

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica

Dipartimento di Elettrotecnica



**IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI INFERENZA
FUZZY PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ
DELL'ALIMENTAZIONE ELETTRICA E RELATIVA
CARATTERIZZAZIONE METROLOGICA**

Relatore: Prof. Alessandro Ferrero

Correlatore: Prof. Simona Salicone

Tesi di Laurea Specialistica di:
Marco Prioli
Matr. 730252

Anno Accademico 2009-2010



Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Alessandro Ferrero, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità dimostratami e per tutti i preziosi consigli che mi ha fornito nel corso del lavoro di ricerca che ha portato alla stesura di questo elaborato.

Desidero inoltre ringraziare la Prof. Simona Salicone, correlatore di questa tesi, per l'aiuto fornito per dirimere i numerosi dubbi e per la grande cortesia dimostratami.

In particolar modo, desidero ringraziare i miei genitori, Felice Prioli e Rosita Marini, per avermi concesso la bellissima opportunità di intraprendere la carriera universitaria in una città lontana da casa e per il loro fondamentale sostegno, sempre presente.

Ringrazio mio fratello maggiore, Alessandro Prioli, che si è sempre preoccupato di starmi vicino e di assicurarmi dei momenti di svago tra le numerose ore di studio.

Ringrazio inoltre tutti i parenti, Angela Prioli, Vittorio Prioli, Udilla Ercoles, recentemente scomparsa, Marino Marini e Maria Bologna, guardiani instancabili del mio stato di salute fisico e morale.

Desidero ringraziare Giuliana Fossati; la sua costante vicinanza ed il suo indispensabile sostegno mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Ringrazio tutta la famiglia Fossati, composta, oltre che da Giuliana, da Costante, Luisa e Davide per la calorosa accoglienza ricevuta e per l'ospitalità che si è rivelata fondamentale in quest'ultimo periodo.

Esprimo infine la mia sincera gratitudine agli amici e compagni di studio, in special modo a Roberto Ferrero, per essermi stati vicini nei momenti difficili e soprattutto in quelli felici.



Indice generale

Indice delle figure.....	3
Indice delle tabelle.....	6
Introduzione.....	7
Capitolo 1.....	10
1.1 Rilevanza della Power Quality	11
1.2 La Power Quality nella normativa.....	13
1.3 Misura della Power Quality	15
1.4 Indici proposti per la quantificazione della Power Quality	18
1.5 Approccio deterministico o euristico?.....	25
Capitolo 2.....	27
2.1 Logica Fuzzy.....	28
2.2 Sistemi di Inferenza Fuzzy: definizioni preliminari.....	29
2.3 Sistemi di Inferenza Fuzzy: metodologia di progettazione.....	33
2.4 Sistemi di Inferenza Fuzzy: procedura operativa.....	36
Capitolo 3.....	44
3.1 Rete di test.....	45
3.2 Simulazioni preliminari	48
3.3 Ingressi del FIS: ξ_{slq}	51
3.4 Ingressi del FIS: Impiego di ξ_{HGI}	55
3.5 Ingressi del FIS: η^+	62



3.6	Uscita del FIS.....	67
3.7	Regole del FIS.....	68
Capitolo 4.....		74
4.1	Risultati delle simulazioni preliminari.....	75
4.2	Simulazioni di test.....	79
4.3	Risultati delle simulazioni di test.....	81
4.4	Conclusioni sui risultati ottenuti.....	88
Capitolo 5.....		89
5.1	L'incertezza di misura.....	90
5.2	Random Fuzzy Variables.....	92
5.3	Inferenza fuzzy modificata.....	96
Capitolo 6.....		110
6.1	Risultati delle simulazioni preliminari.....	111
6.2	Risultati delle simulazioni di test.....	121
Conclusioni.....		129
Obiettivi raggiunti.....		130
Implicazioni nella futura normativa.....		132
Bibliografia.....		134



Indice delle figure

Figura 1: MF "Alto".....	30
Figura 2: MF lineari.....	31
Figura 3: MF gaussiana.....	31
Figura 4: Confronto logica tradizionale logica fuzzy.....	32
Figura 5: Esempio della mancia, funzioni di appartenenza.....	35
Figura 6: Esempio della mancia, schema concettuale.....	37
Figura 7: Esempio della mancia, Fuzzify Inputs.....	38
Figura 8: Esempio della mancia, Apply Fuzzy Operators.....	39
Figura 9: Esempio della mancia, Apply Implication Method.....	40
Figura 10: Esempio della mancia, Aggregate all Outputs.....	41
Figura 11: Esempio della mancia, Defuzzification.....	42
Figura 12: Rete industriale di test proposta da IEEE.....	45
Figura 13: ξ_{slq} , simulazioni "T1" e "T2", livello superiore.....	51
Figura 14: ξ_{slq} , simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore.....	53
Figura 15: MF relativa all'indice ξ_{slq}	54
Figura 16: $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello superiore.....	56
Figura 17: $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore.....	57
Figura 18: MF relativa all'indice $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$	58
Figura 19: $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello superiore.....	58
Figura 20: $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello superiore, solo carichi inquinati.....	60
Figura 21: $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore, solo carichi inquinati.....	61
Figura 22: MF relativa all'indice $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$	62
Figura 23: $(\eta^+)^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore.....	63
Figura 24: η_2^+ , simulazioni "T1" e "T2", livello superiore.....	64
Figura 25: η_2^+ , simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore.....	65
Figura 26: MF relativa all'indice η_2^+	66



Figura 27: MF relativa all'uscita ξ_{dist}	67
Figura 28: ξ_{dist} , "T1", livello superiore	75
Figura 29: ξ_{dist} , "T1", livello inferiore.....	76
Figura 30: ξ_{dist} , "T2", livello superiore	77
Figura 31: ξ_{dist} , "T2", livello inferiore.....	77
Figura 32: ξ_{dist} , "C1", livello superiore.....	81
Figura 33: ξ_{dist} , "C1", livello inferiore	82
Figura 34: ξ_{dist} , "C2", livello superiore.....	83
Figura 35: ξ_{dist} , "C2", livello inferiore	84
Figura 36: ξ_{dist} , "C3", livello superiore.....	85
Figura 37: ξ_{dist} , "C3", livello inferiore	85
Figura 38: Risonatore RLC serie	86
Figura 39: Esempio di FV simmetrica.....	92
Figura 40: Esempio di RFV simmetrica	94
Figura 41: Intervalli in una RFV simmetrica.....	98
Figura 42: Costruzione della superficie per ogni livello z , intervallo esterno	98
Figura 43: Esempio di superficie con piano di intersezione per $x=a_m$	99
Figura 44: RFV risultante dall'intersezione.....	100
Figura 45: FIS di esempio, MF relative all'uscita.....	102
Figura 46: FIS di esempio, risultato del passo " <i>Weigh Each Rule</i> "	102
Figura 47: FIS di esempio, risultato del passo " <i>Apply Implication Method</i> ", $\alpha=0$	103
Figura 48: FIS di esempio, risultato del passo " <i>Pre-aggregation</i> ", $\alpha=0$	105
Figura 49: FIS di esempio, lin. della banda di incertezza, intervallo esterno, $\alpha=0$	106
Figura 50: FIS di esempio, lin. della banda di incertezza, intervallo interno, $\alpha=0$	107
Figura 51: FIS di esempio, risultato del passo " <i>Aggregate All Outputs</i> ", intervallo esterno, $\alpha=0$	107
Figura 52: FIS di esempio, RFV di uscita.....	108
Figura 53: ξ_{dist} , "T1" 100%	112
Figura 54: ξ_{dist} , "T1" 100%, successivamente alla modifica delle regole 7 e 34.....	113
Figura 55: ξ_{dist} , "T1" 60%	116
Figura 56: ξ_{dist} , "T1" 20%	116



Figura 57: ξ_{dist} , "T2" 100%	118
Figura 58: ξ_{dist} , "T2" 60%	118
Figura 59: ξ_{dist} , "T2" 20%	119
Figura 60: ξ_{dist} , "T3"	120
Figura 61: ξ_{dist} , "C1", $\alpha_{2B}=45^\circ$	122
Figura 62: ξ_{dist} , "C1", $\alpha_{2B}=67.5^\circ$	122
Figura 63: ξ_{dist} , "C1", $\alpha_{2B}=90^\circ$	123
Figura 64: ξ_{dist} , "C2" 60%	124
Figura 65: ξ_{dist} , "C2" 20%	125
Figura 66: ξ_{dist} , "C3", $\alpha_{1A}=0^\circ$	126
Figura 67: ξ_{dist} , "C3", $\alpha_{1A}=45^\circ$	126
Figura 68: ξ_{dist} , "C3", $\alpha_{1A}=90^\circ$	127
Figura 69: ξ_{dist} , "C4"	128



Indice delle tabelle

Tabella 1: Origine ed effetti sugli utenti dei disturbi elettrici. Fonte LPQI (<i>“Leonardo Power Quality Initiative”</i>).....	16
Tabella 2: Dati linee.....	46
Tabella 3: Dati trasformatori.....	46
Tabella 4: Dati carichi.....	47
Tabella 5: Dati carico dc del ponte in 1A, <i>“T1”</i>	49
Tabella 6: Dati carico dc del ponte in 2B, <i>“T2”</i>	50
Tabella 7: Dati carico dc del ponte in 2A, <i>“T3”</i>	50
Tabella 8: ξ_{slq} , simulazione <i>“T3”</i> , livello superiore.....	52
Tabella 9: ξ_{slq} , simulazione <i>“T3”</i> , livello inferiore.....	53
Tabella 10: $\ I_{\Sigma L}\ ^2$, simulazione <i>“T3”</i> , livello superiore.....	56
Tabella 11: $\ I_{\Sigma L}\ ^2$, simulazione <i>“T3”</i> , livello inferiore.....	57
Tabella 12: $\ I_{\Sigma S}\ ^2$, simulazioni <i>“T3”</i> , livello superiore.....	59
Tabella 13: $\ I_{\Sigma S}\ ^2$, simulazione <i>“T3”</i> , livello inferiore.....	61
Tabella 14: $(\eta^+)^2$, simulazione <i>“T3”</i> , livello inferiore.....	63
Tabella 15: η_2^+ , simulazione <i>“T3”</i> , livello superiore.....	65
Tabella 16: η_2^+ , simulazione <i>“T3”</i> , livello inferiore.....	65
Tabella 17: Esempio di regole con condizioni in <i>“parallelo”</i>	68
Tabella 18: Regole del FIS.....	70
Tabella 19: Conclusioni dei singoli indici.....	72
Tabella 20: ξ_{dist} , <i>“T3”</i>	78
Tabella 21: Dati carico dc del ponte in 2B, <i>“C1”</i>	80
Tabella 22: ξ_{dist} , <i>“C4”</i> vs <i>“T1”</i> al 100%.....	87
Tabella 23: ξ_{dist} , <i>“T1”</i> al 100%, confronto dei valori prima e dopo la modifica delle regole 7 e 34.....	114



Introduzione

Recentemente, anche in conseguenza della liberalizzazione del mercato elettrico e della prevista evoluzione dell'intero sistema elettrico verso una configurazione a *smart grid*, le tematiche relative all'analisi della qualità dell'alimentazione elettrica hanno assunto un'importanza strategica. Le ragioni di questo crescente interesse nella "*Power Quality*" (PQ) sono da riscontrarsi nei sempre più ingenti costi risultanti da una qualità dell'alimentazione non adeguata ai dispositivi connessi in rete. Tali costi sono legati a significativi effetti che i disturbi elettrici comportano, quali la sospensione momentanea della produzione, l'aumento delle perdite di linea, la riduzione della vita utile delle apparecchiature, la perdita di dati informatici, il malfunzionamento, l'arresto o il danneggiamento dei dispositivi.

L'esigenza di limitare tali effetti negativi comporta quindi la necessità di definire una procedura per l'identificazione delle sorgenti di inquinamento e per l'assegnazione delle relative responsabilità.

Un livello scadente di PQ è legato alla connessione in rete di dispositivi tra loro scarsamente *compatibili*. Le due facce di questa limitata compatibilità sono la presenza sempre più rilevante di carichi altamente suscettibili ai disturbi, legata anche alla crescente informatizzazione dei processi industriali, e la connessione sempre più frequente di carichi che iniettano in rete una ingente quantità di disturbi elettrici, legata alla diffusione su larga scala dell'elettronica di potenza.

Al fine di ottenere una riduzione dei disturbi iniettati, la normativa elettrica vigente pone specifiche relative ai dispositivi elettrici connessi in rete, in termini di suscettività ai disturbi e di livello di emissioni ed anche specifiche relative alle caratteristiche della tensione fornita da sistemi pubblici di distribuzione.



La normativa esistente a riguardo della qualità dell'alimentazione non è dunque attualmente caratterizzata da un'ottica generale e di sistema: manca infatti totalmente il riferimento al più ampio concetto di PQ. Non è inoltre definita, nella regolamentazione elettrica, nessuna procedura di attribuzione ad un soggetto operante in rete delle responsabilità per l'inquinamento elettrico introdotto, direttamente dipendente dalla rilevazione della direzione dei disturbi elettrici.

Questo elaborato affronta il problema della definizione di un indice per la rilevazione della direzione di propagazione in rete dei disturbi elettrici e di stima della sua incertezza, con specifico riferimento al caso dei disturbi periodici.

Nel seguito, vengono brevemente discusse le limitazioni degli approcci fino ad ora proposti per affrontare questo problema. Queste sono legate all'impossibilità di definire un modello matematico deterministico per la rilevazione della direzione dei disturbi che si riveli sufficientemente semplice per una rilevazione in tempo reale, ed al contempo sufficientemente accurato. Il modello non può infatti essere basato su di un numero limitato di grandezze ed indici, dato l'alto numero di gradi di libertà che la rete presenta in regime non sinusoidale.

Per superare le limitazioni mostrate degli approcci tradizionali viene proposto in questa tesi un innovativo approccio euristico al problema, basato sulla logica fuzzy e sui sistemi di inferenza fuzzy. Ci si aspetta che un sistema di inferenza fuzzy, alla presenza di un elevato numero di gradi di libertà, porti comunque alla definizione di un indice di PQ attendibile.

Una ulteriore ragione che rende l'inferenza fuzzy particolarmente attraente nella applicazione alla rilevazione dei disturbi, è data dalla possibilità di modificare opportunamente l'inferenza stessa affinché rappresenti e propaghi correttamente sia



i contributi di modello all'incertezza, legati in questo caso al modello di rete elettrica utilizzato, sia i contributi strumentali che interessano i dati sperimentali.

Valutare l'impatto dell'incertezza di misura è infatti un obiettivo di fondamentale importanza, in special modo se il risultato di misura viene utilizzato in transazioni economiche o per stabilire se sono stati rispettati limiti di legge o di normativa tecnica. Nel caso degli indici di PQ infatti, un approccio metrologico inesatto può portare ad una errata identificazione della sorgente dei disturbi e quindi ad una errata attribuzione delle responsabilità dell'inquinamento elettrico, con conseguente non dovuta o mancata applicazione di penali.

Il primo capitolo descrive gli indici di PQ più comuni e le ragioni della loro scarsa efficacia nella rilevazione della direzione dei disturbi. Il secondo capitolo fornisce invece una cornice teorica della logica fuzzy e del sistema di inferenza fuzzy utilizzato, nel capitolo tre, per il calcolo di un indice di PQ. Il successivo capitolo mostra i risultati forniti dall'indice per diverse simulazioni del funzionamento di una rete industriale di test, confermando la validità dell'approccio proposto.

Il capitolo cinque introduce l'argomento della valutazione dell'incertezza espressa mediante particolari variabili fuzzy e descrive in dettaglio l'inferenza fuzzy modificata. L'ultimo capitolo presenta e discute, infine, i risultati di questo innovativo approccio, mostrando la completa compatibilità tra l'inferenza fuzzy modificata e quella classica e la validità dei risultati raggiunti.



Capitolo 1

Nel primo capitolo, dopo un breve cenno all'importanza odierna del concetto di Power Quality (PQ) e alla situazione normativa corrente, vengono descritte le proposte presenti attualmente nella letteratura scientifica per il calcolo di indici relativi alla PQ ed i principali limiti riscontrati. Viene infine proposta la Logica Fuzzy come strumento alternativo per il calcolo di un indice sintetico di PQ.



1.1 Rilevanza della Power Quality

All'interno della comunità scientifica internazionale non è stato ancora raggiunto un ampio consenso sull'esatto significato del termine "*Power Quality*" (PQ), ma tutti concordano nell'affermare che i problemi rilevati in questo ambito stiano di recente assumendo una grande importanza nella gestione dei sistemi elettrici. A testimonianza di ciò, si rileva un numero sempre più significativo di pubblicazioni scientifiche riguardanti la "*Power Quality*".

Le principali cause della crescente importanza delle problematiche connesse alla qualità dell'alimentazione elettrica sono da riscontrarsi nel progressivo deterioramento della qualità stessa e nella crescente sensibilità dei dispositivi elettrici ai disturbi di tensione [1].

Entrambe le cause sono direttamente legate allo sviluppo dell'elettronica. Da una parte l'elettronica di potenza ha portato ad una larga diffusione di carichi temporari e non lineari che iniettano nelle rete disturbi armonici potenzialmente dannosi per altri dispositivi; dall'altra, la diffusione dell'elettronica di consumo nel mercato domestico e la crescente presenza di sistemi di calcolo portata dall'informatizzazione dei processi industriali, ha introdotto nella rete un grande numero di dispositivi potenzialmente sensibili agli stessi disturbi.

Il "*trait d'union*" tra apparecchiature distorcenti e dispositivi che subiscono la distorsione, è ovviamente rappresentato dalla rete elettrica che fa sì che i disturbi si propaghino virtualmente ad ogni suo nodo. A causa infatti di una impedenza equivalente di sorgente non nulla, la distorsione di corrente introdotta dai carichi inquinanti produce una distorsione di tensione, forzando ogni dispositivo connesso alla rete su uno stesso punto di accoppiamento comune (PCC) ad assorbire una corrente distorta.

Un'ulteriore considerazione che sottolinea l'importanza odierna della "*Power Quality*" nel contesto industriale, è posta dal fatto che le imprese sono attualmente

più sensibili alle interruzioni dei processi. Queste possono essere causate non solo da interruzioni di alimentazione, ma anche da eventuali guasti o malfunzionamenti provocati dai disturbi che, in alcuni casi, portano ad una sospensione della produzione che si prolunga per periodi non trascurabili. I costi legati ad un simile evento sono per le imprese sempre più ingenti e sempre più difficilmente sopportabili a causa dei ridotti margini di profitto [2].

Corrispondentemente, nel mercato domestico, l'alimentazione elettrica sta assumendo in modo sempre più rilevante le caratteristiche di servizio universale; per questa ragione, una sua interruzione, seppur temporalmente limitata, è fonte di crescenti disagi.

Oltre all'interruzione dei processi industriali legati all'interruzione della fornitura elettrica, una qualità dell'alimentazione non adatta ai dispositivi connessi può comportare ulteriori effetti negativi quali l'aumento delle perdite di linea, la riduzione della vita utile delle apparecchiature, la perdita di dati informatici, il malfunzionamento, l'arresto o il danneggiamento dei dispositivi. A ciascuno di questi eventi è associato un costo più o meno ingente a seconda di quale tipologia di utenza subisca il danno.

Quanto riportato fino ad ora giustifica dunque la necessità di definire standard di qualità e procedure di misura della qualità dell'alimentazione elettrica.

Una volta fissati standard di qualità e procedure di misura, è necessario definire le strategie tecnico-commerciali per ottenere una riduzione dei costi sopra menzionati e dunque un maggior soddisfacimento delle aspettative dell'utenza. L'adozione di tali strategie, tuttavia, richiede la disponibilità di procedure di misura in grado di identificare le sorgenti che iniettano disturbi in rete e di quantificare l'entità di tali disturbi.



1.2 La Power Quality nella normativa

La normativa internazionale presenta numerose definizioni del concetto di *"Power Quality"*, ciascuna delle quali, pone l'accento su differenti aspetti del termine. La norma *"UNI EN ISO 9000:2005"* definisce *"Power Quality"* come *"l'insieme degli elementi distintivi intrinseci dell'alimentazione elettrica che soddisfano le aspettative implicite e cogenti dei clienti e delle parti interessate"*. Questa definizione pone quindi l'accento sulle aspettative degli utenti, facendo intendere che gli standard di qualità non possano essere in questo campo universali, ma debbano piuttosto essere relativi alle necessità di ogni categoria di utenza elettrica.

È possibile distinguere due differenti aspetti del concetto di PQ considerando che l'erogazione dell'energia elettrica presenta caratteristiche sia di servizio che di prodotto[3,4]; il servizio elettrico è direttamente legato alla disponibilità di energia, mentre il prodotto energia elettrica può essere o meno soggetto a disturbi di varia natura. Nel primo caso PQ implica quindi continuità dell'alimentazione (*"Supply Continuity"*), mentre nel secondo, qualità della tensione (*"Voltage Quality"*).

Per quanto riguarda il primo aspetto, è relativamente semplice valutare il livello di continuità dell'alimentazione ed individuare le cause di una sua eventuale interruzione. Per questa ragione, gli studi scientifici e la stessa normativa a riguardo della *"Supply Continuity"* (SC) si trovano in uno stadio avanzato. Sono infatti già poste in essere delle politiche di tariffazione tali da penalizzare economicamente il distributore dell'energia nel caso in cui non sia in grado di garantire un prefissato livello di continuità.

Viceversa, la normativa presenta ancora qualche elemento di ambiguità per quanto riguarda il secondo aspetto di *"Voltage Quality"* (VQ).

Dalle organizzazioni internazionali deputate alla definizione degli standard elettrici sono state fornite alcune raccomandazioni per limitare l'iniezione di armoniche in rete [5-8] e per definire le caratteristiche della tensione presente in rete [9-11].

Ulteriori definizioni di termini legati al concetto di PQ sono fornite in [12].

L' *"International Electrotechnical Commission"*, ad esempio, con le norme della serie CEI EN 61000 [6-10] pone l'accento su un concetto prossimo a quello di VQ, ma che presenta sfumature differenti: quello di *"Compatibilità Elettromagnetica"*, dall'inglese EMC. Con questo termine si intende *"la capacità di un dispositivo di funzionare in un ambiente elettromagnetico in modo soddisfacente, senza produrre a sua volta disturbi elettromagnetici intollerabili per tutto ciò che si trova in quello stesso ambiente"*. Con le norme citate, la Commissione pone limiti di emissione degli apparecchi e livelli di immunità degli stessi, riferiti a disturbi condotti ed irradiati e definisce contemporaneamente tipologie di prova e procedure di misura dei disturbi, focalizzando l'attenzione sui singoli dispositivi; all'interno delle norme non è tuttavia presente alcun riferimento ai più ampi termini di PQ e VQ.

La procedura di misura di indici relativi alla VQ e la definizione stessa degli indici da misurare, non trovano quindi attualmente uno standard di riferimento definitivo e risultano oggetto di numerosi studi e pubblicazioni scientifiche.

Una ulteriore ed importante lacuna che si riscontra nella normativa è la mancanza della definizione della procedura di attribuzione della responsabilità dell'inquinamento elettrico ad uno dei soggetti operanti sulla rete. Contribuiscono infatti al mantenimento di un adeguato livello di qualità tutti i soggetti coinvolti dalla produzione all'utilizzazione dell'energia elettrica, compresa la stessa rete elettrica esercita dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN).

Questo elaborato si concentra dunque sull'aspetto più critico della PQ: quello dell'analisi della qualità della tensione; il termine *"Power Quality"* verrà quindi usato da qui in poi per fare riferimento esclusivamente a questo aspetto.



1.3 Misura della Power Quality

In un contesto di ideale erogazione ed utilizzazione dell'energia elettrica, la situazione ideale di riferimento, per un sistema trifase, è data da una terna sinusoidale simmetrica di tensioni in fase con una terna sinusoidale equilibrata di correnti, entrambe con valore efficace e frequenza costanti. È evidente che una tale condizione non possa essere nella pratica mai realizzata.

Ogni indice di valutazione della PQ deve quindi stimare su quali aspetti ed in che misura ci si discosti da questa situazione ideale ed anche stabilire a quale soggetto operante sulla rete attribuire le responsabilità del deterioramento della qualità.

Il primo obiettivo, consistente nella valutazione dell'entità dei disturbi, risulta più semplice da perseguire rispetto al secondo; sono infatti numerosi gli indici di PQ efficaci nella rilevazione dell'intensità dei disturbi. Per quanto riguarda invece il secondo obiettivo citato, non risulta affatto semplice la definizione di una procedura che valuti le responsabilità del deterioramento della PQ; la ragione di tale difficoltà deve essere cercata nella complicata definizione di indici di PQ, efficaci nell'identificazione della direzione dei disturbi, in regime non sinusoidale [13].

Numerosi sono i disturbi che possono allontanare l'erogazione dell'energia elettrica dalle condizioni ideali descritte. L'ente normativo europeo "CENELEC" ha perciò definito le puntuali specifiche della tensione fornita da sistemi pubblici di distribuzione, mediante la norma EN 50160:2005 [11]. La norma citata definisce i valori nominali ed i massimi intervalli di variazione, in condizioni standard, che caratterizzano quattro differenti aspetti della tensione:

- Frequenza
- Ampiezza
- Forma d'onda
- Simmetria della terna di tensioni trifase

Ciascuna di queste caratteristiche della tensione può essere soggetta o meno a differenti disturbi elettrici. In tabella 1 sono indicati origine ed effetti sull'utente finale dei principali disturbi.

Caratt.	Disturbo	Origine	Effetti
Frequenza	Variazioni di frequenza	<ul style="list-style-type: none"> - Distacchi di grossi generatori - Commutazione di grossi carichi - Guasti 	<ul style="list-style-type: none"> - Variazione di velocità nei motori - Malfunzionamento dei dispositivi elettronici che utilizzano la frequenza
Ampiezza	Variazioni rapide di tensione	<ul style="list-style-type: none"> - Inserzione di carichi - Carichi con assorbimento variabile 	<ul style="list-style-type: none"> - Intervento intempestivo di protezioni - Flicker (se le variazioni sono ripetitive) - Malfunzionamento di apparati elettronici
	Variazioni impulsive	<ul style="list-style-type: none"> - Fulminazioni - Manovre - Guasti 	<ul style="list-style-type: none"> - Distruzione isolamenti - Danneggiamento di circuiti elettronici
	Buchi di tensione ed interruzioni brevi	<ul style="list-style-type: none"> - Guasti - Manovre 	<ul style="list-style-type: none"> - Irregolarità nel funzionamento di motori - Malfunzionamento di apparati elettronici - Intervento indebito di relè
Forma d'onda	Armoniche	<ul style="list-style-type: none"> - Carichi non lineari - Azionamenti a velocità variabile - Lampade a fluorescenza - Convertitori statici - Forni ad arco - Saldatrici 	<ul style="list-style-type: none"> - Malfunzionamento di protezioni - Aumento delle perdite nel rame - Aumento delle perdite dielettriche - Aumento delle perdite nel ferro delle macchine elettriche - Funzionamento instabile dei motori - Interferenza sui circuiti di telecomunicazione
Simmetria	Dissimmetria	<ul style="list-style-type: none"> - Carichi sbilanciati 	<ul style="list-style-type: none"> - Sovrariscaldamento di macchine rotanti e raddrizzatori

Tabella 1: Origine ed effetti sugli utenti dei disturbi elettrici.
 Fonte LPQI ("Leonardo Power Quality Initiative")

Tra i disturbi indicati in tabella, sono presenti sia disturbi transitori, come ad esempio le variazioni impulsive di tensione, sia disturbi periodici, come la distorsione armonica.

Per quanto riguarda i disturbi transitori, è relativamente semplice, da un punto di vista teorico, identificare la direzione di propagazione del disturbo e quindi attribuire le responsabilità dell' inquinamento elettrico della rete. A tale scopo si potrebbe infatti utilizzare un sistema di misura distribuito in più nodi della rete dotato di strumenti aventi clock sincronizzati; per identificare la direzione sarebbe in questo caso sufficiente rilevare gli istanti di passaggio del medesimo disturbo nelle diverse sottostazioni di misura.

Ben più complicata è l'identificazione della direzione di un disturbo periodico. In teoria, questa può essere attuata confrontando lo sfasamento relativo tra le componenti di disturbo di tensione e corrente nelle diverse sezioni di misura. Considerando però la generalmente modesta entità dei disturbi, rapportata ai valori nominali, le piccole variazioni di sfasamento tra un nodo e l'altro e la non trascurabile incertezza con cui vengono effettuate le misure di fase, si comprende la criticità di questo metodo.

Un ulteriore elemento critico nella rilevazione della direzione di disturbi periodici è costituito dalla difficoltà di misurare l'impedenza equivalente sorgente e dalla sua variabilità temporale; il modello di rete non può dunque essere noto con precisione.

Per queste ragioni, oltre al rilievo diretto della direzione dei singoli disturbi periodici, viene esplorata la possibilità di definire indici sintetici, basati, ad esempio, sui flussi di potenza armonici.

Questo elaborato affronta quindi il problema di definire un indice sintetico in grado di esprimere numericamente il livello di PQ e di identificare la provenienza dei disturbi elettrici, nell'ottica di assegnazione delle responsabilità dell'inquinamento, per il secondo caso descritto, quello dei disturbi periodici.

1.4 Indici proposti per la quantificazione della Power Quality

Recentemente, in numerosi articoli della letteratura scientifica, sono state proposte definizioni di indici che esprimono numericamente la PQ in un nodo della rete [14-20]. Indici di questo tipo hanno l'obiettivo di valutare l'intensità dei disturbi presenti in un nodo e, soprattutto, di attribuire ad uno dei soggetti operanti localmente sulla rete elettrica le responsabilità dell'introduzione dei disturbi stessi.

Nessuno degli indici proposti sembra però efficiente nella rilevazione della direzione di disturbi periodici e, come già accennato, gli unici che forniscono qualche indicazione utile al riguardo sono quelli basati sull'analisi dei flussi di potenza armonici.

In [15] è presentato un primo indice definito con il termine inglese "*Supply and Loading Quality Index*".

In una generica sezione di misura di un sistema trifase, la potenza attiva trifase può essere scomposta in più componenti:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma+1} + \sum_{h \neq +1} P_{\Sigma h}$$

$P_{\Sigma+1}$ rappresenta la potenza attiva trifase associata alle componenti di tensione e corrente di frequenza fondamentale e sequenza diretta. Questa componente di potenza, di segno sempre positivo, è l'unica componente presente nelle condizioni ideali di fornitura di una tensione sinusoidale simmetrica e di collegamento di soli carichi sbilanciati, lineari e tempo-invarianti.

Tutte le restanti componenti identificano la presenza in rete di disturbi periodici. Nello specifico, il loro valore assoluto è legato all'intensità dei disturbi, mentre il loro segno alla direzione di propagazione degli stessi, come mostrato in [14].

Per convenzione, si considera positivo il segno delle componenti che fluiscono dalla sorgente al carico.

Per identificare tali disturbi è quindi possibile definire un indice di PQ come il rapporto tra le quantità P_{Σ} e $P_{\Sigma+1}$:

$$\xi_{slq} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma+1}} = 1 + \frac{1}{P_{\Sigma+1}} \cdot \sum_{h \neq +1} P_{\Sigma h}$$

Per le considerazioni svolte, l'indice assume valori minori dell'unità quando le componenti di potenza attiva associate a componenti di tensione e corrente, diverse da quella associata alla frequenza fondamentale e di sequenza diretta, sono di segno negativo, fluiscono ovvero dal carico alla sorgente. Con valori inferiori all'unità vengono quindi rilevati i casi in cui gli effetti distorcenti e di squilibrio del carico prevalgono su quelli della sorgente.

Viceversa, l'indice assume valori superiori all'unità quando le stesse componenti sono di segno positivo, fluendo dalla sorgente al carico; con valori superiori all'unità vengono dunque rilevati i casi in cui gli effetti distorcenti e di squilibrio della sorgente prevalgono su quelli del carico.

Ovviamente, l'indice assume il valore unitario solo nel caso ideale di assenza di componenti di tensione e corrente diverse da quella associata alla frequenza fondamentale e di sequenza diretta.

L'attendibilità dell'indice è stata ampiamente discussa nella letteratura [16-18].

Una prima problematica rilevata è la forte dipendenza delle singole potenze armoniche $P_{\Sigma h}$ dalla fase dell'impedenza equivalente sorgente vista dal punto di misura. Se per un certo intervallo di frequenze l'impedenza equivalente assumesse un comportamento fortemente induttivo o capacitivo, le relative $P_{\Sigma h}$ risulterebbero di modesta entità, indipendentemente dall'intensità dei disturbi quantificata dalle correnti armoniche I_h . È quindi possibile che disturbi di grande entità abbiano una

limitata influenza sull'indice finale. Inoltre, per valori di sfasamento tra tensione e corrente armonica prossimi a $\pi/2$, l'errore di fase dei trasduttori di misura può portare ad un'errata valutazione del segno della potenza armonica considerata, rendendo ancora più critica la correlazione tra valore misurato dell'indice e severità della distorsione iniettata.

Una seconda problematica è l'impossibilità di prevedere in che modo si compensino le differenti componenti armoniche di potenza di direzione opposta; è infatti possibile che si verifichino compensazioni tra le componenti di direzione opposta associate a frequenze diverse, ad esempio tra quelle generate dal carico e quelle generate dalla sorgente, o anche tra le componenti di differenti carichi distorcenti connessi allo stesso PCC.

Nei casi descritti l'indice può dunque non rappresentare correttamente l'intensità dell'inquinamento elettrico, e può addirittura fallire nell'identificazione della sorgente prevalente dei disturbi; per questa ragione, nei casi sopra evidenziati, è opportuno considerare insieme ai risultati di ξ_{slq} , i risultati di un ulteriore indice di PQ.

Una possibile via per superare le criticità evidenziate è quella di identificare la severità dell'inquinamento armonico mediante le corrispondenti componenti armoniche di corrente I_h , lasciando alle potenze armoniche $P_{\Sigma h}$ la sola rilevazione della direzione del disturbo.

È questo l'approccio seguito da Muscas nella definizione dell'indice denominato "*Harmonic Global Index*" [19].

Nel calcolo di questo indice, sulla base del segno della corrispondente componente armonica di potenza, la singola componente armonica di corrente I_h viene associata all'insieme L ("*Load*") se tale componente fluisce dal carico verso la sorgente e, viceversa, viene associata all'insieme S ("*Supply*") se fluisce nella direzione opposta.

L'indice viene dunque calcolato dividendo i quadrati delle norme delle componenti appartenenti ai due insiemi:

$$\xi_{HGI} = \frac{\|I_{\Sigma_L}\|^2}{\|I_{\Sigma_S}\|^2}$$

La variabile $(\|I_{\Sigma_L}\|^2)$ quantifica quindi il livello di emissione dei disturbi da parte del carico e la variabile $(\|I_{\Sigma_S}\|^2)$ il livello di assorbimento dei disturbi da parte dello stesso. L'indice assume dunque il valore nullo se il carico è lineare, bilanciato e tempo-invariante $(\|I_{\Sigma_L}\|^2 = 0)$; negli altri casi assume valori positivi, crescenti all'aumentare dei disturbi introdotti dal carico e al diminuire di quelli introdotti dalla sorgente.

Come l'indice ξ_{slq} , anche ξ_{HGI} presenta il problema relativo alla compensazione delle componenti armoniche di direzione opposta. Infatti, visto che l'indice è dato dal rapporto delle due norme, esso quantifica il livello di inquinamento prodotto da un carico, in relazione a quello subito.

Se queste norme fossero invece considerate come due indici a se stanti, la compensazione non potrebbe più avere luogo in quanto la quantificazione del livello di emissione e di assorbimento dei disturbi risulterebbero indipendenti.

Un'ulteriore criticità legata all'indice ξ_{HGI} è data dal fatto che componenti armoniche di corrente associate e frequenze differenti e aventi lo stesso valore efficace, presentano la stessa influenza sull'indice.

Nella realtà, però, l'effetto sulla PQ di tali componenti varia al variare della frequenza delle stesse e quindi, a seconda dei casi, l'effetto può essere più o meno dannoso.

Un'ultima problematica è legata al calcolo di questo indice: le componenti di corrente possono non essere associate al corretto sottoinsieme I_{EL} oppure I_{ES} se la misura della

$P_{\Sigma h}$ non è sufficientemente accurata da fornire il segno del flusso della potenza attiva senza ambiguità. Ciò accade quando l'intervallo centrato sulla misura di potenza attiva, di semiampiezza pari all'incertezza estesa della misura, attraversa la soglia dello zero. In questi casi, associare comunque la componente di corrente ad un insieme o non associarla affatto può portare a grandi errori di valutazione dell'indice, specialmente per componenti di corrente non trascurabili.

Il problema legato alla forte dipendenza delle $P_{\Sigma h}$ dalla fase dell'impedenza equivalente vista dal punto di misura, mostrato dall'indice ξ_{slq} , viene dunque eliminato solo in parte: nei casi in cui l'impedenza equivalente assume un comportamento fortemente induttivo o capacitivo, esiste ancora la possibilità di non riuscire ad assegnare il disturbo I_h o di assegnarlo al sottoinsieme errato.

Un ulteriore indice di PQ è dato dal rapporto tra i THD globali di tensione e corrente:

$$\eta^+ = \frac{GTHD_{I^+}}{GTHD_{U^+}}$$

$$GTHD_{I^+} = \sqrt{\frac{I_{\Sigma}^2}{I_{\Sigma+1}^2} - 1} \quad , \quad GTHD_{U^+} = \sqrt{\frac{U_{\Sigma}^2}{U_{\Sigma+1}^2} - 1}$$

Dove U_{Σ} ed I_{Σ} sono i valori efficaci di tensione e corrente trifasi, mentre $U_{\Sigma+1}$ ed $I_{\Sigma+1}$ sono i valori efficaci della sola componente fondamentale di sequenza diretta di tensione e corrente.

I THD globali sono indici di non conformità ad una terna sinusoidale di sequenza diretta. η^+ assume dunque il valore unitario solo se il carico è puramente resistivo, lineare, bilanciato e tempo-invariante. Valori dell'indice inferiori all'unità evidenziano il comportamento filtrante del carico, che attenua dei disturbi di corrente presenti in rete; viceversa, valori superiori all'unità indicano la tendenza del carico di amplificare i disturbi di tensione traducendoli in disturbi di corrente a causa di una non linearità o di una risonanza.

Proprio la risonanza identifica il punto debole di questo indice; l'indice può infatti assumere valori molto grandi anche se un carico puramente lineare in un intorno della frequenza nominale e che non inietta in rete disturbi, risuona a causa della presenza, non prevista nelle specifiche dell'alimentazione [11], di alcune armoniche di tensione.

L'analisi degli indici di PQ sopra descritti ha mostrato le limitazioni degli stessi, singolarmente presi, nell'individuare le sorgenti di disturbo armonico senza ambiguità.

Si è anche visto, però, che le ragioni di ambiguità sono differenti per i diversi indici e ciò fa supporre che una loro opportuna combinazione possa portare ad una significativa riduzione dei casi in cui l'ambiguità è mostrata.

Questo approccio è stato seguito in [20]; in questo articolo gli indici valutati sulle singole linee alimentate dal PCC sono stati anche rapportati agli omologhi indici valutati sulla linea di alimentazione del PCC. L'indice globale proposto nell'articolo citato è stato definito secondo la seguente combinazione lineare:

$$v_k = \frac{1}{k_1 + k_2 + k_3} \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\xi_{slq_k}^{-1}}{\xi_{slq_s}^{-1}} + k_2 \cdot \frac{\xi_{HGI_k}}{\xi_{HGI_s}} + k_3 \cdot \frac{\eta_k^+}{\eta_s^+} \right)$$

dove il pedice s di riferisce alla linea che alimenta il PCC, mentre il pedice k alla generica linea alimentata.

In [20] viene mostrato che l'indice assume valore unitario se le tensioni di alimentazione sono sinusoidali e simmetriche ed il carico connesso alla linea k è lineare, bilanciato e tempo-invariante. Valori maggiori dell'unità indicano che il carico k è distorto, valori minori di uno indicano viceversa che il carico k subisce i disturbi.

Secondo quanto mostrato nell'articolo citato, l'identificazione della sorgente dei disturbi è sempre corretta se è presente un solo carico distorcente, mentre può permanere un'ambiguità residua (sia pure minore di quella che si ha considerando gli indici singolarmente) se più carichi distorcenti sono connessi allo stesso PCC.

Una delle più importanti ragioni di ambiguità risiede anche nella relativamente elevata incertezza con cui questo indice viene misurato. Infatti, la procedura di misura di tale indice globale risulta particolarmente sensibile anche a modesti contributi di incertezza sui valori misurati delle grandezze di ingresso che portano, propagandosi lungo la procedura di misura, ad intervalli di possibili valori attribuibili al misurando alquanto ampi e tali da non poter più attribuire le responsabilità per l'iniezione dei disturbi in modo non ambiguo.

Questo contributo strumentale all'incertezza si somma al contributo definizionale, di ancora più difficile valutazione, non essendo disponibile un modello di propagazione del disturbo armonico sufficientemente accurato.

Le considerazioni sopra esposte indicano quindi la necessità di procedere lungo due strade.

Da un lato è necessario definire un indice globale di PQ ed una procedura di misura basati su un modello matematico, non necessariamente deterministico, che garantisca una maggiore accuratezza ed una migliore valutazione dell'incertezza del modello stesso e quindi del contributo definizionale dell'incertezza di misura.

Dall'altro lato è necessario che la procedura di misura messa a punto garantisca anche la possibilità di valutare il contributo strumentale all'incertezza di misura e la possibilità di comporlo in modo matematicamente e fisicamente corretto con il contributo definizionale.



1.5 Approccio deterministico o euristico?

La difficoltà di definire un indice di PQ in grado di fornire risultati corretti e privi di ambiguità in tutte le possibili condizioni operative di una rete elettrica non è principalmente legata a problemi intrinseci dello specifico metodo di misura proposto, bensì ad una caratteristica intrinseca del modello del misurando. Un qualunque sistema elettrico è infatti caratterizzato, in regime deformato, da un elevato numero di gradi di libertà e non può quindi essere descritto da un limitato numero di parametri [21]. Questa è l'intrinseca ragione di inadeguatezza degli approcci proposti, tutti basati su un modello deterministico della propagazione dei disturbi armonici, modello che considera un numero limitato di parametri e di relazioni fra di essi.

In tempi recenti, per superare le limitazioni date dall'impiego di modelli deterministici incompleti o troppo articolati per descrivere il comportamento di sistemi complessi, sono stati introdotti metodi euristici che si basano sulla conoscenza della risposta del sistema da descrivere ad un insieme di stimoli e su una descrizione di tipo linguistico della relazione tra i dati di ingresso e di uscita considerati.

Il primo di questi approcci ad essere proposto è stato quello basato sulla logica fuzzy e sugli insiemi fuzzy. Questo approccio, originariamente proposto da Zadeh [22], è basato su una teoria matematica estremamente rigorosa che, unitamente alla teoria della probabilità, può essere inquadrata nella più generale teoria dell'evidenza formalizzata da Shafer [23].

Il suo punto di forza è quello di poter esprimere in modo quantitativo, attraverso la definizione di opportune funzioni di appartenenza delle variabili di ingresso ed uscita agli insiemi fuzzy, l'incertezza con cui è possibile definire un modello del fenomeno considerato.

L'approccio fuzzy appare particolarmente attraente per la definizione di efficienti indici di PQ. Infatti, se si considerano gli indici finora esaminati, risulta evidente che nessuno di essi, né singolarmente, né in combinazione con gli altri, è in grado di valutare la PQ e di definire la sorgenti del disturbo in modo soddisfacente. Risulta però altrettanto evidente che un esperto di reti elettriche è in generale in grado, a partire da quegli stessi valori, di riconoscere la provenienza dei disturbi con ragionevole sicurezza e di stimare in che misura gli stessi disturbi contribuiscono al deterioramento della PQ.

Per questi motivi, l'approccio fuzzy alla determinazione e valutazione di un indice di PQ [24] sembra particolarmente invitante e verrà perseguito nel seguito della tesi.

Il capitolo che segue illustrerà brevemente le principali caratteristiche della logica fuzzy e dei sistemi di inferenza fuzzy, mentre i successivi ne illustreranno l'impiego nella definizione e nella misura di un indice di PQ.



Capitolo 2

In questo capitolo viene inizialmente descritta la logica fuzzy nell'ottica di definire un'architettura concettuale al calcolo di un indice sintetico di PQ. Vengono in seguito illustrate in dettaglio le caratteristiche del sistema di inferenza fuzzy che costituisce lo strumento matematico mediante il quale è stata possibile la valutazione dell'indice. Per semplificare la trattazione viene inoltre introdotto, a titolo di esempio, un semplice sistema di inferenza fuzzy.



2.1 Logica Fuzzy

La teoria degli insiemi fuzzy e la logica fuzzy sono state formalizzate da Lotfi Zadeh nel 1965 [22,25,26] per esprimere, in modo matematicamente rigoroso, le stesse potenzialità del ragionamento approssimato, tipico della mente umana. La formale cornice matematica è fornita a questo approccio dalla teoria dell'evidenza, introdotta da Dempster nel 1968 e formalizzata da Shafer, otto anni dopo, come estensione della teoria della probabilità [23].

La logica fuzzy si contrappone a quella aristotelica, secondo la quale una affermazione può assumere soltanto i gradi di verità 1 oppure 0 (rispettivamente vero o falso). La teoria di Zadeh associa invece ad ogni predicato un grado di verità, o valore di appartenenza, che esprime una misura della verità del predicato stesso e che può assumere tutti i valori tra 0 ed 1 compresi; per essa non valgono dunque i principi aristotelici di non contraddizione e del terzo escluso. Per questa ragione, la teoria degli insiemi fuzzy (o a contorni sfumati) si configura come estensione di quella classica degli insiemi.

La teoria ha trovato immediata applicazione nella trattazione dei sistemi complessi, per i quali, date le limitate informazioni disponibili, il modello matematico può essere ottenuto solo ammettendo un certo grado di incertezza. Questi sistemi sono solitamente caratterizzati da una significativa incertezza di modello.

Un primo vantaggio nell'utilizzo della logica fuzzy rispetto agli approcci deterministici sta proprio nel fatto che è possibile tenere conto dell'impatto dell'incertezza di modello sul risultato finale.

Inoltre, secondo recenti studi [27, 38], facendo ricorso alla teoria dell'evidenza è possibile propagare attraverso il modello l'incertezza di misura da cui sono sempre affetti i dati sperimentali.

Secondo quanto detto, lo stesso impianto matematico è dunque in grado di rappresentare e valutare correttamente entrambe le tipologie di incertezza, fornendo un approccio completo alla loro valutazione e propagazione.

Il riscontro pratico della teoria di Zadeh è costituito dai sistemi di inferenza fuzzy, dall'inglese Fuzzy Inference Systems (FIS), che rappresentano la procedura grazie alla quale è possibile, partendo da singoli valori numerici delle grandezze di ingresso, ottenere un ben definito singolo valore per la grandezza di uscita.

2.2 Sistemi di Inferenza Fuzzy: definizioni preliminari

L'inferenza fuzzy è il processo di elaborazione che permette di mappare le grandezze di ingresso considerate su quelle di uscita, usando la logica fuzzy.

Diversi metodi sono ora disponibili in letteratura per realizzare questa mappatura. Nel seguito di questo lavoro si farà riferimento a quello originariamente proposto da Mamdani nel 1974 [28], perché è sembrato quello che coniuga in modo ottimale l'immediatezza e la relativa semplicità dell'impianto tecnico con l'efficacia dei risultati forniti.

Gli strumenti logico-matematici utilizzati sono le funzioni di appartenenza, le operazioni logiche e le regole linguistiche.

- Una funzione di appartenenza, dal termine inglese "*Membership Function*" (MF), è una funzione che associa ad ogni punto nello spazio dell'ingresso del sistema un valore di appartenenza, compreso tra 0 ed 1, ad uno o più insiemi fuzzy. Lo spazio dell'ingresso, indicato come "*universo del discorso*", definisce l'insieme di tutti i valori che un ingresso può assumere. All'interno dell'universo del discorso vengono definiti gli insiemi dei possibili valori

attribuibili ad una determinata proprietà. Per esempio, se si considera come universo del discorso tutte le persone e le si vuole caratterizzare sulla base dell'altezza, è possibile definire un insieme di valori "alto" a cui è associata una funzione che indica il grado in cui ogni persona è alta (fig. 1); la curva esprime la valutazione soggettiva della condizione di "alto".

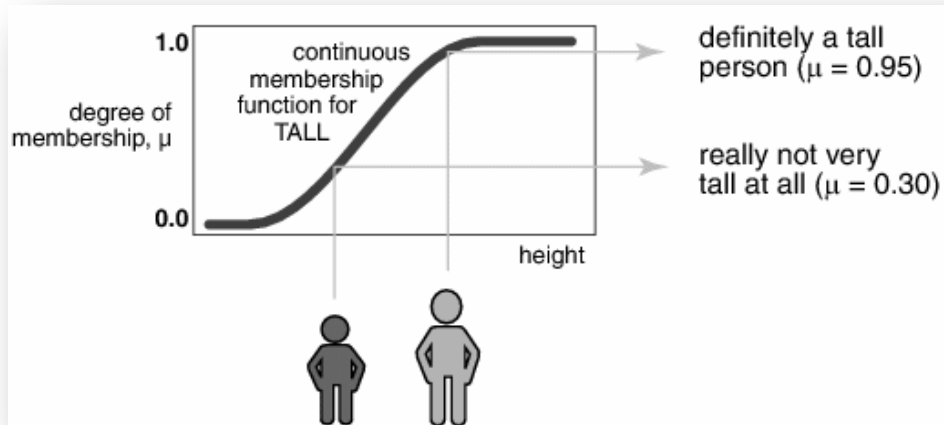


Figura 1: MF "Alto"

Il processo che associa ad ogni ingresso numerico un valore di appartenenza è detto fuzzificazione. Il valore di appartenenza di una certa persona alla funzione che definisce la caratteristica "alto", è ottenibile rilevando il valore che la funzione stessa presenta sull'asse delle ordinate in corrispondenza dell'altezza della persona, posta sull'asse delle ascisse.

Le funzioni di appartenenza possono assumere ogni andamento; per convenzione le più usate sono quelle a tratti lineari (triangolari o trapezoidali) (fig. 2) o quelle gaussiane (fig. 3).

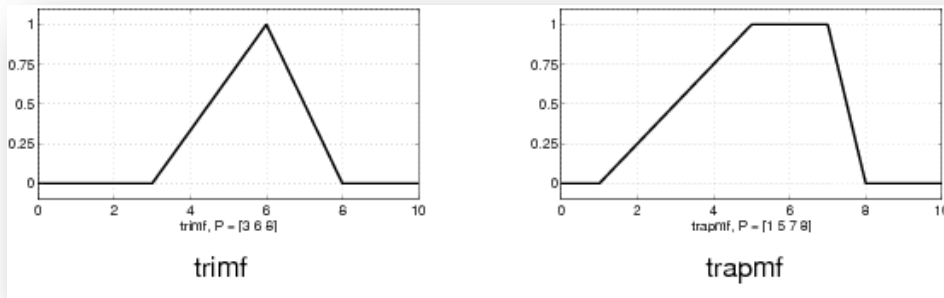


Figura 2: MF lineari

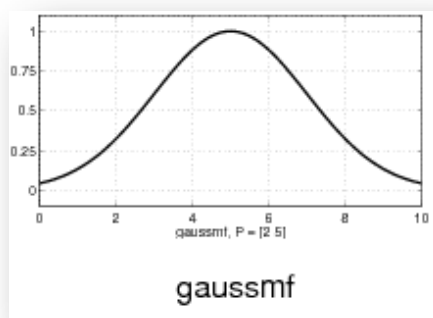


Figura 3: MF gaussiana

- L'inferenza fuzzy fa uso delle operazioni logiche comuni, "AND", "OR", "NOT". Al contrario della logica booleana, il ragionamento logico fuzzy deve essere consistente per ogni valore di appartenenza compreso tra 0 ed 1. Per questa ragione le funzioni logiche "AND", "OR", "NOT", vengono reinterpretate rispettivamente come minimo, massimo e complementare rispetto ad 1 delle MF, come indicato in figura 4.

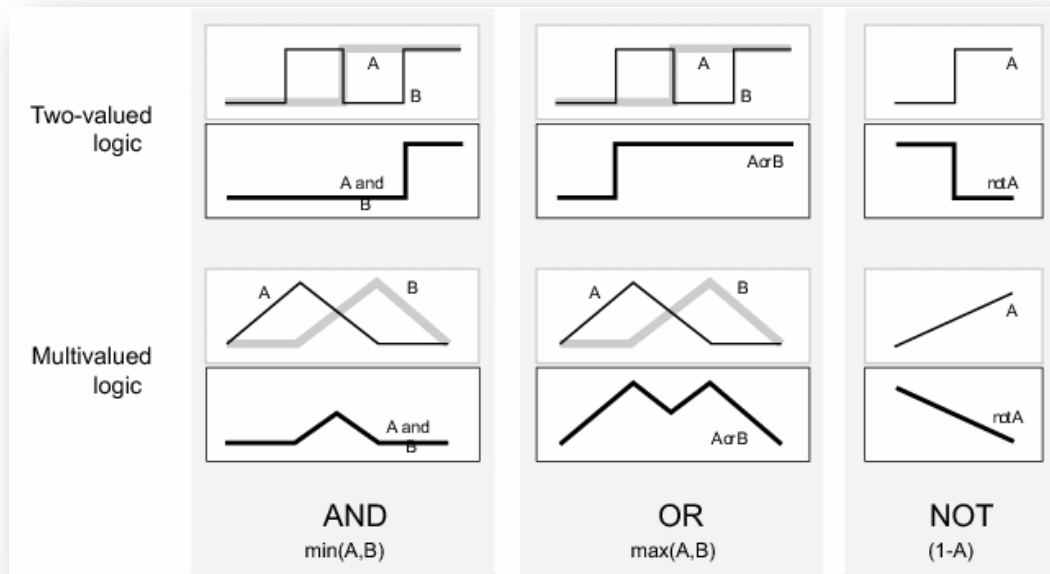


Figura 4: Confronto logica tradizionale logica fuzzy

Correttamente, i risultati delle operazioni logiche in corrispondenza di 0 ed 1 sono gli stessi per la logica booleana e per quella fuzzy.

- Mentre le funzioni di appartenenza e gli operatori fuzzy definiscono rispettivamente la descrizione di una caratteristica (ad esempio "alto") e la connessione tra le varie caratteristiche (ad esempio "alto" e "magro"), la relazione tra ingressi ed uscite del FIS è definita da condizioni del tipo se-allora.

Le regole fuzzy hanno una forma ben definita:

SE (ingresso x) è (*caratteristica $X1$*), ALLORA (uscita y) è (*caratteristica $Y1$*)

La parte iniziale, in cui è posta la condizione "SE ..." è chiamata *antecedente* o *premessa*. La parte finale, in cui è collocato il periodo "ALLORA ..." è invece detta *conseguente* o *conclusione*.

Ciascuna regola può avere uno o più antecedenti ed un solo conseguente. Gli antecedenti possono essere connessi mediante l'operatore logico "E" oppure "O".

Nell'esempio seguente è utilizzato l'operatore "E":

SE (ingresso x) è (*caratteristica X2*) E (ingresso z) è (*caratteristica Z1*), ALLORA
(uscita y) è (*caratteristica Y2*)

Ad ogni regola fuzzy è solitamente associato un peso (se non è associato si intende unitario). Il peso determina ovviamente quanta influenza ha una determinata regola sull'uscita, nei confronti delle altre.

2.3 Sistemi di Inferenza Fuzzy: metodologia di progettazione

Per facilitare la comprensione della metodologia di progettazione di un FIS, la spiegazione che segue farà riferimento ad un semplice esempio di sistema di inferenza fuzzy: un sistema per la determinazione dell'importo della mancia da lasciare al ristorante.

Per la progettazione di un FIS vengono inizialmente definite le variabili da utilizzare come ingresso del sistema per la determinazione di una certa variabile di uscita, o più di una. Le variabili utilizzate come ingresso sono quelle che possono ragionevolmente avere maggiore influenza sulla variabile di uscita. Non è certamente possibile includere tutte le variabili comprendendo quelle che presentano una minima influenza sull'uscita. Infatti, la necessità di descrivere un certo fenomeno in modo accurato, utilizzando quindi un numero elevato di ingressi, si scontra con la necessità di non compromettere la semplicità di progettazione e gestione del FIS e la

sua efficienza computazionale; queste caratteristiche verrebbero infatti meno dovendo definire un elevato numero di regole risultante dalle numerose combinazioni possibili tra le caratteristiche degli ingressi.

Per l'esempio considerato, le variabili di ingresso impiegate possono essere costituite dal *servizio* reso dal ristorante e dal *cibo* servito; è ovvio che numerose altre variabili possono essere prese in considerazione, quali la *raffinatezza* del ristorante o la *cordialità* del cameriere, etc. . È evidente che, per questo esempio, tale scelta deriva da considerazioni personali.

La singola variabile d'uscita è ovviamente costituita dall'importo della *mancia*.

Devono essere in seguito definite le funzioni di appartenenza relative a tutte le caratteristiche con le quali si vuole mappare ciascuna variabile, comprese quelle di uscita. La scelta di quale tipo di funzione di appartenenza impiegare segue esigenze specifiche del progetto, quali, ad esempio, la massima continuità ai bordi, data dal tipo gaussiano, o la semplicità di progettazione per il tipo lineare.

Esattamente come accadeva per il numero di ingressi, il numero di funzioni di appartenenza per ogni variabile, corrispondente al numero di caratteristiche analizzate, deve contemporaneamente soddisfare due esigenze contrapposte. Le funzioni progettate devono infatti fornire una mappatura più completa possibile dell'intervallo di variabilità degli ingressi e, nel contempo, non essere di numero elevato per non far crescere a dismisura il numero di regole. Secondo quanto già osservato, la definizione di numerose regole ha effetti decisamente negativi sulla complessità di gestione del progetto stesso e sulla sua efficienza computazionale.

Per ogni variabile, una volta specificato il massimo intervallo di variazione possibile, vengono posizionate nell'universo del discorso le funzioni di appartenenza. Anche in questo caso si seguono esigenze poste dai diversi progetti. Un metodo per effettuare il posizionamento iniziale delle MF degli ingressi è quello di fissare il valore di appartenenza che deve risultare dalla fuzzificazione di un insieme di valori

dell'ingresso; questo è possibile se si identificano particolari valori degli ingressi per i quali il valore di appartenenza è facilmente definibile.

Nell'esempio considerato è possibile definire tre funzioni di appartenenza per il servizio, relativamente alle caratteristiche di *scarso*, *buono* e *eccellente*, due funzioni di appartenenza per il cibo, relativamente alle caratteristiche di *scadente* e *delizioso*, e tre per la mancia, la quale può variare da un minimo del 5% ad un massimo del 20% dell'importo totale, relativamente alle caratteristiche di *modesta*, *media* e *generosa* (fig. 5). Per rappresentare tutte le funzioni di appartenenza comuni, per il servizio sono state selezionate funzioni di tipo gaussiano, per il cibo funzioni di tipo trapezoidale ed, infine, per la mancia funzioni di tipo triangolare.

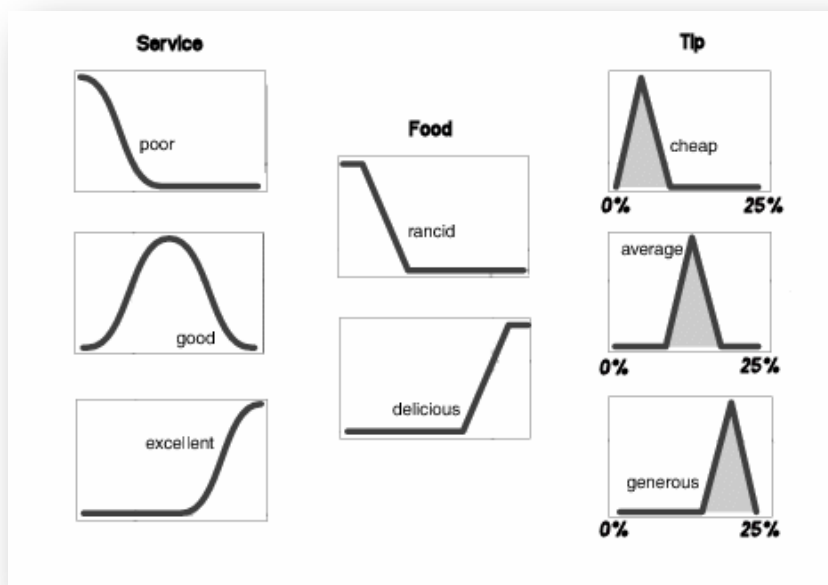


Figura 5: Esempio della mancia, funzioni di appartenenza

Il passo successivo è la definizione delle regole fuzzy che, fungendo da connettore logico tra le variabili di ingresso e di uscita, descrivono di fatto il sistema. A titolo di esempio, è possibile definire per il calcolo della mancia tre regole linguistiche:

1. SE il servizio è *scarso* O il cibo è *scadente*, ALLORA la mancia è *modesta*

2. SE il servizio è *buono*, ALLORA la mancia è *media*

3. SE il servizio è *eccellente* O il cibo è *delizioso*, ALLORA la mancia è *generosa*

In questo caso, gli antecedenti sono stati connessi mediante l'operatore "OR".

Le regole riflettono inizialmente i criteri logici molto semplificati che la mente umana potrebbe utilizzare per calcolare approssimativamente l'importo della mancia. Successivamente, sulla base dei risultati che il sistema fornisce, le regole possono essere ottimizzate per raggiungere dei valori prefissati dell'uscita che il sistema deve ottenere con determinati ingressi; le stesse considerazioni valgono anche per l'ottimizzazione delle funzioni di appartenenza.

Secondo quanto già osservato, le regole raramente possono prendere in considerazione tutte le possibili combinazioni delle caratteristiche degli ingressi. Sta al progettista la scelta delle significative combinazioni da considerare, al fine di ottenere diverse risposte del sistema per determinati valori delle variabili d'ingresso.

2.4 Sistemi di Inferenza Fuzzy: procedura operativa

A seguito della definizione delle variabili di ingresso ed uscita, delle relative MF e delle regole fuzzy, è possibile analizzare la procedura operativa mediante la quale viene implementato un FIS.

Ancora una volta, si fa riferimento all'esempio di calcolo della mancia.

Nello schema concettuale di figura 6 sono riassunti tutti i passi della procedura, costituiti dalla:

- Valutazione degli ingressi mediante le funzioni di appartenenza (*Fuzzify Inputs*)
- Valutazione in parallelo delle regole (*Apply Fuzzy Operators e Apply Implication Method*)
- Aggregazione dei risultati delle regole (*Aggregate all Outputs*)
- Espressione dell'uscita mediante un singolo valore (*Defuzzify*)

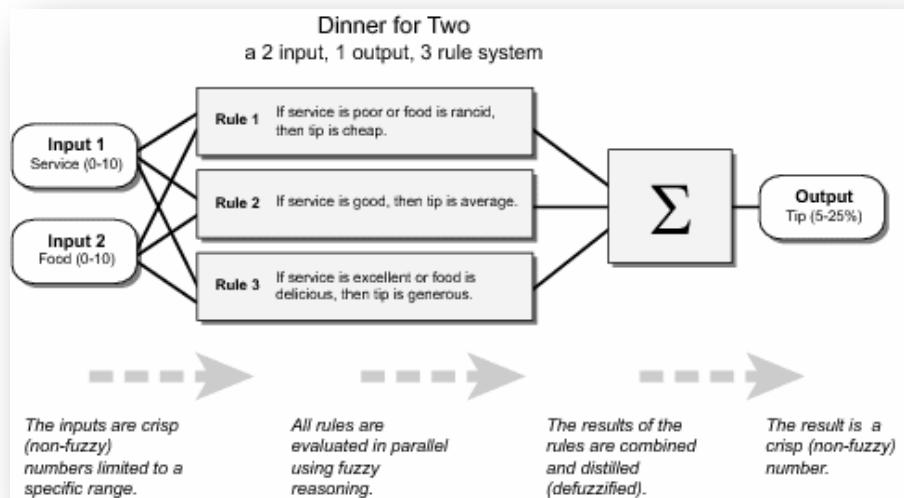


Figura 6: Esempio della mancia, schema concettuale

Ciascuno di questi passi viene descritto in dettaglio, con esplicito riferimento all'esempio del calcolo della mancia.

1. Fuzzify Inputs

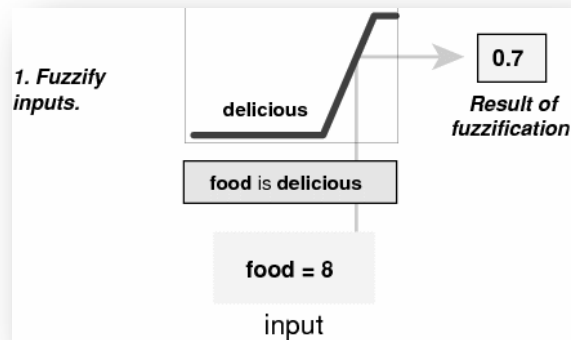


Figura 7: Esempio della mancia, Fuzzify Inputs

Questa fase preliminare consiste nella determinazione del grado di appartenenza ad una caratteristica di un dato ingresso. La figura 7 riporta la procedura di fuzzificazione ed il suo risultato per un valore dell'ingresso *cibo* pari a 8/10, effettuata per la caratteristica *delizioso*. Per completare il passo è necessario calcolare altri quattro valori di appartenenza: tre valori corrispondenti alle tre caratteristiche del *servizio* ed il restante valore relativo alla caratteristica "*scadente*" del cibo.

2. Apply Fuzzy Operators

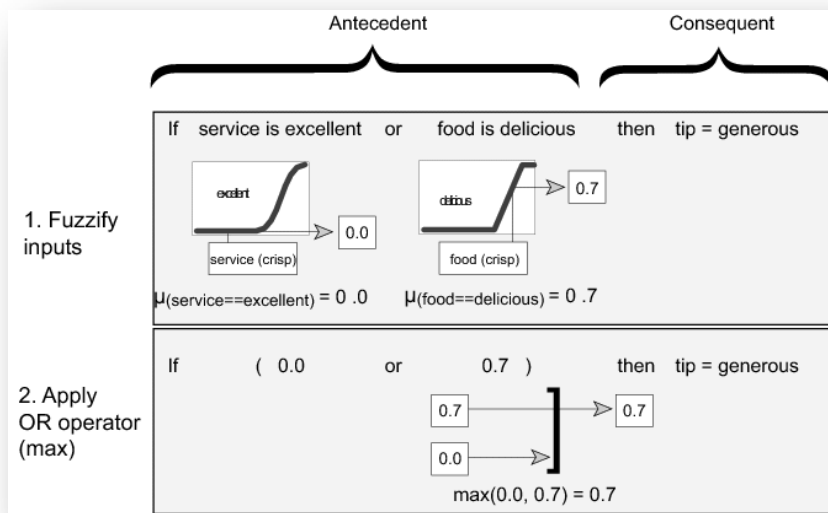


Figura 8: Esempio della mancia, Apply Fuzzy Operators

Se l'antecedente della regola ha due o più condizioni, è necessario applicare, tra i due o più corrispondenti risultati del passo precedente, uno degli operatori logici descritti. In figura 8 è mostrata la procedura di calcolo di questo passo per la terza regola dell'esempio della mancia. L'operatore logico utilizzato nell'esempio è "OR", costituito nella pratica dall'operatore "MAX".

I valori di calcolati al passo precedente indicano che il servizio non è risultato eccellente ($\mu_{(\text{service}=\text{excellent})}=0$), mentre il cibo è risultato "abbastanza delizioso" ($\mu_{(\text{food}=\text{delicious})}=0.7$).

Come si può vedere dalla figura, utilizzando l'operatore logico "OR", la valutazione del passo per la terza regola può fornire un valore elevato ($\mu_{(\text{tip}=\text{generous})}=0.7$), anche se il servizio non è risultato affatto eccellente.

Questo passo deve essere valutato per tutte le restanti regole che presentano un numero di antecedenti superiore all'unità.

3. Apply Implication Method



Figura 9: Esempio della mancia, Apply Implication Method

L'ingresso di questo passo è il singolo valore ottenuto dal passo precedente. Per ciascuna regola, questo valore viene utilizzato per modificare opportunamente la funzione di appartenenza dell'uscita a cui la regola stessa fa riferimento; ad esempio, per la terza regola viene modificata la funzione di appartenenza "generosa" relativa alla mancia.

Vari operatori possono essere utilizzati in questo passo, come il *minimo* ("MIN") ed il *prodotto* ("PROD") che rispettivamente trancano e scalano la funzione di appartenenza.

Dato che nell'esempio è impiegato l'operatore "MIN", la funzione di appartenenza "generosa" viene troncata al valore ottenuto dal passo precedente, in questo caso pari a 0.7 (fig.9).

Questa procedura deve essere ripetuta per ciascuna regola.

4. Aggregate all Outputs

In questo passo, tutte le funzioni di appartenenza, ottenute al passo precedente, vengono unite in una singola funzione. Gli operatori più comuni utilizzati per questa operazione sono il *massimo* ("MAX") e la *somma* ("SUM").

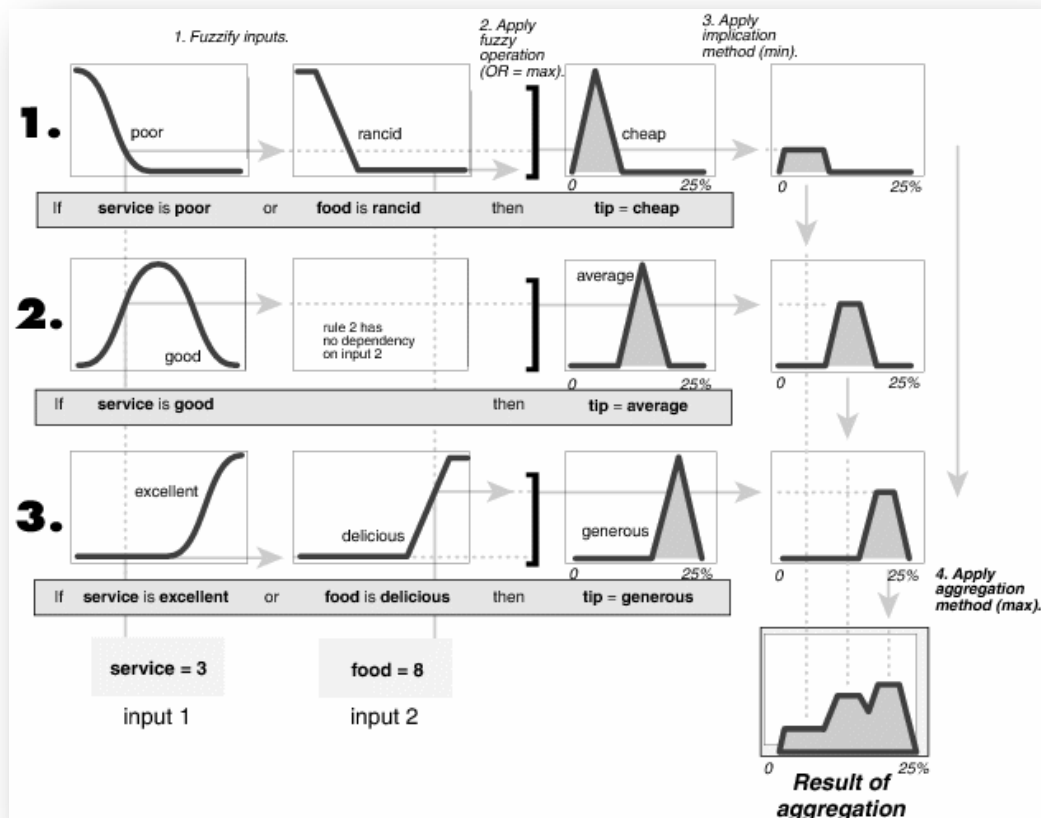


Figura 10: Esempio della mancia, Aggregate all Outputs

In figura 10 è riportata la procedura di calcolo della superficie aggregata secondo l'operatore "MAX", insieme alla valutazione dei precedenti passi per le tre regole, per l'esempio considerato.

Analizzando la forma della superficie risultante è già possibile dedurre che, con i valori degli ingressi considerati, il metodo suggerisce di lasciare una mancia vicina alla caratteristica *media*.

5. Defuzzify

L'uscita del passo precedente può già rappresentare l'uscita del FIS, visto che fornisce una indicazione grafica sui possibili valori attribuibili alla grandezza di uscita.

Per tutti i casi in cui si rende necessario esprimere l'uscita mediante un singolo valore, è necessario applicare un procedimento detto defuzzificazione.

Esistono numerosi metodi per ottenere il valore ritenuto più rappresentativo del fuzzy set risultante in varie condizioni considerate. Il metodo più diffuso, detto "centroide", restituisce il baricentro della figura. Dato che questo è quasi sempre il valore più rappresentativo di una figura, si capiscono le ragioni della sua diffusione.

Altri metodi restituiscono, ad esempio, la media dei valori massimi, il più grande dei valori massimi o il più piccolo dei valori massimi, della figura ottenuta al passo precedente.

Il metodo di defuzzificazione utilizzato nell'esempio è proprio il "centroide". Il baricentro della figura corrisponde ad una mancia pari al 16.7% dell'importo totale del conto.

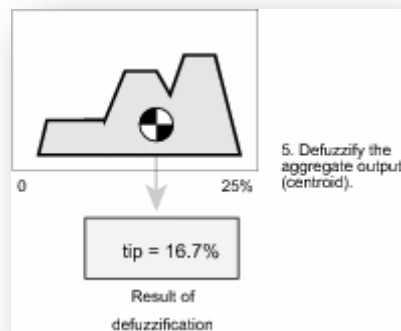


Figura 11: Esempio della mancia, Defuzzification

L'inferenza fuzzy descritta può dunque costituire una innovativa modalità operativa di calcolo di un indice di PQ, proprio per la sua capacità di descrivere un sistema complesso secondo gli schemi tipici del ragionamento umano.

Un punto critico dei sistemi di inferenza fuzzy, quando applicati alle misure, è che non consentono di valutare l'incertezza di misura secondo quanto prescritto dalla Guida all'Espressione dell'Incertezza di Misura (GUM) [29,30]. È però disponibile in letteratura una proposta [31] di modifica del FIS tradizionale di Mamdani che consente di ottenere, in uscita dal FIS modificato e partendo dall'incertezza dichiarata sui valori in ingresso, anche il valore di incertezza sul dato di uscita.

Applicando l'inferenza fuzzy si è quindi virtualmente in grado di risolvere i problemi evidenziati al termine del precedente capitolo.

Nel prossimo capitolo si partirà quindi dall'analisi di un FIS tradizionale per la valutazione di un indice di PQ. Una volta verificatane l'efficacia, si passerà all'implementazione del FIS modificato per la valutazione dello stesso indice insieme alla sua incertezza.



Capitolo 3

Nel terzo capitolo vengono inizialmente definite la rete elettrica sulla quale è stata testata la metodologia di misura dell'indice sintetico di PQ e le simulazioni preliminari sulla base delle quali è stato progettato e perfezionato il Fuzzy Inference System. In seguito viene illustrata la metodologia di progettazione seguita.



3.1 Rete di test

Al fine di ottenere una validazione teorica dell'indice di PQ e del relativo sistema di misura che verranno definiti dettagliatamente nei prossimi paragrafi, sono state condotte delle simulazioni di funzionamento di una rete elettrica industriale, mediante il software Simulink®.

Il modello preso come riferimento è quello proposto dalla commissione IEEE sulla simulazione e modellazione dei disturbi armonici [32]. Il modello è stato opportunamente modificato per tenere conto dell'impedenza di magnetizzazione dei trasformatori [33].

Dato che la rete proposta dall'IEEE è equilibrata, è possibile rappresentarla con il solo schema unifilare (fig. 7) e riportare i soli dati relativi alla sequenza diretta, riferiti alla frequenza di 60 Hz e alla tensione nominale di 13.8 kV del sistema di distribuzione.

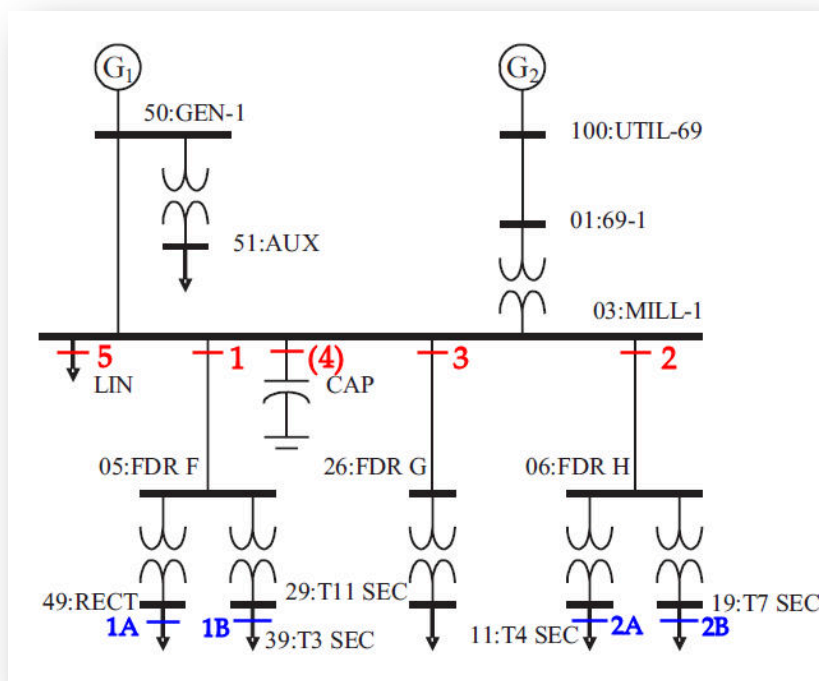


Figura 12: Rete industriale di test proposta da IEEE

La rete, comprendente 13 sbarre, è rappresentativa di un impianto industriale di medie dimensioni; l'alimentazione è fornita da una rete di potenza prevalente a 69 kV, rappresentata da G2; è inoltre presente un generatore di zona G1, direttamente connesso alla distribuzione locale operante a 13.8 kV. Il generatore locale è caratterizzato da un'impedenza sub-transitoria $R_{G1}+jX_{G1}=0.04+j1.37 \Omega$, mentre l'impedenza equivalente alle sbarre di connessione della rete di potenza prevalente, determinata mediante la potenza di cortocircuito ed il rapporto X/R , risulta pari a $R_{G2}+jX_{G2}=0.21+j4.75 \Omega$.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i dati relativi a linee, trasformatori e carichi.

Da	A	$R_L [\Omega]$	$X_L [\Omega]$
100:UTIL-69	01:69-1	0.03	0.06
03:MILL-1	50:GEN-1	0.02	0.05
03:MILL-1	05:FDR F	0.01	0.02
03:MILL-1	26:FDR G	0.03	0.025
03:MILL-1	06:FDR H	0.02	0.02

Tabella 2: Dati linee

Da	A	Tensione [kV]	$R_T [\Omega]$	$X_T [\Omega]$	R_m	X_m
01:69-1	03:MILL-1	69:13.8	0.07	1.01	7.47	0.98
50:GEN-1	51:AUX	13.8:0.48	1.31	7.20	52.25	6.77
05:FDR F	49:RECT	13.8:0.48	1.21	6.76	63.24	8.00
05:FDR F	39:T3 SEC	13.8:4.16	0.90	6.57	45.22	5.97
26:FDR G	29:T11 SEC	13.8:0.48	1.20	7.21	52.25	6.77
06:FDR H	11:T4 SEC	13.8:0.48	1.15	6.90	52.25	6.77
06:FDR H	19:T7 SEC	13.8:2.4	0.27	2.78	20.42	3.12

Tabella 3: Dati trasformatori

Bus	P_{load} [kW]	Q_{load} [kVAr]
03:MILL-1	2240	2000
51:AUX	600	530
39:T3 SEC	1310	1130
11:T4 SEC	370	330
19:T7 SEC	2800	2500
29:T11 SEC	810	800
49:RECT	1150	290

Tabella 4: Dati carichi

La rete è inoltre dotata, sulla sbarra principale, di un banco di condensatori di rifasamento di potenza pari a 6000 kVar; le resistenze serie e di dispersione del banco sono trascurate nel modello.

Nella configurazione originale dell'IEEE la rete aveva un unico carico distortore collegato in 49:RECT, costituito da un raddrizzatore a ponte di Graetz trifase. Nel seguito di questo lavoro vengono considerati carichi distortori, costituiti da ponti trifasi controllati e non, collegati a nodi differenti e simultaneamente connessi a più nodi.

La simulazione è condotta in modo tale da determinare le forme d'onda di tensione in tutti i nodi della rete e quelle di corrente per tutte le linee.

È possibile analizzare la rete a due livelli distinti: a livello superiore la sbarra "03:MILL-1" è considerata come PCC e l'indice viene valutato per tutte le linee alimentate dalla sbarra, tranne quella che collega il banco di condensatori il quale è stato concettualmente incluso nel lato sorgente. A livello inferiore i PCC considerati sono invece le sotto-sbarre "05:FDR F" e "06:FDR H"; anche per questo caso, l'indice viene valutato per tutte le linee alimentate dalle due sotto-sbarre.

In questo modo sarà possibile avere un quadro completo sull'origine e sull'intensità dei disturbi e su quale carico soffra maggiormente dell'inquinamento.

Le simulazioni verranno condotte per svariate configurazioni della rete, considerando uno o più carichi distortenti, di potenza variabile e collegati, in ciascuna simulazione, a nodi differenti della rete.

All'interno della rete di test, sono state collocate varie sezioni di misura teoriche in corrispondenza di sbarre e/o carichi. Per semplificare la lettura dei risultati, alle varie sezioni di misura sono stati assegnati dei numeri, come indicato in figura 12. Secondo questa nuova numerazione, al livello superiore sono presenti le sezioni dalla uno alla cinque, eccezion fatta per la numero 4, corrispondente al banco di condensatori incluso nel lato sorgente, per il quale non è prevista la sezione di misura; al livello inferiore si trovano le sezioni 1A ed 1B, relative ai carichi collegati alla sbarra 1, e le sezioni 2A e 2B, relative ai carichi collegati alla sbarra 2. Poiché si trova una sezione di misura all'inizio di ogni linea, è possibile utilizzare la medesima numerazione per distinguere le sezioni di misura o, equivalentemente, le linee elettriche.

3.2 Simulazioni preliminari

Il funzionamento della rete elettrica di test è stato simulato sia nella configurazione originale, sia sostituendo uno o più carichi lineari della rete con carichi distortenti costituiti da un ponte raddrizzatore a diodi che alimenta un carico resistivo in corrente continua.

I risultati di queste simulazioni preliminari sono stati utilizzati per identificare gli insiemi fuzzy per le variabili di ingresso ed uscita e le relative MF. In via generale, ogni sbarra o sottosbarra costituisce un sistema indipendente; per questo, i risultati di tali simulazioni portano in generale a definire specifici insiemi fuzzy e MF per ogni sbarra. Come si vedrà dai risultati riportati più avanti, dato che le simulazioni hanno evidenziato che le grandezze di ingresso presentano valori simili per ogni

sbarra e sottosbarra presa in esame, è possibile definire insiemi fuzzy e MF delle variabili di ingresso generali, validi ovvero per tutte le sbarre.

I risultati delle simulazioni preliminari sono stati inoltre utilizzati per individuare un insieme iniziale di regole fuzzy ed in seguito per ottimizzarle osservando l'andamento dell'uscita del sistema fuzzy.

Le simulazioni possono essere divise in gruppi, per ciascuno dei quali si è provveduto a variare le potenza attiva assorbita da un ponte dal 100% al 20% in cinque passi totali.

Per il primo gruppo di simulazioni, definito per semplicità mediante la sigla "T1", è stata utilizzata la configurazione originale della rete con un singolo carico distorcente collegato in 1A (49:RECT). Il valore della potenza al 100% corrisponde alla potenza attiva, in quel nodo, indicata in tabella 4 e pari, nel caso specifico, a 1150 kW. La variazione della potenza è stata ottenuta modificando la resistenza equivalente del carico alimentato in corrente continua dal ponte raddrizzatore, secondo quanto riportato in tabella 5.

<i>P</i> %	100%	80%	60%	40%	20%
<i>P</i> obiettivo [kW]	1150	920	690	460	230
<i>R</i> [Ω]	277.6	351.3	474.4	721.5	1464.4
<i>V</i> _{dc RMS} [V]	17868	17977	18093	18218	18352
<i>V</i> ² / <i>R</i> [kW]	1150.1	919.9	690.0	460.0	230.0

Tabella 5: Dati carico dc del ponte in 1A, "T1"

Per il gruppo di simulazioni "T2" è stato aggiunto, rispetto al caso precedente, un carico distorcente collegato in 2B (19:T7 SEC); è stata quindi variata la potenza attiva assorbita dal ponte in 2B, il cui valore massimo risulta pari a 2800 kW, mantenendo

inalterata e pari al valore massimo quella del ponte in 1A. Le resistenze del carico del ponte a potenza variabile sono riportate in tabella 6, mentre la resistenza di quello del ponte in 1A è mantenuta costante al valore di "T1" al 100%.

<i>P</i> %	100%	80%	60%	40%	20%
<i>P</i> obiettivo [kW]	2800	2240	1680	1120	560
<i>R</i>[Ω]	114.8	145.0	195.5	297.2	604.5
<i>V</i>_{dc RMS}[V]	17931	18020	18121	18245	18398
V^2/R [kW]	2800.7	2239.5	1679.6	1120.1	559.9

Tabella 6: Dati carico dc del ponte in 2B, "T2"

È stata effettuata un'ultima singola simulazione preliminare, denominata "T3", mantenendo collegato il carico distorto in 2B ed aggiungendone uno in 2A (11:T4 SEC), di potenza pari a 370 kW; in questo modo si è ottenuta una configurazione di rete dotata di due carichi distorti, di potenza sensibilmente differente, entrambi collegati alla sbarra 2. La resistenza collegata al ponte in 2A è indicata in tabella 7, mentre quella collegata al ponte in 2B è la stessa del caso "T2" al 100%.

<i>P</i> %	100%
<i>P</i> obiettivo [kW]	370
<i>R</i>[Ω]	901
<i>V</i>_{dc RMS}[V]	18258
V^2/R [kW]	370.0

Tabella 7: Dati carico dc del ponte in 2A, "T3"

3.3 Ingressi del FIS: ξ_{slq}

Nella costruzione dell'inferenza fuzzy è possibile ipotizzare, in prima battuta, l'impiego degli indici di PQ descritti nel paragrafo 1.4 come ingressi dell'inferenza, la cui uscita sarà un opportuno indice sintetico di PQ.

Il primo ingresso considerato è dunque costituito dall'indice ξ_{slq} .

Il grafico seguente mostra i risultati del calcolo di ξ_{slq} per le simulazioni "T1" e "T2" in funzione della potenza attiva percentuale alla quale opera il ponte raddrizzatore dello specifico gruppo di simulazioni.

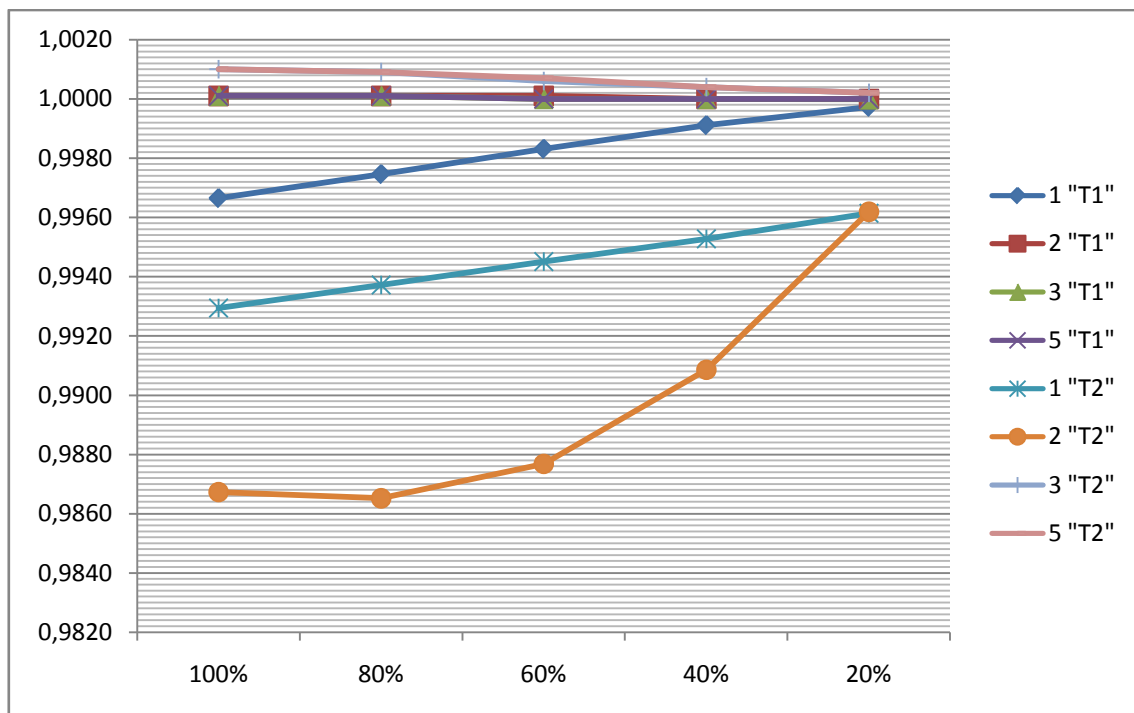


Figura 13: ξ_{slq} , simulazioni "T1" e "T2", livello superiore

Dato che la simulazione "T3" è stata condotta per un singolo valore di potenza attiva assorbita dal ponte distorcente, i relativi risultati sono riportati in una tabella.

Linea e simulazione	ξ_{slq}
1 "T3"	1.0020
2 "T3"	0.9875
3 "T3"	1.0006
5 "T3"	1.0006

Tabella 8: ξ_{slq} , simulazione "T3", livello superiore

Le tracce dalla 1 "T1" alla 5 "T1" mostrano i risultati per le linee dalla 1 alla 5 per il primo gruppo di simulazioni preliminari. Alla linea 1 sono correttamente assegnati valori inferiori all'unità che identificano il collegamento dell'unico carico distorcente; tutte le altre linee sono invece viste come leggermente inquinate: l'indice assume infatti valori superiori all'unità.

Analogamente, le tracce dalla 1 "T2" alla 5 "T2" mostrano i risultati per il secondo gruppo di simulazioni. Due linee che generano inquinamento sono identificate, la 1 e la 2; la seconda linea è correttamente identificata come quella che genera disturbi più consistenti per la presenza di un ponte raddrizzatore di potenza maggiore rispetto a quello collegato alla linea 1.

Nell'ultima simulazione, identificata dalle sigle da 1 "T3" a 5 "T3", la linea 2 è contrassegnata come molto inquinante, mentre tutte le altre come inquinate.

Dalla tabella si deduce che l'indice non ha difficoltà ad identificare i carichi inquinanti, ed il loro grado di inquinamento; come si poteva immaginare, al diminuire della potenza attiva del ponte, diminuiscono anche i disturbi introdotti e gli altri carichi risultano meno inquinati. Molto meno nette sono invece le indicazioni a riguardo dei carichi inquinati: i valori dell'indice per questi casi si distaccano infatti molto limitatamente dal valore unitario.

A livello superiore viene dunque identificata correttamente la linea da cui proviene l'inquinamento; risulta però evidente che, per tutte le linee che alimentano una

sottosbarra, è necessario analizzare le grandezze a livello della sottosbarra stessa se si vuole individuare il carico inquinante.

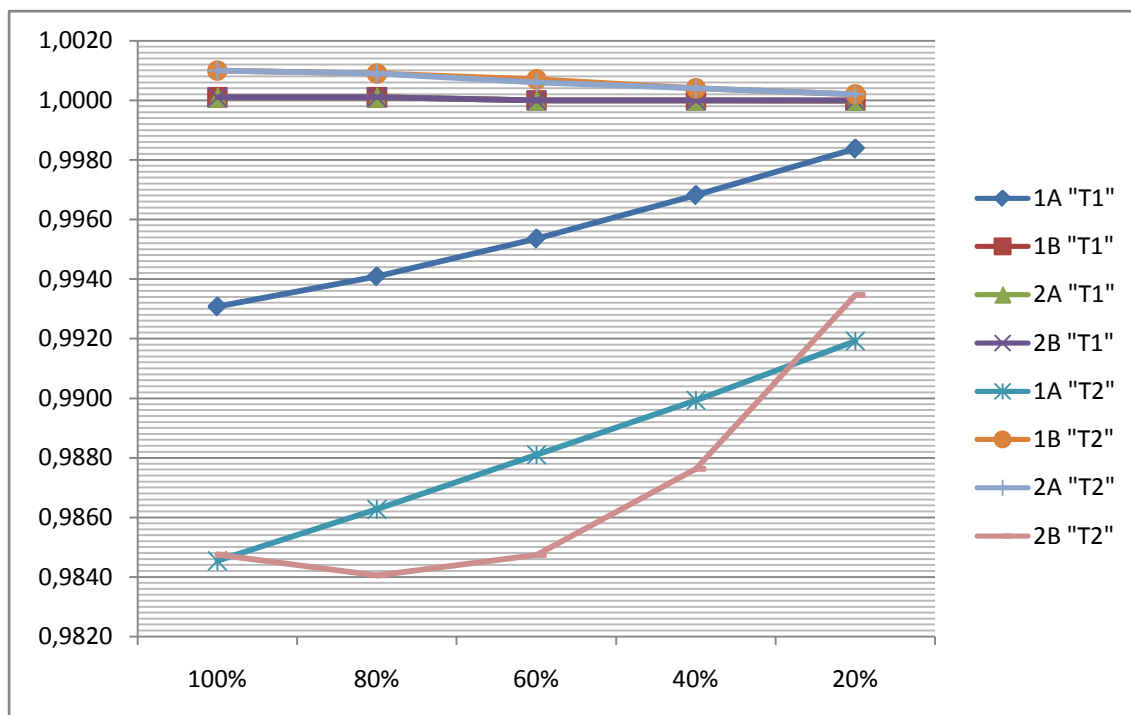


Figura 14: ξ_{slq} , simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore

Linea e simulazione	ξ_{slq}
1A "T3"	1.0033
1B "T3"	1.0006
2A "T3"	0.9870
2B "T3"	0.9875

Tabella 9: ξ_{slq} , simulazione "T3", livello inferiore

Analoghe considerazioni valgono per i risultati relativi al livello inferiore, mostrati in figura 14 ed in tabella 9. I carichi inquinanti 1A "T1", 1A "T2", 2B "T2", 2A "T3" e 2B "T3", sono correttamente identificati, mentre per quanto riguarda i carichi inquinati, la sensibilità dell'indice resta decisamente inferiore.

Secondo quanto già osservato, l'indice assume valori molto simili per il livello superiore e per quello inferiore; è quindi possibile utilizzare gli stessi insiemi fuzzy e MF per entrambi i livelli.

Le MF utilizzate per mappare l'indice ξ_{slq} sono riportate in figura 8.

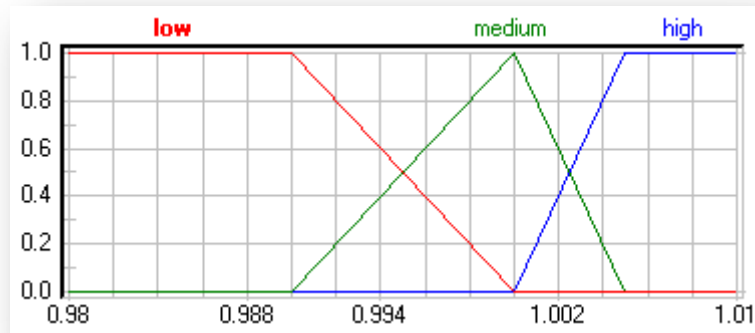


Figura 15: MF relativa all'indice ξ_{slq}

Per semplicità di progettazione, le funzioni di appartenenza disegnate sono del tipo a tratti lineari.

La MF relativa a "medium" è ovviamente centrata sul valore unitario che costituisce il punto neutro dell'indice. Per tutti quei valori di ξ_{slq} che corrispondono ad un valore di appartenenza della caratteristica "medium" diverso da zero, l'indice non è in grado di fornire una netta indicazione a favore dell'ipotesi di carico inquinante (valori nettamente minori di uno) o di carico inquinato (valori nettamente maggiori di uno); in questi casi è opportuno analizzare i valori degli altri ingressi del FIS che verranno definiti più avanti.

Il campo di variabilità relativo a "high" è meno esteso rispetto a quello legato a "low" in quanto l'indice presenta valori molto vicini all'unità nell'identificazione di carichi che subiscono i disturbi.

3.4 Ingressi del FIS: Impiego di ξ_{HGI}

Un secondo ingresso può essere rappresentato dall'indice ξ_{HGI} . Come già osservato, l'incertezza di misura sui flussi di potenza attiva associati alle componenti di corrente può avere un grande impatto sulla valutazione finale dell'indice, dato che può far sì che una o più componenti di corrente vengano associate al sottoinsieme errato di correnti tra I_{EL} ed I_{ES} . Il possibile spostamento di una o più componenti di corrente dalla norma che sta al denominatore a quella che sta al numeratore o viceversa, avrebbe in questo caso un drammatico effetto amplificativo dell'incertezza.

Una possibile soluzione per attenuare questo effetto è quella di utilizzare direttamente come ingressi del FIS il numeratore ed il denominatore dell'indice:

$$\|I_{\Sigma_L}\|^2 = \sum_{h|P_{\Sigma_h} < 0} I_h^2$$

$$\|I_{\Sigma_S}\|^2 = \sum_{h|P_{\Sigma_h} > 0, h \neq +1} I_h^2$$

Nell'insieme I_{ES} non viene presa in considerazione l'armonica fondamentale ($h=1$) poiché è sempre presente ed è di qualche ordine di grandezza superiore alle altre componenti; costituirebbe dunque un semplice offset nel calcolo della norma $\|I_{\Sigma_S}\|^2$.

Se in una sezione di misura si rileva una grande $\|I_{\Sigma_L}\|^2$ ed una piccola $\|I_{\Sigma_S}\|^2$ significa che il carico collegato alla linea corrispondente introduce in rete dei disturbi; si verifica la situazione opposta quando il carico collegato alla linea si comporta come un filtro, subendo i disturbi. Se entrambe le norme risultano elevate significa che è presente un carico distorcente che, per il suo funzionamento normale, assorbe alcune componenti di corrente diverse dalla fondamentale.

Entrambi gli indici sono stati valutati per le simulazioni preliminari descritte sopra.

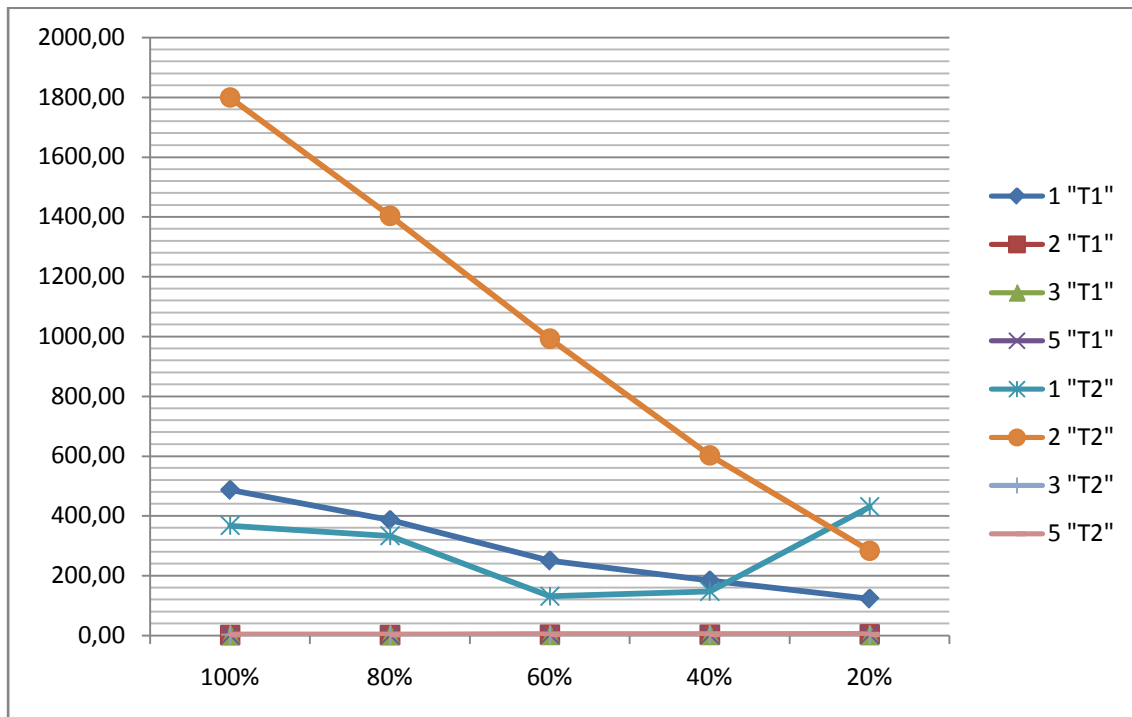


Figura 16: $\|I_{\Sigma_L}\|^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello superiore

Linea e simulazione	$\ I_{\Sigma_L}\ ^2$
1 "T3"	3.11
2 "T3"	2438.80
3 "T3"	2.21
5 "T3"	3.96

Tabella 10: $\|I_{\Sigma_L}\|^2$, simulazione "T3", livello superiore

La figura 16 e la tabella 10 riportano i risultati del calcolo di $\|I_{\Sigma_L}\|^2$ al livello superiore. È evidente che l'indice è perfettamente in grado di riconoscere i carichi inquinanti ed il loro grado di inquinamento decrescente al diminuire della potenza assorbita. Per i carichi non inquinanti l'indice assume sempre valori trascurabili.

Gli analoghi risultati ottenuti per il livello inferiore vengono riportati in figura 17 ed in tabella 11.

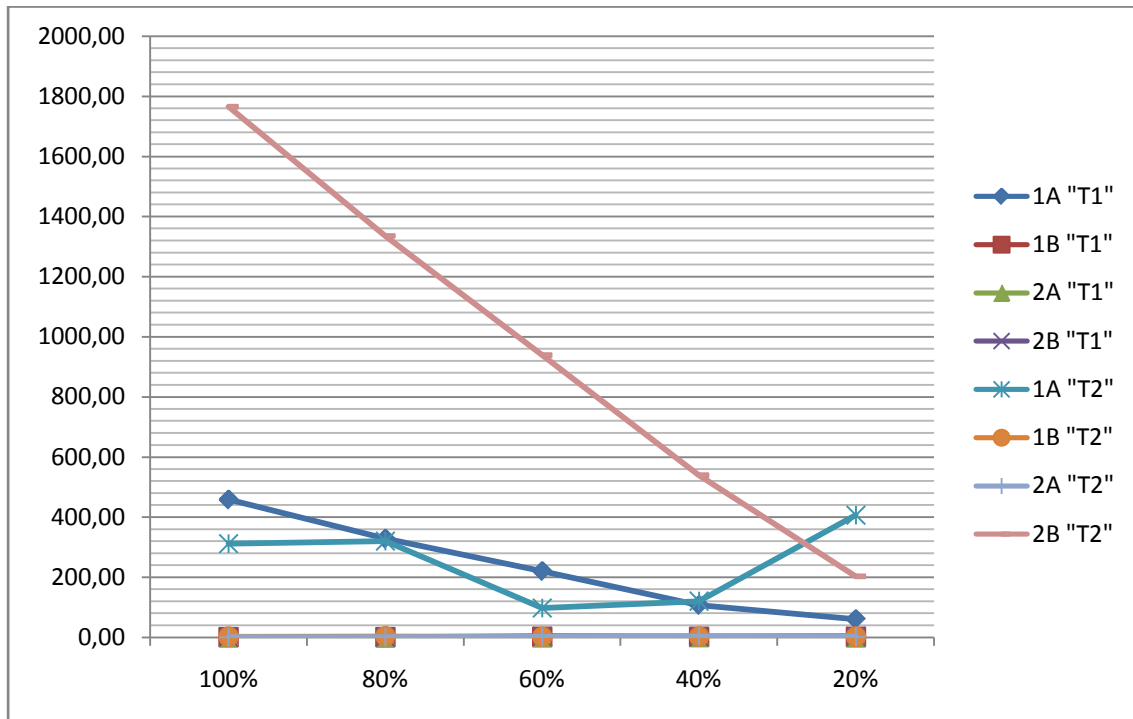


Figura 17: $\|I_{\Sigma_L}\|^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore

Linea e simulazione	$\ I_{\Sigma_L}\ ^2$
1A "T3"	3.06
1B "T3"	3.06
2A "T3"	90.80
2B "T3"	1970.50

Tabella 11: $\|I_{\Sigma_L}\|^2$, simulazione "T3", livello inferiore

Le funzioni di appartenenza, ottenute osservando l'andamento dell'indice $\|I_{\Sigma_L}\|^2$ nei casi evidenziati, sono mostrate in figura 18.

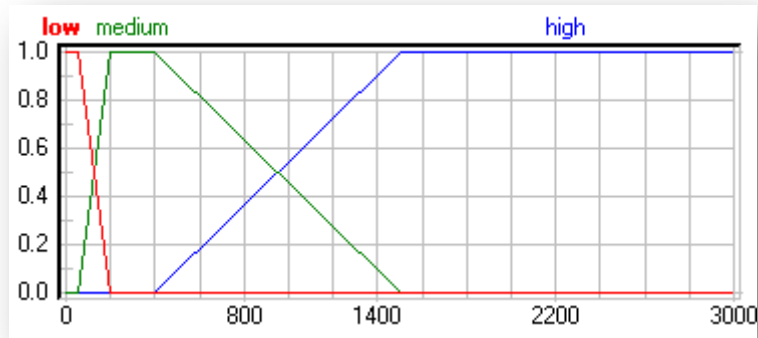


Figura 18: MF relativa all'indice $\|I_{\Sigma_L}\|^2$

La MF relativa a "low" identifica le linee che, secondo l'indice in esame, non stanno sensibilmente introducendo disturbi; le restanti due rilevano il collegamento di un carico distorto e valutano l'intensità dei disturbi introdotti secondo le due caratteristiche "medio" e "alto".

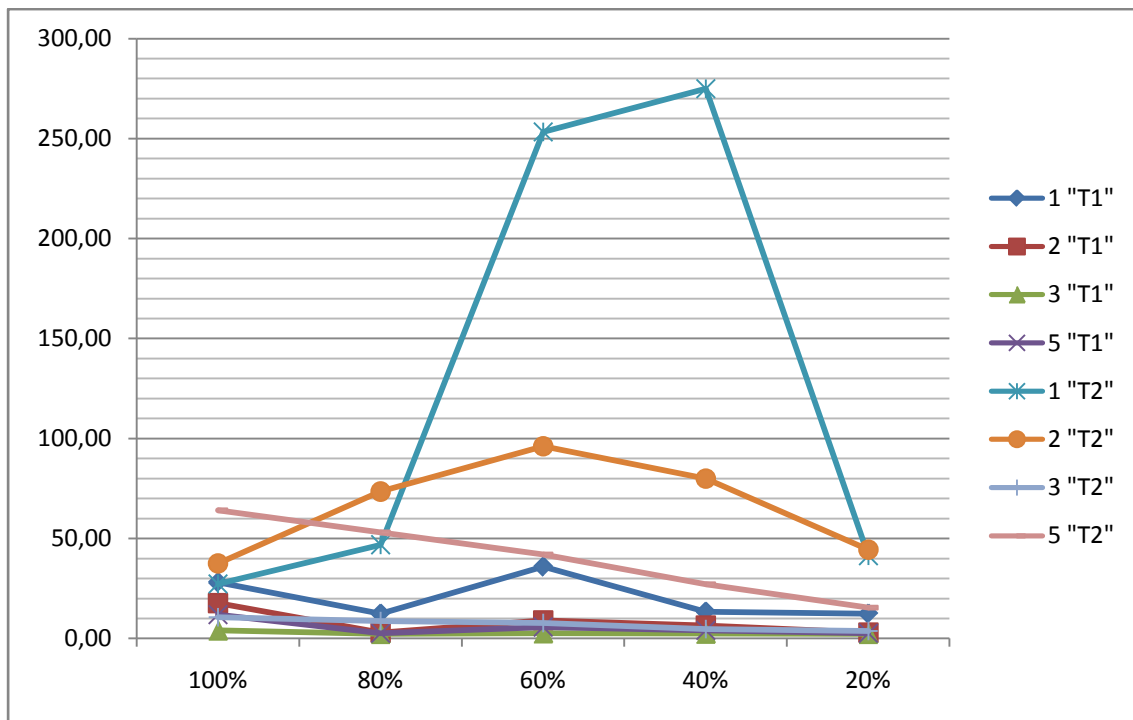


Figura 19: $\|I_{\Sigma_s}\|^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello superiore

Linea e simulazione	$\ I_{\Sigma_s}\ ^2$
1 "T3"	71.02
2 "T3"	23.44
3 "T3"	7.82
5 "T3"	38.84

Tabella 12: $\|I_{\Sigma_s}\|^2$, simulazioni "T3", livello superiore

La figura 19 e la tabella 12 riportano i risultati del calcolo di $\|I_{\Sigma_s}\|^2$ al livello superiore.

L'analisi dei risultati relativi evidenzia una criticità dell'indice $\|I_{\Sigma_s}\|^2$: i carichi che assorbono componenti di corrente maggiori sono proprio quelli distorcenti (1 "T1", 1 "T2", 2 "T2", 2 "T3"). Questa problematica non è dunque specifica dell'indice ma è legata al comportamento elettrico dei carichi distorcenti collegati in rete che assorbono nel loro normale funzionamento consistenti componenti di corrente diverse dalla fondamentale.

Le regole del FIS dovranno quindi tenere conto di questo risultato, in modo da non evidenziare come inquinato un carico fortemente distorcente. Visto che le regole del FIS valuteranno l'indice $\|I_{\Sigma_s}\|^2$ solo per i carichi che secondo gli altri indici sono da ritenere inquinati, è possibile disegnare le sue funzioni di appartenenza, sulla base dei risultati relativi a questo tipo di carichi (fig.20).

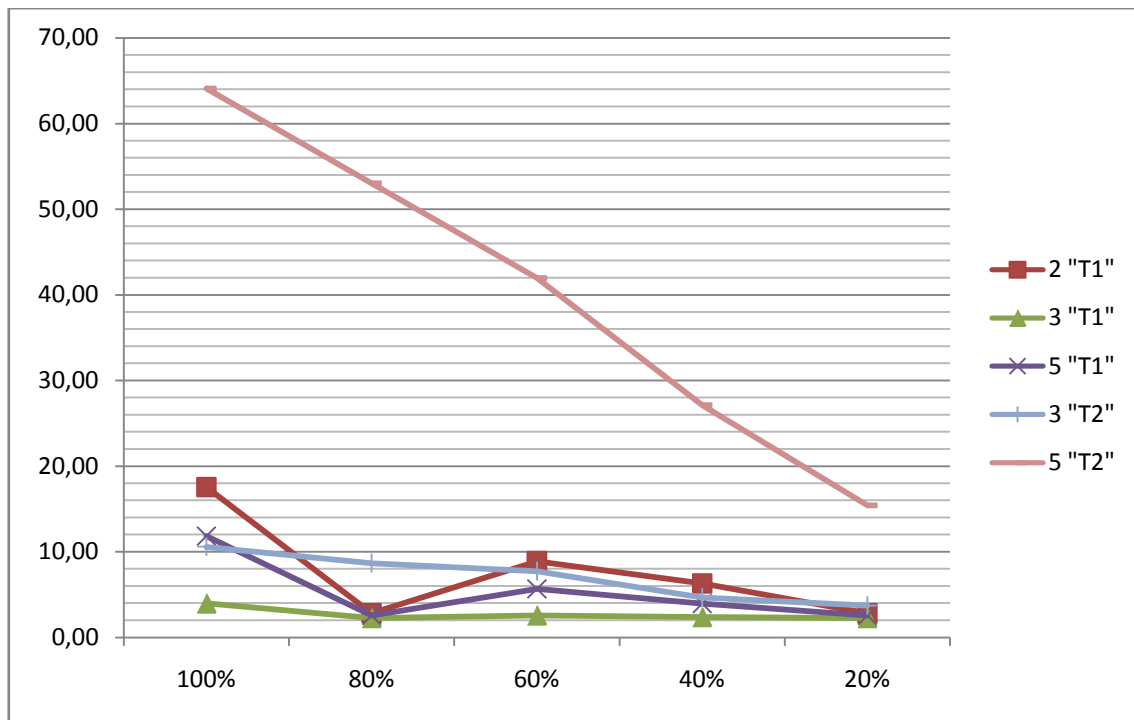


Figura 20: $\|I_{\Sigma_s}\|^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello superiore, solo carichi inquinati

Per i risultati ottenuti per questo indice al livello inferiore, riportati nella seguente figura e nella seguente tabella, valgono le medesime considerazioni sviluppate per il livello superiore. Per questa ragione, la figura 21 riporta i risultati relativi ad i soli carichi inquinati.

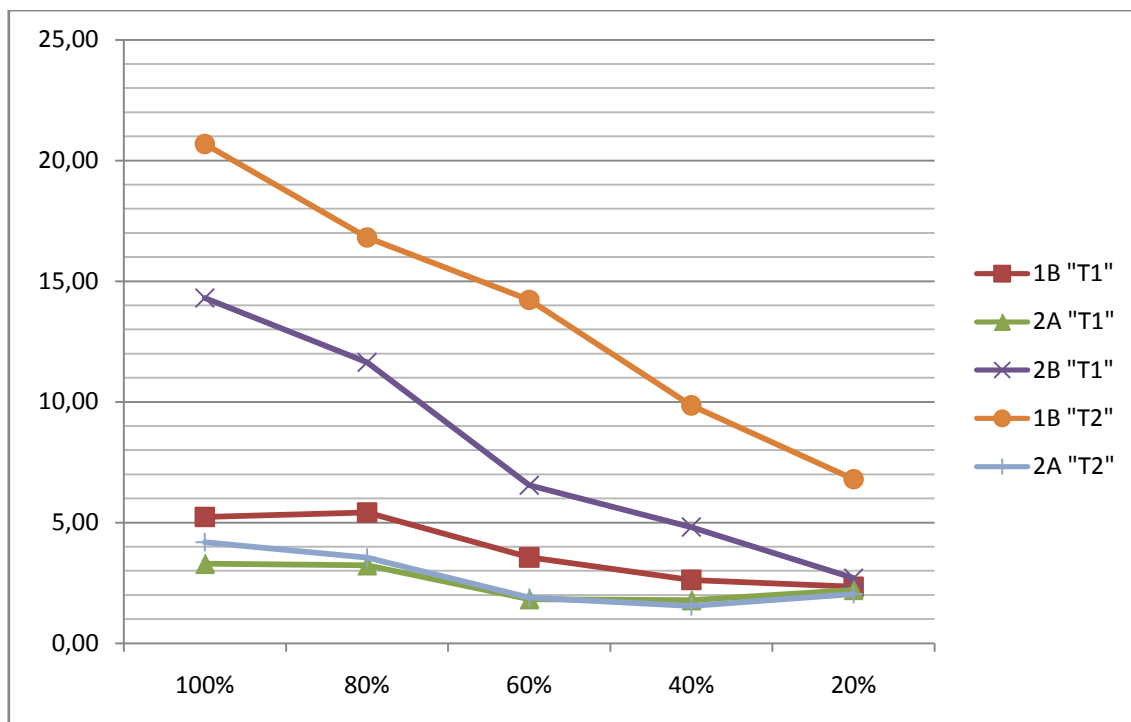


Figura 21: $\|I_{\Sigma s}\|^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore, solo carichi inquinati

Linea e simulazione	$\ I_{\Sigma s}\ ^2$
1A "T3"	28.56
1B "T3"	13.43
2A "T3"	65.01
2B "T3"	81.50

Tabella 13: $\|I_{\Sigma s}\|^2$, simulazione "T3", livello inferiore

Le tre funzioni di appartenenza progettate per questo indice tenendo conto dei soli risultati relativi ai carichi inquinati, sono riportate in figura 22.

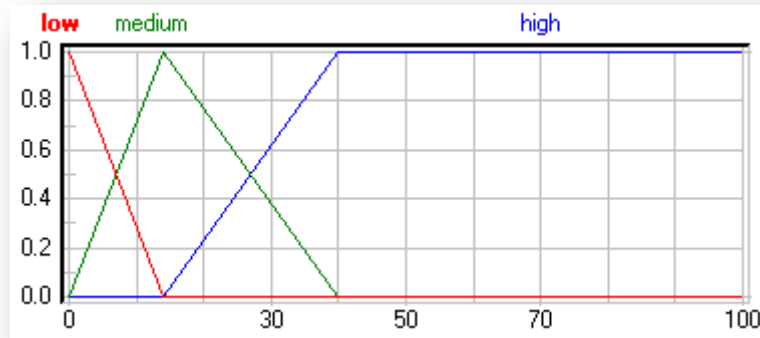


Figura 22: MF relativa all'indice $\|I_{\Sigma_s}\|^2$

Le tre MF identificano il grado di inquinamento passivo di una linea; l'unico carico a non risultare inquinato è quello per cui risulta una $\|I_{\Sigma_s}\|^2$ pari a zero ($\mu_{low}=1$).

3.5 Ingressi del FIS: η^+

Un ulteriore ingresso è dato dal rapporto dei THD globali di tensione e corrente η^+ :

$$\eta^+ = \frac{GTHD_{I^+}}{GTHD_{U^+}}$$

$$GTHD_{I^+} = \sqrt{\frac{I_{\Sigma}^2}{I_{\Sigma+1}^2} - 1} \quad , \quad GTHD_{U^+} = \sqrt{\frac{U_{\Sigma}^2}{U_{\Sigma+1}^2} - 1}$$

In realtà viene considerato come ingresso del FIS il quadrato dell'indice η^+ . Questa scelta è necessaria per evitare la difficoltà di calcolo della radice quadrata che si presenterà solo quando, per il calcolo dell'incertezza, si impiegheranno le variabili random-fuzzy definite nei prossimi capitoli.

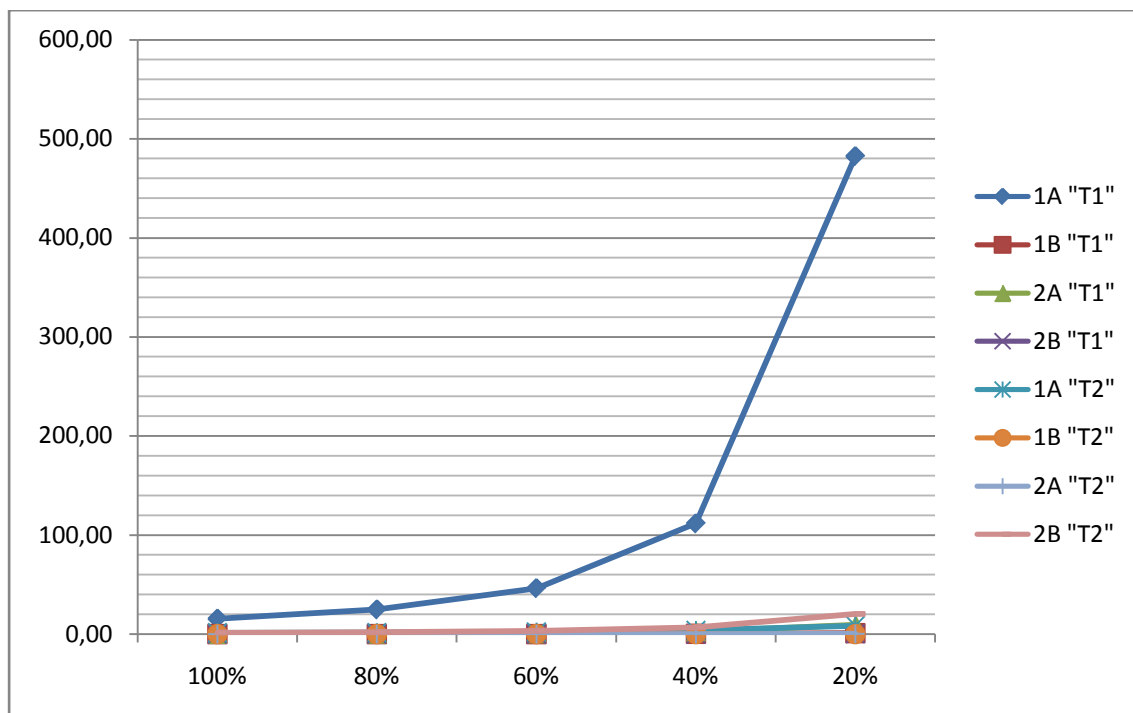


Figura 23: $(\eta^+)^2$, simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore

Linea e simulazione	$(\eta^+)^2$
1A "T3"	0.22
1B "T3"	0.05
2A "T3"	4.21
2B "T3"	2.66

Tabella 14: $(\eta^+)^2$, simulazione "T3", livello inferiore

L'indice è dato dal rapporto di due quantità solitamente molto vicine allo zero, specialmente quando la potenza del carico distorcente si abbassa, facendo così diminuire il *GTHD* di tensione. L'incertezza ha anche in questo caso un effetto notevole, che deve essere tenuto in conto; un minimo errore sulla piccola quantità al denominatore può portare infatti l'indice a valori molto elevati.

È ciò che succede alla linea 1A nella simulazione "T1" (fig. 23). Per una potenza del ponte pari al 20% il $GTHD$ di corrente risulta pari a 8.4% mentre quello di tensione pari a 0.17‰ e l'indice $(\eta^+)^2$ arriva quasi ad assumere il valore 500.

Una strada per superare questo problema è quella di dare un offset unitario ad entrambe le quantità al numeratore e denominatore di $(\eta^+)^2$, allontanandole dallo zero. È importante sottolineare che questa modifica non cambia il valore che l'indice assume se il carico è puramente resistivo, lineare, bilanciato e tempo-invariante, costituito dall'unità.

Si arriva con questa modifica alla definizione di un nuovo indice:

$$\eta_2^+ = \frac{GTHD_{I^+} + 1}{GTHD_{U^+} + 1}$$

$$GTHD_{I^+} + 1 = \frac{I_{\Sigma}^2}{I_{\Sigma+1}^2}, \quad GTHD_{U^+} + 1 = \frac{U_{\Sigma}^2}{U_{\Sigma+1}^2}$$

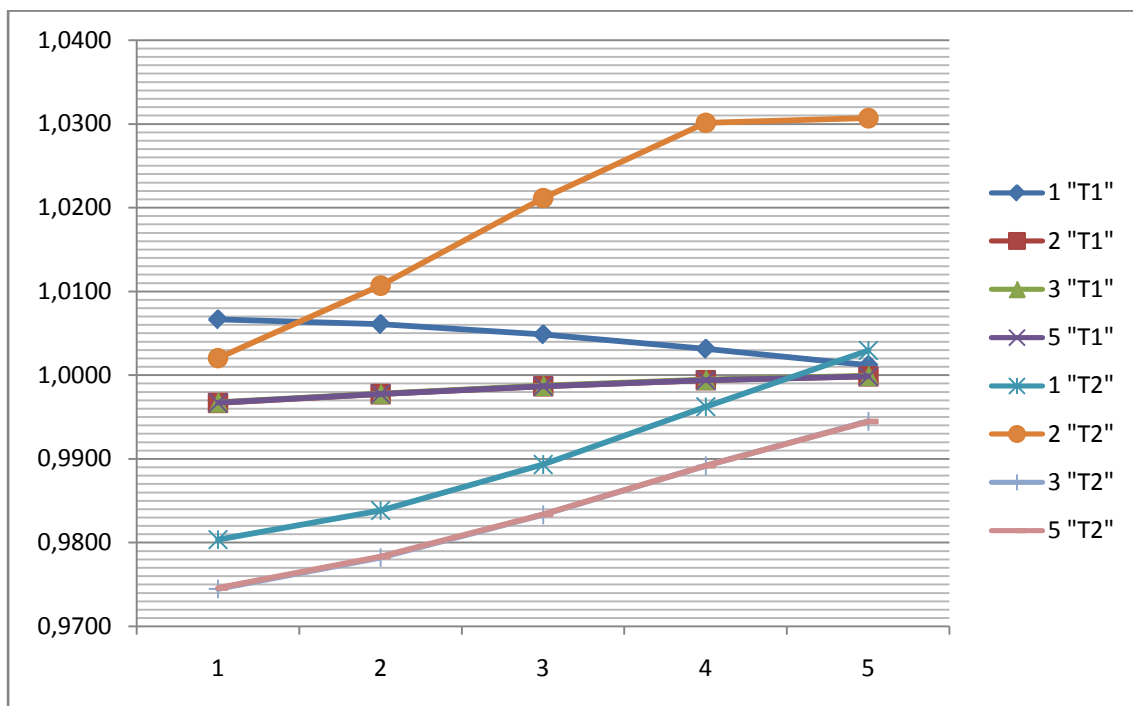


Figura 24: η_2^+ , simulazioni "T1" e "T2", livello superiore

Linea e simulazione	η_2^+
1 "T3"	0.9854
2 "T3"	1.0241
3 "T3"	0.9845
5 "T3"	0.9846

Tabella 15: η_2^+ , simulazione "T3", livello superiore

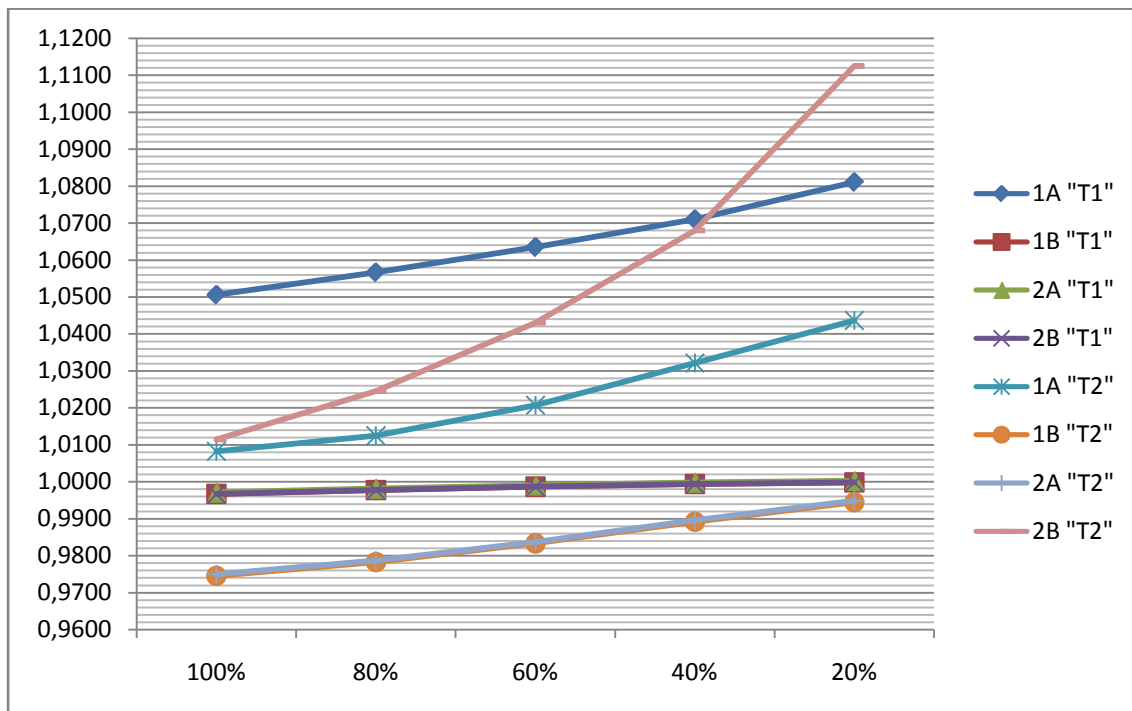


Figura 25: η_2^+ , simulazioni "T1" e "T2", livello inferiore

Linea e simulazione	η_2^+
1A "T3"	0.9872
1B "T3"	0.9845
2A "T3"	1.0512
2B "T3"	1.0269

Tabella 16: η_2^+ , simulazione "T3", livello inferiore

Come si può notare dalla figura 25, la problematica presentata dalla linea 1A nella simulazione "T1" è in questo modo risolta poiché le variazioni del nuovo indice sono contenute in un intervallo limitato.

Dai risultati riportati nelle figure 24 e 25 e nelle tabelle 15 e 16 si osserva che l'indice assegna, quasi sempre correttamente, valori maggiori dell'unità a carichi che iniettano disturbi e valori minori dell'unità a quelli che, al contrario, si comportano come filtri, subendo i disturbi. L'identificazione della direzione dei disturbi non è invece accurata per la linea 1 nella simulazione "T2" che appare come inquinata dal ponte collegato in 2B anche se sta iniettando disturbi in rete (fig. 24). Le regole dovranno tenere conto di questa ulteriore criticità che l'indice mostra quando più carichi distortenti sono collegati in rete.

La rilevazione dell'entità dei disturbi iniettati, essendo qui basata solo sulla valutazione dei GTHD, appare in aumento al diminuire della potenza prelevata dal carico distortente; ciò può non essere del tutto corretto, dal momento che non tiene conto della diminuita entità relativa del disturbo iniettato. Per tale motivo, nella valutazione della severità dell'impatto del carico distortente sulla PQ ci si affiderà prevalentemente agli altri indici in ingresso al FIS.

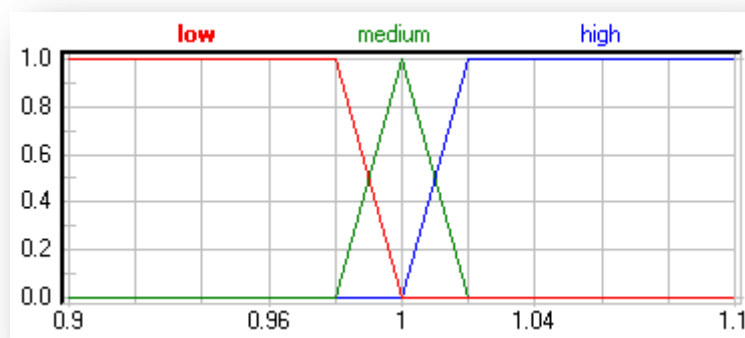


Figura 26: MF relativa all'indice η_2^+

La funzione di appartenenza relativa a “medium” è centrata sul valore unitario neutro; come per l’indice ξ_{slq} , questa funzione di appartenenza identifica i valori per i quali l’indice non è in grado di identificare nettamente il carico come inquinato o inquinante; per valori di η_2^+ che comportano un $\mu_{medium} \neq 0$, le regole saranno quindi progettate in modo da basare la rilevazione della direzione dei disturbi sui restanti indici di ingresso.

3.6 Uscita del FIS

Secondo quanto già osservato l’uscita del FIS deve essere costituita da un indice sintetico che utilizzi le informazioni fornite dagli ingressi per determinare se uno specifico carico stia inquinando o sia inquinato e l’intensità dei disturbi presenti.

A questo scopo è possibile far variare un indice di uscita, denominato ξ_{dist} , tra -1 ed 1: valori positivi dell’indice sono assunti quando il carico considerato sta iniettando i disturbi, mentre valori negativi quando il carico subisce i disturbi. Il valore assoluto dell’indice è invece legato alla severità dei disturbi stessi.

Le cinque funzioni di appartenenza disegnate per l’indice ξ_{dist} , sono riportate in figura 27.

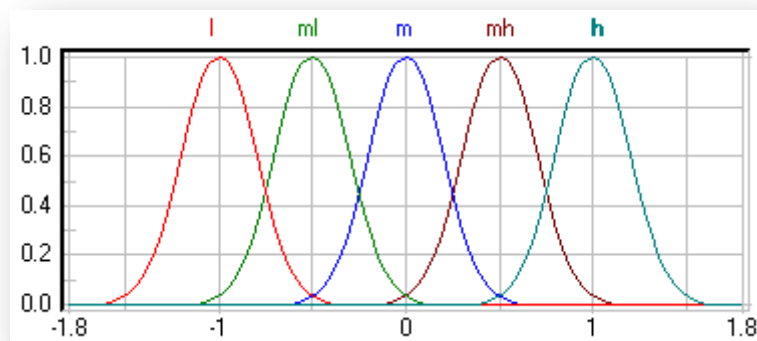


Figura 27: MF relativa all'uscita ξ_{dist}

Per garantire una suddivisione fine dell'intervallo $[-1, 1]$ sono state inserite cinque funzioni di appartenenza. Il tipo gaussiano è stato selezionato per garantire un'ottima continuità ai bordi delle funzioni, rendendo più graduale la transizione da una funzione a quella adiacente.

3.7 Regole del FIS

Successivamente alla progettazione delle funzioni di appartenenza degli ingressi, sono state definite le regole linguistiche fuzzy.

È stato effettuato un primo tentativo di definizione delle regole facendo sì che ogni regola esaminasse lo stato di un solo indice, ottenendo un set di condizioni in "parallelo", come da esempio.

N°	Regola	Peso
1	IF ξ_{slq} is l, THEN ξ_{dist} is h	(1.00)
2	IF ξ_{slq} is m THEN ξ_{dist} is m	(0.67)
...
7	IF $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h, THEN ξ_{dist} is h	(1.00)
8	IF $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m, THEN ξ_{dist} is mh	(1.00)
...

Tabella 17: Esempio di regole con condizioni in "parallelo"

In questo modo però, ogni indice in ingresso fornisce, indipendentemente dagli altri, una specifica informazione sul carico ed il FIS non fa altro che mediare le informazioni ricevute; risulta ovvero impossibile scartare le informazioni di un indice quando tutti gli altri lo contraddicono o anche diminuire l'influenza sull'uscita di una decisione presa con poca credibilità, mediante il peso della regola.

Queste considerazioni hanno suggerito di passare alla configurazione di regole con condizioni in “*serie*”. Ciò ha portato alla definizione delle 35 regole elencate in tabella 18, riportata nella seguente pagina.



N°	Regola	Peso
1	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is h	(1.00)
2	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is h	(0.67)
3	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is l, THEN ξ_{dist} is h	(0.67)
4	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is h	(1.00)
5	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is mh	(0.67)
6	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is l, THEN ξ_{dist} is mh	(0.67)
7	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is mh	(0.67)
8	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
9	IF ξ_{slq} is l AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is l, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
10	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is h	(0.67)
11	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is h	(0.33)
12	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is l, THEN ξ_{dist} is h	(0.33)
13	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is mh	(0.67)
14	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
15	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is l, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
16	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
17	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
18	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is h, THEN ξ_{dist} is ml	(0.75)
19	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is m, THEN ξ_{dist} is ml	(0.75)
20	IF ξ_{slq} is m AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is l, THEN ξ_{dist} is m	(0.50)
21	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is h	(0.67)
22	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is h	(0.33)
23	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is h AND η_2^+ is l, THEN ξ_{dist} is mh	(0.33)
24	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is mh	(0.67)
25	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is m, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
26	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is h, THEN ξ_{dist} is l	(0.75)
27	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is m, THEN ξ_{dist} is ml	(0.75)
28	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is m AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is l, THEN ξ_{dist} is ml	(0.50)
29	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is h, THEN ξ_{dist} is m	(0.33)
30	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is m AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is h, THEN ξ_{dist} is l	(0.75)
31	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is m AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is m, THEN ξ_{dist} is ml	(0.75)
32	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is m AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is l, THEN ξ_{dist} is m	(0.50)
33	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is h, THEN ξ_{dist} is l	(1.00)
34	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is m, THEN ξ_{dist} is l	(1.00)
35	IF ξ_{slq} is h AND $\ I_{\Sigma_L}\ ^2$ is l AND η_2^+ is l AND $\ I_{\Sigma_S}\ ^2$ is l, THEN ξ_{dist} is ml	(0.75)

Tabella 18: Regole del FIS

Seguendo la scelta effettuata originariamente da Mamdani nella definizione dell'inferenza fuzzy, l'operatore logico fuzzy selezionato per connettere diverse condizioni in una regola è la congiunzione "AND". Le regole sono state progettate in modo da esaurire ogni possibile combinazione degli stati degli indici ξ_{slq} , $\|I_{\Sigma_L}\|^2$ ed η_2^+ . Come già osservato, la criticità nell'uso dell'indice $\|I_{\Sigma_S}\|^2$ è che questo rileva come carichi inquinati anche quelli che stanno introducendo disturbi ingenti. Per questa ragione è necessario tenere conto delle indicazioni di $\|I_{\Sigma_S}\|^2$ solo nei casi in cui tutti gli altri indici, o almeno la maggioranza di essi, concordano nell'affermare che il carico in oggetto non sia inquinante. Ovvero, non è possibile che il carico risulti inquinato se ξ_{slq} è "low", se $\|I_{\Sigma_L}\|^2$ è "high", o se η_2^+ è "high".

Esistono condizioni simili anche per il caso di carico inquinante. Data infatti la buona attendibilità di $\|I_{\Sigma_L}\|^2$ nella rilevazione dell'introduzione in rete dei disturbi, le regole devono fare in modo che non sia possibile che il carico sia identificato dall'uscita come inquinante se quest'ultimo indice risulta "low".

Per comprendere la scelta di quale MF dell'uscita assegnare a ciascuna regola ed anche la scelta dei pesi delle varie regole è necessario analizzare il significato delle MF di ogni indice, ovvero quale sarebbe la decisione presa, caso per caso, da ogni indice, indipendentemente dagli altri (tab. 19).

Indice	MF relativa a	Conclusione	MF uscita
ξ_{slq}	"low"	inquinante	"h" o "mh"
	"medium"	? *	?
	"high"	inquinato	"l" o "ml"
$\ I_{\Sigma_L}\ ^2$	"low"	inquinante	"h"
	"medium"	mediamente inquinante	"mh"
	"high"	non inquinante	"m"
η_2^+	"low"	inquinato	"l" o "ml"
	"medium"	? *	?
	"high"	inquinante	"h" o "mh"
$\ I_{\Sigma_S}\ ^2$	"low"	inquinato	"l"
	"medium"	mediamente inquinato	"ml"
	"high"	poco inquinato	"m"

Tabella 19: Conclusioni dei singoli indici

* l'indice non è in grado di giungere autonomamente ad una conclusione

Se in una regola un indice non risulta concorde agli altri, questo non influenza l'implicazione sull'uscita (*THEN ξ_{dist} is ...*) che viene decisa sulla base degli altri indici; se ciò si verifica, data la minor credibilità di una decisione presa scartando le indicazioni di un indice non concorde agli altri, il peso della regola viene diminuito. Si veda come esempio la regola 3, in cui viene scartato l'indice η_2^+ .

Nel caso in cui tra tre indici non vi sia alcun accordo, l'implicazione viene decisa sulla base dell'indice che si ritiene più attendibile per la decisione stessa ed il peso della regola viene ulteriormente abbassato; si veda ad esempio la regola 9, nella quale gli indici con affermazioni opposte ξ_{slq} ed η_2^+ vengono scartati e l'implicazione viene basata su $\|I_{\Sigma_L}\|^2$.

Analoghe considerazioni portano alla determinazione dell'implicazione anche quando sono quattro gli indici analizzati nella regola; si veda come esempio la regola 20, nella quale la decisione di carico né inquinante, né inquinato, viene presa solo sulla base di $\|I_{\Sigma_L}\|^2$ e $\|I_{\Sigma_S}\|^2$, entrambi di valore "low".

Il peso di una regola assume dunque un determinato valore a seconda delle concordanze degli indici all'interno della regola stessa. Tale peso è ottenuto dividendo il numero di indici d'ingresso concordi nell'affermare l'implicazione contenuta nella regola, per il numero totale di indici d'ingresso. Assume dunque il valore unitario solo se tutti gli ingressi affermano la medesima implicazione.

Infine, seguendo il metodo di Mamdani, sono stati scelti i seguenti operatori per i successivi passi del FIS: *"PROD"* per il passo *"Apply Implication Method"* e *"SUM"* per il passo *"Aggregate All Outputs"*.

Per quanto riguarda il passo *"Defuzzify"* è stato scelto il più diffuso metodo del *"centroide"*.

Le regole e le funzioni di appartenenza sopra descritte sono state ottenute a valle di un processo di ottimizzazione basato sui risultati delle diverse simulazioni descritte in questo capitolo.

Il capitolo seguente descrive i risultati forniti dal FIS così ottimizzato, sia nelle stesse condizioni operative considerate nelle simulazioni sopra descritte, sia in condizioni operative differenti.



Capitolo 4

Nel quarto capitolo vengono inizialmente presentati i risultati delle simulazioni preliminari mediante le quali è stato ottimizzato il metodo esposto. Vengono dunque discussi le caratteristiche ed i risultati di ulteriori simulazioni, mediante le quali è stata testata l'efficacia dell'indice ξ_{dist} .



4.1 Risultati delle simulazioni preliminari

Sulla base dei risultati delle simulazioni precedentemente considerate, viene operata una prima validazione per verificare il grado di ottimizzazione, effettuata per ottenere dall'indice ξ_{dist} informazioni accurate ed attendibili sulla direzione e sull'intensità dei disturbi.

Per il gruppo di simulazioni "T1" era stato collegato un singolo ponte distorcente a livello 1A (49:RECT) di potenza variabile tra il 100% ed il 20% del valore nominale.

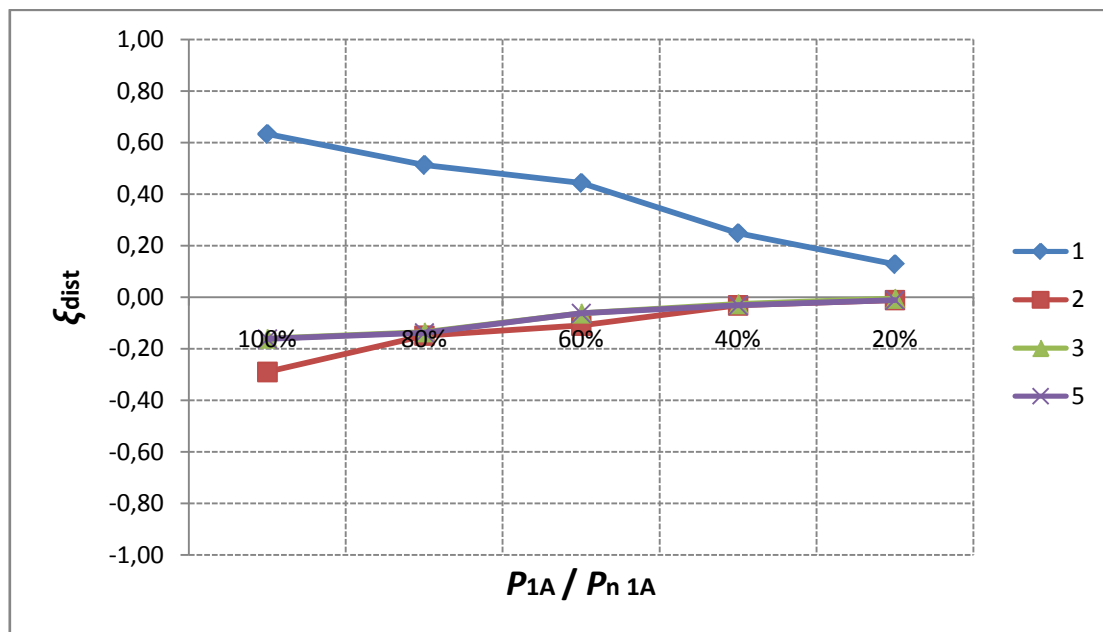


Figura 28: ξ_{dist} , "T1", livello superiore

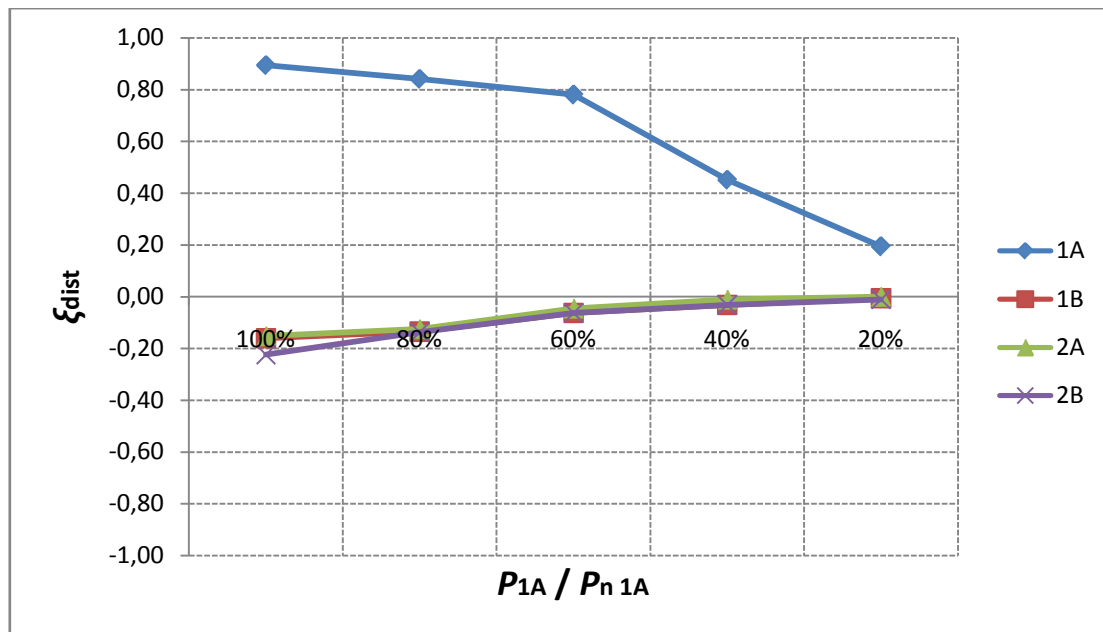


Figura 29: ξ_{dist} , "T1", livello inferiore

Dai grafici risulta evidente la rilevazione da parte dell'indice di un carico inquinante a livello 1A che diminuisce l'entità dei disturbi introdotti al diminuire della potenza assorbita; le responsabilità dell'inquinamento sono dunque correttamente assegnate per ogni condizione di funzionamento. Tutti gli altri carichi risultano subire in modo molto limitato i disturbi iniettati dal carico distortente.

Per il gruppo "T2", le simulazioni sono state condotte introducendo due ponti raddrizzatori collegati in 1A ed in 2B.

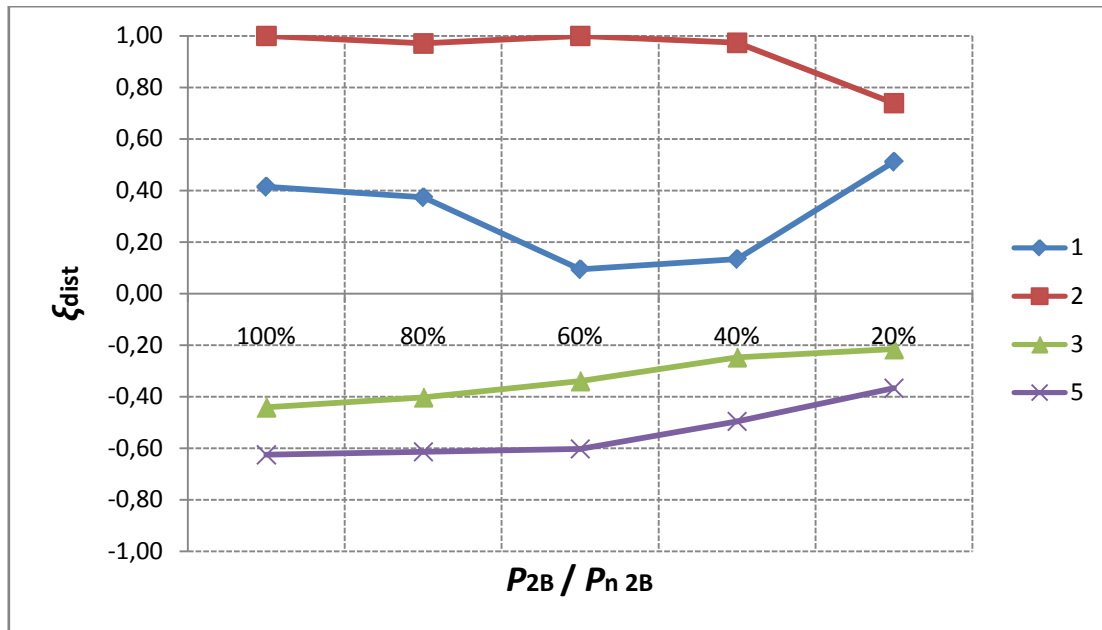


Figura 30: ξ_{dist} , "T2", livello superiore

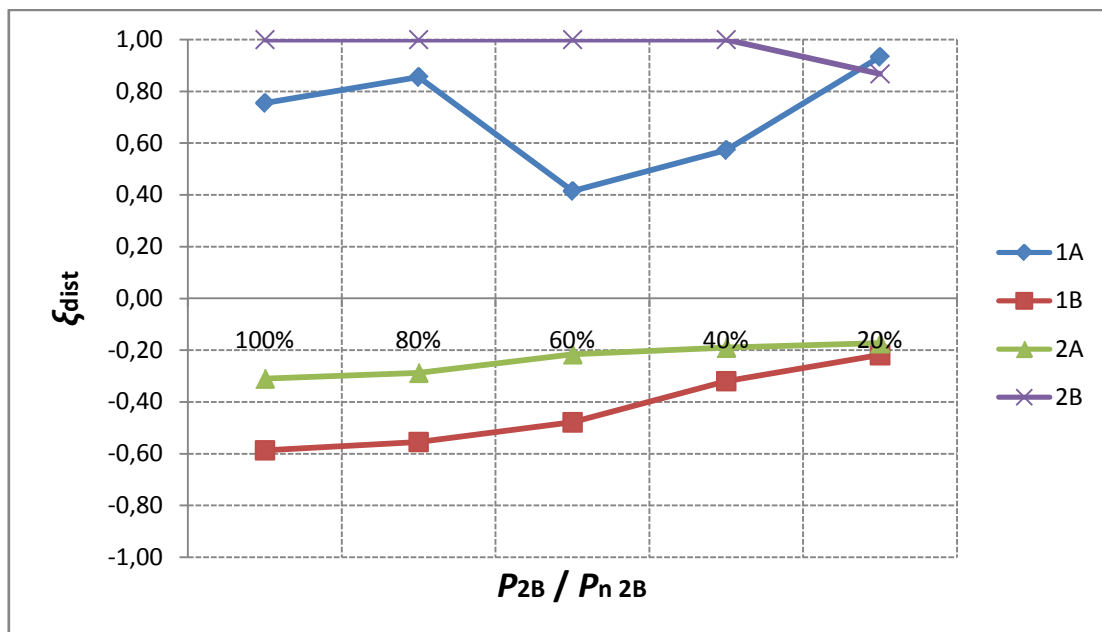


Figura 31: ξ_{dist} , "T2", livello inferiore

Anche in questo caso è evidente la presenza dei due carichi distortenti, di cui uno maggiormente inquinante. Il ponte collegato in 1A, di potenza costante, risulta meno

inquinante al 60% ed al 40%; una spiegazione è data dal possibile assorbimento, da parte del ponte in 1A, di alcune componenti armoniche prodotte dal ponte in 2B che si verificherebbe proprio in corrispondenza di questi valori di potenza.

Tutti gli altri carichi risultano debolmente o mediamente inquinati: a livello superiore la linea che subisce maggiormente l'effetto dei disturbi è la numero cinque, alla quale è collegato direttamente un carico lineare; la mancanza dell'interposizione del trasformatore fa sì che questo carico non benefici dell'effetto filtrante delle reattanze del trasformatore stesso. È quindi plausibile che in questo contesto risulti come il carico più inquinato.

Per la simulazione "T3", sono stati collegati due ponti raddrizzatori alla sbarra 2, uno in 2A e l'altro in 2B. Dato che si tratta di una singola simulazione, i risultati vengono riportati in tabella.

	ξ_{slq}	$\ I_{\Sigma_L}\ ^2$	η_2^+	$\ I_{\Sigma_S}\ ^2$	ξ_{dist}
1	1.0020	3.11	0.9854	71.02	-0.72
2	0.9875	2438.80	1.0241	23.44	1.00
3	1.0006	2.21	0.9845	7.82	-0.33
5	1.0006	3.96	0.9846	38.84	-0.57
1A	1.0033	3.06	0.9872	28.56	-0.67
1B	1.0006	3.06	0.9845	13.43	-0.44
2A	0.9870	90.80	1.0512	65.01	0.36
2B	0.9875	1970.50	1.0269	81.50	1.00

Tabella 20: ξ_{dist} , "T3"

Anche in questo caso, tutte le linee sono correttamente identificate. A livello inferiore il ponte collegato in 2B è riconosciuto come molto inquinante, mentre quello in 2A, di potenza attiva assorbita nettamente inferiore, come leggermente inquinante. Tutti gli altri carichi risultano mediamente o molto inquinati.

È stato dunque possibile ottimizzare il FIS in modo che rilevasse correttamente la provenienza e l'entità dei disturbi per tre gruppi di simulazioni relative a configurazioni di rete ben note.

L'obiettivo seguente è quello di validare il FIS con un diverso set di simulazioni.

4.2 Simulazioni di test

Le simulazioni effettuate per testare il metodo descritto di rilevazione dell'inquinamento armonico sono state condotte sulla medesima rete di test descritta nel paragrafo 3.1.

Per fornire una più estesa serie di casi di test è stata considerata l'inserzione di due carichi distorcenti: il ponte a diodi già considerato nelle simulazioni preliminari ed un carico distorcente più complesso, costituito da un ponte raddrizzatore a tiristori.

È stato dunque osservato il comportamento di tutti i carichi nei confronti dei disturbi iniettati, in vari casi: prima facendo variare l'angolo di accensione dei tiristori e mantenendo inalterata la potenza del ponte a diodi, ed in seguito mantenendo costante l'angolo di accensione e facendo variare la potenza del ponte a diodi. Sono stati inoltre collegati due ponti controllati contemporaneamente ed è stato osservato il comportamento della rete in caso di risonanza di un carico.

Come per le simulazioni preliminari, la potenza è stata fatta variare tra il valore massimo, corrispondente alla potenza del carico presente prima dell'inserzione del ponte (*tab. 4*), ed il 20% del valore massimo in cinque punti. L'angolo di accensione dei tiristori è stato invece fatto variare tra 0° (soluzione equivalente al ponte a diodi) e 90° , anch'esso con cinque valori distinti.

Per il primo gruppo di simulazioni di test, definito per semplicità dalla sigla "C1", è stato collegato un ponte a tiristori con angolo di accensione variabile alla sbarra 2B ed

un ponte a diodi con potenza assorbita costante in 1A. In questo modo si è ottenuta una configurazione simile a quella di "T2", rendendo però variabile l'angolo di accensione dei tiristori al posto della potenza assorbita dal ponte. Le resistenze dei carichi in corrente continua sono le stesse del caso "T2" al 100%. Come si può notare dalla tabella 21, la resistenza del carico alimentato dal ponte in 2B rimane costante ma tensione e potenza assorbita variano al variare dell'angolo di accensione.

α_{2B}	0	22.5	45	67.5	90
R [Ω]	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9
V_{dc RMS} [V]	17931	16862	13079	5648	2971
P [kW]	2798.3	2474.6	1488.8	277.6	76.8

Tabella 21: Dati carico dc del ponte in 2B, "C1"

Per il gruppo "C2", è stata mantenuta la medesima configurazione del gruppo precedente, fissando però l'angolo di accensione al valore di 67.5° e rendendo variabile la potenza del ponte a diodi collegato in 1A. La variazione della potenza è ottenuta variando la resistenza del carico in corrente continua del ponte in 1A per gli stessi valori del caso "T1" (tab. 5).

Per il gruppo di simulazioni "C3", sono stati inseriti due ponti raddrizzatori controllati, entrambi collegati alla sbarra 1. Il ponte in 1B (39:T3 SEC), di potenza minore rispetto all'altro, è stato collegato ad un carico resistivo di 240.2 Ω ed il suo angolo di accensione è stato fissato a 45°. È stato quindi fatto variare l'angolo di accensione dei tiristori del ponte in 1A; come per il caso "T1" al 100%, questo ponte è stato collegato ad un carico resistivo pari a 277.6 Ω .

Per l'ultima simulazione, denominata "C4", è stata testata l'attendibilità dell'indice di PQ presentato, nel caso di risonanza di un carico collegato in rete. È stato inserito un

solo ponte a diodi collegato in 1A di potenza pari a quella del caso "T1" al 100%. È stata quindi creata artificialmente una risonanza di settima armonica, all'interno del carico lineare collegato in 5.

4.3 Risultati delle simulazioni di test

Sulla base dei risultati delle simulazioni di test sopra descritte viene discussa l'attendibilità dell'indice. Dato che le condizioni operative della rete sono completamente note nelle varie simulazioni, è relativamente semplice interpretare le informazioni fornite dall'indice e discuterne la credibilità.

I risultati relativi a "C1", riportati in figura 32 e 33, evidenziano l'effetto della variazione degli angoli di accensione dei tiristori.

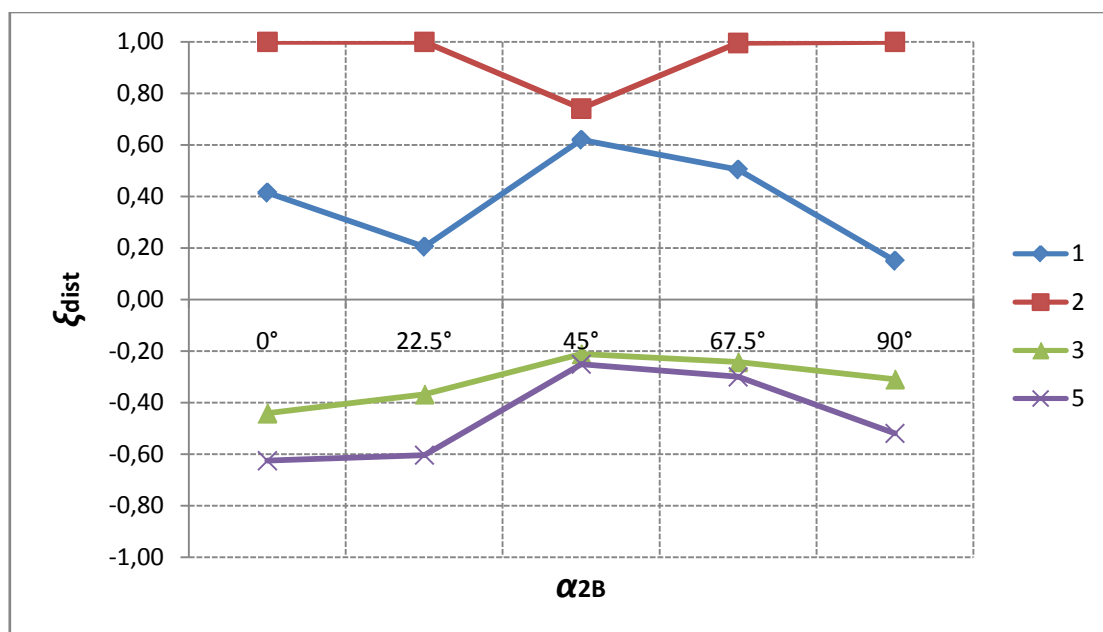


Figura 32: ξ_{dist} , "C1", livello superiore

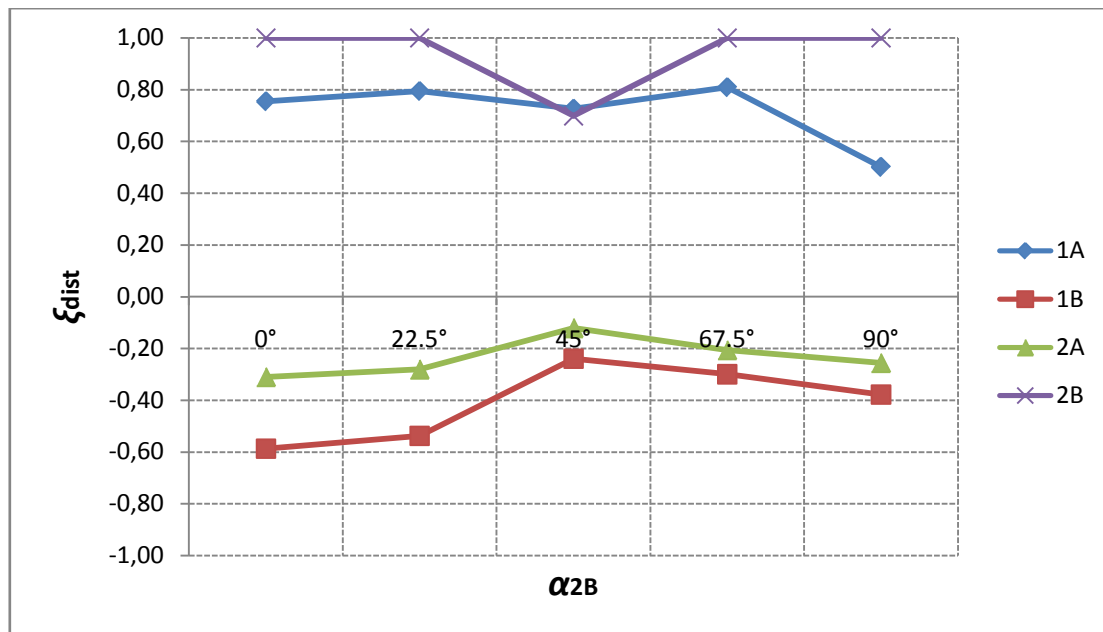


Figura 33: ξ_{dist} , "C1", livello inferiore

All'aumentare di tale angolo, da una parte diminuisce sensibilmente la potenza assorbita dal ponte, e dall'altra aumenta drasticamente la distorsione delle forme d'onda di corrente e tensione. Questi due effetti hanno conseguenze opposte sulla qualità dell'alimentazione in quanto il primo tende a migliorare la qualità, mentre il secondo a peggiorarla.

Le figure 32 e 33 evidenziano rispettivamente a livello superiore ed inferiore delle curve tendenzialmente "v". Il ponte a tiristori risulta ovvero meno inquinante per $\alpha_{2B}=45^\circ$.

Il risultato è interpretabile assumendo che per valori di α_{2B} compresi tra 0° e 45° prevalga l'effetto di diminuzione della potenza assorbita dal ponte, mentre per valori di α_{2B} compresi tra 45° e 90° prevalga l'effetto della distorsione delle forme d'onda.

Anche i carichi non inquinanti confermano questo risultato mostrandosi meno inquinati proprio per $\alpha_{2B}=45^\circ$. Il ponte a diodi collegato in 1 appare invece più o meno inquinante a seconda della direzione delle componenti armoniche che si scambia con l'altro ponte, in ogni caso è sempre riconosciuto come inquinante.

I risultati mostrano che la direzione dei disturbi è correttamente identificata e, alla luce dell'interpretazione fornita, appare plausibile anche la rilevazione dell'intensità dei disturbi.

Con le simulazioni "C2" è stata sperimentata la risposta dell'indice alla variazione di potenza del ponte a diodi, mantenendo la stessa configurazione di rete di "C1".

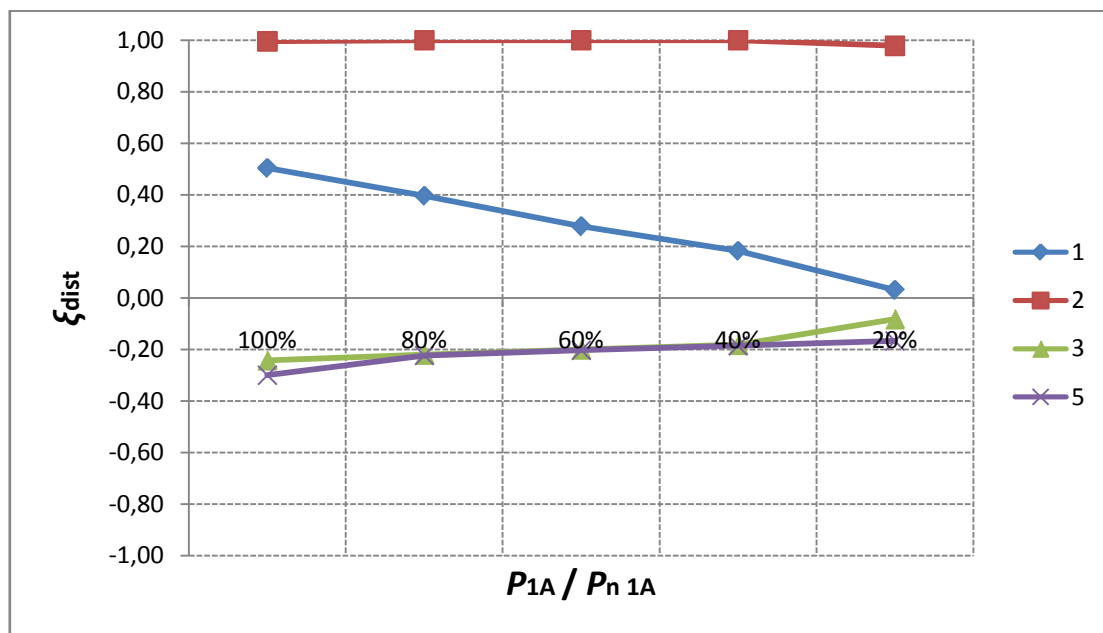


Figura 34: ξ_{dist} , "C2", livello superiore

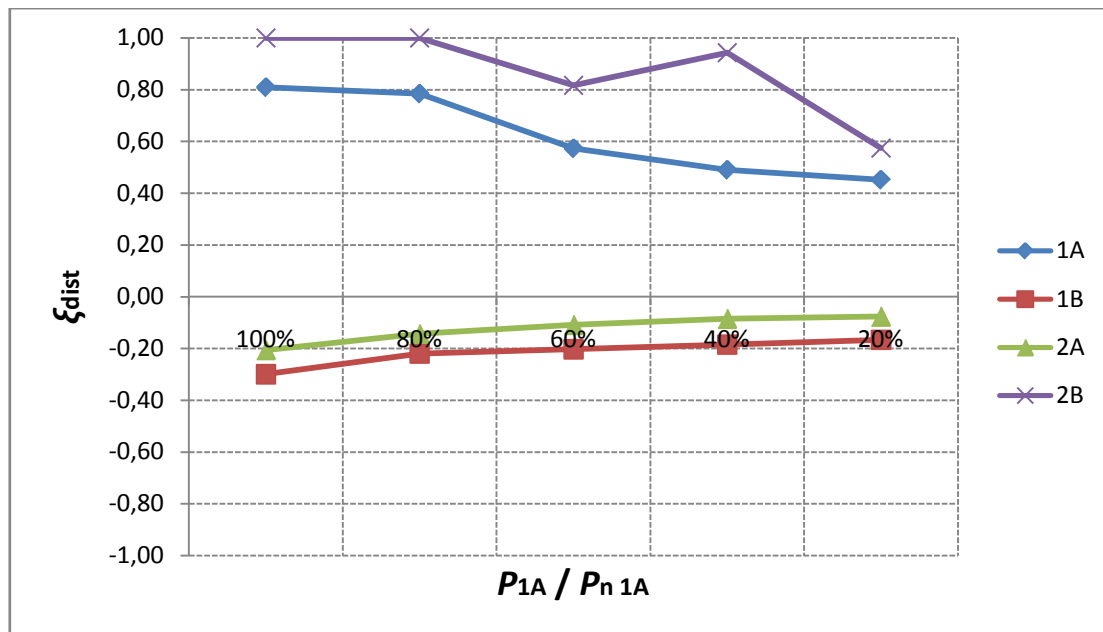


Figura 35: ξ_{dist} , "C2", livello inferiore

Secondo quanto riportato nelle figure 34 e 35, anche in questo caso l'indice ξ_{dist} fornisce risultati corretti. Il ponte a tiristori collegato in 2B risulta come il carico maggiormente inquinante nonostante la piccola potenza assorbita, dovuta ad $\alpha_{2B}=67.5^\circ$, rispetto a quella assorbita dal ponte collegato in 1A. Il ponte a diodi collegato in 1A introduce disturbi decrescenti al diminuire della potenza che preleva dalla rete. Il resto dei carichi risulta costantemente inquinato con un grado modesto, probabilmente perché la distorsione armonica introdotta dal ponte in 2B, a cui è associata una piccola potenza, viene facilmente filtrata.

Con il gruppo di simulazioni "C3", è stato esaminato il comportamento della rete successivo al collegamento di due ponti raddrizzatori controllati alla sbarra 1.

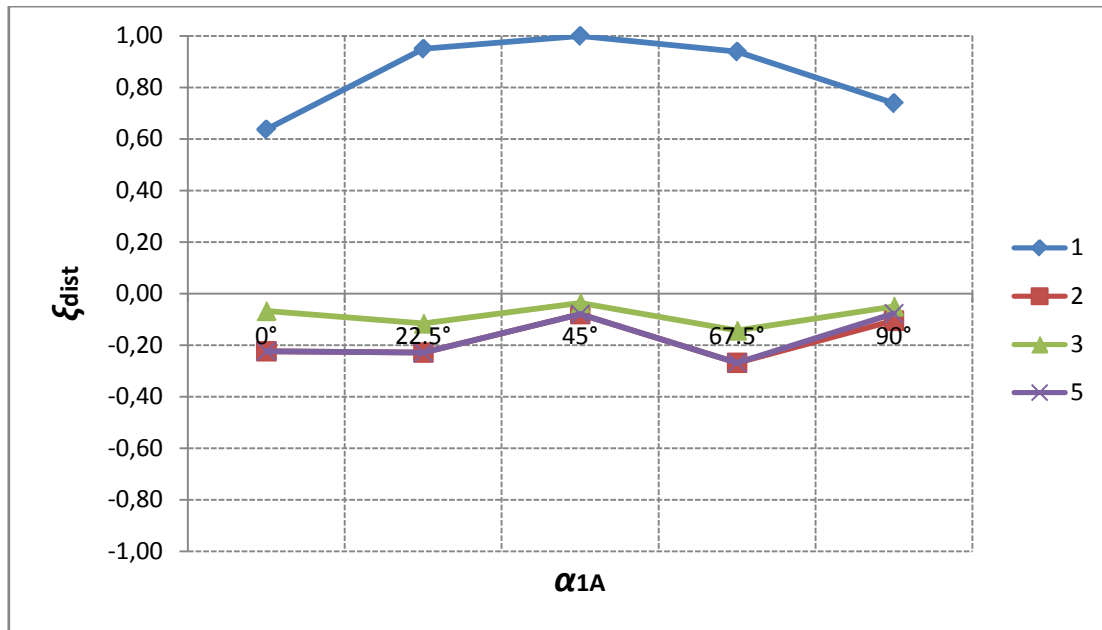


Figura 36: ξ_{dist} , "C3", livello superiore

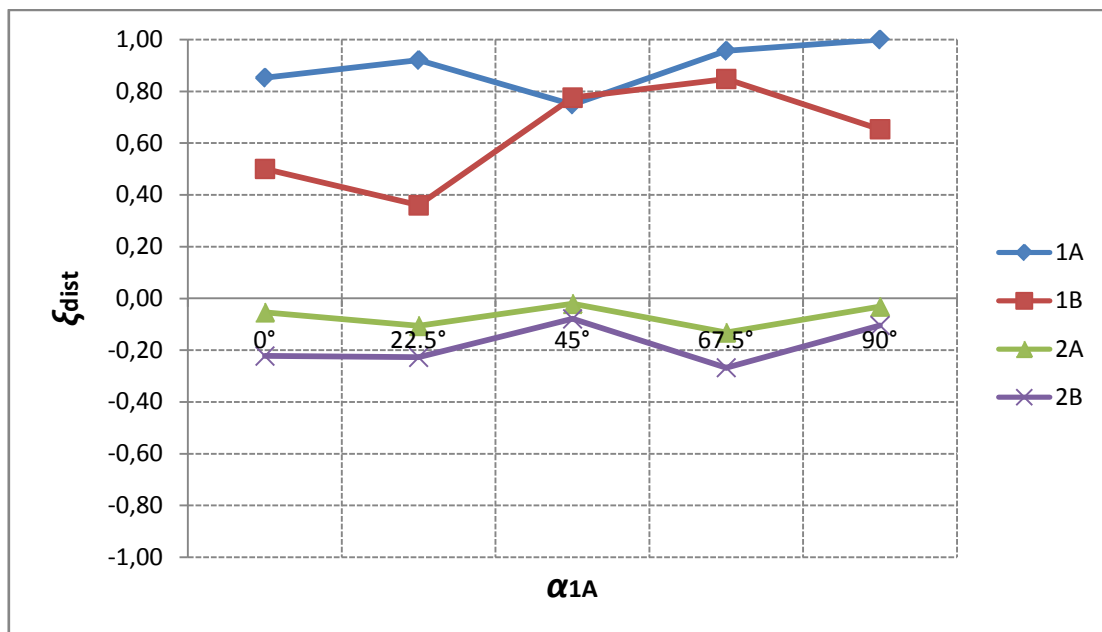


Figura 37: ξ_{dist} , "C3", livello inferiore

La figura 36 mostra una tipica curva a "vasca da bagno" rovesciata.

In questo caso, vista la limitata potenza del ponte a tiristori in 1A, l'effetto della distorsione delle forme d'onda inizialmente prevale sull'effetto della diminuzione della potenza assorbita e per $\alpha_{1A}=45^\circ$ il grado di inquinamento risulta massimo. Per valori di α_{1A} maggiori, la potenza assorbita dal ponte diminuisce ad un livello tale da portare alla diminuzione anche il grado di inquinamento misurato.

Il livello inferiore mostra gli stessi risultati del livello superiore della simulazione "C1", composta da due ponti distorcenti connessi alla stessa sbarra, di cui uno caratterizzato da un angolo di accensione dei tiristori variabile. I risultati di figura 37 si mostrano infatti del tutto simili a quelli mostrati in figura 32. In questo caso, è l'entità dei disturbi introdotti dal ponte a tiristori in 1B a variare, sempre a causa dei cambi di direzioni di alcune componenti armoniche scambiate con il ponte caratterizzato da un angolo di accensione dei tiristori variabile.

Tutti gli altri carichi risultano limitatamente inquinati.

Per testare l'attendibilità di ξ_{dist} in caso di risonanza è stato collegato al carico 5 un risonatore RLC serie, opportunamente dimensionato per risonare ad una frequenza pari al 99.9% della settima armonica.

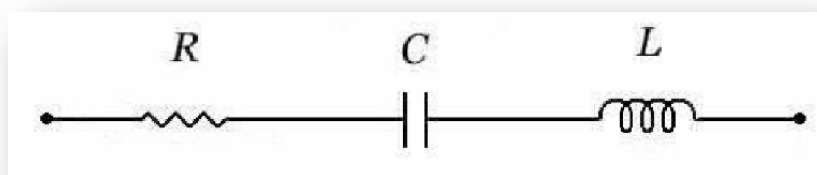


Figura 38: Risonatore RLC serie

$$\bar{Z} = R + j \cdot \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}$$

Imponendo le seguenti condizioni:

$$\begin{cases} R = 5 \Omega \\ \omega_1 = 2\pi \cdot 60 \\ \omega_2 = \omega_1 \cdot 7 \cdot 0.999 \\ |\bar{Z}|_{60 \text{ Hz}} = 10000 \end{cases}$$

È stato ottenuto:

$$\begin{cases} C = \left| \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_2^2 \cdot |\bar{Z}|_{60 \text{ Hz}} \cdot \omega_1} \right| = 0.259834 \mu F \\ L = \frac{1}{\omega_2^2 C} = 0.553751 H \end{cases}$$

La tabella seguente mostra i risultati ottenuti per il caso "C4", comparandoli con quelli ottenuti nel caso di assenza di risonanza ("T1" al 100%).

	ξ_{slq}	$\ I_{\Sigma_L}\ ^2$	η_2^+	$\ I_{\Sigma_S}\ ^2$	$\xi_{\text{dist}} \text{ "C4"}$	$\xi_{\text{dist}} \text{ "T1" } 100\%$
1	0.9997	526.73	1.0109	30.95	0.53	0.63
2	1.0000	3.56	0.9999	4.53	-0.01	-0.29
3	1.0000	2.73	1.0000	2.21	0.00	-0.16
5	1.0002	3.06	1.0021	103.05	-0.08	-0.16
1A	0.9994	452.39	1.0594	116.79	0.59	0.89
1B	1.0000	1.80	0.9999	2.74	-0.01	-0.16
2A	1.0000	1.80	1.0003	2.17	0.00	-0.15
2B	1.0000	3.85	0.9999	3.20	-0.01	-0.22

Tabella 22: ξ_{dist} , "C4" vs "T1" al 100%

Anche in caso di risonanza i carichi inquinati non sono mai riconosciuti come inquinanti. Come è ovvio, visto che il risonatore si comporta come un filtro quasi ideale per la settima armonica, le forme d'onda di tensione diventano quasi

sinusoidali; i carichi inquinanti vedono quindi scendere il loro grado di inquinamento, mentre i restanti carichi risultano poco o per nulla inquinati.

In ogni caso le responsabilità dell'inquinamento elettrico sono correttamente assegnate anche in questo caso.

4.4 Conclusioni sui risultati ottenuti

Secondo quanto riportato, l'indice ξ_{dist} è sempre in grado di identificare correttamente la direzione dei disturbi periodici e quindi di assegnare correttamente le responsabilità dell'introduzione in rete degli stessi.

Per quanto riguarda la rilevazione del grado di inquinamento, i dati presentati evidenziano che questa risulta conforme a quanto atteso, specialmente nella valutazione della severità dei disturbi iniettati dai carichi inquinanti. Viceversa, l'indice mostra una minore sensibilità nella valutazione della severità dell'inquinamento subito dai carichi non inquinanti, a causa della minore sensibilità degli indici di ingresso del FIS nel quantificare l'inquinamento passivo.

Dai dati riportati, l'approccio presentato risulta sempre efficace.

È però necessario considerare che il metodo descritto non risulta completo in quanto manca la valutazione dell'impatto dell'incertezza strumentale sull'indice finale.

Per quanto riguarda la misurazione delle diverse quantità considerate come variabili di ingresso del FIS, l'incertezza di misura associata non può essere trascurata, in quanto alcuni suoi contributi, come ad esempio l'incertezza di fase dei trasduttori, potrebbero avere un effetto drammatico sul risultato finale.

Per completare dunque la caratterizzazione metrologica dell'indice ξ_{dist} , nei prossimi capitoli viene presentato l'approccio esteso grazie al quale è possibile tenere conto dell'incertezza, modificando opportunamente l'inferenza fuzzy tradizionale.

Capitolo 5

In questo capitolo viene brevemente richiamato il concetto di incertezza di misura. Vengono quindi introdotte le “Random Fuzzy Variables” come componente fondamentale di un innovativo approccio fuzzy per la valutazione dell’incertezza. È infine descritto in dettaglio il FIS modificato grazie al quale è possibile valutare operativamente l’incertezza dell’indice ξ_{dist} .



5.1 L'incertezza di misura

Secondo il "Vocabolario Internazionale di Metrologia" (VIM) [34], l'incertezza di misura è definita come il parametro non negativo che caratterizza un intervallo di valori attribuibili ad un misurando. La stima dell'incertezza è di fondamentale importanza in quanto solo attraverso tale parametro si è in grado di stabilire con quale livello di confidenza si può supporre che il valore del misurando cada all'interno di tale intervallo di valori.

Per quanto riguarda specificamente il ruolo dell'incertezza nella valutazione della PQ [35], vista l'entità non trascurabile dei suoi singoli contributi, è necessario assicurarsi che l'intervallo di valori definito dall'incertezza non sia più ampio dell'intervallo di variabilità dell'indice stesso, altrimenti quest'ultimo perderebbe credibilità.

È noto dalla pratica delle misure che le informazioni ottenibili sul misurando sono sempre incomplete e che non possono essere rappresentate da singoli valori numerici [36]. Fin dagli albori di questa disciplina ci si è confrontati con il difficile compito di stimare il grado di incompletezza di tali informazioni, giungendo alla attuale formulazione del concetto di incertezza, definito nel VIM e ripreso dalla "Guide to the expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) [29,30] che fornisce anche indicazioni pratiche per la sua valutazione. Secondo questo approccio che trova un supporto matematico nella teoria della probabilità, ogni risultato di misura può essere espresso mediante variabili casuali se si fa in modo che tutti i contributi sistematici dell'incertezza siano identificati e corretti. Se si suppone infatti che i contributi casuali siano prevalenti rispetto a quelli sistematici, l'approccio probabilistico appare come il migliore strumento matematico per la valutazione dell'incertezza.

Tale assunzione non è però verificata in molte applicazioni pratiche, in cui risulta difficile stimare e correggere tutti i contributi sistematici.

Inoltre, risulta in generale difficile propagare i contributi di incertezza lungo la procedura di misura, specialmente quando tale procedura è complessa e non rappresentabile attraverso una relazione funzionale tra le diverse grandezze misurate, come nel caso contemplato in questo lavoro.

Per superare queste criticità, e in particolare per tenere conto e propagare anche i contributi sistematici, è necessario superare i limiti posti in tal senso dalla teoria della probabilità.

Ciò può essere ottenuto, come mostrato nella recente letteratura [37-49], facendo riferimento alla più generale teoria matematica dell'evidenza, introdotta da Shafer [23]. Due distinti casi particolari di questa teoria sono costituiti dalle teorie della probabilità e della possibilità, in grado di processare in modo corretto, rispettivamente, le componenti casuali e quelle sistematiche dell'incertezza.

Sono stati condotti dei tentativi per esprimere l'incertezza di misura all'interno della sola teoria della possibilità [45-49], ma essi mancano di generalità nell'espressione di tutte le possibili componenti della stessa incertezza.

Si deduce quindi che un approccio basato sulla teoria dell'evidenza rappresenta un'ottima combinazione degli approcci possibilistico e probabilistico, potendo superare le limitazioni mostrate da questi due metodi, quando seguiti separatamente.

L'applicazione della teoria dell'evidenza all'espressione ed alla valutazione dell'incertezza di misura ha portato alla definizione dello strumento matematico delle "*Random Fuzzy Variables*" (RFV) [38] che verrà analizzato nel seguente paragrafo.

5.2 Random Fuzzy Variables

I concetti di variabili fuzzy (FV) e di set fuzzy sono stati introdotti da Zadeh [22,25,26] che ha esteso il tradizionale concetto di grado di appartenenza di una variabile a ad un set A , il quale, in precedenza, poteva assumere soltanto i valori zero ($a \notin A$) ed uno ($a \in A$), considerando una funzione di appartenenza $\mu_A(a)$, dove $0 \leq \mu_A(a) \leq 1$, convessa e normalizzata.

Se si considera un valore numerico α , $0 \leq \alpha \leq 1$, l' α -cut di una variabile fuzzy può essere definito come:

$$A_\alpha = \{a \mid \mu_A(a) \geq \alpha\}$$

Che definisce l'intervallo $[a_1^\alpha, a_2^\alpha]$, dove $a_1^\alpha \leq a_2^\alpha$.

Un esempio di FV, unitamente ad un suo α -cut a livello α , è mostrato in figura 39.

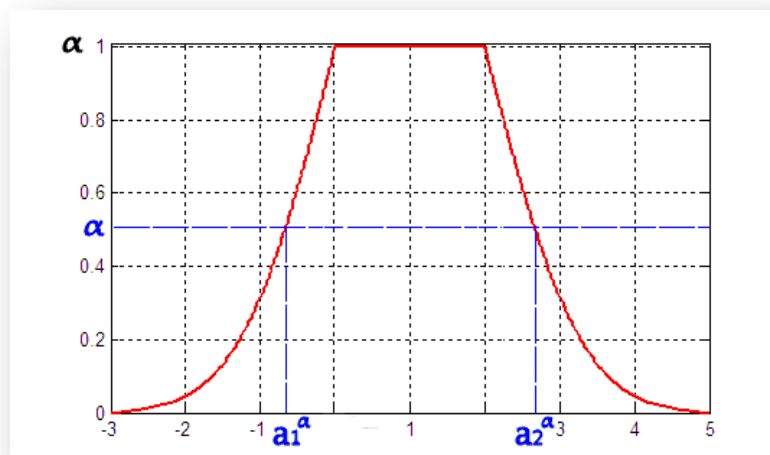


Figura 39: Esempio di FV simmetrica

La FV può essere vista, nella teoria della possibilità, come un insieme di intervalli ordinatamente inclusi l'uno nell'altro, visto che può essere facilmente provato che $A_{\alpha_1} \subset A_{\alpha_2}$ per ogni $\alpha_1 > \alpha_2$.

In accordo con la definizione di FV [22, 50], ogni α -cut A_α può essere considerato come un intervallo di confidenza all'interno del quale si suppone possa cadere la variabile a con un livello di confidenza $1-\alpha$.

Le RFV rappresentano un'ulteriore generalizzazione delle variabili fuzzy (definite all'interno della teoria della possibilità) ed anche delle variabili casuali [51] (definite all'interno della teoria della probabilità).

Per questo motivo, ci si aspetta che le RFV siano in grado di rappresentare correttamente il risultato di una misura sia se sono presenti componenti di incertezza sistematiche, che casuali [52].

Le RFV sono particolari variabili fuzzy di tipo 2. Una RFV è infatti definita da una serie di intervalli di confidenza A_α di tipo 2, intervalli i cui estremi sono a loro volta intervalli. Queste variabili sono quindi definibili mediante un set di α -cut nidificati, identificati da quattro numeri:

$$A_\alpha = \{a_1^\alpha, a_2^\alpha, a_3^\alpha, a_4^\alpha\}$$

che soddisfano i seguenti vincoli:

- $a_1^\alpha \leq a_2^\alpha \leq a_3^\alpha \leq a_4^\alpha \quad \forall \alpha$;
- le sequenze degli intervalli di confidenza di tipo 1 $[a_1^\alpha, a_4^\alpha]$, $[a_2^\alpha, a_3^\alpha]$ generano due funzioni di appartenenza convesse e normalizzate;
- $\forall \alpha, \alpha'$ nell'intervallo $[0,1]$:

$$\alpha' > \alpha \Rightarrow \begin{cases} [a_1^{\alpha'}, a_3^{\alpha'}] \subset [a_1^\alpha, a_3^\alpha] \\ [a_2^{\alpha'}, a_4^{\alpha'}] \subset [a_2^\alpha, a_4^\alpha] \end{cases} ;$$

- $[a_2^{\alpha=1}, a_3^{\alpha=1}] \equiv [a_1^{\alpha=1}, a_4^{\alpha=1}]$.

La rappresentazione grafica di una RFV simmetrica è fornita in figura 40.

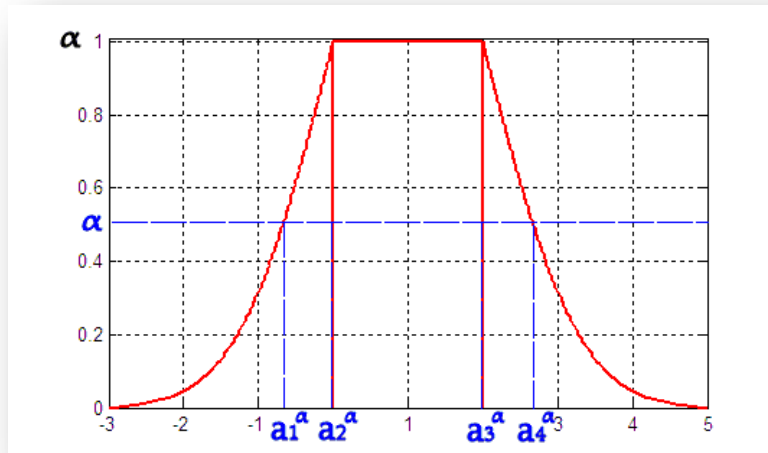


Figura 40: Esempio di RFV simmetrica

Come mostrato in figura, gli estremi dell'intervallo $[a_2^\alpha, a_3^\alpha]$ e quelli dell'intervallo $[a_1^\alpha, a_4^\alpha]$, definiscono due MF che rappresentano, nella teoria dell'evidenza, due distribuzioni di possibilità [38,53].

I tre sotto-intervalli definiti, forniscono inoltre alcune informazioni aggiuntive: l'intervallo interno $[a_2^\alpha, a_3^\alpha]$ tiene conto della distribuzione dei possibili valori attribuibili al misurando per effetto di contributi non casuali (quindi principalmente dei contributi sistematici identificati e non) all'incertezza. Gli intervalli esterni $[a_1^\alpha, a_2^\alpha]$, $[a_3^\alpha, a_4^\alpha]$ tengono conto di quanto si amplia il precedente intervallo per effetto dei contributi casuali.

È possibile dedurre quindi che una RFV è in grado di rappresentare il risultato della misura insieme alla sua incertezza se l'incertezza associata ad ogni misurando è correttamente presa in considerazione nella costruzione della RFV stessa. Il problema sta certamente nell'identificazione, tra tutte le informazioni metrologiche disponibili, di quelle rilevanti e nella conversione di quest'ultime in un'opportuna RFV.

Secondo quanto riportato nella GUM [29,30], due approcci possono essere seguiti per ottenere corrette informazioni metrologiche su un misurando: il metodo di *tipo-A* per

la valutazione dell'incertezza, che prevede un approccio sperimentale costituito dalla ripetizione delle stesse misure, e quello di *tipo-B* che prevede lo sfruttamento delle conoscenze ottenibili a priori sugli strumenti e sulla procedura di misura.

Secondo la definizione di RFV, i due intervalli esterni rappresentano le componenti aleatorie dell'incertezza. Queste fanno sì che i risultati di misure ripetute si distribuiscano secondo una distribuzione di probabilità che può essere ottenuta sperimentalmente interpolando i dati raccolti (valutazione di *tipo-A*); se ciò non fosse possibile, la distribuzione può essere ottenuta sulla base di informazioni note a priori, grazie, ad esempio, ai certificati di taratura o all'esperienza dell'operatore (valutazione di *tipo-B*). La distribuzione di probabilità può essere infine convertita in una distribuzione di possibilità [38,46,48], per generare la MF esterna della RFV.

L'intervallo interno di una RFV rappresenta invece i contributi non aleatori, come, ad esempio, effetti sistematici non totalmente compensati o sconosciuti. Anche in questo caso, può essere attuata una stima di tali contributi con il metodo di *tipo-A*, ripetendo le misure in contesti differenti; tuttavia, il conseguente incremento sensibile dei costi spesso non giustifica tale operazione. Per questa ragione, nella maggior parte delle applicazioni, ci si può basare sulle informazioni metrologiche ottenibili a priori dai dati di calibrazione degli strumenti di misura e dalla conoscenza della stessa procedura di misura.

Non interessa, in questo elaborato, approfondire ulteriormente la metodologia di costruzione di una RFV; ulteriori dettagli a riguardo possono essere trovati in [54,55].

Come richiesto dalla GUM, un metodo che valuti l'incertezza di misura è consistente se non solo rappresenta correttamente l'incertezza, ma se è anche in grado di propagarla, nel caso di misure indirette. A questo scopo è stata definita una opportuna matematica per comporre le RFV, in grado di trattare gli intervalli esterni e quello interno in modo appropriato [56], sulla base delle differenti interpretazioni date per i due tipi di intervalli.

In questo lavoro non viene approfondita la cornice matematica della teoria dell'evidenza e delle RFV per la quale si rimanda a [57-59]. Le operazioni algebriche tra le RFV sono invece definite in [50,60].

5.3 Inferenza fuzzy modificata

Le RFV possono dunque rappresentare correttamente un risultato di misura ed è inoltre disponibile una opportuna matematica in grado di propagare l'incertezza.

L'obiettivo è dunque quello di modificare l'inferenza fuzzy tradizionale, in modo che possa trattare variabili di ingresso ed uscita costituite da RFV, al posto di variabili numeriche, seguendo l'approccio presentato in [31]. La modifica deve far sì che l'incertezza possa propagarsi dalle variabili di ingresso a quelle di uscita, attraverso tutti i passi del FIS.

È interessante sottolineare che, secondo quanto mostrato in [61], mentre le RFV rappresentano l'incertezza strumentale e di metodo che interessa i dati sperimentali, l'inferenza fuzzy tradizionale è particolarmente indicata per rappresentare e propagare l'incertezza di modello, legata in questo caso al modello di rete elettrica. L'inferenza fuzzy, modificata in modo da trattare variabili random-fuzzy, sarebbe quindi in grado di processare correttamente il risultato della misura insieme alle varie tipologie di incertezza.

L'inferenza fuzzy modificata segue sei passi, simili a quelli dell'inferenza fuzzy tradizionale descritti nel paragrafo 2.4.

1. Fuzzify Inputs

Nell'inferenza fuzzy tradizionale, in questo passo vengono determinati i valori di appartenenza, costituiti da singoli valori compresi tra 0 ed 1. Questi risultano dall'intersezione del valore numerico di ingresso con ogni fuzzy set della variabile considerata.

Quando l'ingresso è costituito da un dato sperimentale e se ne considera l'incertezza, l'ingresso di questo passo è costituito da una RFV e il risultato non può essere un singolo valore poiché, dalla definizione di incertezza, il risultato di una misura è un insieme di intervalli corrispondenti a tutti i possibili livelli di confidenza. Ci si aspetta dunque che l'uscita sia un set di intervalli di confidenza.

Una proposta per implementare questo passo in presenza di incertezza è quella di unire le differenti informazioni date dalla RFV di ingresso e dai relativi fuzzy set, costruendo una opportuna superficie, per ognuno di questi fuzzy set, secondo la seguente procedura.

Si immagini di voler calcolare, ad esempio, il grado di appartenenza della RFV mostrata in figura 41 al fuzzy set triangolare indicato in figura 42.

- Detto a_m il valore medio dell' α -cut della RFV dell'ingresso per $\alpha=1$, come indicato in figura 41, si definiscono quattro intervalli di ampiezza pari a:

$$\begin{aligned} we_l^\alpha &= a_m - a_1^\alpha & wi_l^\alpha &= a_m - a_2^\alpha \\ we_r^\alpha &= a_4^\alpha - a_m & wi_r^\alpha &= a_3^\alpha - a_m \end{aligned}$$

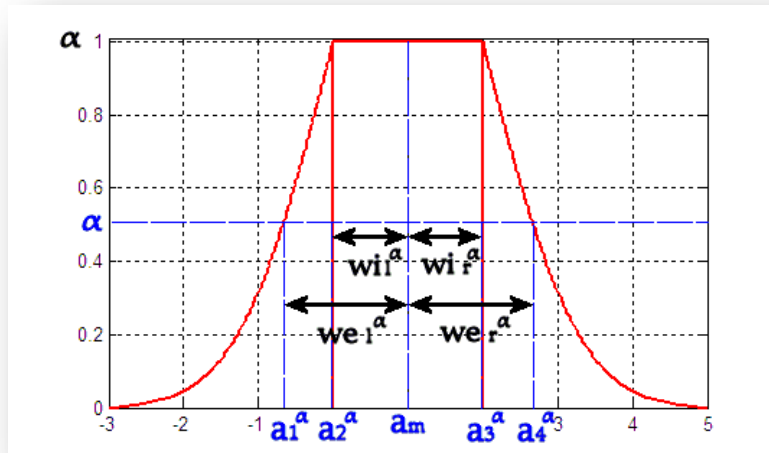


Figura 41: Intervalli in una RFV simmetrica

- Si considera un generico sistema di riferimento ortogonale x,y,z . Con x si indica un generico valore della variabile d'ingresso, con y il suo grado appartenenza al fuzzy set considerato e sia z una variabile definita nell'intervallo $[0, 1]$.

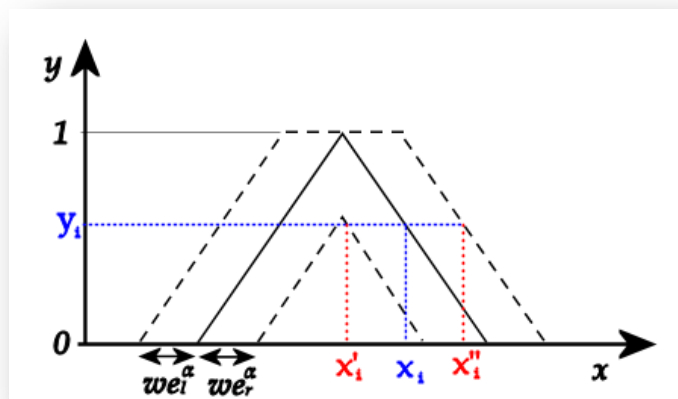


Figura 42: Costruzione della superficie per ogni livello z , intervallo esterno

Come indicato in figura 42, per ogni piano x,y definito dal livello z , ogni punto x_i è convertito in un intervallo $[x_i', x_i'']$, con $x_i' = x_i - we_l^\alpha$, $x_i'' = x_i + we_r^\alpha$, entrambi definiti per $\alpha=z$.

Se il fuzzy set considerato è, come in figura, una funzione convessa, due intervalli sono associati ad ogni valore y . In caso di sovrapposizione dei due intervalli, viene considerato un intervallo unico dato dagli estremi minore e maggiore.

La stessa procedura, mostrata in figura 42 per l'intervallo esterno, è seguita anche per l'intervallo interno, variando gli opportuni parametri (wi_l^α al posto di we_l^α e wi_r^α al posto di we_r^α).

Ripetendo la procedura per ogni valore di $\alpha=z$ della RFV d'ingresso, è possibile costruire una superficie definita nel piano x,y,z .

Per l'esempio considerato, una possibile superficie è riportata in figura 43.

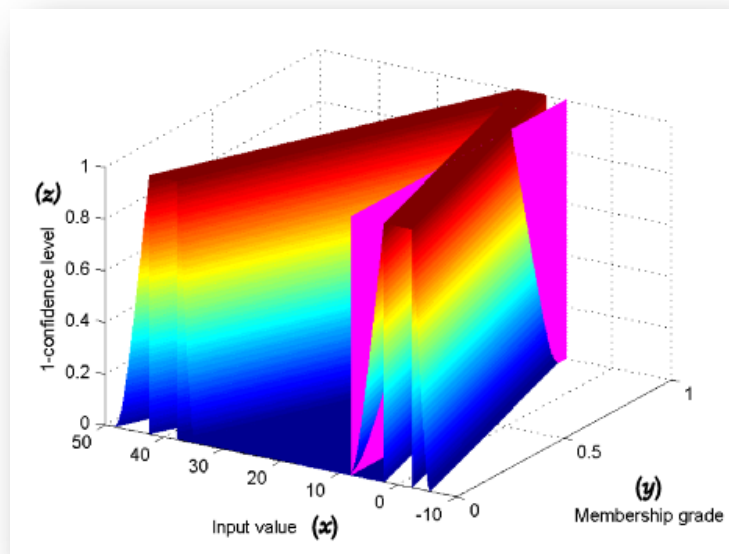


Figura 43: Esempio di superficie con piano di intersezione per $x=a_m$

La rilevante proprietà della superficie costruita è che se essa viene tagliata, come indicato in figura, da un piano di intersezione per $x=a_m$, si ottiene nuovamente una funzione di appartenenza, che rappresenta il valore di appartenenza della variabile di ingresso al fuzzy set considerato.

Il risultato dell'intersezione è mostrato in figura 44.

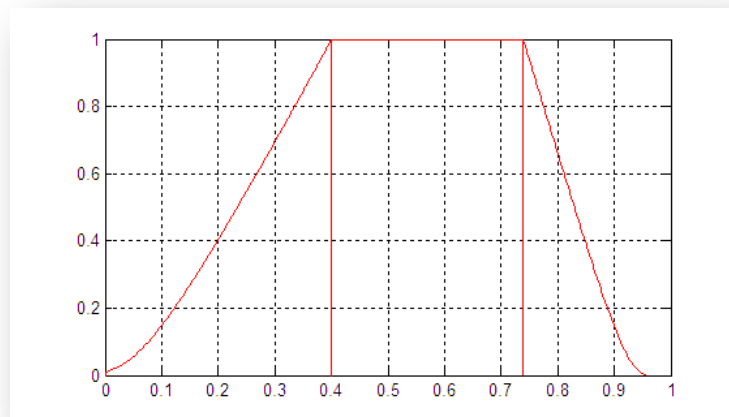


Figura 44: RFV risultante dall'intersezione

A causa dell'incertezza, il valore di appartenenza di un ingresso a ciascun fuzzy set definito per la variabile considerata è quindi una RFV oppure zero.

2. *Apply Fuzzy Operators*

In questo passo vengono esaminate tutte le regole. Se una di queste è dotata di più antecedenti, è possibile applicare direttamente alle variabili fuzzy ottenute al passo precedente gli operatori fuzzy AND, OR e NOT; come già osservato questi operatori sono costituiti rispettivamente dal minimo, massimo e complementare rispetto ad 1 della MF.

Completato questo passo, si ottiene una variabile random-fuzzy per ogni regola.

3. *Weigh Each Rule*

Nel terzo passo viene applicato un peso ai risultati del passo precedente. Questo corrisponde a decidere che influenza debba avere la singola regola del sistema fuzzy sulla superficie aggregata e dunque sul risultato finale.

È possibile applicare il peso semplicemente moltiplicando i valori delle ascisse di ogni RFV per il peso stesso, ottenendo nuovamente una RFV per ogni regola.

Come sarà chiarito nella descrizione dei passi successivi, una regola con peso molto basso, ha in questo modo scarsissima influenza sulla superficie finale, mentre una regola con peso unitario ha su di essa piena influenza.

4. *Apply Implication Method*

Dato che il passo precedente fornisce una RFV al posto di un singolo valore numerico, per calcolare l'implicazione fuzzy ed i passi successivi le operazioni devono essere su intervalli (ovvero per ogni α -cut della RFV) al posto di numeri.

Per semplificare l'illustrazione del metodo utilizzato, si introduce come esempio un FIS avente un uscita caratterizzata dalle cinque MF mostrate nella seguente figura.

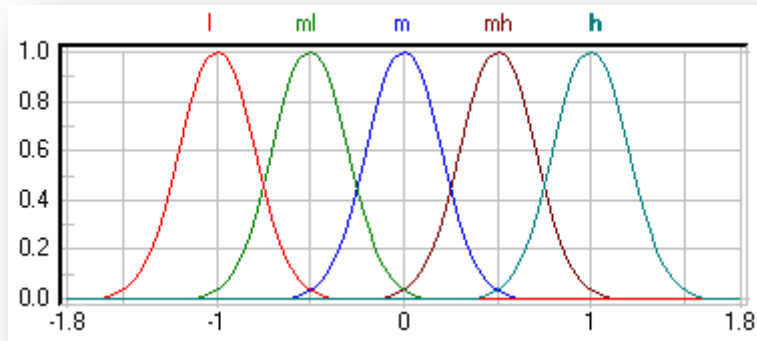


Figura 45: FIS di esempio, MF relative all'uscita

Si immagini che il sistema sia dotato di sette regole: le prime cinque regole riferite rispettivamente alle MF di uscita “low”, “medium-low”, “medium”, “medium-high”, “high”, la sesta nuovamente a “low” e la settima a “medium-low”.

Per semplicità, si supponga inoltre che il risultato dei primi tre passi siano le sette RFV indicate in figura 46.

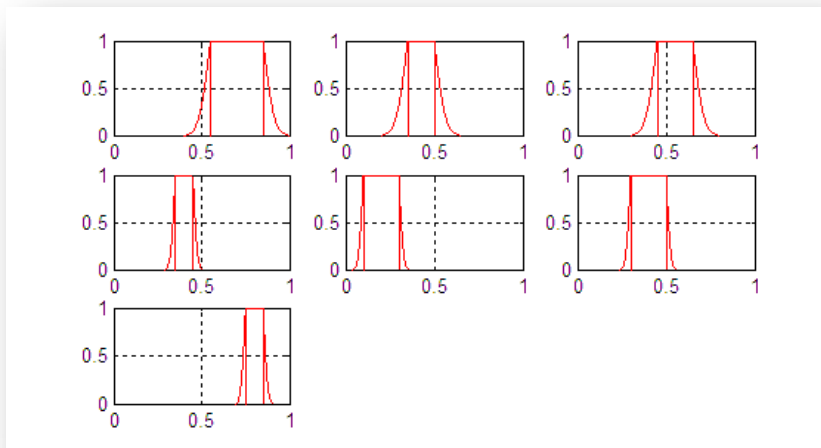


Figura 46: FIS di esempio, risultato del passo “Weigh Each Rule”

Nel FIS tradizionale, per ogni regola fuzzy, la MF dell'uscita alla quale la regola fa riferimento è in qualche modo pesata con il risultato ottenuto al

passo precedente, secondo gli operatori "MIN" o "PROD". Considerando l'operatore "PROD", il passo viene implementato moltiplicando la MF dell'uscita per il singolo valore numerico, ottenuto al passo precedente.

Nell'inferenza modificata, per ogni livello α , la stessa MF dell'uscita può essere moltiplicata per i quattro differenti valori che costituiscono un α -cut della RFV di ingresso, fornendo in questo modo due "zone di incertezza".

La figura 47 mostra il risultato per l'esempio considerato, per il valore $\alpha=0$. Considerando l'intervallo esterno della RFV di ingresso, la zona di incertezza che si ottiene è quella compresa tra le tracce blu e azzurra, mentre considerando l'intervallo interno la zona di incertezza è compresa tra le tracce verde e rossa.

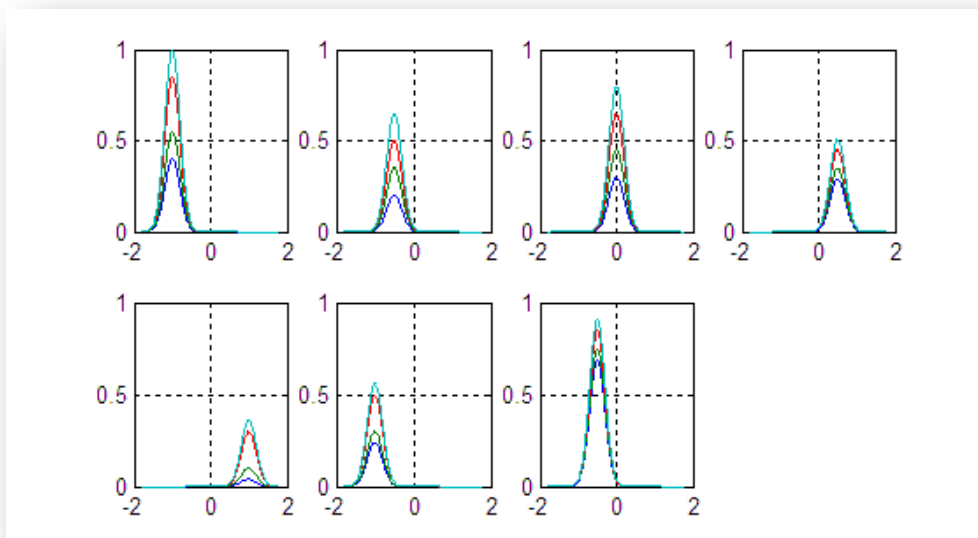


Figura 47: FIS di esempio, risultato del passo "Apply Implication Method", $\alpha=0$

5. Pre-aggregation

Il passo precedente fornisce dunque quattro MF per ogni regola. L'efficienza computazionale di sistemi fuzzy con un elevato numero di regole potrebbe venire compromessa nel tentativo di elaborare direttamente questa notevole quantità di dati. Per questa ragione, prima del vero passo di aggregazione, si inserisce una pre-aggregazione.

In questo passo si uniscono i risultati che fanno riferimento alla stessa MF dell'uscita, applicando l'operatore del passo di aggregazione vero e proprio ("MAX" o "SUM").

Nell'esempio riportato, il primo ed il sesto grafico di figura 47 fanno entrambi riferimento alla MF "low" dell'uscita ed il secondo e il settimo fanno entrambi riferimento alla MF "medium-low". L'operatore scelto viene dunque applicato tra i due grafici di ogni coppia. Nell'esempio è impiegato l'operatore "MAX".

I grafici dal 3 al 5 di figura 47 vengono invece riportati tali e quali in quanto non esistono altri risultati relativi alle MF "medium", "medium-high" e ad "high".

I risultati della pre-aggregazione sono riportati nella seguente figura.

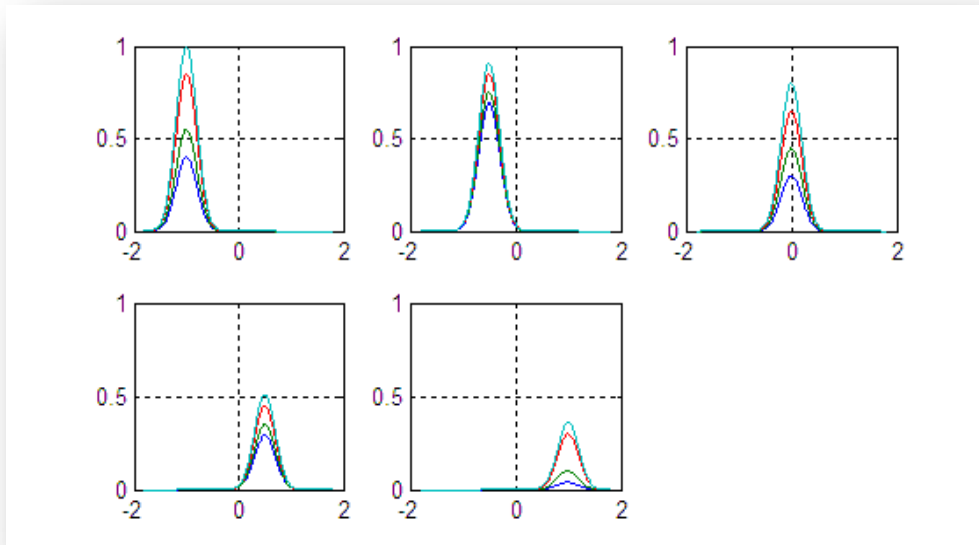


Figura 48: FIS di esempio, risultato del passo "Pre-aggregation", $\alpha=0$

Procedendo in questo modo, i passi successivi dovranno elaborare una minor quantità di dati; a valle di questo passo, infatti, si ottengono sempre un numero di grafici pari al numero totale di MF dell'uscita, nell'esempio contemplato, pari a cinque.

6. Aggregate all Outputs

Nell'inferenza tradizionale, tutte le uscite dell'implicazione fuzzy vengono aggregate secondo gli operatori di "MAX" o "SUM", per ottenere una singola figura geometrica.

Nell'inferenza modificata, per ogni valore di α , le uscite precedenti non mostrano curve singole ma definiscono i bordi di due zone di incertezza relative agli intervalli interno ed esterno.

Il passo deve dunque fornire due figure geometriche che mostrano multiple zone di incertezza, una figura relativa all'intervallo esterno ed una relativa a quello interno.

Il compito del passo successivo sarà dunque quello di calcolare i baricentri (metodo del "centroide") di tutte le possibili figure geometriche che sono comprese nella zona di incertezza.

Dal punto di vista computazionale, non è ovviamente possibile considerare tutte le possibili curve comprese tra i due estremi della zona di incertezza. Tale zona viene dunque divisa linearmente in tre spazi, calcolando la posizione di due curve intermedie tra la minima e la massima di figura 48, sia per l'intervallo esterno (curve blu e azzurra) che per quello interno (curve verde e rossa).

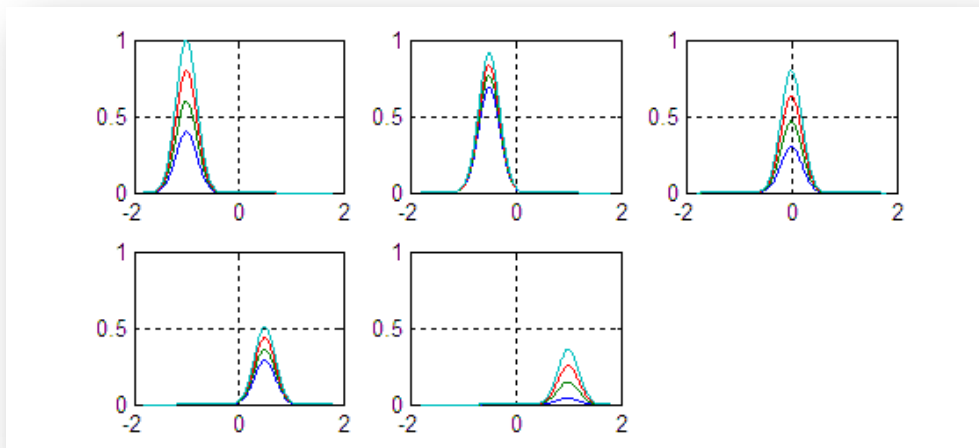


Figura 49: FIS di esempio, lin. della banda di incertezza, intervallo esterno, $\alpha=0$

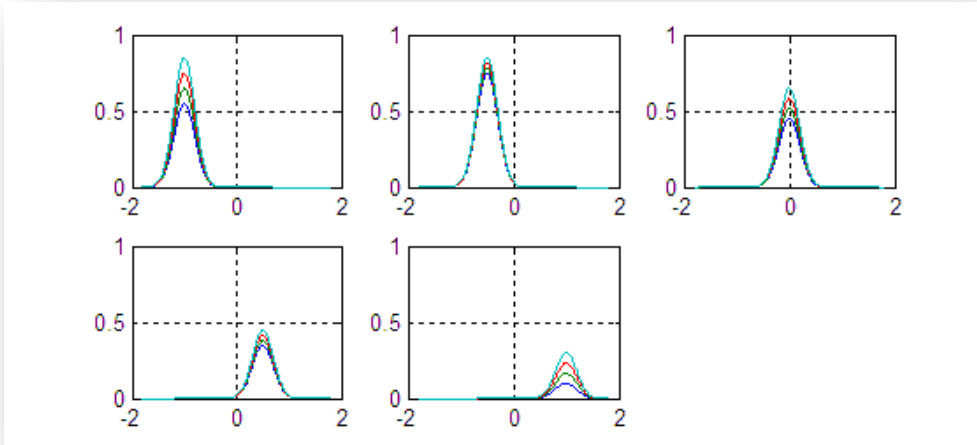


Figura 50: FIS di esempio, lin. della banda di incertezza, intervallo interno, $\alpha=0$

In questo modo si limita il numero delle possibili combinazioni di aree aggregate, componendo le varie curve, a $4^5 = 1024$ per l'intervallo esterno e ad altrettante per quello interno.

Ciò risulta molto utile in termini di risparmio di tempo di elaborazione, in quanto queste operazioni devono essere eseguite per ogni livello di α .

Le curve che identificano le 1024 aree aggregate per l'intervallo esterno sono disegnate nella seguente figura.

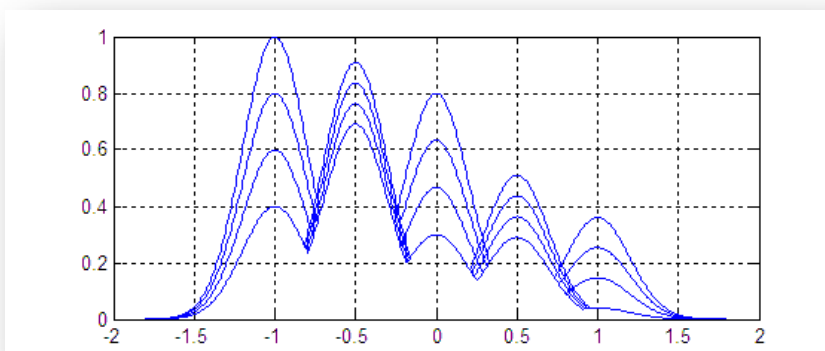


Figura 51: FIS di esempio, risultato del passo "Aggregate All Outputs", intervallo esterno, $\alpha=0$

7. Defuzzify

Nell'inferenza tradizionale, in questo passo viene calcolato un singolo valore legato ad esempio al baricentro della figura se viene considerato il metodo del "centroide". Nell'inferenza modificata, l'incertezza fa sì che si possano ottenere 1024 baricentri per l'intervallo esterno e altrettanti per quello interno. Considerando il minimo ed il massimo di queste due serie di numeri, si ottengono quattro valori che possono essere considerati come un α -cut della RFV di uscita, a livello α .

Ripetendo dunque i passi 4, 5, 6 e 7 per ogni valore di α , è possibile ricostruire la RFV completa dell'uscita.

Per l'esempio considerato, la RFV dell'uscita è mostrata in figura 52.

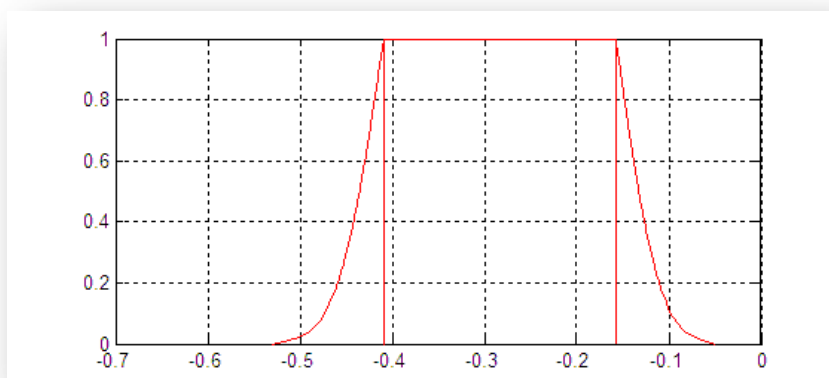


Figura 52: FIS di esempio, RFV di uscita

Grazie all'approccio fuzzy esteso all'incertezza è dunque possibile esprimere e propagare correttamente attraverso il metodo di calcolo, tutte le componenti di incertezza che hanno influenza sull'indice ξ_{dist} .

Come risultato, l'uscita del FIS espressa in termini di RFV è in grado di fornire, rispetto all'indice costituito da un singolo valore numerico, informazioni di più alto livello sulla PQ in un nodo della rete.



Capitolo 6

In questo capitolo vengono presentati i risultati dell'inferenza fuzzy modificata per le stesse simulazioni preliminari e di test considerate precedentemente per il FIS tradizionale. Viene quindi inizialmente discussa l'ottimizzazione del FIS modificato ed in seguito la validità dei risultati raggiunti, confrontandoli con quelli ottenuti mediante il FIS tradizionale.



6.1 Risultati delle simulazioni preliminari

L'inferenza fuzzy modificata, descritta nel precedente capitolo, viene implementata mantenendo inalterate tutte le caratteristiche del FIS tradizionale.

Il FIS modificato viene ottimizzato, e successivamente testato, mediante le stesse simulazioni considerate per l'inferenza fuzzy classica.

Per costruire le RFV rappresentanti gli ingressi del FIS, è necessario simulare l'effetto dell'incertezza di misura.

La componente di incertezza strumentale viene infatti considerata sia nelle simulazioni preliminari che nelle simulazioni di test condotte, supponendo che i singoli campioni di tensione e corrente siano affetti da un contributo sistematico dell'incertezza e da uno aleatorio.

Si ipotizza che il contributo sistematico sia compreso nell'intervallo $\pm 0.2\%$ (in riferimento ai valori nominali di 13.8 kV per le tensioni e 470 A per le correnti) e che quello aleatorio sia rappresentato da una distribuzione di probabilità normale di deviazione standard pari allo 0.02% degli stessi valori di riferimento.

Si simula, inoltre, la presenza di incertezza nella misura dell'angolo di fase tra tensioni e correnti introducendo un ritardo temporale tra i rispettivi campioni acquisiti, pari a $5 \cdot 10^{-3}$ rad.

Questi contributi di incertezza sono compatibili con quelli che si riscontrerebbero per misure elettriche effettuate sul campo mediante trasduttori di misura e dispositivi di acquisizione dati [44].

La figura seguente mostra le RFV relative al calcolo dell'indice ξ_{dist} per tutte le linee, nel caso "T1" al 100%. Per questo caso è inserito un singolo carico distorto a livello 1A.

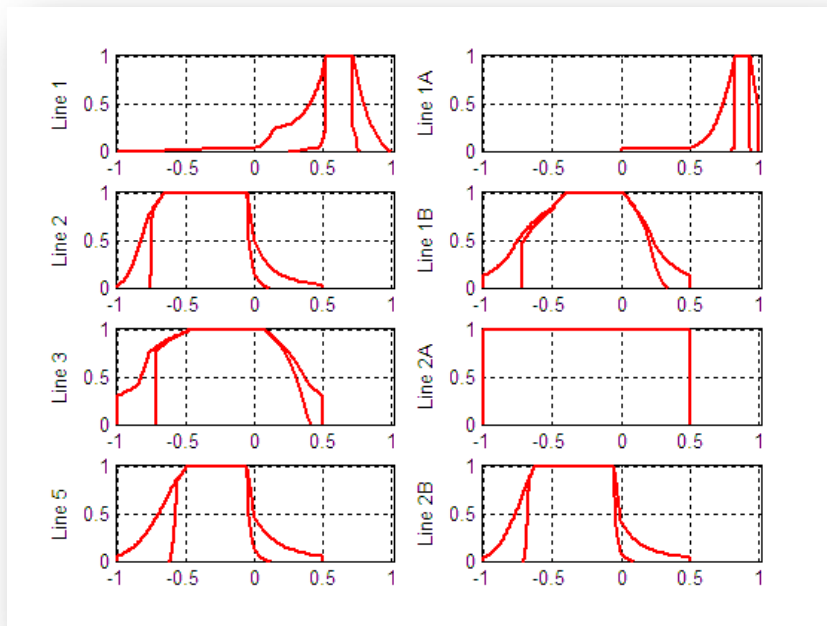


Figura 53: ξ_{dist} , "T1" 100%

La figura mostra che, per grandi livelli di confidenza (bassi livelli di α), tutte le linee possono apparire sia come inquinanti, sia come inquinate, visto che quasi tutte le RFV attraversano, per un certo valore di α , la soglia dello zero.

Questo risultato pone completamente in dubbio i risultati dell'approccio tradizionale al calcolo dell'indice ξ_{dist} , mostrando che l'incertezza associata all'indice può essere di entità tale da modificare l'attribuzione delle responsabilità dell'inquinamento.

Un tentativo per ridurre il drammatico effetto dell'incertezza sull'indice viene effettuato modificando l'implicazione sull'uscita di alcune regole.

Osservando i risultati dei passi intermedi del FIS è stato possibile individuare quali regole fossero responsabili dell'attraversamento dell'asse $\xi_{\text{dist}}=0$ da parte della RFV di uscita.

La modifica effettuata riguarda le regole 7 e 34, evidenziate in tabella 18. In dettaglio, l'attributo "medium-high", assegnato all'uscita nell'implicazione della regola 7, viene

modificato in “medium” e l’attributo “low”, assegnato nell’implicazione della regola 34, viene variato in “medium-low”.

Questa semplice modifica di due attributi dell’implicazione risulta avere grande influenza sui risultati del FIS modificato ed, al contrario, scarsissima influenza sui risultati dell’approccio tradizionale.

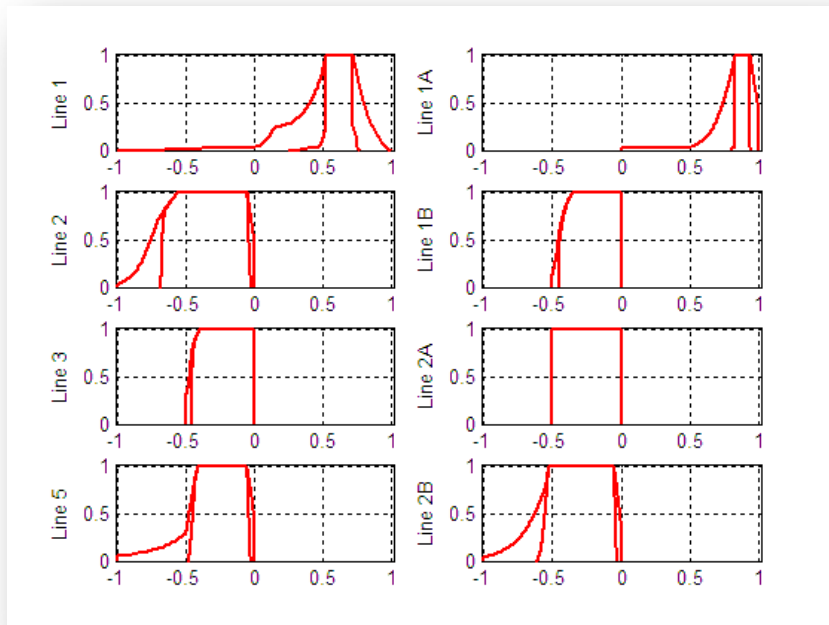


Figura 54: ξ_{dist} , “T1” 100%, successivamente alla modifica delle regole 7 e 34

L’influenza di tale cambiamento è esercitata, in special modo, sugli indici dei carichi inquinati che sono identificati come tali, per ogni livello α .

L’effetto dell’incertezza risulta limitato ad un livello accettabile: se vengono considerati gli intervalli risultanti da un α -cut con livello di confidenza pari al 70%-75% ($\alpha=0.3-0.25$), si ottengono buone indicazioni sul livello di inquinamento introdotto o subito da un carico.

Il carico distortente è infatti nettamente individuato sia a livello superiore (linea 1) che a livello inferiore (linea 1A). La distorsione introdotta risulta di maggiore entità a

livello inferiore in quanto è rapportata alla modesta potenza attiva in gioco nella sotto-sbarra in esame.

A seguito della modifica delle due regole è nuovamente valutato l'indice ξ_{dist} mediante il FIS tradizionale. La modifica ha in questo caso effetto solo sulla seconda o terza cifra decimale dell'indice. Il confronto fra i risultati del FIS tradizionale prima e dopo la modifica è riportato in tabella 23 per la simulazione "T1" al 100%.

	ξ_{slq}	$\ I_{\Sigma_L}\ ^2$	η_2^+	$\ I_{\Sigma_S}\ ^2$	ξ_{dist} "T1" successivamente alla modifica delle regole 7 e 34	ξ_{dist} "T1"
1	0.9967	487.09	1.0067	28.09	0.63	0.63
2	1.0001	2.25	0.9967	17.56	-0.31	-0.29
3	1.0001	1.35	0.9967	3.99	-0.18	-0.16
5	1.0001	1.76	0.9967	11.84	-0.18	-0.16
1A	0.9931	458.62	1.0506	62.75	0.89	0.89
1B	1.0001	0.90	0.9967	5.24	-0.18	-0.16
2A	1.0001	0.86	0.9971	3.30	-0.17	-0.15
2B	1.0001	1.76	0.9967	14.30	-0.25	-0.22

Tabella 23: ξ_{dist} , "T1" al 100%, confronto dei valori prima e dopo la modifica delle regole 7 e 34

La ragione della profonda differenza tra l'impatto della modifica sul FIS modificato e quello sul il FIS tradizionale è legata al differente comportamento dei due nei confronti delle regole il quale valore di appartenenza, risultante dopo l'applicazione delle operazioni logiche fuzzy, è di poco superiore allo zero.

Nel FIS tradizionale, infatti, una tale regola ha limitatissima influenza sull'uscita, in quanto apporta alla superficie aggregata finale, una superficie di area trascurabile.

Non è così invece per l'inferenza fuzzy modificata, nella quale vengono calcolate tutte le possibili combinazioni di aree aggregate, per ogni livello α .

Se in una sola di queste combinazioni l'area risultante dalle altre regole viene azzerata, è possibile che una regola con valore di appartenenza quasi nullo sposti considerevolmente uno dei 1024 baricentri, risultanti dalle corrispondenti combinazioni. Questo comporterebbe una consistente variazione del valore minimo dei baricentri o di quello massimo.

Ripetendosi l'effetto per tutti i valori di α , verrebbe così spostato l'intero estremo sinistro della RFV di uscita o, rispettivamente, quello destro.

Questo è l'esatto effetto che hanno le regole 7 e 34 sui risultati riportati in figura 53. Grazie alla modifica dell'implicazione delle due regole, è dunque possibile ottenere RFV di ampiezza minore che forniscono risultati più netti.

I risultati della simulazione "T1" al 60% ed al 20% di potenza assorbita dal ponte, rispetto alla nominale, sono rispettivamente riportati in figura 55 e 56.

Tutti i risultati mostrati successivamente si riferiscono al FIS risultante dopo la modifica delle regole 7 e 34.

Per brevità, i risultati intermedi, riferiti al 80% ed al 40% di potenza assorbita, non vengono qui riportati.



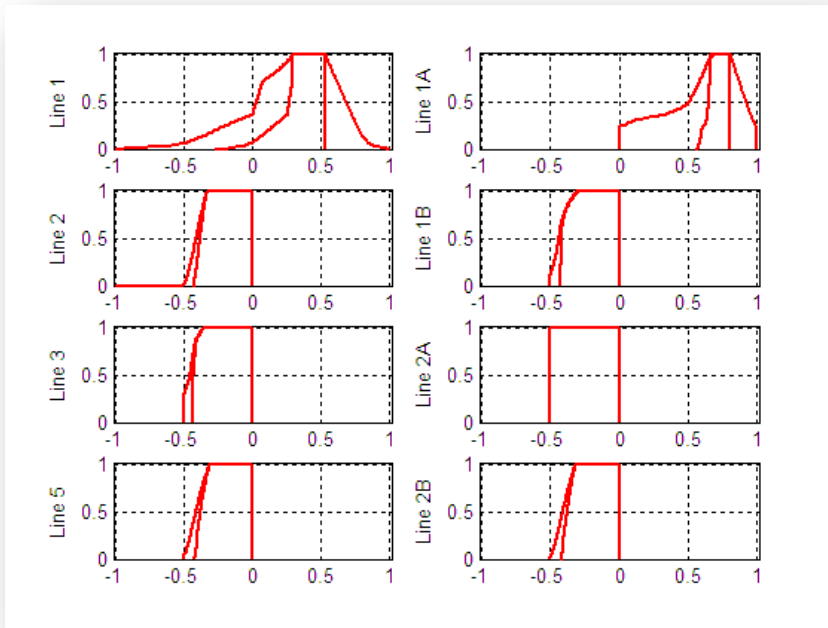


Figura 55: ξ_{dist} , "T1" 60%

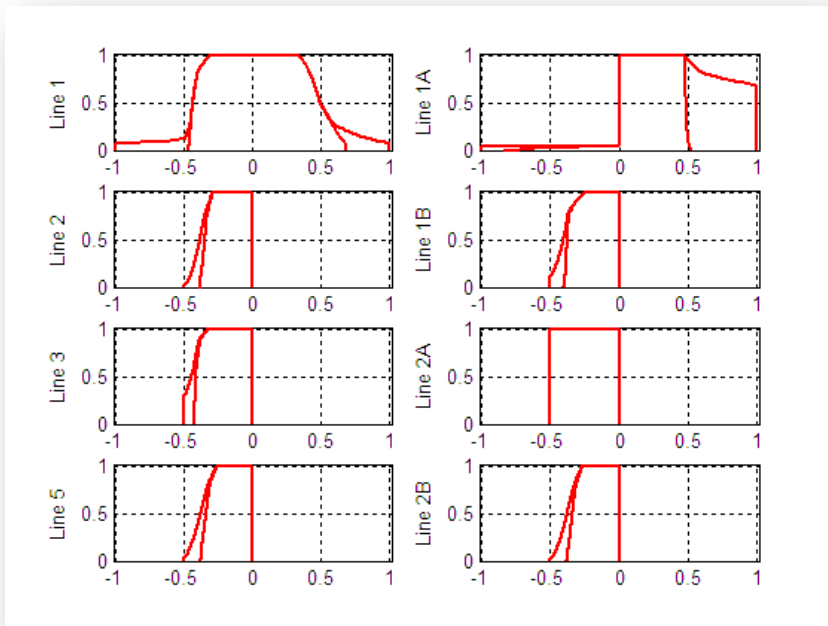


Figura 56: ξ_{dist} , "T1" 20%

I risultati mostrano che, a livello superiore (grafici della colonna sinistra), al diminuire della potenza assorbita dal ponte, il carico distorcente collegato alla linea 1 è sempre più difficilmente identificabile come tale.

Per una potenza assorbita pari al 20% della nominale, risulta impossibile determinare il collegamento del ponte distorcente.

A livello inferiore, invece, (grafici della colonna destra), la RFV della linea 1A rimane sempre nel corretto semipiano destro; in realtà, per "T1" al 20%, l'incertezza fa sì che la RFV arrivi ad abbracciare praticamente l'intero semipiano destro.

Queste difficoltà sono però giustificate dalla constatazione che, per una potenza assorbita dal ponte pari al 20% della nominale, i disturbi introdotti risultano di entità molto modesta in relazione alle notevoli potenze assorbite dai carichi.

I carichi inquinati sono sempre identificati come tali, le rispettive RFV si avvicinano maggiormente all'asse $\xi_{\text{dist}}=0$, al decrescere dalla potenza assorbita. Il calcolo dell'impatto dell'incertezza evidenzia che il grado di inquinamento elettrico subito da queste apparecchiature può avere entità variabile tra gli estremi -0.5 e 0.

Le seguenti figure propongono i risultati delle simulazioni "T2" per potenze percentuali pari a 100%, 60% e 20%.

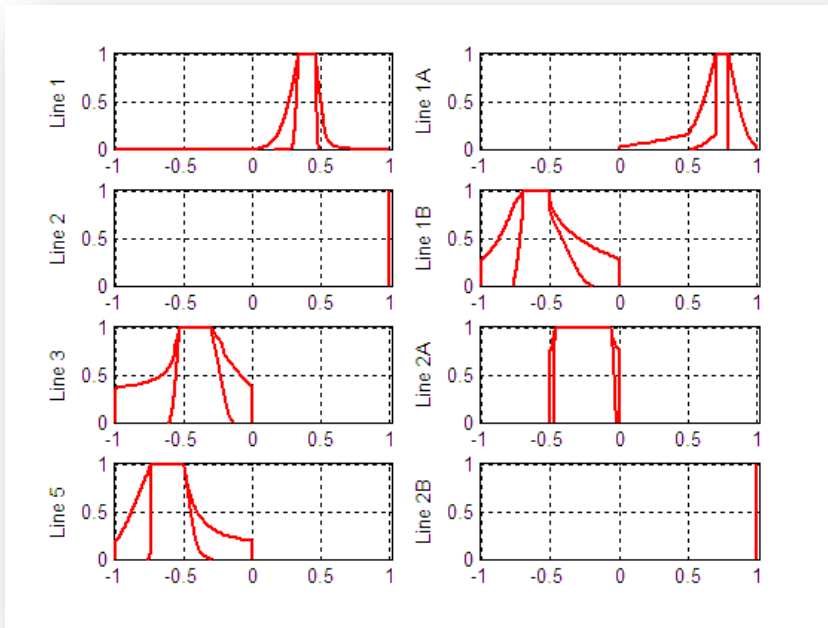


Figura 57: ξ_{dist} , "T2" 100%

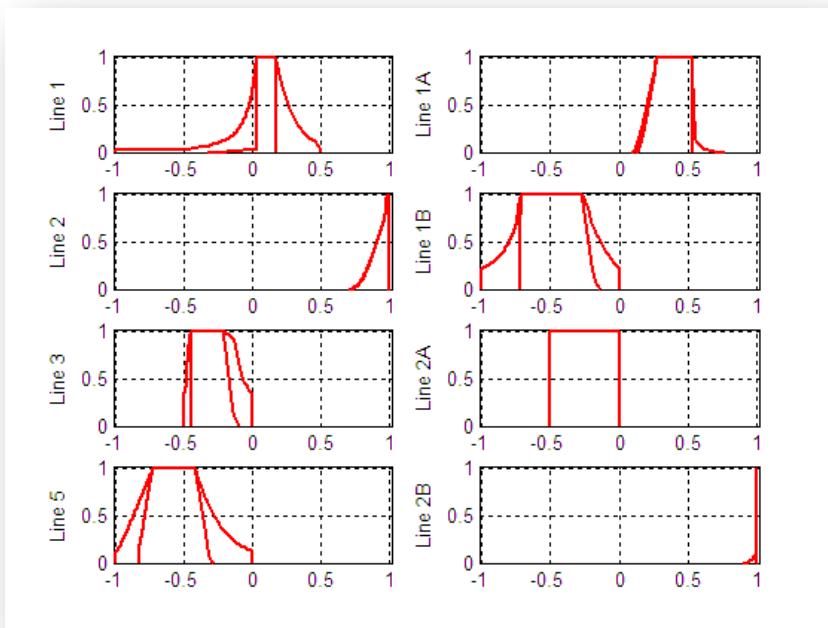


Figura 58: ξ_{dist} , "T2" 60%

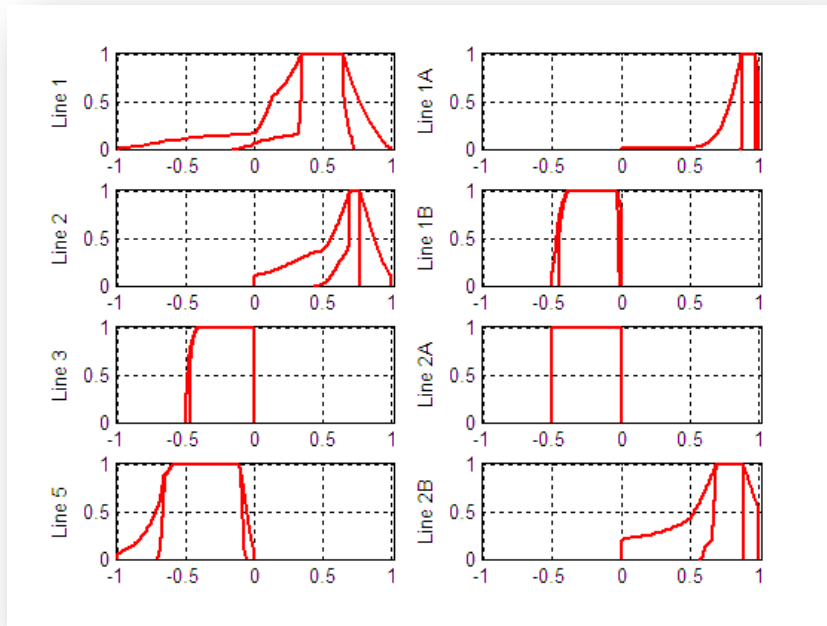


Figura 59: ξ_{dist} , "T2" 20%

Anche in questo caso, i carichi distorcenti, collegati in 1A ed in 2B, sono correttamente identificati per ogni percentuale di potenza assorbita dal ponte. Nei casi "T2" al 100% ed al 60%, l'indice ξ_{dist} valutato per il ponte a potenza prevalente collegato in 2B, è posto ad 1 per ogni valore di α . L'incertezza non ha in questi casi effetto sull'uscita ξ_{dist} in quanto il FIS identifica il carico come nettamente inquinante per ogni valore degli ingressi che cade nell'intervallo costituito dall'incertezza estesa ad essi associata.

Le RFV relative a carichi inquinati si trovano sempre nel rispettivo semipiano sinistro.

Correttamente, al decrescere della potenza percentuale, tutte le RFV si avvicinano alla soglia dello zero che molto raramente viene attraversata.

Osservando contemporaneamente i risultati del FIS tradizionale e quelli del FIS modificato, tra i due si rileva un'ottima compatibilità.

Riportando infatti i risultati puntuali del FIS tradizionale, mostrati per il caso in esame nelle figure 30 e 31, nelle rispettive RFV, si nota che essi rappresentano sempre un punto prossimo al centro dei due valori del α -cut per $\alpha=1$.

Questa osservazione rafforza la validità del metodo proposto di generalizzazione dell'inferenza fuzzy tradizionale.

Come ci si poteva aspettare, l'effetto dell'incertezza è quello di sfumare le nette informazioni estratte dall'indice puntuale ξ_{dist} , a riguardo del solo grado di inquinamento introdotto o subito. Nella maggior parte dei casi evidenziati, infatti, la direzione dei disturbi identificata dal FIS tradizionale, viene confermata dal FIS modificato.

I risultati dell'ultima simulazione preliminare condotta sono mostrati in figura 60.

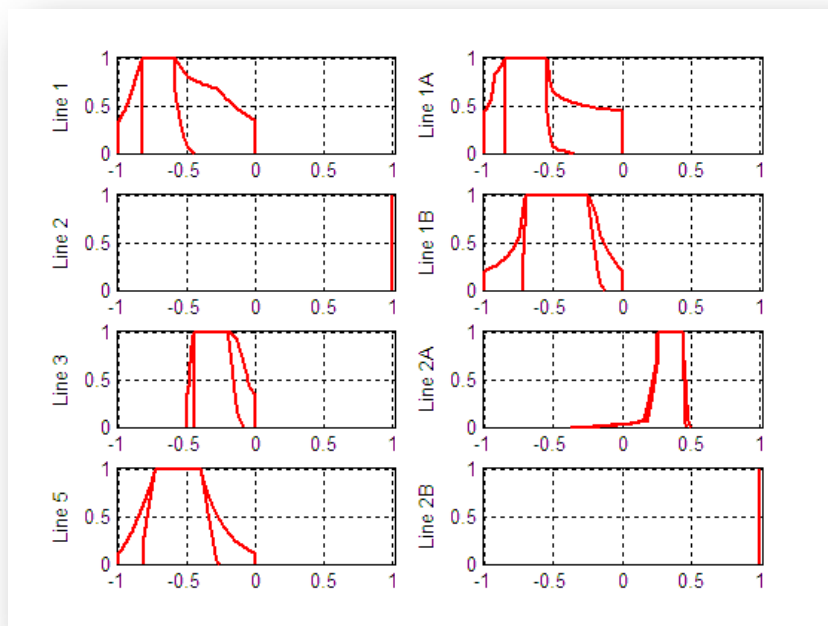


Figura 60: ξ_{dist} , "T3"

In questa simulazione, la linea 2, ed in particolare il carico collegato in 2B, vengono identificati come nettamente inquinanti. Il ponte collegato in 2A, di potenza

decisamente inferiore rispetto a quello collegato in 2B, è identificato come inquinante di grado modesto.

Tutte le restanti linee risultano inquinate. In dettaglio, l'indice valutato per le linee 1 ed 1A mostra per $\alpha=0.25\sim 0.3$ una completa variabilità tra -1 e 0. È dunque difficile dedurre il livello dei disturbi subiti da tale carico.

Anche per il FIS modificato, è stata dunque possibile l'ottimizzazione che ha portato il sistema a produrre a risultati significativi.

L'indice espresso in termini di RFV fornisce infatti, nella maggior parte dei casi, utili indicazioni sulla PQ in un nodo della rete. Nel contempo, i risultati giustificano la necessità di valutazione dell'incertezza associata a ξ_{dist} , visto il grande impatto che questa mostra, nei confronti dell'indice puntuale.

Similarmente al caso del FIS tradizionale, nel prossimo paragrafo vengono presentati i risultati delle simulazioni di test.

6.2 Risultati delle simulazioni di test

Le figure seguenti riportano i risultati del gruppo di simulazioni "C1", per il quale è stato collegato un ponte raddrizzatore a diodi in 1A ed uno a tiristori in 2B.

I valori dell'angolo di accensione dei tiristori considerati sono tre: 45° , 67.5° e 90° . In realtà, i risultati di "C1" per un angolo di accensione pari a 0° sono già riportati in figura 57, visto che la configurazione di rete, le potenze e gli angoli in gioco per questo caso, coincidono alla perfezione con quelli di "T2" al 100%.

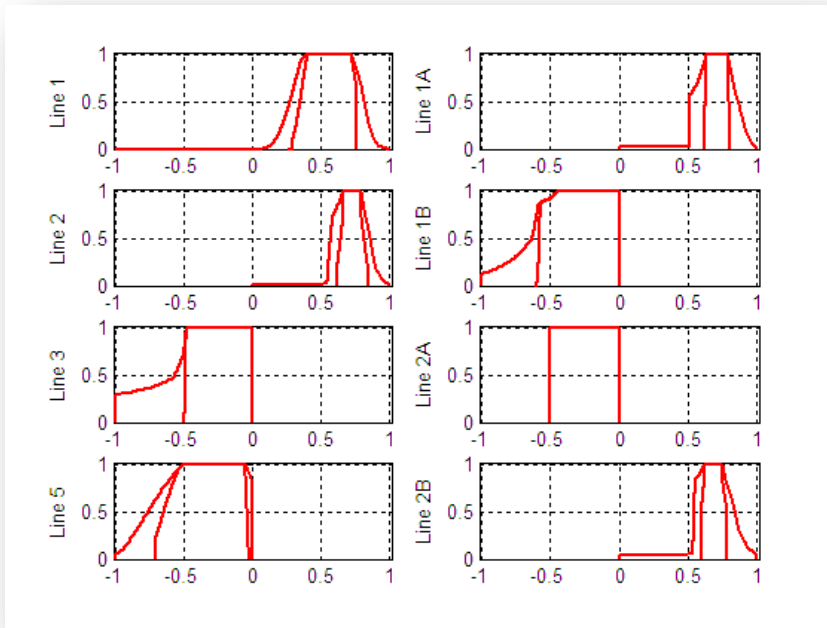


Figura 61: ξ_{dist} , "C1", $\alpha_{2B}=45^\circ$

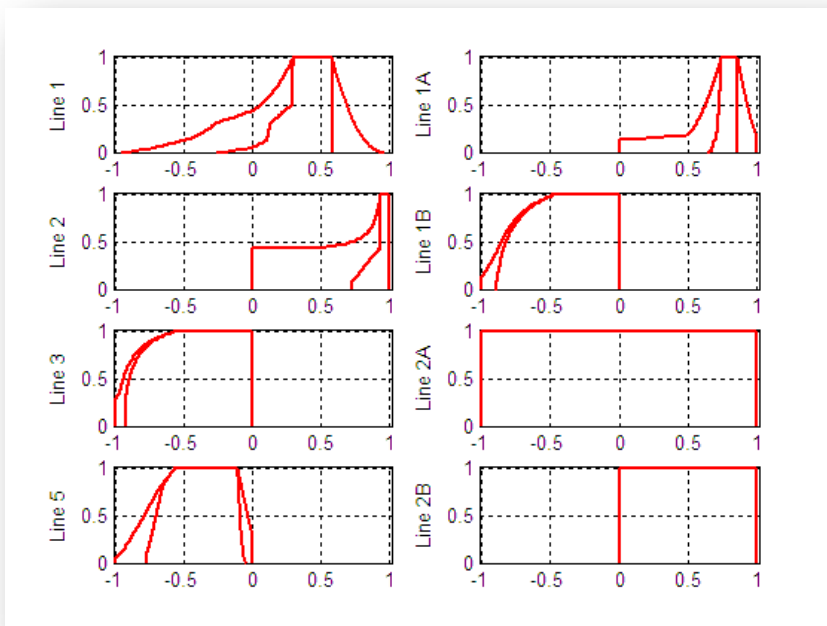


Figura 62: ξ_{dist} , "C1", $\alpha_{2B}=67.5^\circ$

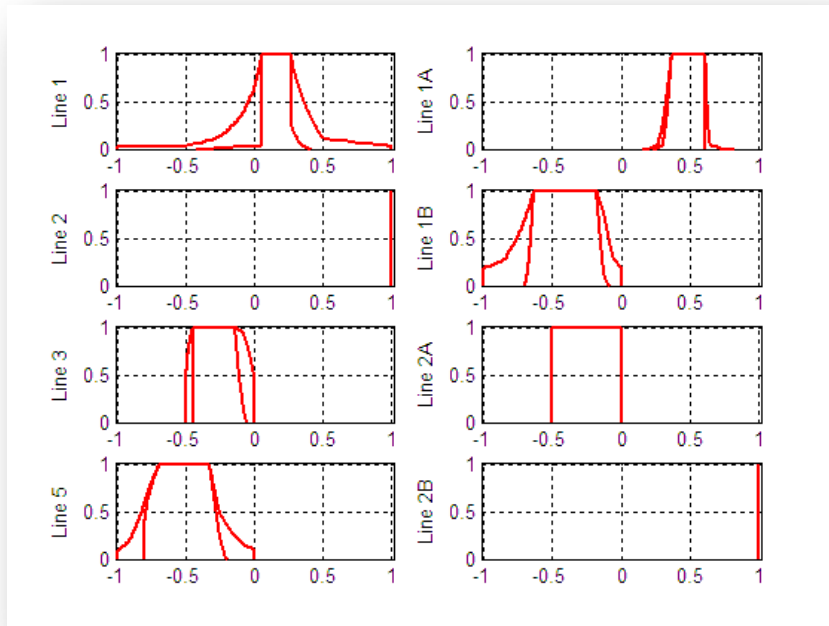


Figura 63: ξ_{dist} , "C1", $\alpha_{2B} = 90^\circ$

I risultati mostrano una buona identificazione, da parte dell'indice, dei carichi che iniettano o subiscono l'inquinamento per i casi $\alpha=45^\circ$ e $\alpha=90^\circ$.

Per il caso $\alpha=67.5^\circ$, l'incertezza ha un effetto molto più evidente su tutti gli indici valutati ed in special modo sulle linee 2A e 2B, le quali RFV abbracciano rispettivamente tutto il piano e tutto il semipiano destro.

Per queste due linee, gli indici in ingresso ξ_{slq} e η_2^+ risultano affetti da un contributo di incertezza tale che essi risultano poter abbracciare completamente, o non abbracciare affatto, ogni MF associata. È chiaro dunque che il FIS non possa fornire delle informazioni dettagliate a riguardo del livello di inquinamento e della direzione dei disturbi associati a queste due linee.

Il risultato ottenuto non è però vano, in quanto, contrariamente alle nette indicazioni fornite dal FIS tradizionale, suggerisce per questo caso la necessità di una ulteriore e maggiormente dettagliata analisi metrologica della PQ.

I risultati per il gruppo di simulazioni "C2" sono presentati nelle seguenti figure.

Per tale caso è stata mantenuta la configurazione di rete di "C1", fissando l'angolo di accensione del ponte collegato in 2B al valore di 67.5° e rendendo variabile la potenza assorbita dal ponte collegato in 1A.

I risultati qui riportati corrispondono a valori di potenza percentuale del 60% e del 20%. È però necessario considerare che i risultati di "C2" al 100% corrispondono a quelli del caso "C1" con $\alpha=67.5^\circ$, riportati in figura 62.

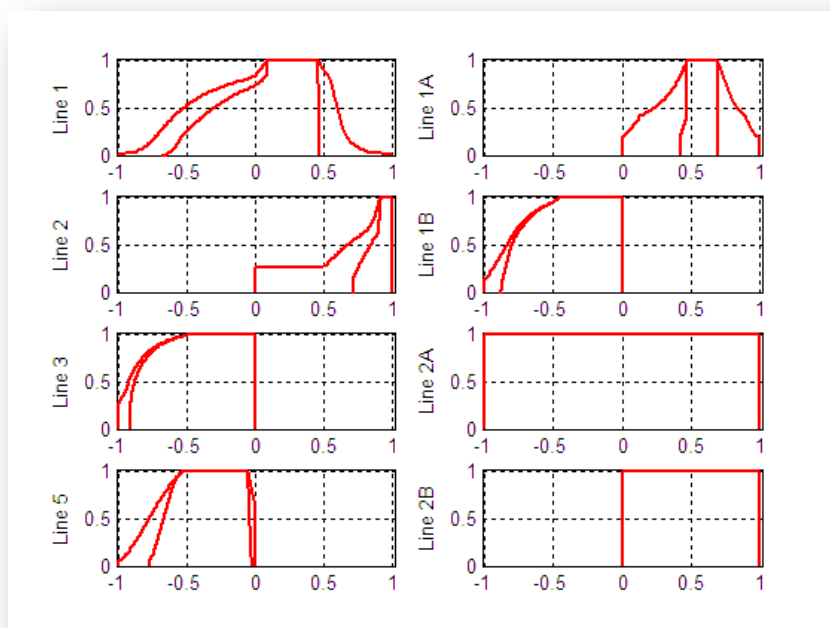


Figura 64: ξ_{dist} , "C2" 60%

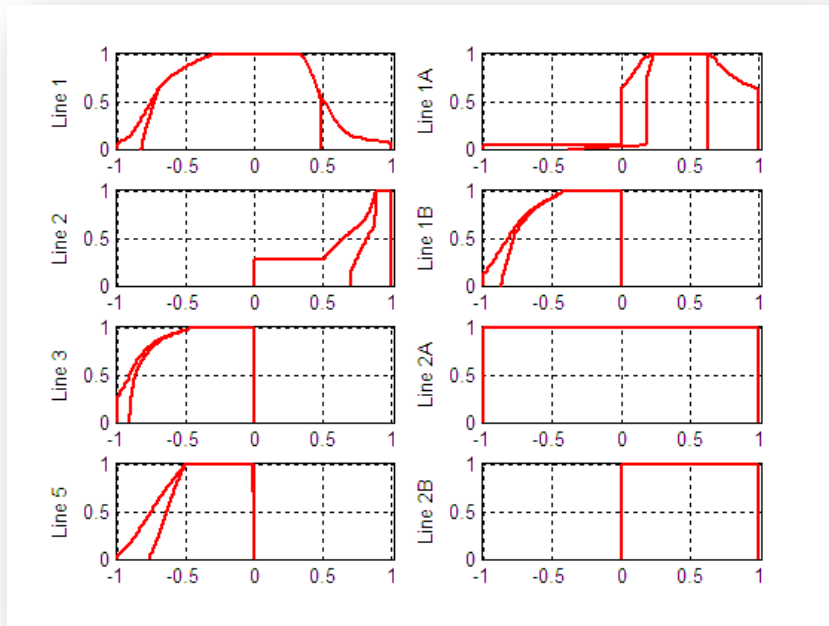


Figura 65: ξ_{dist} , "C2" 20%

Come appare evidente dalle figure, le RFV risultanti risultano avere nuovamente un'ampiezza notevole a causa della grande incertezza mostrata dagli indici ξ_{slq} e η_2^+ . Si deduce quindi che, per tutte le simulazioni in cui α_{2B} assume il valore 67.5° , sono presenti alcune componenti armoniche di corrente, di entità rilevante e con direzione di propagazione ignota, a causa dell'incertezza.

In questi casi, l'inferenza fuzzy modificata giustifica a posteriori la necessità di valutare l'impatto dell'incertezza sull'indice ottenuto grazie all'approccio tradizionale. Le ambiguità, non identificate dall'indice espresso mediante un singolo valore, vengono infatti svelate dall'approccio modificato; questo approccio rivela dunque la sua importanza nel suggerire di condurre analisi più approfondite sulla PQ in configurazioni nelle quali permane una certa ambiguità.

Vengono quindi esaminati i risultati delle simulazioni "C3".

Per questo caso, sono stati collegati due raddrizzatori controllati alla linea 1: il primo, con angolo di accensione dei tiristori variabile, è stato collegato in 1A, mentre il secondo, con angolo fisso ad un valore pari a 45° , è stato collegato in 1B.

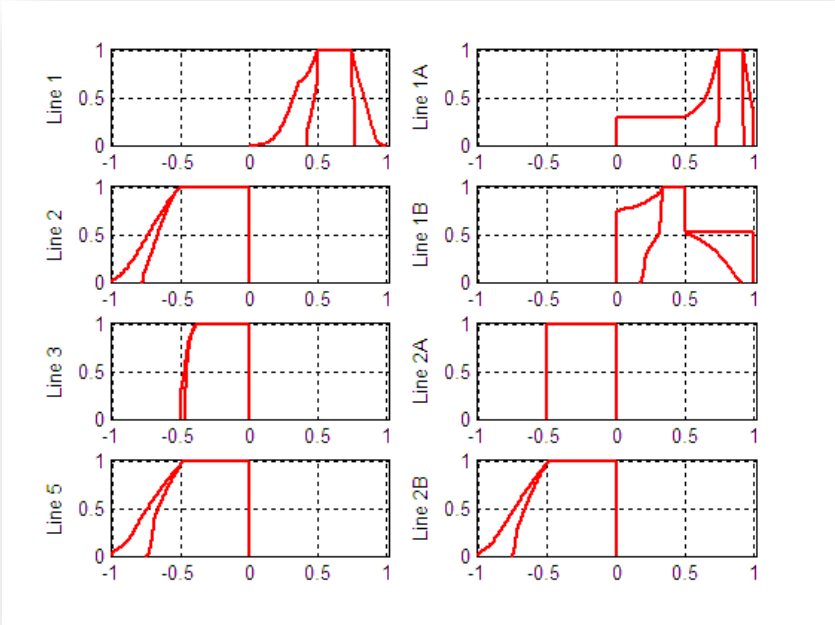


Figura 66: ξ_{dist} , "C3", $\alpha_{1A}=0^\circ$

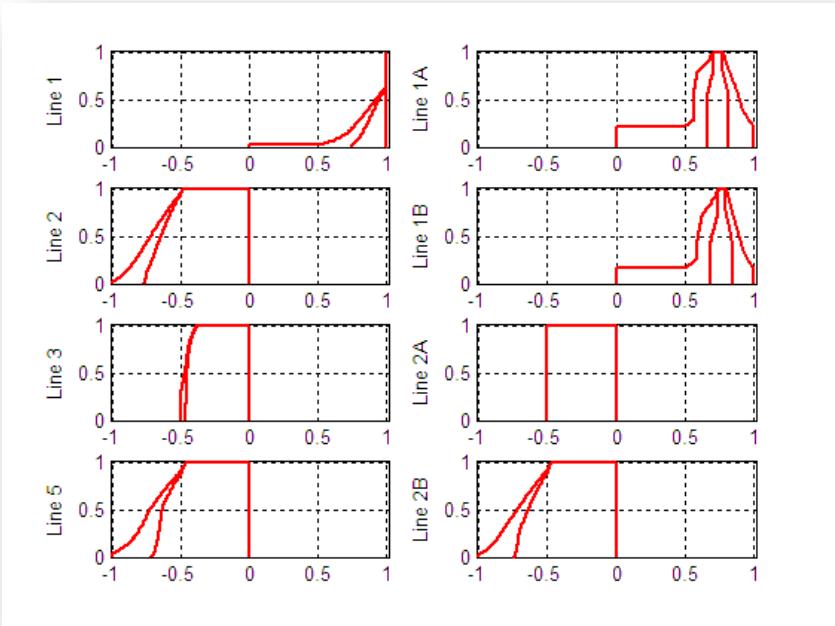


Figura 67: ξ_{dist} , "C3", $\alpha_{1A}=45^\circ$

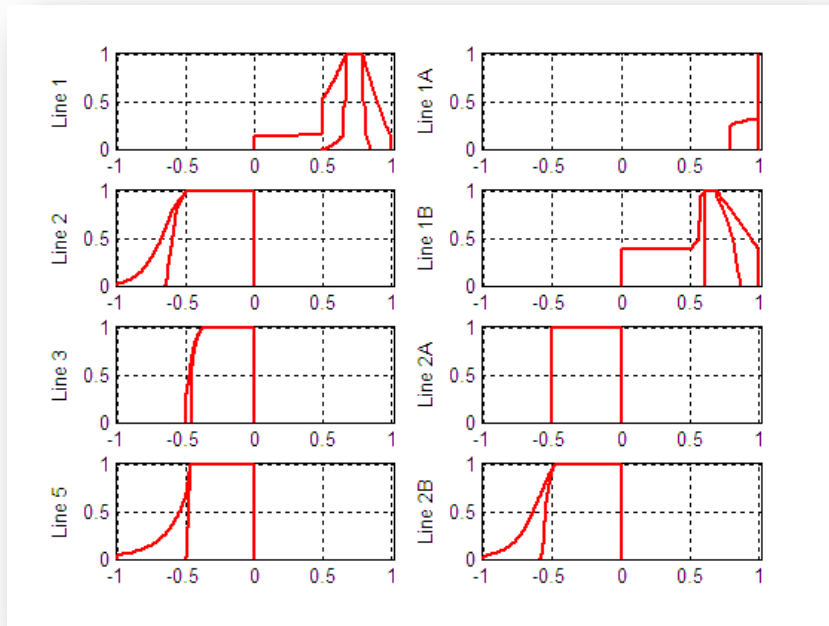


Figura 68: ξ_{dist} , "C3", $\alpha_{1A}=90^\circ$

Le RFV risultati per questo caso forniscono indicazioni sufficientemente nette a riguardo della PQ e della direzione dei disturbi per tutte le linee della rete. In accordo ai risultati del FIS tradizionale, il livello di disturbi introdotti dal carico collegato in 1A, identificato come distorcente, appare in aumento all'aumentare del proprio angolo di accensione dei tiristori. Anche il ponte collegato in 1B è sempre correttamente identificato come inquinante.

Similarmente ai risultati mostrati dall'indice ξ_{dist} costituito da un singolo valore numerico, tutti i restanti carichi risultano lievemente inquinati per ogni valore di α_{1A} .

Con l'ultima simulazione di test, è stato analizzato il comportamento del sistema in caso di risonanza del carico lineare collegato alla linea 5.

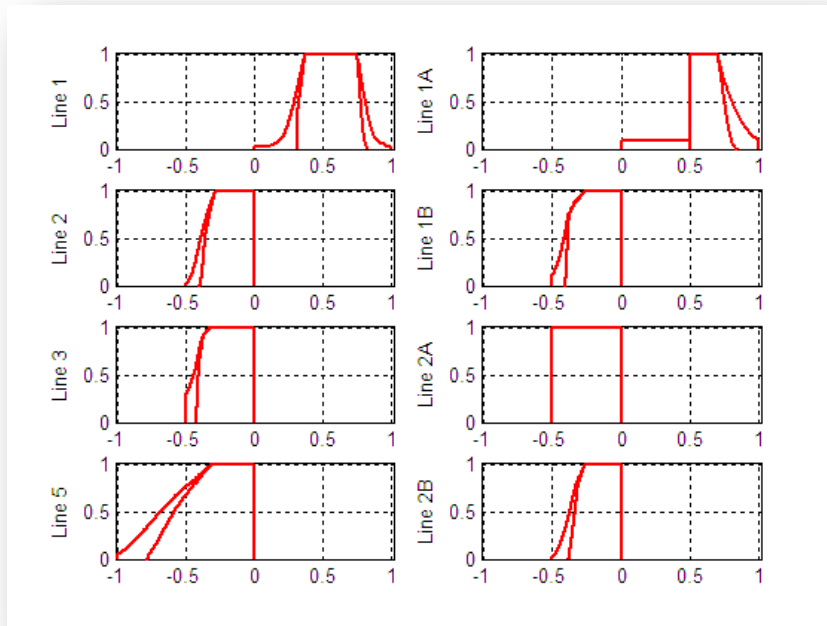


Figura 69: ξ_{dist} , "C4"

Confrontando i risultati di figura 69 con quelli ottenuti in assenza di risonanza (*fig. 54*), si nota che la banda di incertezza delle RFV delle linee inquinanti 1 ed 1A è più grande in caso di risonanza. Ciò non inficia in nessun modo l'identificazione dell'introduzione dei disturbi.

In accordo con l'approccio tradizionale, le RFV dei carichi inquinati risultano avvicinarsi all'asse $\xi_{\text{dist}}=0$. Il livello dei disturbi subiti decresce grazie all'introduzione del filtro per la settima armonica di corrente, rappresentato dal risonatore RLC serie.

I risultati del FIS modificato confermano dunque i risultati ottenuti dal FIS tradizionale, in quanto le RFV così ottenute sono sempre centrate sui singoli valori numerici forniti dal FIS tradizionale.

Tuttavia, in alcuni casi le RFV forniscono, soprattutto per elevati valori del livello di confidenza (α -cut inferiori), intervalli molto ampi che talora coprono quasi per intero il range $[-1, 1]$ di variabilità dell'indice ξ_{dist} .

Conclusioni

Vengono infine discussi e confrontati i due approcci proposti per la valutazione di un indice di PQ, mettendo in luce i risultati raggiunti e le possibili evoluzioni future. Si accenna inoltre alle possibili implicazioni dei metodi presentati sulla normativa elettrica vigente.



Obiettivi raggiunti

In questo elaborato è stato presentato un approccio fuzzy per l'identificazione delle sorgenti di disturbi periodici e per la quantificazione del loro impatto sul deterioramento della PQ.

L'approccio fuzzy ha portato alla definizione di un "*Fuzzy Inference System*" dotato di un indice di uscita in grado di valutare se il disturbo si trovi a valle o a monte della sezione di misura, posta in un nodo della rete.

È stata inoltre valutata l'incertezza di misura associata all'indice finale, modificando il FIS tradizionale in modo tale che le variabili di ingresso ed uscita del sistema potessero essere espresse in termini di RFV.

I due metodi proposti non costituiscono due approcci distinti, ma modi differenti di processare e rappresentare dati sperimentali. Il metodo completo e metrologicamente corretto è senza dubbio quello che consente di elaborare anche l'incertezza di misura.

I diversi risultati conseguiti possono dunque essere letti sotto differenti "lenti di ingrandimento" che analizzano:

- Quali informazioni aggiuntive abbia apportato la valutazione dell'impatto dell'incertezza di misura
- La necessità della stessa valutazione dell'incertezza
- Le ambiguità residue nella determinazione della sorgente dei disturbi
- La possibilità di definire specifiche più stringenti sull'incertezza associata agli ingressi del FIS, per ridurre le ambiguità residue

I risultati del FIS modificato hanno rivelato che l'incertezza di misura associata agli indici di ingresso porta a definire, per i possibili valori di ξ_{dist} , intervalli molto ampi che coprono gran parte del campo di variabilità dell'indice stesso.

Infatti, in molti casi, per valori di α prossimi a zero, i valori esterni del α -cut di una RFV includono frequentemente tutto il semiasse sinistro del grafico (intervallo $[-1,0]$) o tutto quello destro (intervallo $[0,1]$).

Considerando però valori di α corrispondenti a livelli di confidenza $1-\alpha$ del 70%-75%, nella maggior parte dei casi, i possibili valori attribuibili a ξ_{dist} si distribuiscono su un intervallo molto più stretto, consentendo una identificazione non ambigua della sorgente di inquinamento e del suo impatto sulla PQ.

In altri casi invece, l'effetto dell'incertezza è risultato di una entità tale che la distribuzione dei possibili valori attribuibili all'indice di uscita risulta coprire quasi per intero, anche per valori di $\alpha \gg 0$, l'intero range $[-1, 1]$. In questa situazione l'identificazione della direzione dei disturbi non è più sicura come appare dall'indice ξ_{dist} fornito dal FIS tradizionale.

In questi casi, la valutazione dell'incertezza ha mostrato tutta la sua importanza, visto che ha mostrato i limiti metrologici delle apparecchiature e della procedura impiegate.

In questo senso, i risultati raggiunti hanno giustificato a posteriori il notevole sforzo condotto per giungere alla stima dell'incertezza di misura anche in procedure di misura basate su FIS.

In ogni caso, i risultati del FIS modificato non hanno mai contraddetto quelli del FIS tradizionale, confermando dunque la validità della generalizzazione dell'inferenza fuzzy classica proposta.

Nei casi in cui i valori stimati di incertezza hanno reso ambigue le indicazioni fornite da ξ_{dist} , l'approccio proposto conferma la sua validità. Esso mostra infatti quali strade seguire per superare le ambiguità che si sono evidenziate.



Da un lato, è possibile impiegare la stessa metodologia di misura, utilizzando però trasduttori e dispositivi di misura che presentino accuratezza più elevata, in modo da ridurre l'impatto dell'incertezza sull'indice di uscita finale.

Il FIS modificato può essere facilmente utilizzato per capire quali strumenti di misura siano adeguati per la determinazione degli indici di ingresso del FIS stesso. Effettuando un certo numero di simulazioni è infatti possibile definire le specifiche delle massime componenti dell'incertezza di misura associate agli ingressi, in modo da restringere ad un valore desiderato l'ampiezza della RFV dell'uscita.

Dall'altro lato, è possibile individuare le componenti del FIS (funzioni di appartenenza o regole) particolarmente sensibili a contributi di incertezza e modificarle opportunamente per diminuire tale sensibilità.

La validità del metodo comprendente la valutazione dell'incertezza è stata ampiamente discussa mediante simulazioni teoriche del funzionamento di una rete elettrica industriale di media potenza.

Una possibile evoluzione futura del lavoro è la verifica in campo della reale efficacia del metodo di rilevazione dei disturbi periodici.

Implicazioni nella futura normativa

Nel paragrafo 1.2 si è accennato alle principali normative vigenti riguardanti la PQ, evidenziandone delle lacune. Una tra le più importanti lacune presentate dalla normativa, è, a giudizio dell'autore, la mancanza della definizione di una procedura per il rilevamento delle sorgenti di disturbi elettrici periodici e per l'assegnazione delle conseguenti responsabilità ad un soggetto operante in rete.

A causa delle sempre più pressanti implicazioni economiche e legali di una scarsa qualità dell'alimentazione elettrica, legate ad esempio all'incremento delle perdite di

linea e dei problemi di compatibilità elettromagnetica od alla stessa riduzione di vita utile delle apparecchiature elettriche, ci si aspetta che, a breve, questa procedura debba essere definita.

Questa esigenza è decisamente attuale in quanto l'intero sistema elettrico sta evolvendo verso uno scenario, quello delle "smart grids", che vede una crescente presenza di generazione distribuita, in cui i ruoli di "sorgente" e "carico" andranno sempre più sfumandosi nel ruolo del "prosumer". In questa situazione, l'identificazione delle sorgenti di inquinamento elettrico diventa cruciale; è dunque di fondamentale importanza disporre di chiare indicazioni normative al riguardo.

I risultati raggiunti in questo elaborato confermano il raggiungimento dell'obiettivo prefissato dell'identificazione delle sorgenti di disturbi periodici e della quantificazione del loro impatto sul deterioramento della PQ.

Il metodo proposto può dunque essere preso come riferimento di partenza da quella parte normativa riguardante la complicata procedura di identificazione dei disturbi periodici, sia per la sua capacità di individuare le sorgenti di disturbo, sia per la sua capacità di valutare l'incertezza dell'indice fornito.

Successivamente all'attribuzione delle responsabilità dell'inquinamento elettrico, una possibile soluzione per limitare le distorsioni introdotte potrebbe essere, ad esempio, la definizione di adeguate politiche tariffarie volte a scoraggiare l'inserimento di carichi distorcenti non compensati e ad incoraggiare, viceversa, l'uso di dispositivi locali di compensazione, direttamente connessi alle sbarre degli utenti.

Bibliografia

- [1] Math H. J. Bollen, *“Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions”*, 1999.
- [2] A. J. Berrisford, *“Should a utility meter harmonics?”*, in *Proc. IEE 7th CMATES*, Glasgow, U.K., Nov. 1992, pp.86-89.
- [3] J. Arillaga, M. H. J. Bollen, and N. R. Watson, *“Power quality following deregulation”*, *Proc. IEEE*, vol. 88, pp. 246-261, Feb. 2000.
- [4] R. Sasdelli, G. del Gobbo, and G. Iuculano, *“Quality management for electricity as a processed material”*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 49, pp. 460-467, Apr. 2000.
- [5] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519, 1992.
- [6] *“Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for Harmonic Current Emission (Equipment Input Current ≤ 16 A Per Phase)”*, *IEC 61000-3-2*, 1998.
- [7] *“Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-4: Limits – Limitation of Emission of Harmonic Current in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment With Rated Current Greater Than 16 A”*, *IEC 61000-3-4*, 1998.
- [8] *“Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems”*, *IEC 61000-3-6*, 1996.
- [9] *“Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker in Low-Voltage Supply Systems for Equipment With Rated Current ≤ 16 A”*, *IEC 61000-3-4*, 1994.

- [10] “Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 5: Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment With Rated Current Greater Than 16 A”, *IEC 61000-3-5*, 1994.
- [11] “Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems”, *CENELEC, EN 50160*, 2005.
- [12] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Standard 1159, 1995.
- [13] A. Ferrero, “Definitions of Electrical quantities commonly used in non-sinusoidal conditions”, *Eur. Trans. Electrical Power Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 235-240, 1998.
- [14] E. J. Davis, E. Emanuel and D. J. Pileggi, “Harmonic Pollution Metering: theoretical considerations”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, vol. 15, no. 1, pp. 19-23, 2000.
- [15] A. Ferrero, A. Menchetti and R. Sasdelli, “Measurement of the electric power quality and related problems”, *ETEP*, vol. 6 no. 6, pp. 401-406, 1996.
- [16] P. H. Swart, M. J. Case, and J. D. van Wyk, “On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks”, *ETEP*, vol. 6, no. 6, pp. 391-396, 1996.
- [17] A. Ferrero, L. Peretto, and R. Sasdelli, “Revenue metering un the presence of distortion and unbalance: Myths and reality”, Athens, Greece, 1998.
- [18] A. P. J. Rens and P. H. Swart, “On techniques for the localization of multiple distortion sources in three-phase networks: Time-domain verification”, *ETEP*, vol. 11, no. 5, pp. 317-322, 2001.
- [19] C. Muscas, “Assessment of electric power quality: Indices for identifying disturbing loads”, *ETEP*, vol. 8, no. 6, pp. 287-292, 1998.

- [20] D. Castaldo, A. Ferrero, S. Salicone, and A. Testa, "An Index for Assessing the Responsibility for Injecting Periodic Disturbances", *L'Energia Elettrica*, vol.81, "Ricerche", pp. 134-143, 2004.
- [21] G. Carpinelli and A. Testa, "Power quality indices and loss of information risk", in *IMEKO TC-4 Symposium on Development in Digital Measuring Instrumentation*, Naples, Italy, 1998.
- [22] L. A. Zadeh, "Fuzzy logic and approximate reasoning", *Synthese*, vol. 30, no. 1, pp. 407-428, 1975.
- [23] G. Shafer, "*A Mathematical Theory of Evidence*", Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, 1976.
- [24] A. Ferrero, S. Salicone and G. Todeschini, "A fuzzy method for the identification of the sources producing harmonic pollution in the electric network", *IMTC 2007 – Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Warsaw, Poland, 1-3 May 2007.
- [25] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Inform. Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [26] L. A. Zadeh, "Outline a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-2, pp. 28-44, 1973.
- [27] A. Ferrero, S. Salicone, G. Todeschini, "Accounting Measurement Uncertainty in Fuzzy Inference", *AMUEM 2007 - International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement*.
- [28] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [29] IEC-ISO, "*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*", 1992.

- [30] IEC-ISO, “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions*”, 2004.
- [31] A. Ferrero, A. Federici, and S. Salicone, “A Method for Considering and Processing Measurement Uncertainty in Fuzzy Inference Systems”, *I2MTC – Int. Instrum. Meas., Technology Conference*, pp.612-617, Singapore, 5-7 May, 2009.
- [32] Task force on harmonics modeling and simulations: “Test system for harmonic modeling and simulations”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, vol. 14, n. 2, pp. 579-587, 1999.
- [33] R. Carbone, D. Castaldo, R. Langella, and A. Testa, “Probabilistic modeling of industrial systems for voltage distortion analysis”, *Proc. 9th ICHQP*, vol. 2, pp. 608-613, Orlando, USA, 2000.
- [34] UNI CEI 70099:2008, “*Vocabolario Internazionale di Metrologia - Concetti fondamentali e generali e termini correlati*” (VIM), Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008.
- [35] A. Ferrero, S. Salicone, G. Todeschini, “Measurement uncertainty role in the identification of the sources of periodic disturbances”, *Seventh International Workshop on Power Definition and Measurement under Non-Sinusoidal Conditions*, Cagliari, July 10-12, 2006.
- [36] A. Ferrero and S. Salicone, “Measurement uncertainty”, *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 44-51, 2006.
- [37] A. Ferrero, M. Lazzaroni, and S. Salicone, “A calibration procedure for a digital instrument for electric power quality measurement”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 51, pp. 716-722, Aug. 2002.
- [38] S. Salicone, “*Measurement Uncertainty: An Approach Via the Mathematical Theory of Evidence*”, Springer-Verlag, New York, NY, 2006.

- [39] Q. Zhu, Z. Jiang, Z. Zhao, and H. Wang, "Uncertainty estimation in measurement of micromechanical properties using random-fuzzy variables", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, no. 3, p. 035 107, Mar. 2006.
- [40] J. M. Mendel, "*Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*", Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 2001.
- [41] B. Möller, M. Beer, and U. Reuter, "Theoretical basics of fuzzy randomness – Application to time series with fuzzy data", in *Proc. ICOSSAR – Safety and Reliability of Engineering Systems and Structures*, pp. 1701-1707, 2005.
- [42] A. Ferrero and S. Salicone, "the RFV method applied to uncertainty estimation: A case study", in *Proc. IMTC*, pp.1-6, Warsaw, Poland, May 1-3, 2007.
- [43] A. Mencattini, G. Rabottino, S. Salicone and M. Salmieri, "Uncertainty handling and propagation in x-ray images analysis systems by means of random fuzzy variables", in *AMUEM 2008*, pp. 50-55, Sardinia, Trento, Italy, July 21-22, 2008.
- [44] S. Salicone and R. Tinarelli, "An experimental comparison in the uncertainty estimation affecting wavelet-based signal analysis by means of the IEC-ISO Guide and the random-fuzzy approaches", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, no. 3, pp. 691-699, June 2006.
- [45] G. Mauris, L. Berrah, L. Folluoy, and A. Haurat, "Fuzzy handling of measurement errors in instrumentation", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 49, pp. 89-93, Feb. 2000.
- [46] G. Mauris, V. Lasserre, and L. Folluoy, "A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement", *Measurement*, vol. 29, pp. 165-177, 2001.
- [47] M. Urbansky and J. Wasowsky, "Fuzzy approach to the theory of measurement inexactness", *Measurement*, vol. 34, pp. 67-74, 2003.



- [48] G. Mauris, "Expression of measurement uncertainty in a very limited knowledge context: A possibility theory-based approach", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 3, pp. 731-735, Jun. 2007.
- [49] A. Mencattini, M. Salmeri, and R. Lojacono, "Type-2 fuzzy sets for modeling uncertainty in measurement", in *Proc. AMUEM*, pp. 8-13, Trento, Italy, Apr. 20-21, 2006.
- [50] A. Kaufman and M. M. Gupta, "*Introduction to Fuzzy Mathematics – Theory and Applications*", New York, NY, Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [51] A. Ferrero, S. Salicone: "A Comparative Analysis of the Statistical and Random-Fuzzy Approaches in the Expression of Uncertainty in Measurement", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 54, n. 4, pp.1475-1481, 2005.
- [52] A. Ferrero, S. Salicone, "The Random-Fuzzy Variables: A New Approach to the Expression of Uncertainty in Measurement", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, no. 5, Oct. 2004.
- [53] A. Ferrero, R. Gamba, and S. Salicone, "A method based on random fuzzy variables for the on-line estimation of measurement uncertainty of DSP-based instruments", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 1362-1369, Oct. 2004.
- [54] A. Ferrero and S. Salicone, "The Construction of Random-Fuzzy Variables From the Available Relevant Metrological Information", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 365-374, Feb. 2009.
- [55] A. Ferrero, S. Salicone, "Different possible approaches to RFV construction based on the available metrological information", in *Proc. AMUEM*, pp. 35-40, Trento, Italy, Jul. 16-18, 2007.
- [56] A. Mencattini and S. Salicone, "A comparison between different methods for processing the random part of random-fuzzy variables representing

measurement results”, in AMUEM 2008, pp. 72-77, Sardagna, Trento, Italy, July 21-22, 2008.

- [57] A. Ferrero and S. Salicone, “Fully Comprehensive Mathematical Approach to the Expression of Uncertainty in Measurement”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 706-712, June 2006.
- [58] A. Ferrero and S. Salicone, “Modeling and Processing Measurement Uncertainty Within the Theory of Evidence: Mathematics of Random-Fuzzy Variables”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 704-716, June 2007.
- [59] G. J. Klir and B. Yuan, “*Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications*”, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1995.
- [60] A. Ferrero and S. Salicone, “An innovative approach to the determination of uncertainty in measurements based on fuzzy variables”, in *Proc. IEEE IMTC*, Anchorage, AK, pp. 227-232, May 21-23, 2002.
- [61] A. Ferrero, A. Federici and S. Salicone, “Instrumental uncertainty and model uncertainty unified in a Fuzzy Inference System”, *IEEE, Trans. Inst. Meas.*, vol. 59, no. 3, pp. 1149-1157, 2010.

