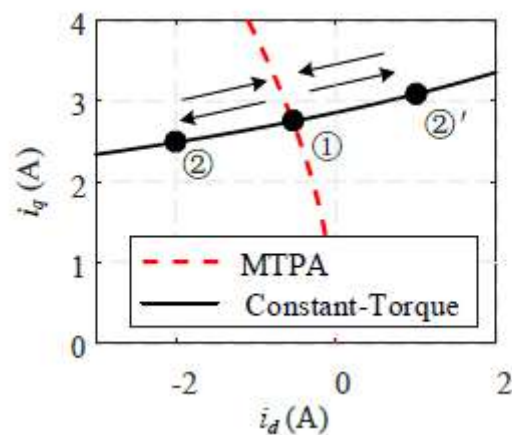


Fig. 35 – Perturbazione del punto di lavoro di un IPMSM [71].

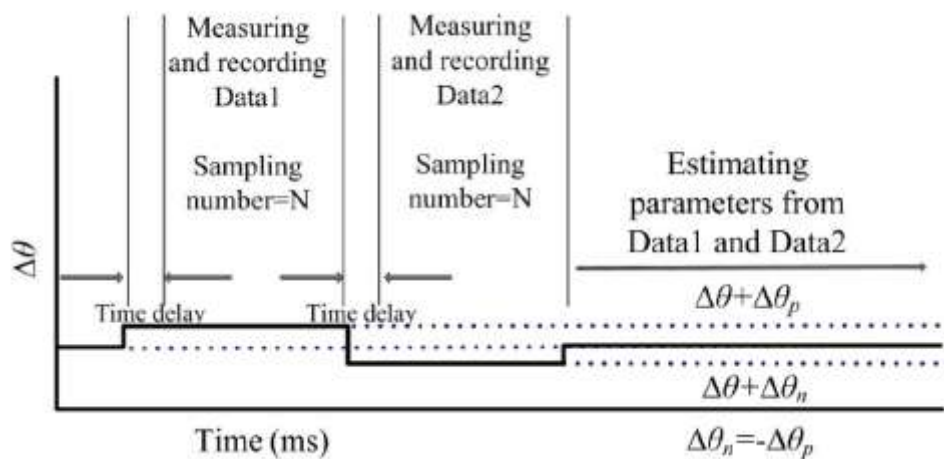


Fig. 36 – Introduzione di due offset di posizione di segno opposto [72].

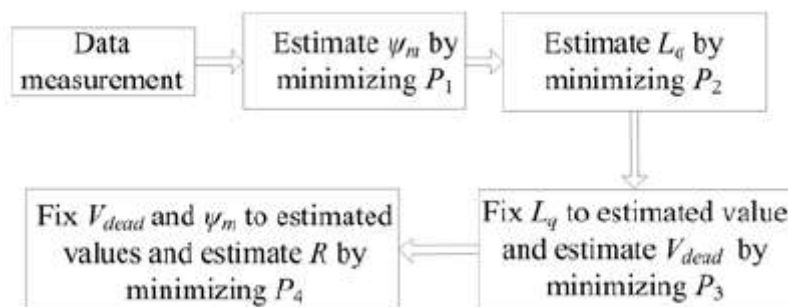


Fig. 37 – Procedura di stima dei parametri elettrici basata su offset di posizione e algoritmo genetico quantistico [73].

I metodi basati sull'iniezione di segnale sono affetti da due distinte problematiche. La prima è che, per poter introdurre segnali di perturbazione, è necessario intervenire nella logica di controllo dell'azionamento. Ciò è ovviamente fattibile in una fase di design dell'algoritmo di controllo dell'azionamento elettrico ma non lo è invece se l'azionamento è già operativo. Infatti, in genere gli azionamenti commerciali non consentono di poter implementare logiche di controllo customizzate, come l'iniezione di segnale. L'altra problematica è che i segnali di perturbazione possono alterare l'efficienza e le prestazioni del controllo della macchina. Infatti, questi segnali introducono perdite Joule aggiuntive e in alcuni casi oscillazioni di coppia e velocità indesiderate.

3.2.4 Metodi basati sui dati transitori e sull'analisi armonica

Per superare le problematiche legate all'introduzione di segnali di perturbazione, sono stati sviluppati metodi basati sull'analisi dei dati in condizioni transitorie della macchina o sull'analisi armonica dei dati ottenuti in condizioni stazionarie. In entrambi i casi, questi approcci consentono di aumentare il numero di equazioni a disposizione di incrementare il rango del sistema. In [75], viene utilizzato il modello dinamico di un IPMSM insieme all'equazione di equilibrio meccanico. Per stimare le induttanze di asse d e q vengono dunque introdotte due equazioni relative a dati campionato con un tempo di campionamento piccolo. Successivamente, il flusso rotorico, la resistenza statorica ed il carico della macchina vengono stimati utilizzando tre equazioni relative a dati campionati con un tempo di campionamento più grande. In particolare, per stimare i parametri nei due diversi step, viene utilizzato un algoritmo noto come *Affine Projection Algorithm* (APA) basato sulla minimizzazione dell'errore tra l'uscita stimata mediante i parametri stimati e l'uscita misurata del sistema. La procedura generale è illustrata in Fig. 38.

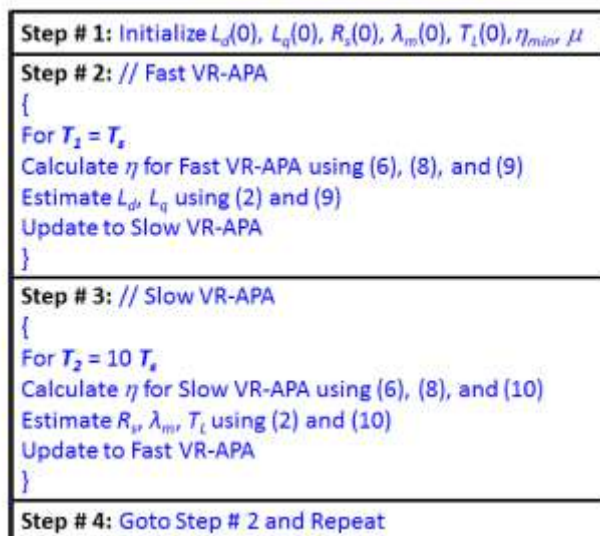


Fig. 38 – Procedura di stima a due passi basata su due diversi tempi di campionamento [75].

In [76] viene utilizzato un algoritmo di stima basato sul metodo dei minimi quadrati che opera su una finestra mobile di campioni acquisiti in condizioni stazionarie e transitorie del motore. Tuttavia, si richiede che la macchina operi in diverse condizioni di funzionamento per poter risolvere il problema della carenza del rango. In [77], vengono utilizzati tre diversi filtri di Kalman estesi basati sul modello dinamico del PMSM per identificare i parametri elettrici. Tuttavia, il metodo richiede di utilizzare i dati a due diverse velocità.

In [78], vengono utilizzate due equazioni aggiuntive basate sul modello del ripple di corrente. Queste due equazioni, aggiunte alle equazioni stazionari del motore vengono dunque utilizzate per il design di un algoritmo basato su RLS. Inoltre, per correggere errori di misura ed incertezze aggiuntive le correnti vengono appositamente filtrate, come mostrato in Fig. 39. Tuttavia, questo studio manca di validazione sperimentale.

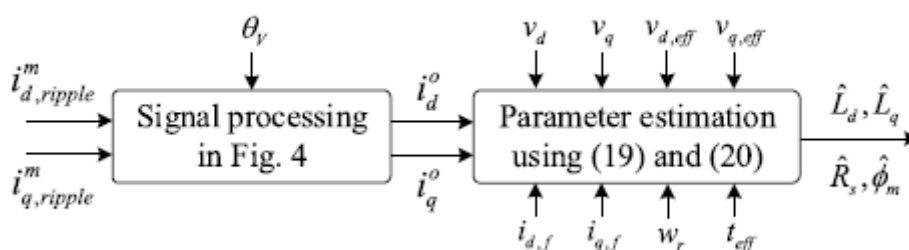


Fig. 39 – Stima basata su modello in ripple di corrente con filtraggio [78].

In [79], per risolvere il problema del rango senza l'iniezione di segnale si propone l'utilizzo di un modello matematico alternativo basato sulle equazioni in coordinate alpha/beta del PMSM come mostrato in Fig. 40.

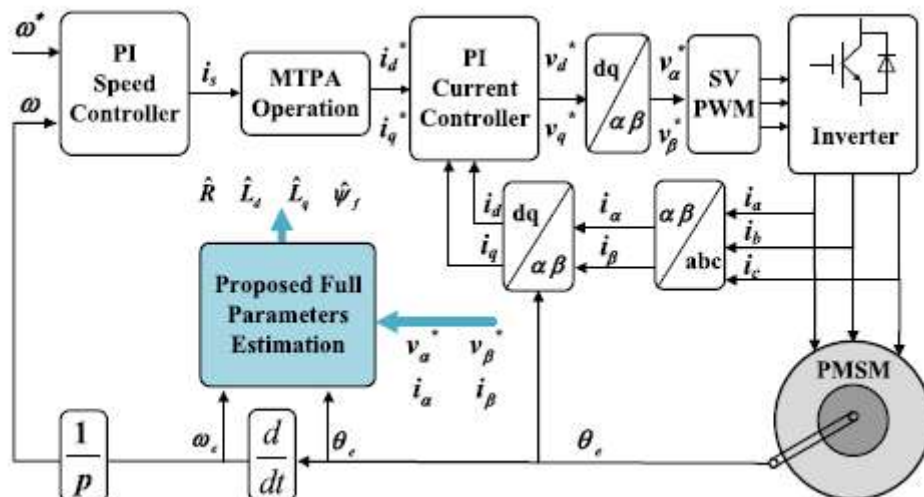


Fig. 40 – Schema di identificazione parametrica basato sul modello alpha/beta [79].

Il principale limite di questi metodi è che la loro accuratezza è notevolmente ridotta a causa del fatto che il contenuto armonico dei segnali è spesso distorto e alterato a causa di altri disturbi e fenomeni non considerati e dalle operazioni di prefiltraggio delle misure. Le stesse considerazioni si possono anche fare riguardo ai metodi basati sull'utilizzo degli stati transitori. Generalmente questi transitori non sono ben osservabili a causa delle operazioni di filtraggio, le quali invece non alterano le misure significative durante gli stati stazionari della macchina.

3.2.5 Stima dei parametri meccanici

La stima dei parametri meccanici è particolarmente complessa poiché nell'equazione di equilibrio meccanico il momento di inerzia è legato alla derivata dell'accelerazione ed inoltre compare la coppia di carico che è una grandezza non misurabile. A causa di questo le procedure esistenti richiedono generalmente di effettuare test ad hoc con fasi di accelerazione e decelerazione della macchina con carico noto o costante.

Per esempio, in [80] è stato proposto un osservatore sliding mode (SMO) esteso per stimare il momento di inerzia, il coefficiente di attrito viscoso e la coppia di carico di un PMSM. Questo metodo è basato sulla conoscenza di valori approssimativi del momento di inerzia e del coefficiente di attrito viscoso. Lo schema di funzionamento è illustrato in Fig. 41. In [81] viene utilizzata una rete di tre SMO estesi interconnessi, per stimare gli stessi parametri utilizzando misure di velocità e coppia elettromagnetica, come mostrato in Fig.

42. Questo lavoro considera anche la presenza dell'attrito di Coulomb che viene compensato prima di stimare gli altri parametri con una prova senza carico meccanico.

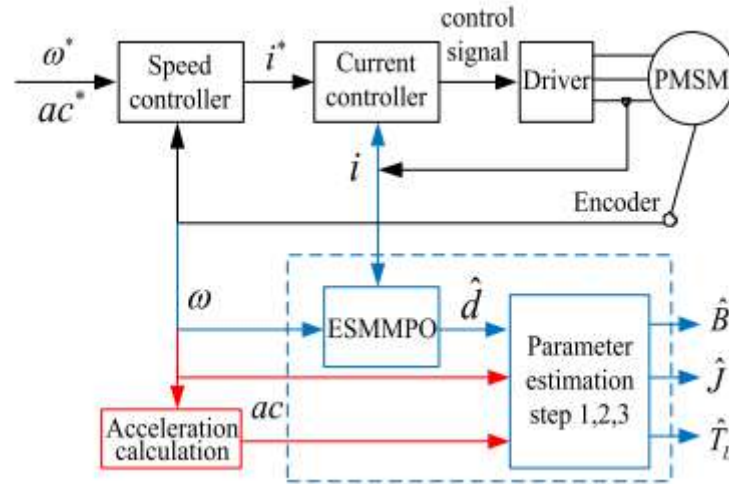


Fig. 41 – Identificazione dei parametri meccanici con SMO esteso [80].

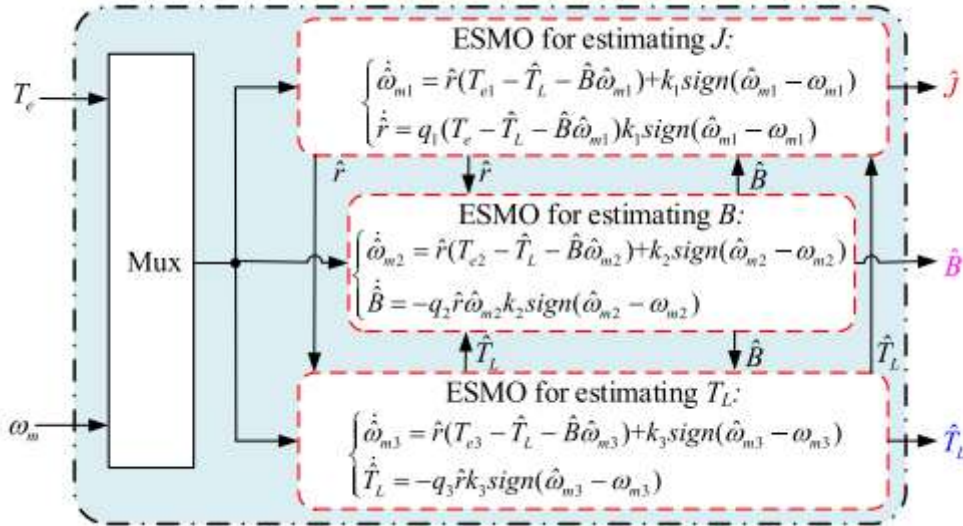


Fig. 42 – Rete di SMO estesi [81].

In [19], il momento di inerzia ed il coefficiente di attrito viscoso vengono stimati mediante un algoritmo PSO in assenza di coppia di carico. In particolare, il coefficiente di attrito viscoso viene stimato in condizioni stazionarie mentre il momento di inerzia sfruttando i dati acquisiti durante una fase di avviamento della macchina ad accelerazione costante. In [74], viene utilizzato uno stimatore MRAS per stimare il momento

di inerzia ed il coefficiente di attrito viscoso in assenza di coppia di carico. In particolare, vengono utilizzati dei dati generati mediante la sovrapposizione di un riferimento di velocità sinusoidale per ottenere fasi di accelerazione e decelerazione del motore. In [82] viene proposto un metodo per identificare il coefficiente di attrito viscoso, il momento di inerzia e l'attrito di Coulomb di un SPMSM. In particolare, l'attrito di Coulomb e il momento di inerzia vengono determinati usando dati ottenuti durante una fase di accelerazione ed una fase di decelerazione della macchina ottenute iniettando correnti di asse q di uguale intensità e verso opposto. Il coefficiente di attrito viscoso viene invece determinato acquisendo i dati durante una fase di decelerazione naturale della macchina senza che venga sviluppata alcuna coppia elettromagnetica frenante. Lo schema generale di identificazione è mostrato in Fig. 43.

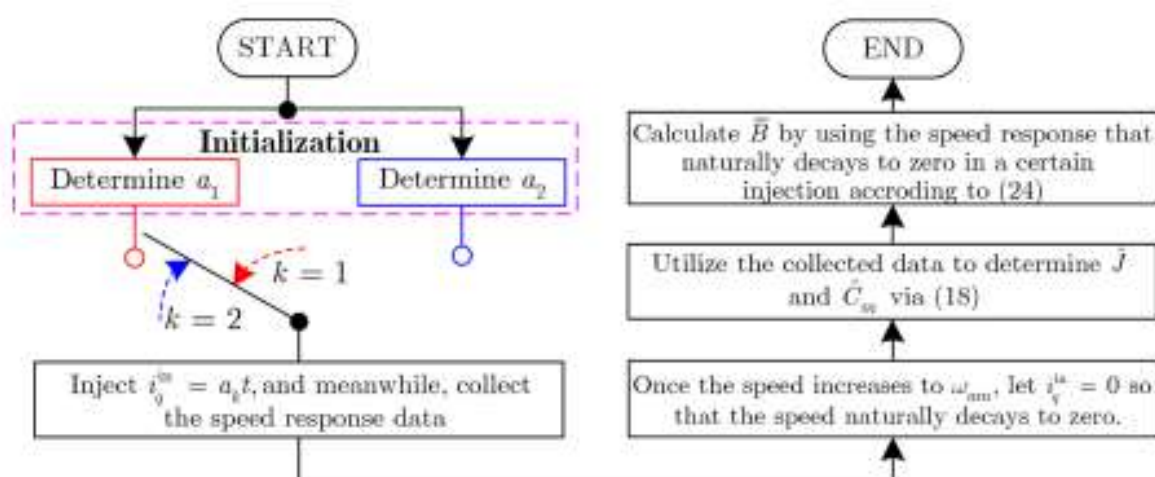


Fig. 43 – Procedura di identificazione dei parametri meccanici [82].

In [83], viene proposto uno SMO di ordine elevato per la stima del momento di inerzia, coefficiente di attrito viscoso e coppia di carico. In particolare, il coefficiente di attrito viscoso viene stimato utilizzando i dati acquisiti durante due condizioni di funzionamento a diversa velocità e stesso carico. Per la stima della coppia di attrito e ventilazione vengono invece utilizzati i dati acquisiti durante due diverse condizioni di funzionamento ad accelerazione costante con la stessa coppia di carico. Le due fasi di stima vengono illustrate in Fig. 44. In [84] viene iniettata una corrente di asse q sinusoidale con coppia di carico nulla per causare fasi di accelerazione e decelerazione, come mostrato in Fig. 45. In particolare, il momento di inerzia viene determinato usando i dati corrispondenti al punto di velocità nulla mentre il coefficiente di attrito viscoso viene stimato usando i dati in corrispondenza del valore di picco della velocità, in cui la derivata della velocità è nulla.

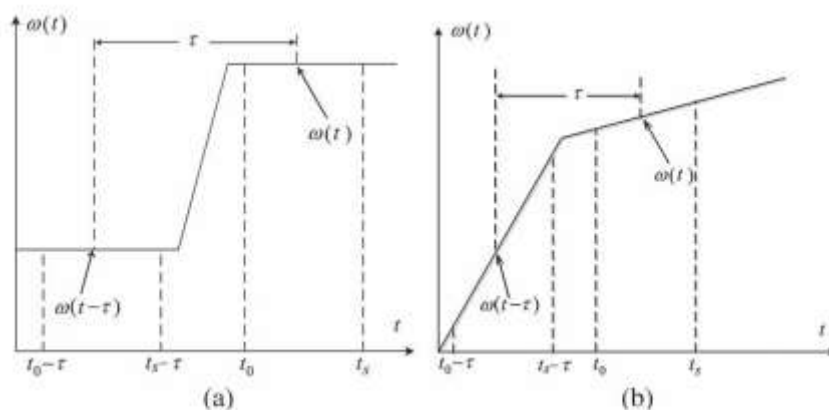


Fig. 44 – Identificazione dei parametri meccanici: (a) andamento della velocità per stimare il coefficiente di attrito viscoso, (b) andamento della velocità per stimare il momento di inerzia [83].

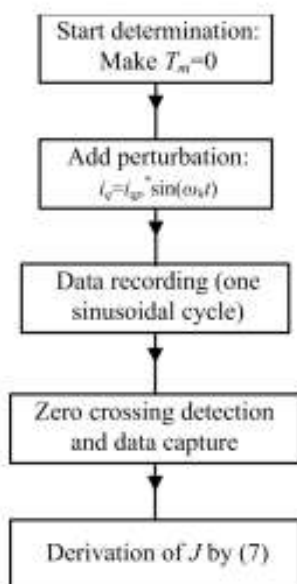


Fig. 45 – Procedura di identificazione del momento di inerzia [83].

3.3. Metodi non-intrusivi per PMSM integrati nei sistemi IoT

Le nuove tecnologie IoT consentono di accumulare una grande quantità di dati generati da macchine, impianti e dispositivi industriali durante il loro funzionamento ordinario. Come valorizzare questi dati è oggetto di notevole interesse da parte della comunità scientifica. L'identificazione dei sistemi e l'identificazione parametrica costituiscono una attività certamente in grado di valorizzare i dati, generando conoscenza aggiuntiva sui sistemi, sul loro funzionamento e sul loro stato di salute. Alcuni lavori scientifici sono emblematici di questo recente interesse per l'identificazione dei sistemi con tecnologie edge/cloud computing. Per esempio, in [87], viene implementato un metodo di identificazione parametrica basato sul metodo di minimizzazione degli errori quadratici di predizione di sistemi connessi ad una piattaforma cloud privata. L'architettura cloud utilizzata è mostrata in Fig. 46. In [88] è stato implementato un algoritmo basato sulla evoluzione differenziale per risolvere un problema di identificazione parametrica nel dominio della biologia dei sistemi usando una piattaforma cloud fornita da Microsoft Azure. In [89] viene effettuata una identificazione parametrica del modello del suolo, nell'ambito di problemi di ingegneria geotecnica, in una piattaforma cloud con un metodo basato su PSO. In [90] è stato brevettato un'architettura cloud per l'identificazione dello stato di carica – *in inglese State of Charge (SOC)* - di una batteria per veicoli ibridi ed elettrici basata sull'implementazione di un filtro di Kalman. Uno schema di funzionamento è illustrato in Fig. 47 e Fig. 48.

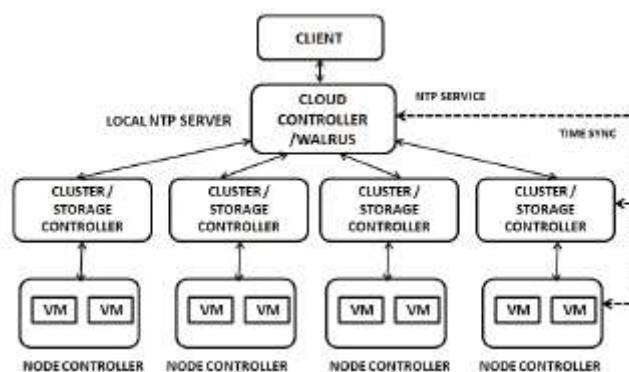


Fig. 46 – Architettura cloud per l'identificazione parametrica [87].

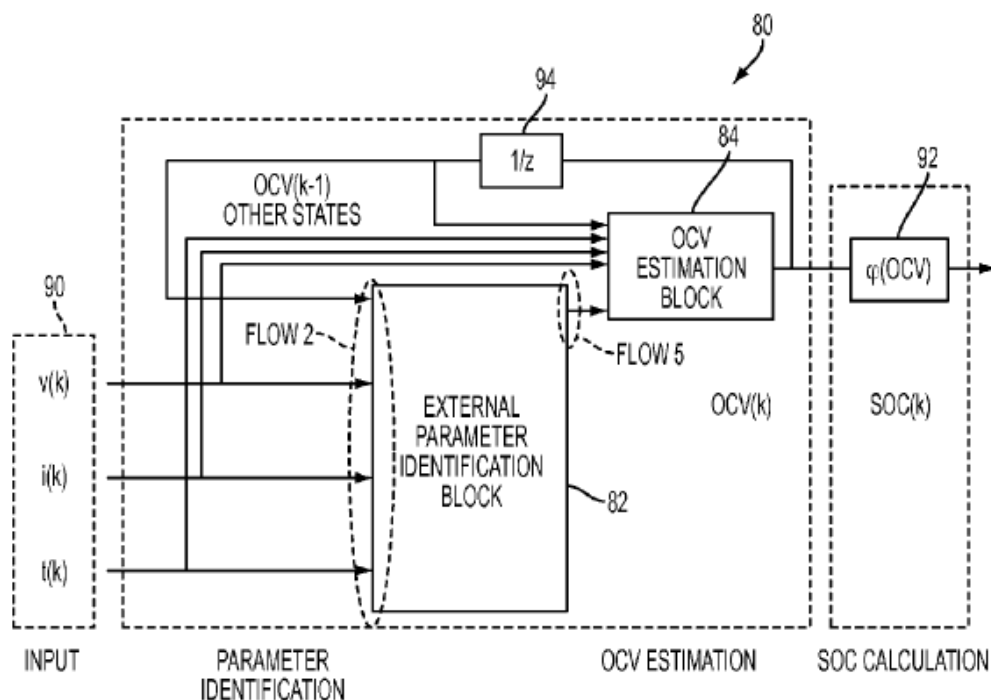


Fig. 47 – Schema di identificazione parametrica di una batteria [90].

Rispetto ai convenzionali metodi online e offline per l'identificazione parametrica di motori elettrici, i metodi basati sull'implementazione in cloud presentano i seguenti vantaggi:

- Sono idonei all'identificazione di motori su larga scala
- Consentono di incrociare i dati di più motori per fare confronti utili al rilevamento di anomalie
- Essendo i sistemi cloud dotati di maggiori risorse computazionali, consentono di implementare più algoritmi di identificazione e algoritmi di identificazione più complessi.

Tuttavia, bisogna considerare dei vincoli aggiuntivi non presenti nei convenzionali metodi online ed offline:

- Non è possibile effettuare dei test ad hoc per raccogliere i dati, ma possono essere utilizzati solo i dati generati durante il funzionamento ordinario dei motori.
- Non è possibile implementare metodi di identificazione basati sull'iniezione di segnali di perturbazione. Questo poiché sarebbe necessario programmare l'unità di controllo di ogni azionamento e generalmente si tratta di una operazione non possibile con azionamenti commerciali.

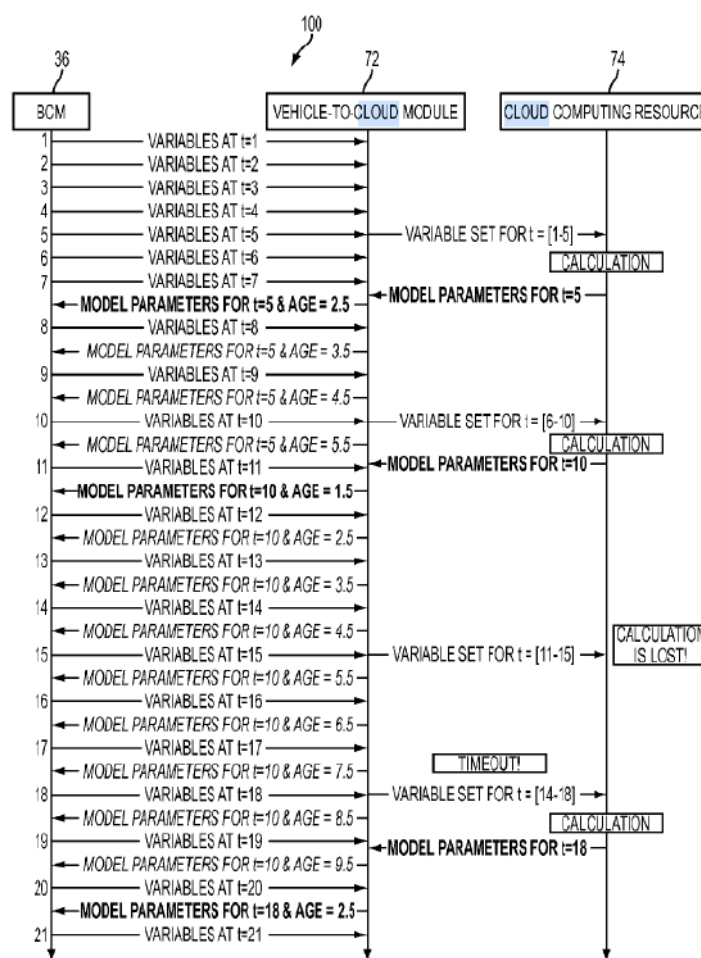


Fig. 48 – Scambio di dati tra veicolo e cloud [90].

Per questo, per poter effettuare l'identificazione parametrica di motori elettrici in ambienti cloud computing è necessario progettare appositamente algoritmi che siano flessibili e non-intrusivi. Devono essere flessibili poiché devono poter operare anche nel caso in cui i motori lavorino con cicli di lavoro caratterizzati da pochi stati stazionari differenti. Devono essere inoltre non-intrusivi poiché non devono richiedere di effettuare test ad hoc, fermi macchina, strumentazione aggiuntiva o l'iniezione di segnali di perturbazione.

Nella letteratura, pochi lavori presentano l'identificazione parametrica di motori elettrici in applicazioni cloud computing. In [91], è stata proposta l'identificazione del flusso rotorico di un SPMSM mediante MRAS usando un'architettura edge/cloud basata su Amazon Web Services (AWS). Gli altri parametri della macchina sono stati invece supposti noti. In particolare, l'algoritmo di stima è stato associato ad un altro algoritmo in grado di rilevare quando le stime fornite dallo stimatore MRAS convergono al valore di regime, come mostrato in Fig. 49.

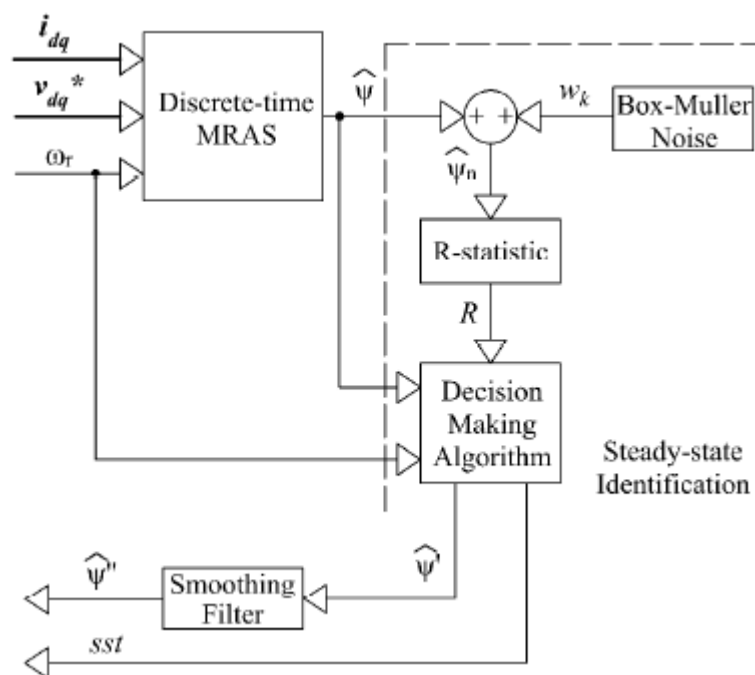


Fig. 49 – Algoritmo di stima MRAS supervisionato da un algoritmo di identificazione degli stati stazionari [91].

In [92] è stato proposto un algoritmo basato su tre reti neurali Adaline per stimare i tre parametri elettrici di un SPMSM mediante la stessa architettura edge/cloud proposta in [91]. Il problema della carenza del rango viene qui superato senza iniezione di segnale di perturbazione sfruttando i diversi stazionari della macchina. Gli stati stazionari idonei all'identificazione parametrica vengono selezionati mediante un algoritmo decisionale (DMA) che fornisce un segnale di enable alle reti neurali Adaline, come illustrato in Fig. 50. L'architettura edge/cloud computing proposta è stata riportata in Fig. 51. In [93] viene proposto un algoritmo di identificazione basato su reti neurali Adaline che richiede l'utilizzo di soli due stati stazionari ottenere le stime parametriche senza iniezione di segnali di perturbazione. I principali limiti di questi lavori sono l'aver trascurato le non-linearità dell'inverter e le variazioni dei parametri con il variare delle condizioni operative dei motori.

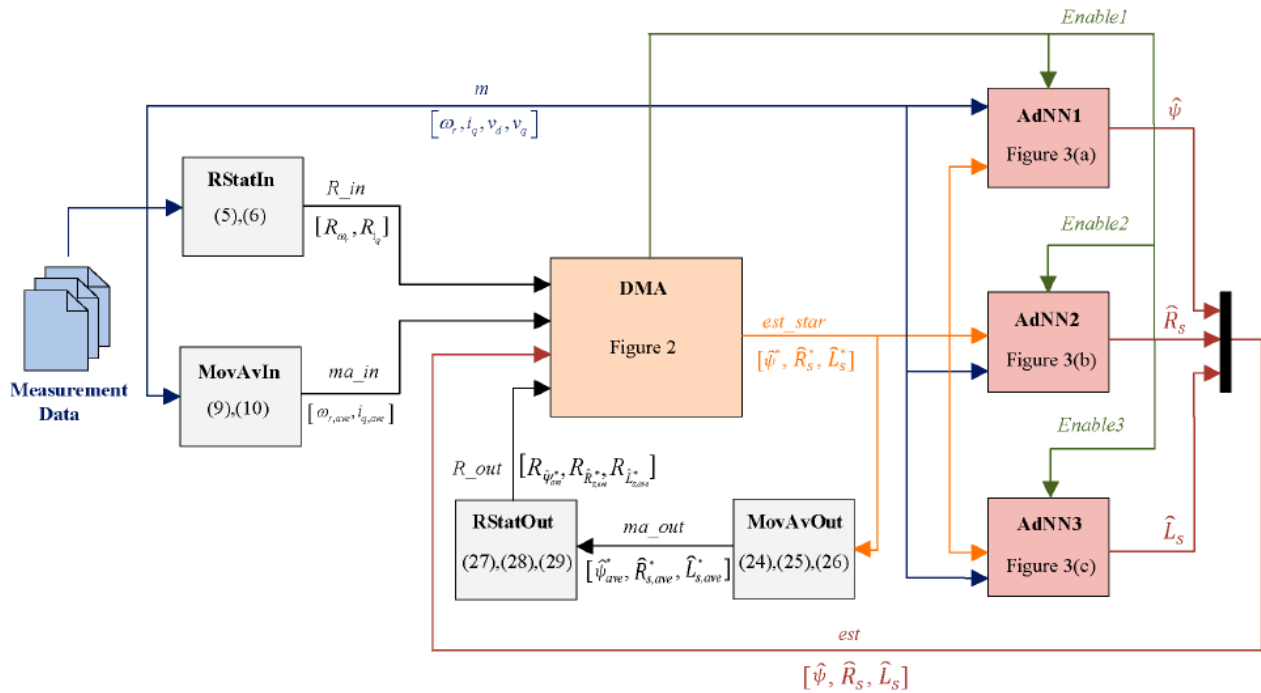


Fig. 50 – Algoritmo di stima parametrica basato su reti neurali Adaline supervisionato da un algoritmo decisionale [92].

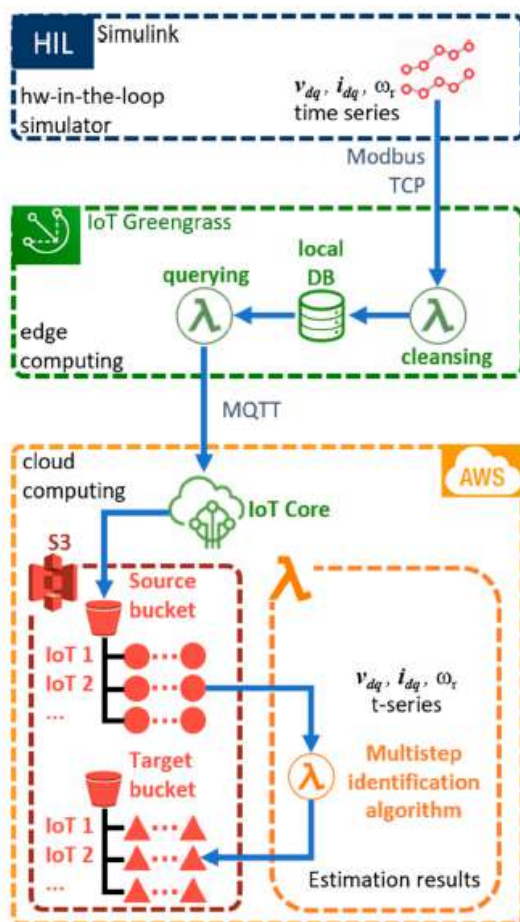


Fig. 51 – Architettura edge/cloud computing per l'identificazione parametrica di un SPMSM [92].

4. Conclusioni

In questo documento sono state riassunte le più recenti e avanzate tecniche di identificazione dei modelli di carichi e generatori nelle smart grids. Sono state prese in esame tecniche di identificazione di carichi/generatori compositi con approcci a scatola grigia e scatola nera e tecniche di identificazione più specifiche di macchine sincrone a magneti permanenti (PMSM). Per quanto riguarda le tecniche di identificazione di carichi e generatori/compositi, le più flessibili sono quelle a scatola nera, poiché prescindono dal tipo di carichi/generatori e dalla conoscenza dei loro modelli matematici. Per quanto riguarda le tecniche di identificazione dei PMSM, le più idonee risultano essere quelle online e quelle per PMSM integrati nei sistemi IoT, poiché non necessitano di effettuare test dedicati per raccogliere i dati necessari all'identificazione parametrica.

5. Bibliografia

- [1] Induction Motor Market Trends, Opportunities, Competitive Analysis and Challenges for the manufacturers. Available online: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-induction-motor-market/93716/> (accessed on 14 February 2023).
- [2] Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Global Market Report 2023. Available online: https://www.researchandmarkets.com/reports/5741705/permanent-magnet-synchronous-motor-pmsm-global?gclid=EAlaIqobChMlypKgyYO2_QIV2fhRCh3WfweUEAMYAyAAEgIYHPD_BwE (accessed on 14 February 2023).
- [3] Permanent magnet synchronous motors and synchronous reluctance motors. Available online: <https://www.powertransmissionworld.com/high-efficiency-motors-permanent-magnet-synchronous-motors-and-synchronous-reluctance-motors/> (accessed on 14 February 2023).
- [4] M. S. Rafaq and J. -W. Jung, "A Comprehensive Review of State-of-the-Art Parameter Estimation Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors in Wide Speed Range," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 7, pp. 4747-4758, July 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2944413.
- [5] Y. Chen, H. Wu, Y. Shen, X. Meng and P. Ju, "A Fast Parameter Identification Method for Composite Load Model Based on Jumping and Steady-State Points of Measured Data," in IEEE Access, vol. 10, pp. 97665-97676, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3206380.
- [6] M. Khodayar and J. Wang, "Probabilistic Time-Varying Parameter Identification for Load Modeling: A Deep Generative Approach," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 3, pp. 1625-1636, March 2021, doi: 10.1109/TII.2020.2971014.
- [7] M. Cui, M. Khodayar, C. Chen, X. Wang, Y. Zhang and M. E. Khodayar, "Deep Learning-Based Time-Varying Parameter Identification for System-Wide Load Modeling," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 6, pp. 6102-6114, Nov. 2019, doi: 10.1109/TSG.2019.2896493.
- [8] S. Chen et al., "Internet of Things Based Smart Grids Supported by Intelligent Edge Computing," in IEEE Access, vol. 7, pp. 74089-74102, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2920488.
- [9] F. Bu, Z. Ma, Y. Yuan and Z. Wang, "WECC Composite Load Model Parameter Identification Using Evolutionary Deep Reinforcement Learning," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 5407-5417, Nov. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.3008730.
- [10] X. Wang, Y. Wang, D. Shi, J. Wang and Z. Wang, "Two-Stage WECC Composite Load Modeling: A Double Deep Q-Learning Networks Approach," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 5, pp. 4331-4344, Sept. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2988171.
- [11] C. Wang, Z. Wang, J. Wang and D. Zhao, "Robust Time-Varying Parameter Identification for Composite Load Modeling," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 967-979, Jan. 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2756898.

- [12]X. Tian, X. Lii, L. Zhao, Z. Tan, S. Luo and C. Li, "Simplified Identification Strategy of Load Model Based on Global Sensitivity Analysis," in IEEE Access, vol. 8, pp. 131545-131552, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007639.
- [13]A. Rouhani and A. Abur, "Real-Time Dynamic Parameter Estimation for an Exponential Dynamic Load Model," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 3, pp. 1530-1536, May 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2449904.
- [14]A. Miranian and K. Rouzbehi, "Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 2872-2881, Aug. 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2234142.
- [15]Y. Bao, L. Y. Wang, C. Wang and Y. Wang, "Hammerstein Models and Real-Time System Identification of Load Dynamics for Voltage Management," in IEEE Access, vol. 6, pp. 34598-34607, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2849002.
- [16]J. Zhu, T. Luo, J. Chen, Y. Xia, C. Wang and M. Liu, "Recursive Bayesian-Based Approach for Online Automatic Identification of Generalized Electric Load Models in a Multi-Model Framework," in IEEE Access, vol. 7, pp. 121145-121155, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938099.
- [17]A. Mitra, R. Dutta, A. Gupta, A. Mohapatra and S. Chakrabarti, "A Robust Data-Driven Approach for Adaptive Dynamic Load Modeling," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 5, pp. 3779-3791, Sept. 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3137328.
- [18]X. Xiao, C. Chen and M. Zhang, "Dynamic Permanent Magnet Flux Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 1085-1088, June 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2041435.
- [19]Z. -H. Liu, H. -L. Wei, X. -H. Li, K. Liu and Q. -C. Zhong, "Global Identification of Electrical and Mechanical Parameters in PMSM Drive Based on Dynamic Self-Learning PSO," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 12, pp. 10858-10871, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2801331.
- [20]A. Mishra and P. Agarwal, S.P. Srivastava "A comprehensive analysis and implementation of vector control of permanent magnet synchronous motor" in International Journal of Power and Energy Conversion 5:1, 1-23, 2014, <https://doi.org/10.1504/IJPEC.2014.059982>
- [21]K. Liu and Z. Q. Zhu, "Quantum Genetic Algorithm-Based Parameter Estimation of PMSM Under Variable Speed Control Accounting for System Identifiability and VSI Nonlinearity," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 4, pp. 2363-2371, April 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2351774.
- [22]K. Liu, Z. Q. Zhu, Q. Zhang and J. Zhang, "Influence of Nonideal Voltage Measurement on Parameter Estimation in Permanent-Magnet Synchronous Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2438-2447, June 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2162214.

- [23] N. Bedetti, S. Calligaro and R. Petrella, "Stand-Still Self-Identification of Flux Characteristics for Synchronous Reluctance Machines Using Novel Saturation Approximating Function and Multiple Linear Regression," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 4, pp. 3083-3092, July-Aug. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2535413.
- [24] K. Liu, Z. Q. Zhu and D. A. Stone, "Parameter Estimation for Condition Monitoring of PMSM Stator Winding and Rotor Permanent Magnets," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 5902-5913, Dec. 2013, doi: 10.1109/TIE.2013.2238874.
- [25] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo and A. Tenconi, "Axial flux interior PM synchronous motor: parameters identification and steady-state performance measurements," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 1581-1588, Nov.-Dec. 2000, doi: 10.1109/28.887209.
- [26] T. J. Vyncke, F. M. L. L. De Belie, R. K. Boel, J. A. A. Melkebeek, Yonghua Cheng and P. Lataire, "Identification of PM synchronous machines in the frequency domain by broadband excitation," 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008, pp. 1253-1258, doi: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581176.
- [27] G. Wang et al., "Self-Commissioning of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives at Standstill Considering Inverter Nonlinearities," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6615-6627, Dec. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2014.2306734.
- [28] Y. Da, X. Shi and M. Krishnamurthy, "A New Approach to Fault Diagnostics for Permanent Magnet Synchronous Machines Using Electromagnetic Signature Analysis," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 4104-4112, Aug. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2227808.
- [29] E. Armando, R. I. Bojoi, P. Guglielmi, G. Pellegrino and M. Pastorelli, "Experimental Identification of the Magnetic Model of Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 5, pp. 2116-2125, Sept.-Oct. 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2258876.
- [30] M. A. Rahman and P. Zhou, "Accurate determination of permanent magnet motor parameters by digital torque angle measurement," *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 10, pp. 6868-6870, Nov. 1994.
- [31] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
- [32] R. Dutta and M. F. Rahman, "A comparative analysis of two test methods of measuring d- and q-axes inductances of interior permanent magnet machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 11, pp. 3712-3718, Nov. 2006.
- [33] H. P. Nee, L. Lefevre, P. Thelin, and J. Soulard, "Determination of d and q reactances of permanent-magnet synchronous motors without measurements of the rotor position," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 5, pp. 1330-1335, Sep./Oct. 2000.
- [34] P. H. Mellor, F. B. Chaaban, and K. J. Binns, "Estimation of parameters and performance of rare-earth permanent-magnet motors avoiding measurement of load angle," *IEE Proc. B Electr. Power Appl.*, vol. 138, no. 6, pp. 322-330, Nov. 1991.

- [35]B. Stumberger, G. Stumberger, D. Dolinar, A. Hamler, and M. Trlep, "Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 5, pp. 1264–1271, Sep./Oct. 2003.
- [36]S. A. Odhano, R. Bojoi, S. G. Rosu, and A. Tenconi, "Identification of the magnetic model of permanent-magnet synchronous machines using DC-biased low-frequency AC signal injection," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 4, pp. 3208–3215, Jul./Aug. 2015.
- [37]X. Wu, X. Fu, M. Lin, and L. Jia, "Off-line inductance identification of IPMSM with sequence-pulse injection," IEEE Trans. Ind. Informat., to be published, doi: 10.1109/TII.2019.2932796.
- [38]S. L. Kellner and B. Piepenbreier, "Identification of ohmic stator resistance based on low frequency current signal injection in permanent magnet synchronous machines," in Proc. 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf., Ohrid, Macedonia, 2010, Art. no. 5606555.
- [39]S. A. Odhano et al., "Identification of three-phase IPM machine parameters using torque tests," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 53, no. 3, pp. 1883–1891, May/Jun. 2017.
- [40]M. Popescu and D. Dorrell, "A method for determining IPM motor parameters from simple torque test data," in Proc. 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Vienna, Austria, 2013, pp. 7290–7294.
- [41]K. Liu, J. Feng, S. Guo, L. Xiao, and Z. Q. Zhu, "Identification of flux linkage map of permanent magnet synchronous machines under uncertain circuit resistance and inverter nonlinearity," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 14, no. 2, pp. 556–568, Feb. 2018.
- [42]Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong and Jin Hur, "Determination of parameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet synchronous motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 1303-1306, April 2006.
- [43]Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim and Jung-Woo Park, "Improved parameter modeling of interior permanent magnet synchronous motor based on finite element analysis," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1867-1870, July 2000, doi: 10.1109/20.877809.
- [44]P. Zhou, M. A. Rahman and M. A. Jabbar, "Field circuit analysis of permanent magnet synchronous motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, no. 4, pp. 1350-1359, July 1994, doi: 10.1109/20.305531.
- [45]J. F. Gieras, E. Santini and M. Wing, "Calculation of synchronous reactances of small permanent-magnet alternating-current motors: comparison of analytical approach and finite element method with measurements," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 3712-3720, Sept. 1998, doi: 10.1109/20.718533.
- [46]B. Vaseghi, N. Takorabet and F. Meibody-Tabar, "Fault Analysis and Parameter Identification of Permanent-Magnet Motors by the Finite-Element Method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 9, pp. 3290-3295, Sept. 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2022156.

- [47]N. Leboeuf, T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar and G. Clerc, "Estimating Permanent-Magnet Motor Parameters Under Inter-Turn Fault Conditions," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 963-966, Feb. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2011.2177642.
- [48]Hag-Wone Kim, Myung-Joong Youn, Kwan-Yuhl Cho and Hyun-Soo Kim, "Nonlinearity estimation and compensation of PWM VSI for PMSM under resistance and flux linkage uncertainty," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 14, no. 4, pp. 589-601, July 2006, doi: 10.1109/TCST.2006.876622.
- [49]S. -H. Hwang and J. -M. Kim, "Dead Time Compensation Method for Voltage-Fed PWM Inverter," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 1, pp. 1-10, March 2010, doi: 10.1109/TEC.2009.2031811.
- [50]K. Liu, Z. Q. Zhu, Q. Zhang and J. Zhang, "Influence of Nonideal Voltage Measurement on Parameter Estimation in Permanent-Magnet Synchronous Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2438-2447, June 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2162214.
- [51]Z. Tang and B. Akin, "Suppression of Dead-Time Distortion Through Revised Repetitive Controller in PMSM Drives," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 3, pp. 918-930, Sept. 2017, doi: 10.1109/TEC.2017.2679701.
- [52]Wang, Weihua, and Wenkai Wang. 2018. "Compensation for Inverter Nonlinearity in Permanent Magnet Synchronous Motor Drive and Effect on Torsional Vibration of Electric Vehicle Driveline" Energies 11, no. 10: 2542. <https://doi.org/10.3390/en1102542>
- [53]K. Liu, J. Feng, S. Guo, L. Xiao and Z. -Q. Zhu, "Identification of Flux Linkage Map of Permanent Magnet Synchronous Machines Under Uncertain Circuit Resistance and Inverter Nonlinearity," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 2, pp. 556-568, Feb. 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2722470.
- [54]X. Li and R. Kennel, "General Formulation of Kalman-Filter-Based Online Parameter Identification Methods for VSI-Fed PMSM," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 4, pp. 2856-2864, April 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2977568.
- [55]Hag-Wone Kim, Myung-Joong Youn and Kwan-Youl Cho, "New voltage distortion observer of PWM VSI for PMSM," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 4, pp. 1188-1192, Aug. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.851601.
- [56]K. Liu and Z. Q. Zhu, "Online Estimation of the Rotor Flux Linkage and Voltage-Source Inverter Nonlinearity in Permanent Magnet Synchronous Machine Drives," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 418-427, Jan. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2252024.
- [57]Z. Q. Zhu, D. Liang and K. Liu, "Online Parameter Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machines: An Overview," in IEEE Access, vol. 9, pp. 59059-59084, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072959.

- [58]Y. Inoue, Y. Kawaguchi, S. Morimoto and M. Sanada, "Performance Improvement of Sensorless IPMSM Drives in a Low-Speed Region Using Online Parameter Identification," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 2, pp. 798-804, March-April 2011, doi: 10.1109/TIA.2010.2101994.
- [59]X. Xiao, C. Chen and M. Zhang, "Dynamic Permanent Magnet Flux Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, pp. 1085-1088, June 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2041435.
- [60]T. Boileau, N. Leboeuf, B. Nahid-Mobarakeh and F. Meibody-Tabar, "Online Identification of PMSM Parameters: Parameter Identifiability and Estimator Comparative Study," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 4, pp. 1944-1957, July-Aug. 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2155010.
- [61]Wenxin Liu, Li Liu and D. A. Cartes, "Efforts on real-time implementation of PSO based PMSM parameter identification," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, 2008, pp. 1-7, doi: 10.1109/PES.2008.4596324.
- [62]Kyu-Wang Lee, Doo-Hee Jung and In-Joong Ha, "An online identification method for both stator resistance and back-EMF coefficient of PMSMs without rotational transducers," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 507-510, April 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.825280.
- [63]Q. Liu and K. Hameyer, "A fast online full parameter estimation of a PMSM with sinusoidal signal injection," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 4091-4096, doi: 10.1109/ECCE.2015.7310237.
- [64]K. Liu, Q. Zhang, J. Chen, Z. Q. Zhu and J. Zhang, "Online Multiparameter Estimation of Nonsalient-Pole PM Synchronous Machines With Temperature Variation Tracking," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1776-1788, May 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2054055.
- [65]G. Feng, C. Lai and N. C. Kar, "A Novel Current Injection-Based Online Parameter Estimation Method for PMSMs Considering Magnetic Saturation," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, July 2016, Art no. 8106004, doi: 10.1109/TMAG.2016.2525805.
- [66]G. Feng, C. Lai, K. Mukherjee and N. C. Kar, "Current Injection-Based Online Parameter and VSI Nonlinearity Estimation for PMSM Drives Using Current and Voltage DC Components," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 2, pp. 119-128, June 2016, doi: 10.1109/TTE.2016.2538180.
- [67]Z. -H. Liu, X. -H. Li, L. -H. Wu, S. -W. Zhou and K. Liu, "GPU-Accelerated Parallel Coevolutionary Algorithm for Parameters Identification and Temperature Monitoring in Permanent Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 5, pp. 1220-1230, Oct. 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2424073.

- [68]Z. -H. Liu, H. -L. Wei, Q. -C. Zhong, K. Liu and X. -H. Li, "GPU Implementation of DPSO-RE Algorithm for Parameters Identification of Surface PMSM Considering VSI Nonlinearity," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 1334-1345, Sept. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2690688.
- [69]S. J. Underwood and I. Husain, "Online Parameter Estimation and Adaptive Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2435-2443, July 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2036029.
- [70]C. Lai, G. Feng, K. Mukherjee, V. Loukanov and N. C. Kar, "Torque Ripple Minimization for Interior PMSM with Consideration of Magnetic Saturation Incorporating Online Parameter Identification," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017, Art no. 8105904, doi: 10.1109/TMAG.2017.2666089.
- [71]Zhou, M.; Jiang, L.; Wang, C. Real-Time Multiparameter Identification of a Salient-Pole PMSM Based on Two Steady States. *Energies* 2020, 13, 6109. <https://doi.org/10.3390/en13226109>
- [72]K. Liu and Z. Q. Zhu, "Position-Offset-Based Parameter Estimation Using the Adaline NN for Condition Monitoring of Permanent-Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2372-2383, April 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2360145.
- [73]K. Liu and Z. Q. Zhu, "Position Offset-Based Parameter Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machines Under Variable Speed Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 6, pp. 3438-3446, June 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2337011.
- [74]K. Liu and Z. Q. Zhu, "Mechanical Parameter Estimation of Permanent-Magnet Synchronous Machines With Aiding From Estimation of Rotor PM Flux Linkage," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 4, pp. 3115-3125, July-Aug. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2399615.
- [75]M. S. Rafiq, S. A. Q. Mohammed and J. -W. Jung, "Online Multiparameter Estimation for Robust Adaptive Decoupling PI Controllers of an IPMSM Drive: Variable Regularized APAs," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 3, pp. 1386-1395, June 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2906649.
- [76]A. Zentai and T. Dabóczy, "Online parameter estimation of permanent magnet synchronous machines by means of window LS optimization," 2009 European Control Conference (ECC), Budapest, Hungary, 2009, pp. 591-596, doi: 10.23919/ECC.2009.7074467.
- [77]H. Li, T. Chen and H. Yao, "The full rank identification of PM flux linkage for PMSM," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, China, 2016, pp. 2993-2998, doi: 10.1109/IPEMC.2016.7512773.
- [78]K. Choi, Y. Kim, K. -S. Kim and S. -K. Kim, "Using the Stator Current Ripple Model for Real-Time Estimation of Full Parameters of a Permanent Magnet Synchronous Motor," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 33369-33379, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2904228.

- [79]Y. Yu et al., "Full Parameter Estimation for Permanent Magnet Synchronous Motors," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 5, pp. 4376-4386, May 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3078391.
- [80]X. Zhang and Z. Li, "Sliding-Mode Observer-Based Mechanical Parameter Estimation for Permanent Magnet Synchronous Motor," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 8, pp. 5732-5745, Aug. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2495183.
- [81]C. Yang, B. Song, Y. Xie and X. Tang, "Online Parallel Estimation of Mechanical Parameters for PMSM Drives via a Network of Interconnected Extended Sliding-Mode Observers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11818-11834, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3067328.
- [82]C. Yang, B. Song, Y. Xie, S. Lu and X. Tang, "Speed-Controller-Independent Mechanical Parameter Identification in SPMSM Drive Achieved via Signal Injection," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 2, pp. 1282-1297, Feb. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3161760.
- [83]Y. Feng, X. Yu and F. Han, "High-Order Terminal Sliding-Mode Observer for Parameter Estimation of a Permanent-Magnet Synchronous Motor," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4272-4280, Oct. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2213561.
- [84]K. Liu and Z. Zhu, "Fast Determination of Moment of Inertia of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives for Design of Speed Loop Regulator," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 1816-1824, Sept. 2017, doi: 10.1109/TCST.2016.2615090.
- [85]Z. Masoumi, B. Moaveni, M. Khorshidi, J. Faiz and S. M. M. Gazafrudi, "Experimental Parameter Estimation of Induction Motor Based on Transient and Steady-State Responses in Synchronous and Rotor Reference Frames," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 1, pp. 145-152, March 2022, doi: 10.1109/TEC.2021.3094521.
- [86]S. R. P. Reddy and U. Loganathan, "Offline Recursive Identification of Electrical Parameters of VSI-Fed Induction Motor Drives," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 10, pp. 10711-10719, Oct. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2978932.
- [87]P. S. Saikrishna, R. Pasumathy and N. P. Bhatt, "Identification and Multivariable Gain-Scheduling Control for Cloud Computing Systems," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 792-807, May 2017, doi: 10.1109/TCST.2016.2580659.
- [88]P. González, X. C. Pardo, D. R. Penas, D. Teijeiro, J. R. Banga and R. Doallo, "Using the Cloud for Parameter Estimation Problems: Comparing Spark vs MPI with a Case-Study," 2017 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID), Madrid, Spain, 2017, pp. 797-806, doi: 10.1109/CCGRID.2017.58.
- [89]Hsieh, Y.M. Cloud-Computing Based Parameter Identification System—With Applications in Geotechnical Engineering. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Orlando, FL, USA, 23–25 June 2014.

- [90] Li, Y.; Kristinsson, J.G.; Syed, F.U. Parameter Identification Offloading Using Cloud Computing Resources. U.S. Patent 20150251555A1, 10 September 2015.
- [91] D. Costantino, E. Brescia, P. R. Massenio, P. Serafino, G. L. Cascella and F. Cupertino, "SuMRAS: a new SPMSM Parameter Identification in Cloud Computing Environment," 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Modena, Italy, 2021, pp. 297-302, doi: 10.1109/WEMDCD51469.2021.9425641.
- [92] Brescia, E.; Costantino, D.; Marzo, F.; Massenio, P.R.; Cascella, G.L.; Naso, D. Automated Multistep Parameter Identification of SPMSMs in Large-Scale Applications Using Cloud Computing Resources. *Sensors* 2021, 21, 4699. <https://doi.org/10.3390/s21144699>.
- [93] E. Brescia, P. Serafino, D. Cascella, G. Comitangelo, G. Conte and L. Chieco, "Automated Parameter Identification of SPMSMs Based on Two Steady States Using Cloud Computing Resources," 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town, South Africa, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECET52533.2021.9698606.