

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



Emulatore di rete, analisi e simulazioni

Relatore: Prof. Marco MAURI

Tesi di laurea di:

Davide LARGHI

Matr. 804381

Anno Accademico 2013 - 2014

*A Mamma e Papà,
per questa inestimabile opportunità.*

Indice

Elenco delle figure	8
	9
Introduzione	11
1 Fonti rinnovabili e qualità della tensione	13
1.1 Le fonti rinnovabili nel sistema elettrico italiano	13
1.2 Qualità dell'alimentazione elettrica	18
1.2.1 La norma CEI 50160	20
1.3 Obiettivi della tesi	28
2 Stato dell'arte	29
2.1 Micro reti	30
2.2 Reti a convertitori	32
3 Riduzione in scala delle reti elettriche	39
3.1 I valori relativi	40
3.1.1 I valori relativi nei sistemi elettrici	40
3.2 Riduzione in scala di reti elettriche	42
4 Modello di un nodo di rete elettrica	51
4.1 Realizzazione del modello	51
4.1.1 Nodo di rete	52
4.1.2 Funzione di trasferimento	55
4.2 Verifica del modello	58
4.2.1 Generatore di tensioni trifase	58
4.2.2 Modello di carico RL	63
4.2.3 Simulazioni di verifica	64
4.2.4 Risultati	68
4.3 Simulazione di guasti	70
4.3.1 Implementazione del guasto	71

5	Analisi tipologie emulatore di rete	75
5.1	Controllo del convertitore	75
5.1.1	Principio di funzionamento di un convertitore	76
5.1.2	Filtro LC	79
5.1.3	Metodo di controllo	82
5.2	Configurazione ideale emulatore di rete	84
5.2.1	Emulatore di rete con convertitore singolo	84
5.2.2	Emulatore di rete con convertitori multipli	88
6	Attività sperimentale	97
6.1	Scheda di sviluppo dsPICDEM MCLV-2	97
6.2	Programmazione tramite Simulink e Mplab	98
6.3	Verifica del tempo di ciclo	99
7	Conclusioni	103
A	Trasformata di Laplace	105
A.1	funzione di trasferimento	106
B	Trasformata Zeta	109
B.1	Relazione tra dominio s e dominio z	110
C	Trasformata di Park	113
C.1	Trasformata di Park su assi fissi	113
C.2	Vettore spaziale	114
C.3	Trasformata di Park su assi rotanti	116
	Bibliografia	119

Elenco delle figure

1.1	Crescita potenza da fonte rinnovabile.	15
1.2	Totale potenza installata in Italia.	15
1.3	Evoluzione della produzione lorda di energia	18
1.4	Variazione rapida di tensione	23
1.5	Flicker	24
1.6	Buco di tensione	24
2.1	Schema tipica micro rete	31
2.2	Schema emulatore di rete	34
2.3	Rete realizzata con convertitori elettronici	35
3.1	Circuito RLC	42
3.2	Poli e Zeri circuito RLC prima e dopo la scalatura, continuo.	45
3.3	Poli e Zeri circuito RLC prima e dopo la scalatura, discreto.	45
3.4	Circuito linea e carico.	46
3.5	Poli e Zeri linea prima e dopo la scalatura, continuo.	49
3.6	Poli e Zeri linea prima e dopo la scalatura, discreto.	49
4.1	Fasore impedenza di corto circuito.	53
4.2	Circuito equivalente monofase nodo di rete.	55
4.3	Circuito equivalente definitivo del nodo di rete.	56
4.4	Terna diretta.	59
4.5	Terna inversa.	60
4.6	Terna omopolare.	61
4.7	Tensione trifase simmetrica.	62
4.8	Tensione trifase con un 10%di terna inversa sovrapposta.	62
4.9	Circuito equivalente carico RL.	63
4.10	Schema a blocchi della funzione di trasferimento del nodo.	64
4.11	Schema a blocchi terna diretta.	65
4.12	Schema a blocchi terna inversa.	65
4.13	Schema a blocchi terna omopolare.	66
4.14	Blocco “Nodo di Rete”.	66
4.15	Schema a blocchi del carico.	67

4.16	Schema a blocchi nodo di rete e carico.	67
4.17	Nodo di rete realizzato con elementi Simulink.	67
4.18	Tensione modello Simulink.	68
4.19	Corrente modello Simulink.	69
4.20	Tensione del nodo data dal modello 4.21.	69
4.21	Corrente del nodo data dal modello 4.21.	70
4.22	Schema a blocchi del guasto.	72
4.23	Corrente di guasto.	73
4.24	Corrente di guasto di un'unica fase.	73
4.25	Tensione di guasto.	74
5.1	Schema convertitore elettronico.	76
5.2	Onda portante e modulanti sinusoidali.	77
5.3	Tensioni V_{AN} , V_{BN} e V_{CN}	78
5.4	Tensioni V_{AB} , V_{BC} e V_{CA}	79
5.5	Circuito equivalente monofase filtro LC.	80
5.6	Diagrammi di Bode filtro LC.	82
5.7	Regolatore Proporzionale Integrabile.	82
5.8	Emulatore di rete con singolo convertitore.	85
5.9	Tensione generata dall'emulatore di rete con singolo convertitore.	85
5.10	Confronto tensione convertitore e tensione modello.	86
5.11	Corrente assorbita dal carico.	87
5.12	Componenti armoniche tensione a vuoto.	87
5.13	Componenti armoniche tensione a carico.	88
5.14	Rete di riferimento.	89
5.15	Emulatore di rete con più convertitori.	91
5.16	Controllo convertitori.	92
5.17	Phase Locked Loop.	93
5.18	Tensione sul carico.	93
5.19	Sincronizzazione.	94
5.20	Fase tra le tensioni dei convertitori.	94
5.21	Corrente assorbita dal carico.	95
5.22	Componenti armoniche tensione a vuoto.	95
5.23	Componenti armoniche tensione a carico.	96
6.1	Scheda dsPICDEM MCLV-2.	98
6.2	Tensione modello nodo di rete elettrica.	100
6.3	Quantizzazione della tensione data dal tempo di integrazione di 400 μs	100
6.4	Programmazione scheda dsPICDEM MCLV-2 con Simulink.	101
B.1	Mappatura s-z.	111
C.1	Assi rotanti di Park.	118

Elenco delle tabelle

1.1	Produzione da fonti rinnovabili	14
1.2	Numero e potenza impianti da fonte rinnovabile	16
1.3	Produzione da fonti rinnovabili effettiva	16
1.4	Produzione da fonti rinnovabili secondo Direttiva 2009/28/CE	17
1.5	Ampiezze percentuali armoniche di tensione BT	27
1.6	Ampiezze percentuali armoniche di tensione MT	27
A.1	Segnali e corrispondenti trasformate di Laplace	108
B.1	Segnali e corrispondenti trasformate Zeta	110

Introduzione

Negli ultimi due decenni si è assistito ad una rapida evoluzione della concezione e della gestione del sistema di produzione e trasmissione dell'energia elettrica.

I più stringenti vincoli ambientali e la grande rilevanza degli incentivi statali ed europei, hanno spinto grandi e piccoli produttori a investire nelle fonti energetiche rinnovabili che grazie al loro sviluppo tecnologico sono sempre più efficienti ed accessibili con costi di realizzazione e gestione sempre minori.

Il numero di impianti di produzione da fonti rinnovabili è in continuo incremento e le stime per i prossimi anni confermano questa crescita. La totale potenza installata è ormai tale che il loro impatto sulla rete elettrica nazionale non è più trascurabile.

Ciò porta ad un minor consumo di combustibili fossili e quindi un minor impatto ambientale, sono sorte, però, problemi che rendono difficile la previsione dei flussi di potenza in fase di Load Flow.

Con la diffusione di questi impianti il sistema elettrico nazionale sta gradualmente passando da avere la produzione centralizzata e l'utilizzazione distribuita, ad avere sia la produzione che l'utilizzazione distribuite. I flussi di potenza, in passato unidirezionali, sono ormai bidirezionali con problemi per le protezioni tradizionali.

Per ridurre l'entità del problema sono allo studio le cosiddette Smart Grid e sono state varate nuove norme e aggiornamenti ai codici di rete per regolamentare la gestione degli impianti di generazione da fonte rinnovabile.

Per far sì che questi impianti rispettino i vincoli imposti è necessario che vengano testati nelle più diverse condizioni di funzionamento possibile, e visto che ciò è difficilmente realizzabile sulla rete reale, è pratica comune realizzare degli emulatori di rete che ne replichino le dinamiche, consentendo la realizzazione di test affidabili e ripetibili.

In questa tesi verranno analizzati diversi tipi di emulatori di rete confrontandone le prestazioni e sarà proposto un metodo per la riduzione in scala di una rete elettrica in modo ottenere modelli facilmente realizzabili in laboratorio.

Capitolo 1

Fonti rinnovabili e qualità della tensione

1.1 Le fonti rinnovabili nel sistema elettrico italiano

La crescita che negli ultimi anni hanno avuto gli impianti da fonti rinnovabili li ha portati a ricoprire un ruolo di primo piano nel sistema elettrico italiano.

Secondo le statistiche fornite da Terna [1] e dal Gestore Servizi Energetici (GSE) [2] per l'anno 2013 (ultimo rilevamento disponibile), per il settore elettrico grazie a circa 600 000 impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili con una potenza complessiva di quasi 50 000 MW, sono stati prodotti nel 2013 circa 112 TWh di energia elettrica; corrispondenti a circa (9.6 Mtep, tonnellate equivalenti di petrolio).

La fonte rinnovabile che nel 2013 ha fornito il contributo più importante è stata l'idroelettrico (44%) seguita da solare (21%), bioenergie (16%), eolico (14%) e geotermico (6%)(tab. 1.1).

La Direttiva europea indicata in tabella è la 2009/28/CE “Promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili” [3] che mira ad istituire un quadro comune per la produzione e la promozione di energia a partire da fonti rinnovabili. Per ciascuno Stato membro è stato fissato un obiettivo per la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia entro il 2020. Per attuare i

provvedimenti imposti dalla direttiva, in Italia è stato attuato il Piano di Azione Nazionale (PAN) per le energie rinnovabili. I valori indicati sotto la voce “Direttiva 2009/28/CE” sono quelli normalizzati per il raggiungimento degli obiettivi imposti dalla norma stessa.

Fonti rinnovabili	Potenza [MW]	Effettiva		2009/28/CE	
		TWh	ktep	TWh	ktep
Idroelettrico	18.366	52,8	4.537,7	45,0	3.868,0
Eolica	8.561	14,9	1.280,9	14,1	1.214,1
Solare	18.053	21,6	1.856,3	21,6	1.856,3
Geotermico	773	5,7	486,6	5,7	486,6
Bioenergie	4.033	17,1	1.469,5	17,0	1.458,3
Totale	49.786	112,1	9.631,0	103,4	8.883,3

Tabella 1.1: Produzione da fonti rinnovabili

Nel 2013 la potenza installata negli impianti da fonte rinnovabile era pari a 49 786 MW con una produzione effettiva di 112 TWh o 9, 631 Mtep.

Il numero degli impianti da fonti energetiche rinnovabili diffusi sul territorio nazionale negli ultimi anni ha continuato a crescere fino ad arrivare nel 2013 a raggiungere il 40.2% della potenza complessiva installata in Italia e il 38.6% della produzione lorda totale.

Tra il 2000 e il 2013 la potenza efficiente lorda da fonti rinnovabili installata in Italia è passata da 18 335 MW a 49 786 MW con un incremento di 31 451 MW e il tasso di crescita medio annuo della potenza complessiva è stato pari all'8% mentre quello della nuova potenza installata ha raggiunto il 13.8% e, considerato che l'idroelettrico è rimasto pressoché invariato, tutta la crescita è da imputarsi alle nuove fonti energetiche.

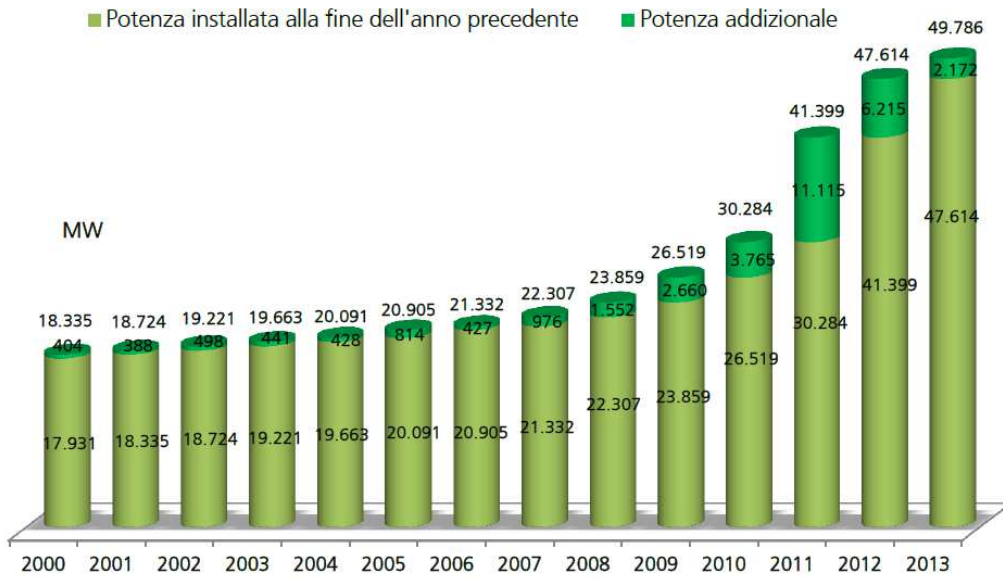


Figura 1.1: Crescita potenza da fonte rinnovabile.

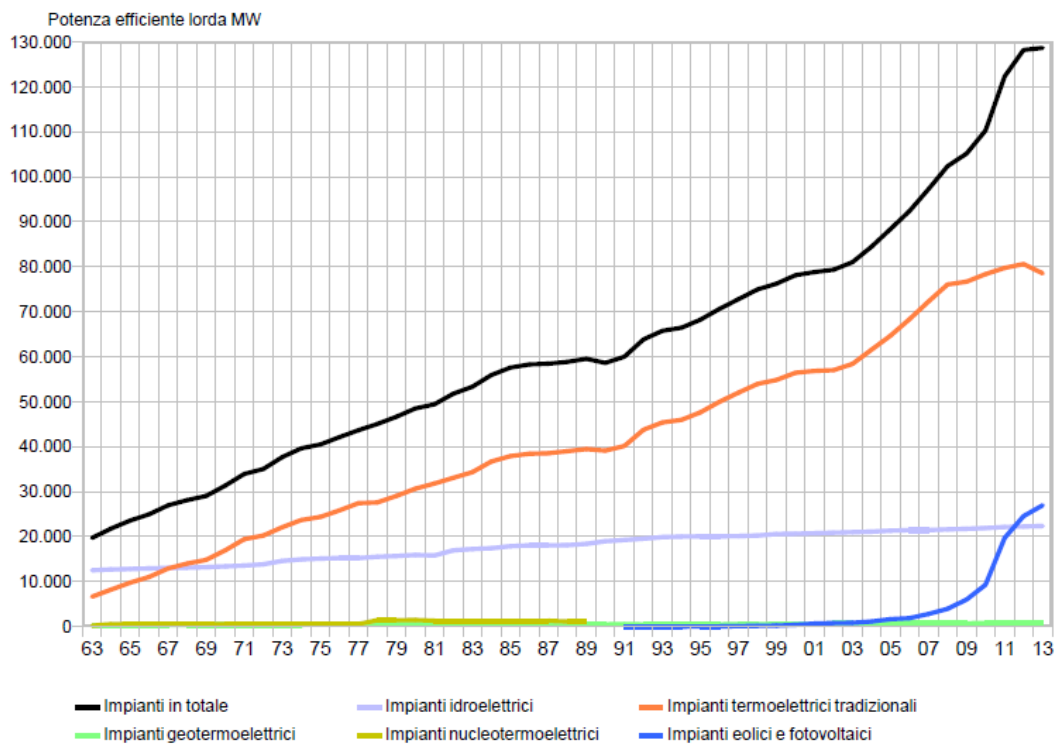


Figura 1.2: Totale potenza installata in Italia.

La produzione di energia da fonti rinnovabili ha raggiunto i 112 100 GWh nel 2013, il 21.5% in più rispetto al 2012, mentre quella calcolata ai fini del raggiungimento degli obiettivi imposti dalla 2099/28/CE è pari a 103 311.

Nel 2013 le fonti energetiche rinnovabili hanno rappresentato il 38.6% della produzione lorda complessiva in crescita rispetto al 30.8% del 2012. Questo aumento è dovuto da un lato alle condizioni climatiche favorevoli all'idroelettrico con numerose precipitazioni, ma anche alla costante crescita di fotovoltaico e biomasse.

Rispetto al consumo interno lordo, dato dalla differenza tra la produzione da pompaggi, nel 2013 l'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, contabilizzata come da Direttiva, ha contribuito per il 31.3%.

	2012		2013		Variazione %	
	n°	[kW]	n°	[kW]	n°	[kW]
Idroelettrico	2.970	18.231.993	3.250	18.365.890	9,4	0,7
Eolica	1.054	8.119.401	1.386	8.560.808	31,5	5,4
Solare	481.267	16.689.505	591.029	18.053.038	22,8	8,2
Geotermico	33	772.000	34	772.990	3,0	0,1
Bioenergie	2.199	3.801.573	2.409	4.033.422	9,5	6,1
Totale	487.523	47.614.472	598.108	49.786.148	22,7	4,6

Tabella 1.2: Numero e potenza impianti da fonte rinnovabile

	2012	2013	Variazione %
	[GWh]		
Idroelettrico	41.874,9	52.773,4	26,0
Eolica	13.407,1	14.897,0	11,1
Solare	18.861,7	21.588,6	14,5
Geotermico	5.591,7	5.659,2	1,2
Bioenergie	12.486,9	17.090,1	36,9
Totale Rinnovabile	92.222,3	112.008,3	21,5
Produzione Complessiva	299.276	289.803	-3,2
Totale FER/Produzione Complessiva	30,8%	38,6%	

Tabella 1.3: Produzione da fonti rinnovabili effettiva

	2012	2013	Variazione %
	[GWh]		
Idroelettrico	44.140,1	44.984,3	1,9
Eolica	12.402,3	14.119,6	13,8
Solare	18.861,7	21.588,6	14,5
Geotermico	5.591,7	5.659,2	1,2
Bioenergie	12.342,1	16.960,0	37,4
Totale Rinnovabile	93.338,0	103.311,7	10,7
Produzione Complessiva	299.276	289.803	-3,2
Totale FER/Produzione Complessiva	31,2%	35,6%	

Tabella 1.4: Produzione da fonti rinnovabili secondo Direttiva 2009/28/CE

A partire dal 2008 è cresciuta sempre più l'importanza di fonti rinnovabili come solare, eolico e bioenergie. L'idroelettrico ha raggiunto nel 2013 il suo massimo picco di produzione pari a 52 774 GWh grazie alle favorevoli condizioni climatiche.

Il solare è la seconda fonte in ordine di importanza crescendo fino a 21 589 GWh e l'eolico è arrivato a 14 897 GWh con una crescita media annua tra 2000 e 2012 pari al 28.7%.

La produzione da bioenergie nel 2013 è stata pari a 17090 GWh con un tasso di crescita medio annuo del 20.6%, mentre la geotermica è rimasta pressoché invariata a causa del limitato numero di siti idonei.

Dall'inizio della crisi economica del 2009 i consumi di energia elettrica in Italia sono calati e nel 2013 hanno raggiunto il minimo dal 2002 (fig. 1.3).

È diminuito inoltre l'utilizzo di tutte le fonti energetiche fossili, specialmente il gas naturale, che da un massimo del 54% nel 2008, è calato drasticamente fino al 37% nel 2013, mentre nello stesso periodo le fonti rinnovabili sono passate dal 18% al 38% diventando la prima fonte energetica per la produzione elettrica in Italia.

Questa situazione ha un notevole impatto sul sistema elettrico nazionale. Ad esclusione di idroelettrico, geotermico e biomasse, l'eolico e il solare fotovoltaico hanno il grande problema della non programmabilità essendo la loro produzione strettamente legata alle condizioni meteorologiche.

Se, per ipotesi, venisse a mancare improvvisamente il sole su un grande impianto,

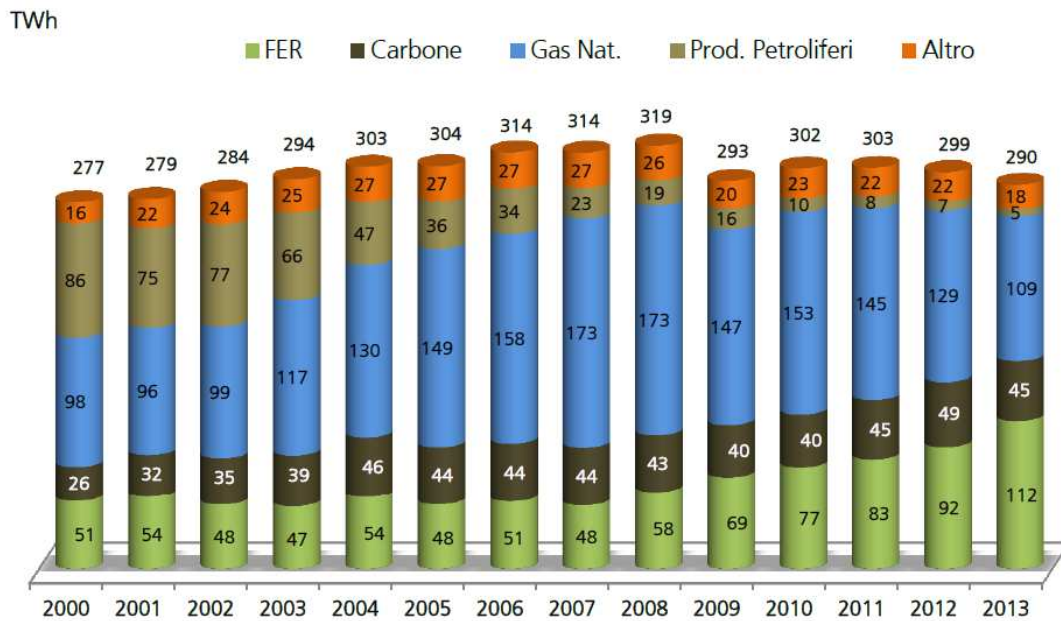


Figura 1.3: Evoluzione della produzione lorda di energia

verrebbe meno, in brevissimo tempo, una quota importante di energia e, se non vi fossero centrali tradizionali pronte a sopperire all'ammacco, si arriverebbe al collasso della frequenza e quindi allo spegnimento della rete.

Nella realtà non si arriva mai a casi estremi, ma la presenza di tantissimi piccoli impianti che possono cessare la produzione in qualunque istante ha come conseguenza un peggioramento della qualità dell'alimentazione elettrica.

1.2 Qualità dell'alimentazione elettrica

Un tema molto importante nella gestione delle reti elettriche riguarda la cosiddetta *qualità* dell'alimentazione elettrica.

Le norme definiscono i limiti in cui la tensione deve mantenersi per poter garantire uno standard di qualità del servizio elettrico che viene definita considerando:

- la continuità dell'alimentazione elettrica, intesa come assenza di interruzioni nella fornitura di energia;
- la qualità della tensione, intesa come qualità della forma d'onda (ampiezza, frequenza, variazione, ecc...);

Sono poi definiti i limiti entro cui devono mantenersi eventuali alterazioni e disturbi della tensione.

I disturbi, cosiddetti condotti, sono alterazioni della ampiezza o della forma d'onda della tensione che, prodotti da una sorgente, si propagano lungo una rete di alimentazione, viaggiando sui conduttori di linea e in alcuni casi anche attraverso i trasformatori, per cui possono anche trasferirsi tra reti a tensioni diverse.

Questi disturbi, se i loro livelli sono eccessivi, possono degradare il funzionamento di un dispositivo, apparecchio o sistema e provocare anche danni.

Quelli considerati nelle norme sono:

- variazioni della tensione;
- fluttuazioni della tensione (flicker);
- buchi di tensione;
- sovratensioni;
- squilibri di tensione;
- armoniche;
- interarmoniche;

Questi hanno impatto più o meno elevato a seconda delle caratteristiche delle linee, infatti la capacità di una rete di alimentazione di assorbire i disturbi è legata all'impedenza equivalente della rete vista nel punto di connessione, cioè alla potenza di corto circuito del nodo.

$$A_{cc} = \overline{V_0} I_{cc} = \frac{V_0^2}{Z_{cc}}$$

Infatti i livelli risultanti di alcune tra le forme di disturbo condotto più importanti e cioè le variazioni rapide di tensione, il flicker e la distorsione armonica, dipendono strettamente, oltre che dagli assorbimenti variabili di corrente sulla rete, anche dalla potenza di corto circuito e dalla struttura della rete di alimentazione.

La potenza di corto circuito di un nodo può però cambiare nel tempo per il fatto che la stessa configurazione della rete è soggetta a cambiamenti a causa della necessità di garantire un'adeguata continuità del servizio e ovviamente è diversa per ogni nodo della rete.

La norma di riferimento a livello nazionale per la definizione della qualità dell'alimentazione elettrica è la CEI 50160 "Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica"[4].

1.2.1 La norma CEI 50160

La norma CEI 50160, nata e sviluppata a livello europeo, prende in considerazione il tema della qualità dell'alimentazione elettrica per fornire condizioni soddisfacenti al funzionamento delle apparecchiature dell'utente.

La norma limita il suo campo alla sola fornitura di energia elettrica definendo e descrivendo i limiti e i valori massimi attesi entro cui gli utenti possono aspettarsi che rimangano contenute le caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione in Media e Bassa tensione; non da invece, indicazioni per quanto riguarda le emissioni di disturbi da parte degli impianti utilizzatori.

È applicabile solo in condizioni normali cioè quelle in cui il sistema elettrico è in grado di soddisfare l'alimentazione del carico, eliminare i guasti e riprendere il servizio con mezzi e procedimenti ordinari in assenza di condizioni eccezionali dovute ad influenze esterne o a situazioni critiche rilevanti.

Non sono quindi contemplate situazioni al di fuori del controllo del fornitore (disastri naturali, influenze esterne, forza maggiore, ecc...).

In generale la norma contempla le caratteristiche della tensione di alimentazione riguardanti:

- frequenza;
- ampiezza;
- forma d'onda;
- simmetria delle tensioni trifase;

caratteristiche soggette a variazioni durante il normale esercizio di un sistema elettrico a seguito di variazioni del carico, disturbi generati da particolari apparecchiature e dai guasti.

Esse variano in modo non prevedibile, o aleatorio, nel tempo e nella posizione e ne vengono ben definiti i limiti entro cui la variazione è ammessa.

Variazioni di frequenza

Le variazioni di frequenza sono scostamenti della frequenza di alimentazione dalla frequenza nominale della rete (50 Hz in Europa) e dipendono essenzialmente da eventi relativi al sistema di generazione e trasmissione:

- distacco di grossi gruppi alternatori;
- guasti su linee in Alta (AT) e Altissima (AAT) Tensione;
- apertura di linee di interconnessione importanti;

Per le reti in Media (MT) e Bassa (BT) Tensione le variazioni di frequenza ammesse sono:

- per sistemi con connessione sincrone ad un sistema interconnesso: 50 Hz $\pm 1\%$ durante il 95% di un anno e 50 Hz + 4%/-6% durante il 100% del tempo;
- per sistemi senza connessione sincrona ad un sistema interconnesso (sistemi in isola): 50 Hz $\pm 2\%$ per il 95% di una settimana e 50 Hz $\pm 15\%$ durante il 100% del tempo.

Variazioni della tensione

In condizioni nominali di esercizio, le variazioni di carico determinano delle variazioni della tensione media di alimentazione, compensate generalmente in poche decine di secondi. La norma prevede, escludendo le interruzioni di tensione:

- Reti BT:
 - durante qualsiasi periodo di una settimana il 95% dei valori efficaci della tensione di alimentazione, mediato nei dieci minuti deve essere compreso in $U_N \pm 10$;
 - tutti i valori efficaci della tensione di alimentazione, mediati nei 10 minuti, devono essere compresi in $U_N + 10 / - 15$;

- Reti MT:
 - durante qualsiasi periodo di una settimana il 95% dei valori efficaci della tensione di alimentazione, mediato nei dieci minuti deve essere compreso in $U_N \pm 10$;

con U_N si intende il valore efficace nominale della tensione.

Variazioni rapide della tensione

Si tratta di abbassamenti rapidi del valore efficace della tensione per effetto delle variazioni di carico di potenza significative rispetto alla potenza di corto circuito del nodo a cui è connesso il carico.

Si presentano normalmente con un iniziale brusco abbassamento, il cui fronte di discesa può durare fino a 10 ms, seguito da una rampa crescente di durata di diversi cicli, fino a terminare ad un valore di tensione inferiore a quello esistente prima della variazione di carico.

Ovviamente una variazione rapida di tensione non deve scendere sotto al limite $U_N - 10\%$ altrimenti si ricadrebbe nel caso di buco di tensione.

Tipicamente hanno ampiezze non superiori al 5% della tensione nominale ma occasionalmente possono verificarsi variazioni anche del 10% nel caso di aree rurali

con lunghe linee di alimentazione.

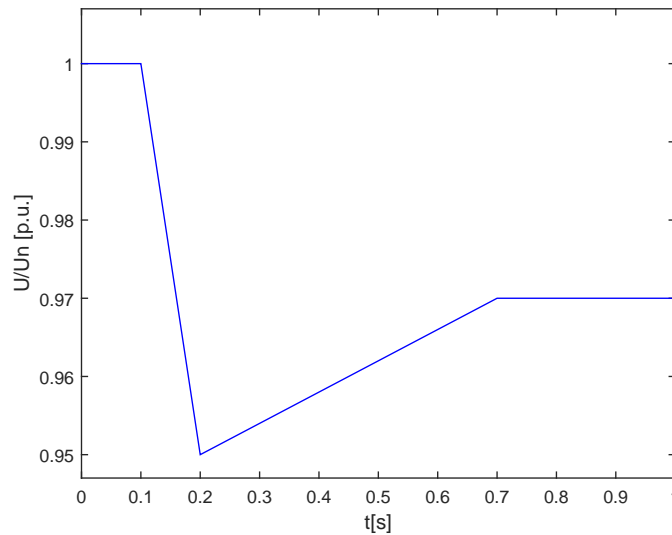


Figura 1.4: Variazione rapida di tensione

La norma prevede:

- Reti BT: ampiezze non superiori al 5% di U_N e in talune circostanze fino al 10%;
- Reti MT: ampiezze non superiori al 4% di U_N e in talune circostanze fino al 6%;

Flicker

Il flicker è l'effetto prodotto sulla percezione visiva della variazione dell'intensità luminosa di lampade soggetta a fluttuazioni della loro tensione di alimentazione; tipicamente si tratta di fluttuazioni con frequenze comprese tra 0.5% e 35% .

La severità del disturbo è valutata con uno strumento detto "Flickermetro", le cui specifiche sono indicate nella norma CEI EN 61000, che restituisce due parametri:

- severità a breve termine (P_{ST}) misurata a intervalli di 10 minuti;
- severità a lungo termine (P_{LT}) valutata su 12 intervalli consecutivi di (P_{ST}) mediante l'espressione:

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{STi}^3}{12}}$$

la norma prevede valori di P_{LT} minori di 1 per il 95% del tempo di osservazione.

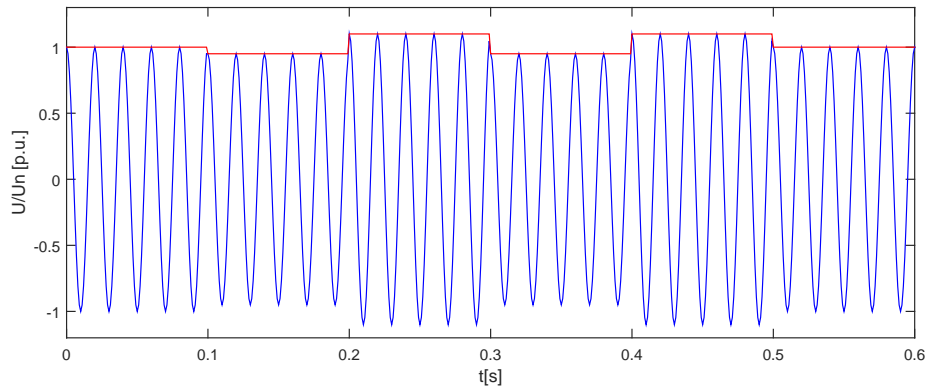


Figura 1.5: Flicker

Buco di tensione

Generalmente dovuto a guasti in rete e raramente dovuto alla commutazione di grossi carichi, è definito come una riduzione improvvisa del valore efficace della tensione tra il 90% e l'1% del valore nominale U_N .

Convenzionalmente il buco di tensione ha durata compresa tra 10 ms e 1 minuto.

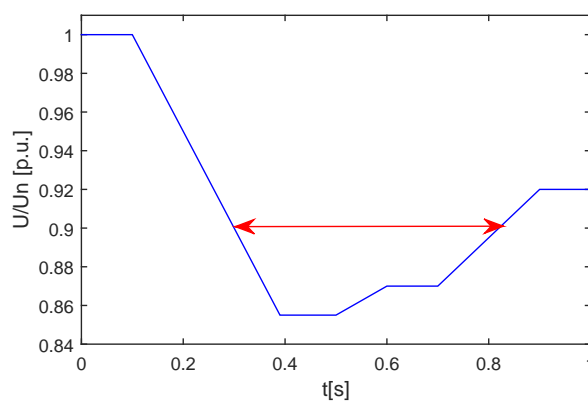


Figura 1.6: Buco di tensione

Interruzioni brevi e lunghe della tensione

La norma divide le interruzioni dell'alimentazione elettrica in:

- interruzioni brevi di durata inferiore a 3 minuti;
- interruzioni lunghe di durata superiore a 3 minuti;

ciò per considerare le caratteristiche di protezione e i sistemi di richiusura automatica utilizzati nelle reti di distribuzione.

Essendo eventi aleatori e imprevedibili, la norma fornisce solo valori indicativi sul numero delle possibili interruzioni sia per le reti BT che MT.

- brevi interruzioni: il numero annuale può variare da qualche decina a parecchie centinaia e la durata di circa il 70% delle interruzioni può essere inferiore a 1 s;
- lunghe interruzioni: il numero annuale può andare da meno di 10 fino anche a 50;

Sovratensioni temporanee

Si tratta di sovratensioni a frequenza di rete che si manifestano durante i guasti nel sistema di distribuzione e scompaiono all'estinzione del guasto.

Le reti in BT sono esercite con neutro efficacemente a terra e ciò limita molto l'effetto delle sovratensioni dovute a guasti tra fase e terra che si manifestano nel sistema MT a monte.

Nelle reti in MT le sovratensioni hanno origine da guasti monofase a terra e il conseguente spostamento del centro stella del sistema di tensioni trifase.

Si possono avere anche sovratensioni dovute a fenomeni di ferrorisonanza, cioè alla saturazione dei nuclei magnetici dei trasformatori durante i guasti, con armoniche e sub armoniche da pochi Hz fino anche a 150 Hz. Sono comunque fenomeni rari se paragonati ai guasti monofase.

La norma indica che in sistemi con neutro francamente a terra la sovratensione non deve superare il valore di $1.7U_N$, mentre nei sistemi con neutro isolato o connesso a terra con Bobina di Petersen non deve superare $2.0U_N$.

Squilibrio di tensione trifase

È caratterizzato, per effetto di uno squilibrio del carico, da una perdita della simmetria in ampiezza e fase, dei vettori delle tensioni di fase, cioè dalla presenza di una terna inversa.

Il rapporto tra la componente di sequenza inversa U_i e diretta U_d è detto grado di squilibrio.

La norma stabilisce che, durante il periodo di una settimana, per il 95% dei valori medi efficaci, calcolati su 10 minuti, il grado di squilibrio sarà compreso tra 0 e 2%. In alcune aree si può arrivare anche al 3%.

Disturbi armonici

La norma fornisce i valori percentuali massimi ammissibili delle singole componenti armoniche¹ riferiti al valore nominale della tensione e non all'ampiezza della fondamentale come pratica comune.

Inoltre viene valutato l'effetto complessivo delle varie componenti armoniche tramite un parametro percentuale chiamato Total Harmonic Distortion (THD) valutato come:

$$THD = \sqrt{\left(\sum_{h=2}^{40} v_h^2\right)} \cdot 100$$

fermandosi per convenzione al 40-esimo ordine.

La norma stabilisce che durante qualunque periodo di una settimana, il 95% dei valori efficaci di ogni tensione armonica, mediati su 10 minuti, deve essere minore o uguale ai valori indicati nelle due tabelle. Relativamente al valore THD questo deve essere minore o uguale all'8% sia per la media che per la bassa tensione.

¹Non sono riportati le ampiezze per ordini superiori al 25-esimo in quanto molto piccoli e largamente imprevedibili a causa delle risonanze.

Dispari		Dispari multiple di 3		Pari	
h	%	h	%	h	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6-24	2
13	3	21	0.5		2
17	2				2
19	1.5				2
23	1.5				2
25	1.5				2

Tabella 1.5: Ampiezze percentuali armoniche di tensione BT

Dispari		Dispari multiple di 3		Pari	
h	%	h	%	h	%
5	6	3	5*	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6-24	2
13	3	21	0.5		2
17	2				2
19	1.5				2
23	1.5				2
25	1.5				2

* Può assumere valori anche molto inferiori a seconda della topologia della rete.

Tabella 1.6: Ampiezze percentuali armoniche di tensione MT

Quelli indicati finora sono i disturbi che normalmente si possono trovare nella tensione della rete elettrica e gli impianti di generazione tradizionali contribuiscono attivamente a garantire gli standard di qualità richiesti dalle norme, ma per un impianto da fonte solare o eolica ciò è più difficile data l'aleatorietà della sua produzione.

È necessario comprendere come questo tipo di impianto si interagisca con la rete in modo da poterli rendere sempre più performanti e far sì che possano contribuire anch'essi alla qualità dell'alimentazione elettrica.

1.3 Obiettivi della tesi

Da quanto visto finora si può facilmente intuire l'importanza ricoperta dalle fonti rinnovabili nel sistema elettrico italiano. Addirittura sono diventate la fonte energetica preponderante superando, per quantità di energia prodotta, tutte le fonti tradizionali, e quindi il loro impatto sulla rete elettrica è decisamente importante. Ad esclusione di idroelettrico, geotermico e bioenergie che sono facilmente programmabili per far fronte alle richieste della rete, solare e eolico sono strettamente legati alle condizioni meteorologiche e la loro produzione non è facilmente programmabile. Le loro dinamiche, inoltre, sono molto rapide e ciò amplifica ancora di più il loro impatto sulla rete.

Non solo, solare e eolico sono interfacciati alla rete tramite convertitori elettronici quindi il loro comportamento è influenzato anche dal loro metodo di controllo.

Obiettivo di questa tesi è proporre un metodo di riduzione in scala dei parametri di una rete elettrica in modo da poter realizzare modelli facilmente replicabili in laboratorio ma che mantengano le dinamiche della rete reale, sviluppare un metodo di controllo di un emulatore di rete elettrica che riesca ad emulare non solo la tensione ai capi di un nodo in condizioni statiche, ma che sia in grado di rispondere correttamente alle variazioni del carico ad esso connesso con dinamiche del tutto simili a quelle reali.

Verranno poi effettuate simulazioni in ambiente Matlab/SIMULINK per validare i modelli proposti e per fare confronti tra le diverse tipologie di simulatore di rete elettrica. Infine saranno presentati i risultati di prove sperimentali a supporto delle simulazioni delle simulazioni e per verificare l'effettivo funzionamento di un simulatore di rete realizzato con convertitori elettronici.

Capitolo 2

Stato dell'arte

La crescita esponenziale che negli ultimi anni hanno avuto gli impianti di produzione da fonti rinnovabili ha portato ad una decentralizzazione della produzione dell'energia elettrica. Per assicurare la qualità dell'energia, o Power Quality, e la stabilità della rete elettrica nel futuro, i codici di rete per la gestione di questo tipo di impianti sono costantemente aggiornati.

Essi definiscono il comportamento che questi sistemi devono avere durante condizioni di funzionamento normali, ma anche anomale, della rete come avviene in presenza di buchi di tensione, terne sbilanciate, sovratensioni, variazioni di frequenza e disturbi armonici.

I sistemi di generazione da fonti rinnovabili come solare fotovoltaico ed eolico, dovranno essere quindi sviluppati in modo da rispettare gli standard imposti dalle norme per potersi comportare nel modo più simile possibile a quello degli impianti tradizionali e contribuire alla Power Quality e alla stabilità della rete.

Il comportamento in rete dei sistemi da fonte rinnovabile è influenzato dal loro metodo di controllo e per testarli e svilupparli meglio è pratica comune realizzare emulatori di rete elettrica in scala.

L'importanza di impianti di questo tipo deriva dal fatto che test e prove sul campo sono costosi e richiedono molto tempo; inoltre consentono di studiare scenari futuri non ancora presenti su reti reali, oppure situazioni di grandi dis-

simmetrie nelle tensioni o elevati disturbi armonici.

Dall'analisi degli articoli presenti in letteratura gli emulatori possono essere divisi principalmente in due grandi categorie: reti di piccole dimensioni (in seguito micro reti) realizzate con elementi fisici, opportunamente scalati, che realizzano le dinamiche della rete reale di riferimento, e sistemi realizzati interamente con convertitori elettronici, in grado di generare tutte le forme d'onda necessarie a simulare le dinamiche della rete.

Entrambe le tipologie hanno pregi e difetti, ora analizzati, che permettono di definire il campo di applicazione migliore per ognuna delle due.

2.1 Micro reti

Le micro reti sono impianti realizzati all'interno di istituti di ricerca con lo scopo di alimentare carichi di varia natura all'interno dei laboratori.

Vengono utilizzate per studiare il comportamento e la stabilità della rete in diverse condizioni di lavoro e tipicamente sono collegate a carichi e fonti di energia non convenzionali e di natura molto diverse tra loro (fonti rinnovabili, sistemi di accumulo, ecc ...).

In figura 2.1 è riportato lo schema della micro rete presentata in [5] che può essere considerato l'esempio più completo in quanto contiene un elevato numero di elementi diversi (generatori, carichi, gruppi di accumulo, ecc...) riuniti in un unico impianto. Come si può notare esso è identico ad una qualsiasi rete elettrica industriale cambiano soltanto le dimensioni dell'impianto.

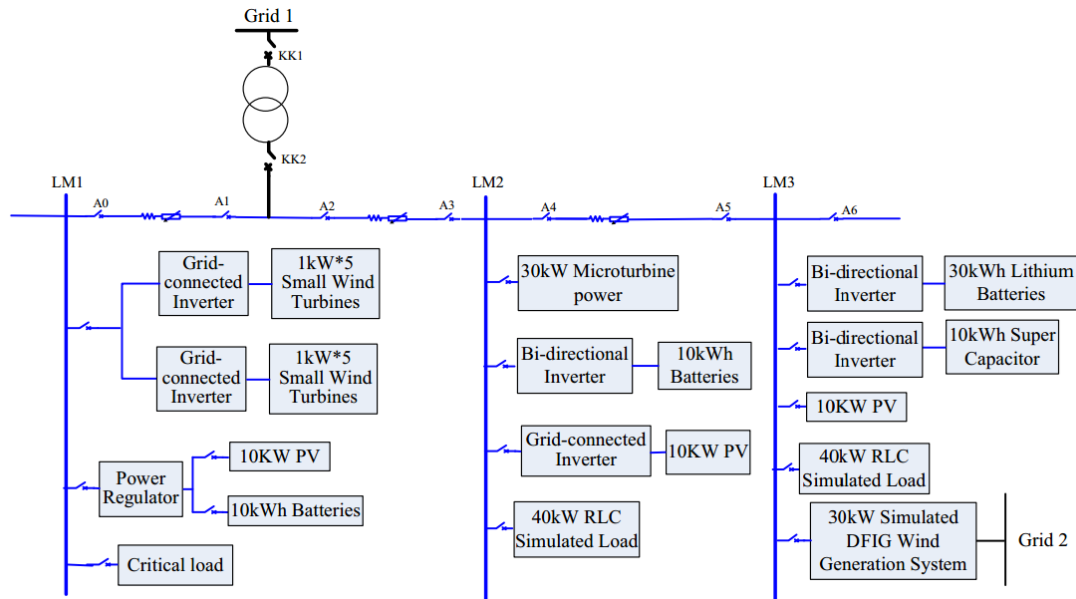


Figura 2.1: Schema tipica micro rete

I vari elementi della rete sono realizzati in modo tale da avere lo stesso comportamento di quelli reali. Le linee sono realizzate tramite induttanze e capacità che ne riflettono le proprietà, sono presenti diversi tipi di generatori (tradizionali, fotovoltaico, eolico, fuel cells, ecc . . .), carichi lineari e non e sistemi di accumulo. Inoltre sono presenti tutti i sistemi per realizzare la protezione e la comunicazione tra le stazioni che lavorano con le stesse modalità della rete elettrica industriale.

La maggior parte degli articoli presenti in letteratura propone le micro reti come strumento migliore per la ricerca e lo sviluppo di sistemi e metodi di misura, controllo e comunicazione.[6][7]

Infatti una tematica molto diffusa oggi nello studio delle reti è quella di studiare sistemi per la misura dell'ampiezza e della fase della tensione ai nodi della rete per la verifica dei load flow, misure contenenti anche un'informazione dell'istante temporale in cui sono state effettuate.

Tradizionalmente ciò era fatto da pochi sistemi centralizzati che raccoglievano le informazioni (spesso non simultanee) dai vari nodi, ed eseguivano i calcoli basandosi su modelli monofase.

Questo approccio portava ad una stima dello stato della rete con molti errori nella simmetria della tensione unitamente ad errori strumentali, problemi dovuti alla comunicazione dei dati e difficoltà date dal grande onere computazionale.

Sono allo studio sistemi come le PMU (Phasor Measurement Unit) che permettono di effettuare misure molto accurate con istanti temporali ben definiti, essendo sincronizzate tramite gps, consentendo di risolvere gran parte dei problemi.

Sulle micro reti sono stati effettuati anche esperimenti per lo studio di fonti energetiche non convenzionali come sistemi di accumulo chimici o cinetici ma anche generatori di energia da onde marine [8], oltre allo studio di metodi di gestione delle linee [9].

Negli ultimi anni stanno nascendo micro reti per lo studio di linee ad altissima e media tensione in corrente continua HVDC e MVDC [10] ma il materiale presente in rete è ancora limitato.

Questi sistemi consentono un accurato studio dei sistemi ad essi connessi anche con prove di lunga durata, ma hanno delle limitazioni dovute principalmente al fatto che essi lavorano in condizioni normali o discostandosene poco. Hanno costi di realizzazione molto elevati e rendendoli fuori portata per molti laboratori di ricerca che solitamente si rivolgono ad enti esterni che già li posseggono per effettuare le proprie prove.

2.2 Reti a convertitori

Gli esempi presenti in letteratura presentano un utilizzo dei convertitori elettronici piuttosto limitato per quanto riguarda lo studio delle reti. Per lo più si tratta di emulatori di carico da interfacciare ai piccoli impianti da fonti rinnovabili per studiarne la loro capacità di produzione e studiare la stabilità degli inverter di interfaccia, oppure semplici generatori di tensione variabile per la simulazione di guasti.

L'utilizzo di emulatori di rete realizzati con convertitori elettronici consente di realizzare con facilità tutta una gamma di forme d'onda non ottenibili con le micro reti. Si possono, infatti, implementare tutti i tipi di perturbazioni proprie delle reti (terne inverse, componenti armoniche, buchi e innalzamenti di tensione,

flicker, grandi variazioni di frequenza, ecc ...) fin dove le dinamiche dell'inverter lo consentono.

Di seguito sono presentati alcuni emulatori di rete in cui si fa un grande uso di convertitori elettronici.

In [12] viene presentato un emulatore di rete con cui gli autori si prefiggono l'obiettivo di studiare le interazioni tra la rete e gli inverter utilizzati per connettere gli impianti di generazione da fonti rinnovabili; soprattutto per quanto riguarda la risonanza armonica tra l'impedenza di rete e le armoniche prodotte dai convertitori.

Il sistema ha una potenza di 75 kW, con tensioni di fase pari a 120 V e contiene diversi elementi ad esso connessi come un generatore fotovoltaico, una cella a combustibile per la produzione di energia dall'idrogeno, un generatore eolico e un carico passivo.

Tutto l'insieme può funzionare in tre diverse modalità:

- alimentato con un inverter con il quale è possibile variare il valore di tensione e frequenza e generare armoniche;
- alimentato con una connessione diretta alla rete elettrica industriale e, tramite un banco passivo di induttanze, variare l'impedenza vista dagli inverter;
- alimentato contemporaneamente sia dalla rete che dall'inverter in modo da ottenere valori molto accurati di impedenza e riuscire a testare i limiti di stabilità dei convertitori in prova;

È un sistema molto complesso e costoso, inoltre non è pensato per l'emulazione delle dinamiche di rete.

In [13] è studiato un emulatore di rete elettrica con una potenza di circa 30 kW ma interamente realizzato con convertitori elettronici e i filtri come elementi passivi, gettando le basi per l'architettura tipica per un sistema di questo tipo che sarà realizzato secondo il seguente schema:

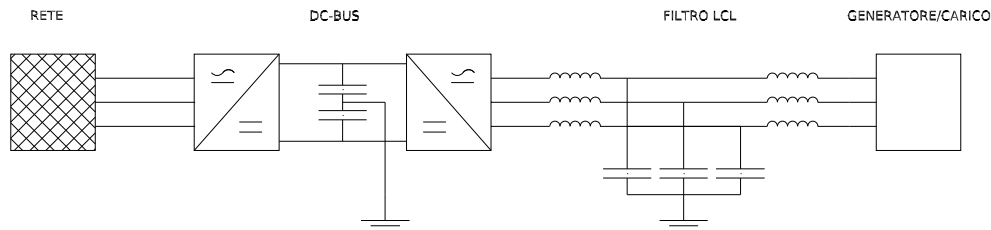


Figura 2.2: Schema emulatore di rete

in cui un convertitore Back-to-Back interfaccia il sistema alla rete elettrica realizzando un DC-bus a tensione costante, un altro convertitore si occupa, invece, di realizzare le tensioni desiderate ai capi del filtro per simulare il comportamento della rete.

Gli autori inoltre propongono una metodologia per il dimensionamento dei condensatori del DC-bus e degli elementi del filtro.

Viene poi presentato un metodo di controllo in anello chiuso del convertitore che tramite la conoscenza della matrice di stato del sistema realizza fedelmente le tensioni di riferimento.

Non si fa menzione nell'articolo per cosa verrà poi utilizzato il sistema né su che tipo di carico verranno effettuate le prove, però è interessante proprio per l'architettura proposta.

Nell'articolo [14] viene discussa la realizzazione di un emulatore di rete basato interamente su convertitori elettronici funzionante in bassissima tensione (circa 40 Vpp). Il sistema è pensato per studiare la capacità degli elementi ad esso collegati di funzionare anche in caso di abbassamenti o innalzamenti repentini delle tensione e/o in presenza di armoniche.

Infine il lavoro presentato negli articoli [15][16][17][18][19] è molto interessante perché espone interamente il processo di realizzazione di una micro rete totalmente controllata da convertitori elettronici.

L'impianto (fig. 2.3) è realizzato con un convertitore back to back di grande potenza con il compito di alimentare un dc bus a cui sono poi collegati tutti gli inverter che, essendo poi collegati tra loro, realizzano una rete trifase su cui si andranno ad eseguire i test.

Sono stati sviluppati modelli per il controllo dei convertitori in modo che emulino il comportamento di una turbina eolica [20], di un impianto fotovoltaico [21] e di un motore asincrono [22] in modo da avere una grande diversità di comportamento tra un carico e l'altro.

Obiettivo del lavoro è quello di replicare le dinamiche della rete rappresentata in alto nella figura 2.3

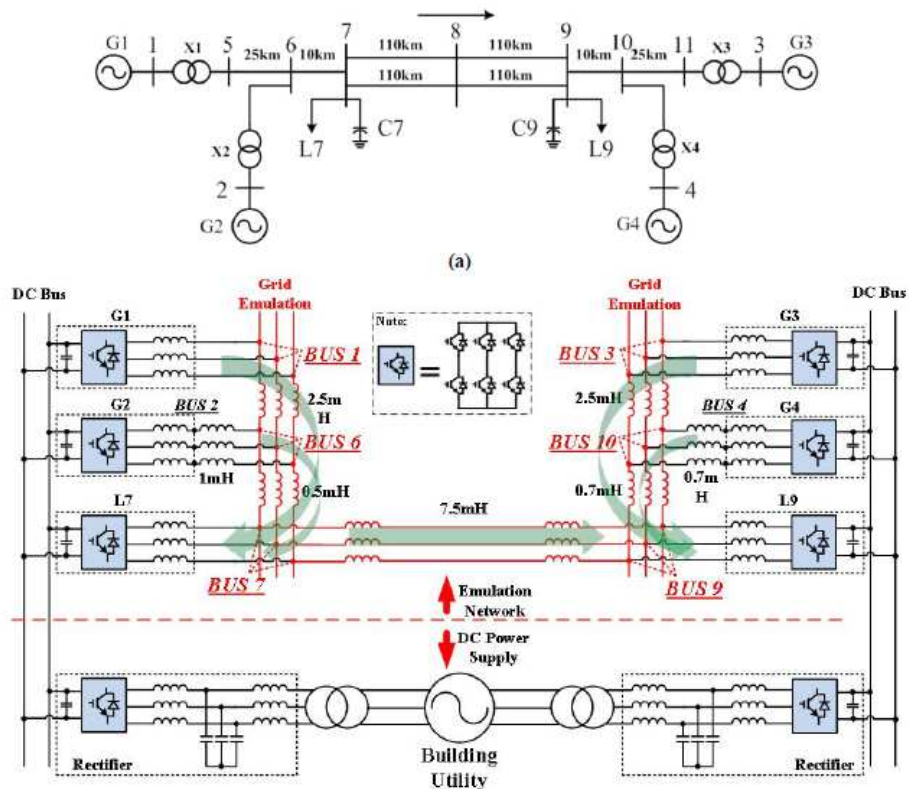


Figura 2.3: Rete realizzata con convertitori elettronici

Gli autori hanno poi sviluppato un metodo per la riduzione in scala della rete, cioè per passare dai parametri di una rete reale a quelli corrispondenti per una rete di minore potenza ma che mantenga le stesse dinamiche; metodo che sarà analizzato nel dettaglio più avanti.

È un esempio interessante della flessibilità di una rete realizzata con convertitori anche se le dinamiche delle linee sono ancora date da parametri fisici (resistenze, induttanze e capacità) che quindi non permettono di riconfigurarne la topologia.

Il vantaggio principale di una rete realizzata con convertitori è che i costi sono contenuti ed, una volta sviluppati i modelli, è possibile controllarli in modo da generare tensioni compatibili con il comportamento di una rete reale anche molto complessa.

Lo svantaggio principale risiede nella difficoltà nell'ottenere forme d'onda con pochi disturbi senza diminuire troppo le prestazioni dinamiche del sistema.

In conclusione ognuno dei lavori presentati sopra ha pregi e difetti: le micro reti consentono di studiare, oltre alle dinamiche delle linee, anche problemi di comunicazione tra i nodi della rete e di gestione delle protezioni ma d'altro canto hanno elevati costi di realizzazione, sono difficilmente riconfigurabili e lavorano sempre in condizioni che si discostano poco da quelle nominali.

Le reti realizzate con convertitori permettono lo studio di un numero elevatissimo di tematiche: dalle dinamiche delle linee allo studio dei guasti fino all'emulazione di condizioni di lavoro molto lontane dalle nominali, necessitano, soltanto, di modelli di controllo che ben riflettano il comportamento delle reti reali.

Presentano però difficoltà nell'ottenere forme d'onda di tensione e corrente pulite, cioè in assenza rumore sovrapposto, senza diminuirne molto le dinamiche e vi sono anche limitazioni date dalla capacità di calcolo dei controllori.

Si può quindi affermare che se lo scopo dello studio è quello di realizzare test di affidabilità e di lunga durata l'opzione migliore è l'utilizzo di una micro rete in cui si possono testare i comportamenti dei sistemi in prova in condizioni nominali di funzionamento.

Se invece l'obiettivo è lo studio di sistemi nuovi o parzialmente sviluppati e si vuole testarne le capacità in condizioni estremamente perturbate la soluzione ideale sono i convertitori elettronici che consentono di realizzare le più diverse tensioni e condizioni di lavoro in maniera affidabile, controllata e ripetibile.

Capitolo 3

Riduzione in scala delle reti elettriche

La realizzazione di prove sperimentali pone spesso di fronte alla difficoltà di dover ridurre un sistema reale di grande potenza in uno compatibile con le disponibilità del laboratorio ma che sia comunque rappresentativo della realtà.

Nel caso delle reti elettriche i test su sistemi in alta tensione e di grande potenza sono difficilmente realizzabili in laboratorio, sia per motivi di complessità che di sicurezza. Bisogna quindi provvedere alla realizzazione di un modello in scala ridotta che abbia le stesse proprietà e dinamiche della rete reale.

È necessario quindi individuare quali parametri definiscono il comportamento della rete reale e scalarne le dimensioni in modo che il modello risultante sia il più fedele possibile alla realtà.

In una rete qualsiasi le dinamiche vengono imposte dai parametri della linea, cioè:

- parametri serie: resistenza e induttanza della linea;
- parametri derivati: capacità e conduttanza verso terra:

per poter scalare correttamente questi parametri si usa il metodo detto dei *Valori Relativi*.

3.1 I valori relativi

Si definiscono *Valori Relativi* o *Valori in Per Unità* (pu) delle grandezze di un sistema, i rapporti dei valori di queste grandezze con i valori di grandezze dimensionalmente omogenee a quelle considerate che vengono assunti come riferimento o base.

Le grandezze scelte come base devono formare un sistema coerente, cioè il valore base di una grandezza, ottenibile dalle altre grandezze secondo una legge fisica o relazione matematica, deve essere ottenibile con la stessa relazione dai valori base delle altre grandezze.

Alcuni valori delle grandezze di base possono essere scelti arbitrariamente e verranno definiti *fondamentali* mentre gli altri verranno ricavati sulla base delle leggi fisiche che li legano ai fondamentali.

3.1.1 I valori relativi nei sistemi elettrici

In ambito elettrotecnico i valori relativi sono molto usati soprattutto nello studio delle reti perché consentono l'analisi di sistemi con sezioni a tensione diversa riportando tutte le grandezze ad un unico livello semplificando molto il problema. Una volta ricavati i valori relativi dei risultati essi vengono poi moltiplicati per le loro grandezze di riferimento trasformandoli in quelli reali.

Le grandezze base fondamentali solitamente scelte per problemi di elettrotecnica sono:

- il valore efficace nominale della tensione concatenata o di linea espressa in Volt, V_{base} [V];
- una potenza, solitamente quella nominale di un generatore o trasformatore importante, espressa in VoltAmpere, A_{base} [VA];

da questi due è poi possibile ricavare i valori base di tutte le altre grandezze utilizzando le ben note relazioni:

- corrente base:

$$I_{base} = \frac{A_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}}; \quad (3.1)$$

- impedenza base:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{A_{base}}; \quad (3.2)$$

- ammettenza base:

$$Y_{base} = \frac{1}{Z_{base}}; \quad (3.3)$$

Dopodiché è possibile trasformare i valori istantanei delle grandezze in quelli relativi semplicemente facendone il rapporto con il corrispondente valore base:

$$v_{pu} = \frac{V}{V_{base}}; \quad (3.4)$$

$$i_{pu} = \frac{I}{I_{base}}; \quad (3.5)$$

$$z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}}; \quad (3.6)$$

$$y_{pu} = \frac{Y}{Y_{base}}; \quad (3.7)$$

Si può anche facilmente operare un cambio di base, cioè riportare i valori relativi calcolati con un determinato riferimento, in altri con un riferimento diverso. Indicando con un apice le grandezze nella nuova base:

$$I' = I \cdot \frac{A_{base}}{A_{base}'} \cdot \frac{V_{base}'}{V_{base}}; \quad (3.8)$$

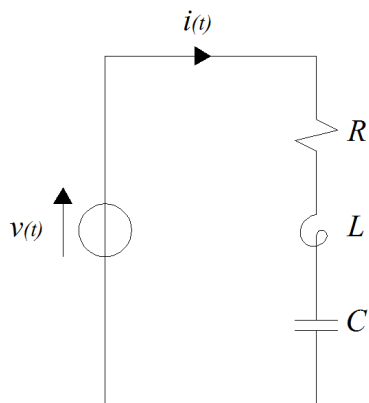
$$Z' = Z \cdot \frac{A_{base}'}{A_{base}} \cdot \frac{V_{base}^2}{V_{base}'^2}; \quad (3.9)$$

3.2 Riduzione in scala di reti elettriche

Come riportato a inizio capitolo, un modello in scala ridotta deve possedere le stesse dinamiche e proprietà della rete reale. I valori relativi permettono di fare questa operazione e il concetto chiave di questo metodo, citato da L. Yang e alt. in [15] e sviluppato in [23], è che il valore di una grandezza espresso in valori relativi deve rimanere invariato passando dal sistema reale a quello scalato.

Cioè, ad esempio, se il valore relativo di una resistenza è pari a 0.5 nel sistema reale, dovrà essere pari a 0.5 anche nel sistema scalato.

Per verificare la correttezza di tale metodo si consideri un circuito RLC come sistema di partenza e si supponga di volerlo scalare in un suo modello di minore potenza:



$$v(t) = \sqrt{2} 15\,000 \cos(\omega t) \text{ V}$$

$$A = 10 \text{ MVA}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$R = 8 \Omega;$$

$$L = 5 \text{ mH};$$

$$C = 170 \mu\text{F};$$

Figura 3.1: Circuito RLC

Per verificarne le dinamiche, a fronte di una tensione variabile di forma qualsiasi come variabile di ingresso, andiamo a studiarne la funzione di trasferimento, espressa come rapporto tra ingresso e uscita utilizzando la trasformata di Laplace (cfr. Appendice A):

$$H(s) = \frac{I(s)}{V(s)} = \frac{sC}{s^2LC + sRC + 1} = \frac{0.00017s}{8.5 \cdot 10^{-7}s^2 + 0.00136s + 1}; \quad (3.10)$$

La funzione di trasferimento di un dato sistema definisce il comportamento che ha il sistema a fronte di un ingresso qualsivoglia, identificandone le dinamiche definite dalla posizione nel piano $\sigma - j\omega$ degli zeri (radici del numeratore) e dei poli (radici del denominatore).

Se il modello scalato avrà una funzione di trasferimento con poli e zeri coincidenti a quelli del sistema reale allora anche le sue dinamiche lo saranno.

Si supponga di voler scalare il circuito RLC visto sopra (fig. 3.1) in uno con valore efficace della tensione pari a $12V$ e una potenza di $500VA$.

Per prima cosa si esegue il calcolo dei valori relativi del sistema reale:

$$A_{base} = 10 \cdot 10^6 VA; \quad V_{base} = 15\,000 V; \quad (3.11)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{A_{base}} = 22.5 \Omega; \quad (3.12)$$

$$r_{pu} = \frac{R}{Z_{base}} = 0.35556; \quad (3.13)$$

Dato che l'impedenza di riferimento è espressa in Ohm non è corretto fare il calcolo diretto dell'induttanza e delle capacità in valore relativo ma occorre prima passare per le reattanze:

$$X_L = 2\pi fL = \omega L = 1.571\Omega; \quad (3.14)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C} = 18.72\Omega; \quad (3.15)$$

dopodiché:

$$x_{Lpu} = \frac{X_L}{Z_{base}} = 0.0698; \quad (3.16)$$

$$x_{Cpu} = \frac{X_C}{Z_{base}} = 0.832; \quad (3.17)$$

Il nuovo modello avrà:

$$A_{base}' = 500 \text{ VA}; \quad V_{base}' = 12 \text{ V}; \quad (3.18)$$

$$Z_{base}' = \frac{V_{base}'^2}{A_{base}'} = 0.288 \text{ } \Omega; \quad (3.19)$$

e quindi per ottenere i valori dei parametri del circuito basta moltiplicare il loro valore relativo per le grandezze base:

$$R' = r_{pu} \cdot Z_{base}' = 0.1024 \text{ } \Omega; \quad (3.20)$$

$$X_L' = x_{Lpu} \cdot Z_{base}' = 0.0201 \text{ } \Omega \rightarrow L' = 6.4 \cdot 10^{-5}; \quad (3.21)$$

$$X_C' = x_{Cpu} \cdot Z_{base}' = 0.2396 \text{ } \Omega; \rightarrow C' = 0.0133; \quad (3.22)$$

e la funzione di trasferimento corrispondente:

$$H'(s) = \frac{I'(s)}{V'(s)} = \frac{sC'}{s^2L'C' + sR'C' + 1} = \frac{0.0133s}{8.5 \cdot 10^{-7}s^2 + 0.00136s + 1}; \quad (3.23)$$

Si può notare che essa è uguale, a parte il numeratore, a quella della rete reale (4.10) ma questo non ne cambia le dinamiche. Infatti osservando la mappatura dei poli e degli zeri (fig. 3.2) si può vedere che essi coincidono per entrambe le funzioni di trasferimento.

Ciò è valido non solo nel dominio della frequenza ma vale anche nel discreto. Infatti facendo la mappatura dei poli e degli zeri delle due funzioni di trasferimento con il metodo di Tustin¹ (vedi Appendice B) e facendo la proiezione di poli e zeri nel piano di Gauss (fig. 3.3), si ottengono ancora due grafici identici segno che le dinamiche restano invariate anche nel discreto:

$$H(z) = \frac{0.009234z^2 - 0.009234}{z^2 - 1.841z + 0.8523}; \quad (3.24)$$

¹Periodo di campionamento $T_s = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

$$H'(z) = \frac{0.7214z^2 - 0.7214}{z^2 - 1.841z + 0.8523}; \quad (3.25)$$

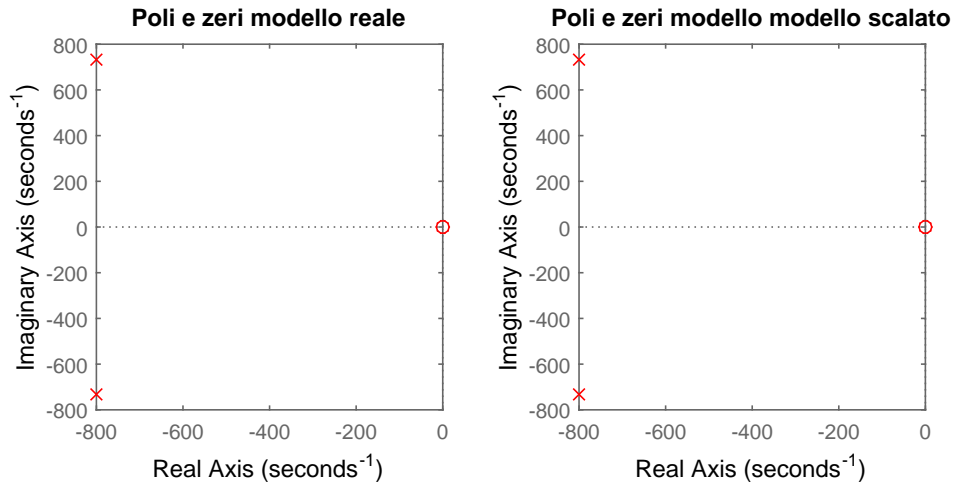


Figura 3.2: Poli e Zeri circuito RLC prima e dopo la scalatura, continuo.

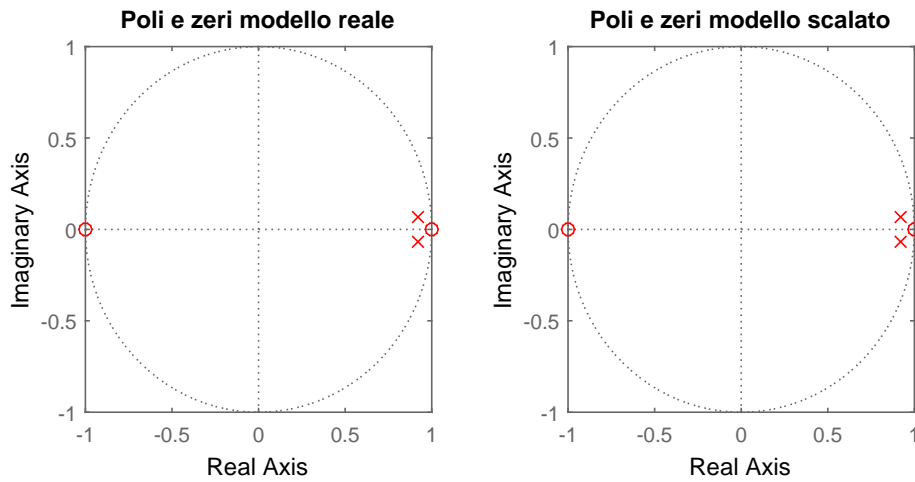


Figura 3.3: Poli e Zeri circuito RLC prima e dopo la scalatura, discreto.

Si consideri ora un caso più complesso e più rappresentativo della realtà. In figura 5.14 è rappresentato il circuito equivalente di una linea, modello a gamma (Γ), con parametri serie e derivati che alimenta un carico RL.

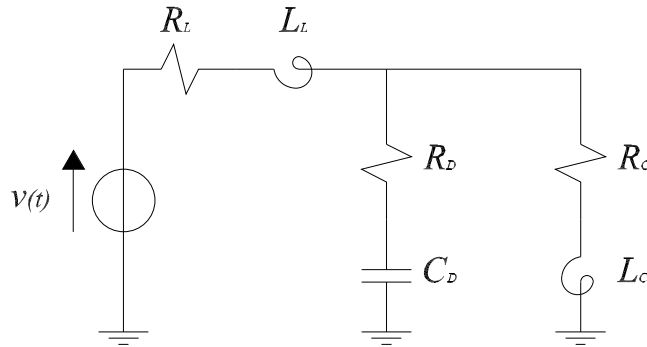


Figura 3.4: Circuito linea e carico.

La funzione di trasferimento che identifica la tensione sul carico in funzione di quella di ingresso è la seguente:

$$H(s) = \frac{(R_C + sL_C) \left(R_D + \frac{1}{sC_D} \right)}{(R_L + sL_L) \left(sL_C + \frac{1}{sC_D} + R_C + R_D \right) + (R_C + sL_C) \left(R_D + \frac{1}{sC_D} \right)}; \quad (3.26)$$

che dati i seguenti valori² e una lunghezza di linea pari a 20km :

$$v(t) = \sqrt{2} 15\,000 \cos(\omega t) \text{ V}$$

$$A = 50 \text{ MVA}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$R_L = 0.1 \Omega/\text{km};$$

$$L_L = 1.0 \text{ mH}/\text{km};$$

$$C_D = 11 \text{ nF}/\text{km};$$

$$R_D = 10 \cdot 10^6 \Omega/\text{km};$$

$$R_C = 10 \Omega;$$

$$L_C = 3 \text{ mH};$$

diventa:

$$H(s) = \frac{0.132s^2 + 440s + 10}{1.32 \cdot 10^{-11}s^3 + 1.012s^2 + 528s + 12}; \quad (3.27)$$

Si vuole ora scalare anche questo circuito in un modello ridotto da 12V di tensione in valore efficace e 500VA di potenza.

Operando come sopra (4.13) si ottiene:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{A_{base}} = 4.5 \Omega; \quad (3.28)$$

$$r_{Dpu} = \frac{R_D}{Z_{base}} = 4.444 \cdot 10^7; \quad r_{Lpu} = \frac{R_L}{Z_{base}} = 0.444; \quad r_{Cpu} = \frac{R_C}{Z_{base}} = 2.222; \quad (3.29)$$

$$x_{CDpu} = \frac{X_{CD}}{Z_{base}} = 3215; \quad x_{LLpu} = \frac{X_{LL}}{Z_{base}} = 1.3963; \quad x_{LCpu} = \frac{X_{LC}}{Z_{base}} = 0.209; \quad (3.30)$$

e visto che i valori di base del modello scalato sono gli stessi di prima (4.11) otteniamo:

$$R_D' = r_{Dpu} \cdot Z_{base}' = 1.28 \cdot 10^7 \Omega; \quad R_L' = r_{Lpu} \cdot Z_{base}' = 0.128 \Omega; \quad (3.31)$$

²C.M.Arturi, "Elettromagnetismo applicato e metodi di calcolo", pag. 387.[24]

$$R_C' = r_{C_{pu}} \cdot Z_{base}' = 0.64 \Omega; \quad X_{C_D}' = x_{C_{Dpu}} \cdot Z_{base}' = 925.9 \Omega; \quad (3.32)$$

$$X_{L_L}' = x_{L_{Lpu}} \cdot Z_{base}' = 0.4021 \Omega; \quad X_{L_C}' = x_{L_{Cpu}} \cdot Z_{base}' = 0.0603 \Omega; \quad (3.33)$$

e infine:

$$C_D' = 3.4375 \cdot 10^{-6} F; \quad L_L' = 0.0013 H; \quad L_C' = 1.9200 \cdot 10^{-4} H; \quad (3.34)$$

A questo punto la funzione di trasferimento del sistema scalato, che ha espressione del tutto simile a quella della rete reale(4.26):

$$H(s)' = \frac{(R_C' + sL_C') \left(RD' + \frac{1}{sC_D'} \right)}{(R_L' + sL_L') \left(sL_C' + \frac{1}{sC_D'} + R_C' + RD' \right) + (R_C' + sL_C') \left(RD' + \frac{1}{sC_D'} \right)}; \quad (3.35)$$

risulta:

$$H'(s) = \frac{0.008448s^2 + 28.16s + 0.64}{8.448 \cdot 10^{-13}s^3 + 0.06477s^2 + 33.79s + 0.768}; \quad (3.36)$$

Individuando ora la posizione dei poli e degli zeri delle due funzioni di trasferimento notiamo, come ci aspettavamo, che essa rimane invariata nel passaggio da un sistema all'altro(fig.3.5)

Anche nel discreto le cose non cambiano.

Facendo la mappatura poli e degli zeri delle due funzioni di trasferimento con il metodo di Tustin si ottiene per il circuito reale:

$$H(z) = \frac{0.1483z^3 - 0.1059z^2 - 0.1483z + 0.1059}{z^3 - 0.9492z^2 - z + 0.9492}; \quad (3.37)$$

e per quello scalato:

$$H(z) = \frac{0.1483z^3 - 0.1059z^2 - 0.1483z + 0.1059}{z^3 - 0.9492z^2 - z + 0.9492}; \quad (3.38)$$

Anche in questo caso poli e zeri hanno posizioni identiche quindi le dinamiche restano invariate(fig.3.6).

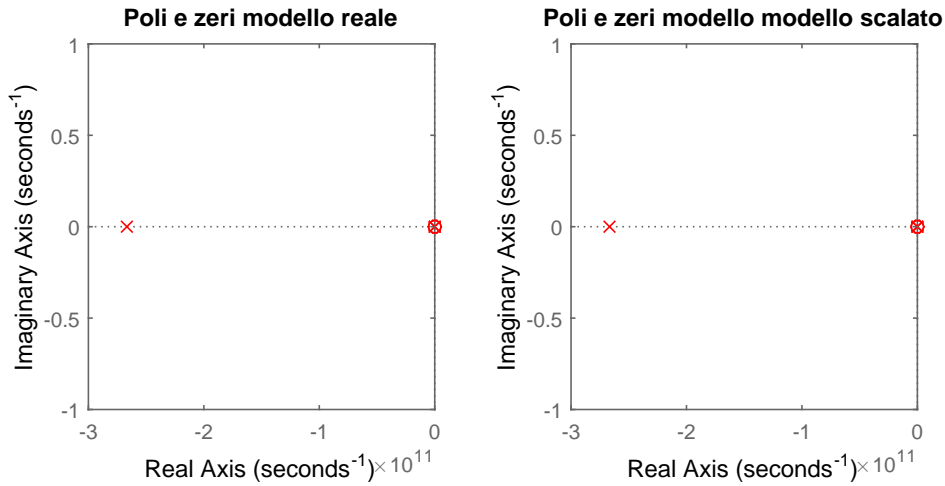


Figura 3.5: Poli e Zeri linea prima e dopo la scalatura, continuo.

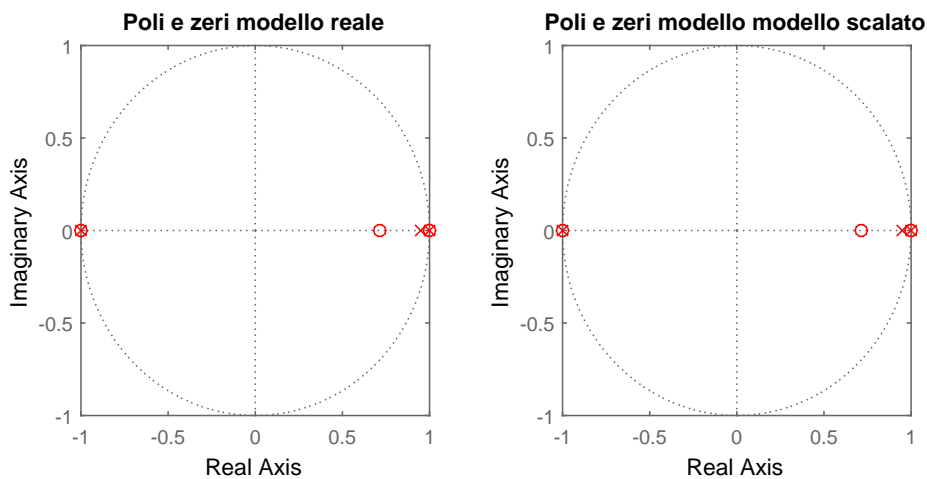


Figura 3.6: Poli e Zeri linea prima e dopo la scalatura, discreto.

In conclusione si può affermare che il metodo di riduzione in scala utilizzando i valori relativi è valido, e consente di ridurre le dimensioni del problema in modo da rendere più agevole la sua realizzazione in laboratorio senza andarne a variare le caratteristiche e dinamiche.

È un metodo semplice e puramente algebrico, quindi può essere eseguito con grande facilità da qualsiasi foglio di calcolo e microcontrollore.

Capitolo 4

Modello di un nodo di rete elettrica

La rete elettrica è un sistema decisamente complesso con proprietà che cambiano da un nodo all'altro a seconda della sua topologia, e per poter effettuare in laboratorio esperimenti e prove che ben approssimino la realtà è necessario lo sviluppo di modelli matematici adeguati.

La grandezza che identifica lo stato di funzionamento della rete elettrica è la tensione e, come visto nei capitoli precedenti, esistono molte indicazioni riguardanti le sue caratteristiche in modo tale da garantirne la qualità.

Il modello matematico che esprime le dinamiche della rete dovrà essere in grado di realizzare una tensione alternata compatibile con le specifiche e rispondere correttamente agli assorbimenti o iniezioni di potenza da parte del carico a valle. Una volta sviluppato, il modello dovrà essere validato tramite simulazioni che ne verifichino la correttezza; esse saranno prima effettuate sul solo modello per appurarne le caratteristiche e, successivamente, sul modello inserito in un contesto più ampio, cioè in presenza di elementi al di fuori del suo controllo (carichi, altri generatori, ecc. ...).

4.1 Realizzazione del modello

Per procedere con la realizzazione di un modello matematico che simuli il comportamento di una rete elettrica è necessario definire il tipo di problema che si vuole risolvere e le sue caratteristiche.

Obiettivo di questo lavoro è lo studio di un emulatore in grado di realizzare le dinamiche di un nodo di rete elettrica connesso ad un impianto di generazione da fonte rinnovabile (parco eolico).

Il modello dovrà quindi essere, inizialmente, in grado di realizzare una tensione alternata che reagisca correttamente ad eventuali assorbimenti o iniezioni di potenza nel nodo. Dopodiché verrà ampliato in modo che sia in grado di realizzare terne sbilanciate, con presenza di armoniche, fino alla simulazione di tensioni affette da guasti.

4.1.1 Nodo di rete

Con il termine *nodo di rete elettrica* si intende, da qui in avanti, il punto fisico a cui un generatore, o carico, si interfaccia con il sistema elettrico.

Le sue caratteristiche sono definite dalla tensione nominale a vuoto V_n e dalla potenza di corto circuito:

$$Acc = \overline{V_n} \underline{I_{cc}}; \quad (4.1)$$

dove $\underline{I_{cc}}$ rappresenta il complesso coniugato della corrente di corto circuito che è anche la massima erogabile dal nodo.

La tensione a vuoto è quella misurabile ai capi del nodo quando non vi è alcuno assorbimento o erogazione di potenza, mentre la potenza di corto circuito è quella dissipata nell'impedenza interna del nodo quando è attraversata dalla corrente di corto circuito.

Questa impedenza è definita appunto *impedenza di corto circuito*:

$$Z_{cc} = \frac{V_n^2}{A_{cc}}; \quad (4.2)$$

La formula 4.2 restituisce, però, solo il modulo dell'impedenza di corto circuito e per poter definire le dinamiche del nodo è necessario conoscerne anche la componente reale e immaginaria.

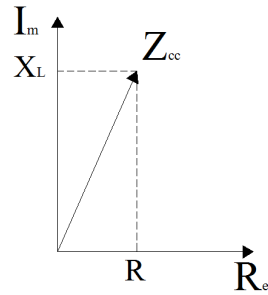


Figura 4.1: Fasore impedenza di corto circuito.

Nella realtà l'impedenza di corto circuito di un nodo di rete è principalmente induttiva e se si indica con:

$$X_L = 2\pi fL = \omega L; \quad (4.3)$$

la reattanza del nodo (L è l'induttanza della linea) e con R la sua resistenza, l'espressione della generica impedenza di corto circuito è data da:

$$\overline{Z_{cc}} = R + jX_L; \quad (4.4)$$

Dato, però, che dalle specifiche del nodo non è possibile distinguerne le due componenti, per la realizzazione del modello è necessario introdurre un coefficiente α definito come:

$$\alpha = \frac{X_L}{R}; \quad (4.5)$$

Utilizzando questo rapporto l'espressione del modulo consente di calcolarne la componente resistiva:

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X_L^2}; \quad (4.6)$$

$$= \sqrt{R^2 + (\alpha R)^2}; \quad (4.7)$$

$$= \sqrt{R^2(1 + \alpha^2)}; \quad (4.8)$$

\therefore

$$R = \sqrt{\frac{Z_{cc}^2}{1 + \alpha^2}}; \quad (4.9)$$

e quindi la reattanza:

$$X_L = \alpha \sqrt{\frac{Z_{cc}^2}{1 + \alpha^2}}; \quad (4.10)$$

A questo punto l'induttanza del nodo può essere facilmente ricavata come:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}; \quad (4.11)$$

L'impedenza di corto circuito da origine alle cadute di tensione nel nodo negli istanti in cui la potenza è uscente e viceversa provoca innalzamenti di tensione se entrante.

Quindi, utilizzando per semplicità l'equivalente Thévenin monofase, la tensione ai capi del nodo può essere espressa (fasorialmente) come:

$$\overline{V_{out}} = \overline{V_n} - \overline{Z_{cc}} \overline{I_{out}}; \quad (4.12)$$

con $\overline{I_{out}}$ si è indicata la corrente istantanea uscente dal nodo.

Il nodo di rete elettrica su cui infine saranno realizzate le simulazioni sarà tri-fase e i parametri R e L saranno uguali per tutte e tre le fasi; eventuali squilibri o dissimmetrie, in fase di simulazione, saranno realizzate controllando opportu-

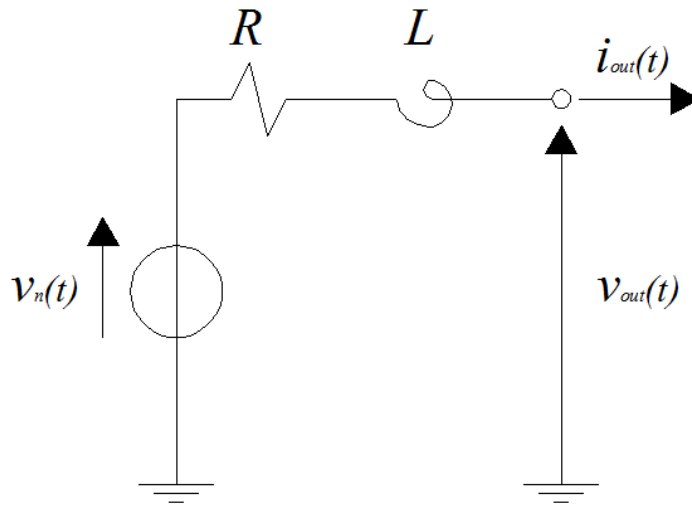


Figura 4.2: Circuito equivalente monofase nodo di rete.

namente il generatore di tensione a monte dell'impedenza di corto circuito.

4.1.2 Funzione di trasferimento

L'espressione 4.12 che identifica la tensione ai capi del nodo, essendo fasoriale, non ne identifica le dinamiche ma mostra soltanto il suo comportamento a regime e non in transitorio.

La simulazione, per essere valida, deve mostrare il comportamento del nodo di rete a fronte di qualsiasi evento che può avvenire ai suoi capi o a monte di esso. Scrivendo l'espressione 4.12 nella sua corrispondente nel dominio del tempo:

$$v_{out}(t) = v_n(t) - R i_{out}(t) - L \frac{d}{dt} i_{out}(t); \quad (4.13)$$

si ottiene un'equazione differenziale del primo ordine che mostra le dinamiche del nodo di rete dovute alla sua componente resistiva e induttiva.

Per renderlo facilmente implementabile in un ambiente di simulazione, all'espressione 4.13 viene applicata la trasformata di Laplace in modo da ottenerne la funzione di trasferimento:

$$V_{out}(s) = V_n(s) - (R + sL)I_{out}(s); \quad (4.14)$$

che esprime il legame della tensione ai capi del nodo in funzione della tensione a vuoto e della corrente erogata.

Questa espressione però è problematica per via della presenza del termine $(R+sL)$ che moltiplica la corrente in uscita. Se espressa nella formulazione presentata nell'appendice A, questa relazione può essere riscritta come:

$$V_{out}(s) = V_n(s) - \frac{R + sL}{1} I_{out}(s); \quad (4.15)$$

e si nota che il termine che moltiplica la corrente in uscita $I_{out}(s)$ ha il grado (in s) del numeratore maggiore di quello del denominatore; siamo cioè in presenza di un sistema *improprio*.

Ciò porta ad alcune difficoltà computazionali oltre ad avere un'uscita, V_{out} , molto disturbata a causa della presenza della derivata.

Per ovviare ai problemi si consideri una diversa configurazione del circuito equivalente del nodo di rete:

a cui sono state aggiunte una resistenza e una capacità di dispersione verso terra.

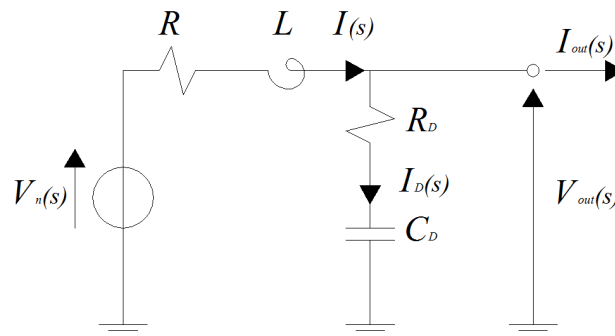


Figura 4.3: Circuito equivalente definitivo del nodo di rete.

Questo ha una duplice funzione, infatti, rende il modello del nodo più simile alla realtà in quanto qualsiasi linea elettrica ha degli effetti capacitivi, per quanto piccoli, di dispersione verso terra e, inoltre, la funzione di trasferimento che esprime la tensione di uscita in funzione della tensione a monte del nodo e della corrente

assorbita risulta:

$$V_{out}(s) = V_n(s) - (R + sL)I(s); \quad (4.16)$$

$$= V_n(s) - (R + sL)(I_{out}(s) + I_D(s)); \quad (4.17)$$

$$= V_n(s) - (R + sL)I_{out}(s) - (R + sL)\frac{V_{out}(s)}{R_D + \left(\frac{1}{sC_D}\right)}; \quad (4.18)$$

quindi:

$$V_{out}(s) \left(1 + \frac{(R + sL)sC_D}{sC_DR_D + 1}\right) = V_n(s) - (R + sL)I_{out}(s); \quad (4.19)$$

$$V_{out}(s) \left(\frac{s^2LC_D + sC_D(R + R_D) + 1}{sC_DR_D + 1}\right) = V_n(s) - (R + sL)I_{out}(s); \quad (4.20)$$

e infine:

$$V_{out}(s) = \left(\frac{sC_DR_D + 1}{s^2LC_D + sC_D(R + R_D) + 1}\right) V_n(s) - \left(\frac{s^2LR_DC_D + s(L + C_DR_DR) + R}{s^2LC_D + sC_D(R + R_D) + 1}\right) I_{out}(s); \quad (4.21)$$

Come si può notare il grado del numeratore è minore o uguale a quello del denominatore sia per il contributo dovuto alla tensione a vuoto che in quello dato dalla corrente uscente; perciò la grandezza in uscita $V_{out}(s)$ sarà assente da disturbi e non darà particolari problemi computazionali.

L'espressione finale della tensione del nodo è data dalla somma di due contributi e questo porta a delle interessanti proprietà:

- il primo contributo tiene conto delle variazioni di tensione a monte del nodo, variazioni che possono derivare da guasti o dalla presenza di componenti armoniche, per calcolare l'andamento della tensione a vuoto;
- il secondo contributo dipende dalla corrente assorbita dal carico e non richiede la conoscenza a priori delle caratteristiche del carico stesso contrariamente da quanto richiesto dai modelli già presenti in ambiente MATLAB/Simulink;

Questa formulazione, quindi, consente una grande flessibilità nella generazione della tensione da parte del simulatore di rete. Agendo sulla $V_n(s)$ si potranno generare tensioni alternate simmetriche, squilibrate e con armoniche; mentre la $I_{out}(s)$ dipenderà totalmente dal tipo di carico connesso al nodo che ne risponderà generando eventuali cadute di tensione in accordo con la funzione di trasferimento.

L'espressione 4.21 definisce quindi tutte le dinamiche del nodo di rete ed è questa che verrà usata come modello matematico per le successive simulazioni.

4.2 Verifica del modello

È necessario ora confrontare il modello di nodo di rete presentato nel paragrafo precedente con un modello da considerare di riferimento per poterne verificare la correttezza.

Come modello di riferimento si consideri il blocco Simulink “Three Phase Source” presente nell'ambiente SimPowerSystem.

Esso è in grado di generare una tensione trifase e di simulare le dinamiche interne del nodo una volta note la potenza di corto circuito e la tensione nominale. Però, a differenza del modello sviluppato nel paragrafo precedente, per poter funzionare deve essere a conoscenza del tipo di carico ad esso connesso inoltre può generare solamente tensioni trifase simmetriche. Confrontando le sue prestazioni con quelle del nuovo modello potremo valutarne la bontà.

Il modello sviluppato finora non è ancora in grado di funzionare come il blocco Simulink ora presentato perché non è ancora in grado di generare una tensione e, inoltre, necessita di un carico che assorba una corrente permettendo di verificarne le dinamiche.

4.2.1 Generatore di tensioni trifase

Per poter testare le prestazioni della funzione di trasferimento 4.21 è necessario disporre di un elemento che generi un segnale $V_n(s)$ rappresentativo della tensione a monte del nodo.

Visto che verrà simulato un nodo generico della rete elettrica, sarà necessario generare una terna trifase di tensioni sfasate di 120° l'una dall'altra.

Per fare ciò si utilizza un approccio fasoriale identificando ogni tensione con il suo vettore complesso:

$$\overline{v_a d} = v_a; \quad (4.22)$$

$$\overline{v_b d} = v_b e^{-j\frac{2}{3}\pi}; \quad (4.23)$$

$$\overline{v_c d} = v_c e^{-j\frac{4}{3}\pi}; \quad (4.24)$$

dopodiché è necessario porre in rotazione la terna alla frequenza desiderata e considerando la proiezione sull'asse reale dei tre vettori si ottiene una terna equilibrata di tensioni sinusoidali.

$$v_a d(t) = \text{Re} \{ \overline{v_a d} e^{j\omega t} \}; \quad (4.25)$$

$$v_b d(t) = \text{Re} \{ \overline{v_b d} e^{j\omega t} \}; \quad (4.26)$$

$$v_c d(t) = \text{Re} \{ \overline{v_c d} e^{j\omega t} \}; \quad (4.27)$$

La pulsazione ω si ottiene come indicato nell'equazione 4.28 dove con f si indica la frequenza:

$$\omega = 2\pi f; \quad (4.28)$$

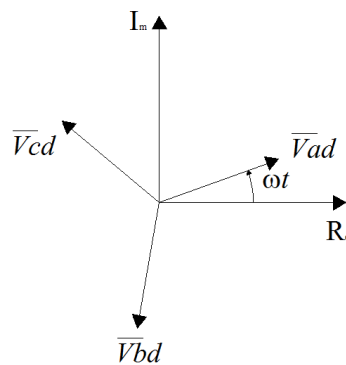


Figura 4.4: Terna diretta.

Quella rappresentata dalle equazioni 4.25, 4.26, 4.27 è una terna di tensioni

cosiddetta *diretta* in quanto la fase b è in ritardo di 120° sulla fase a e la fase c è in ritardo di 120° sulla fase b , ma spesso capita, in presenza di carichi squilibrati, che vi sia la presenza di una terna *inversa* sovrapposta.

La terna inversa ha le fasi poste in senso ciclico opposto rispetto alla diretta e per realizzarla basta invertire due vettori:

$$\overline{v_{ai}} = v_{ai}; \quad (4.29)$$

$$\overline{v_{bi}} = v_{bi} e^{-j\frac{4}{3}\pi}; \quad (4.30)$$

$$\overline{v_{ci}} = v_{ci} e^{-j\frac{2}{3}\pi}; \quad (4.31)$$

e poi parla in rotazione come per la diretta e prenderne la parte reale:

$$v_{ai}(t) = \text{Re} \{ \overline{v_{ai}} e^{j\omega t} \}; \quad (4.32)$$

$$v_{bi}(t) = \text{Re} \{ \overline{v_{bi}} e^{j\omega t} \}; \quad (4.33)$$

$$v_{ci}(t) = \text{Re} \{ \overline{v_{ci}} e^{j\omega t} \}; \quad (4.34)$$

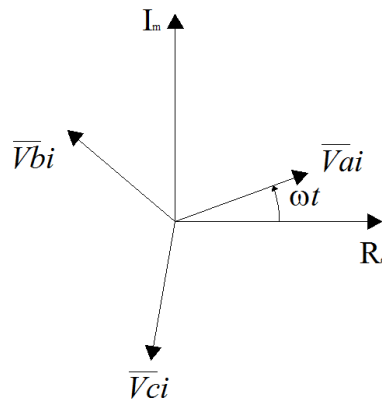


Figura 4.5: Terna inversa.

Esiste, infine, anche una terza terna detta *omopolare* in cui tutti e tre i fasori sono equiversi.

$$\overline{v_a o} = v_a o; \quad (4.35)$$

$$\overline{v_b o} = v_b o; \quad (4.36)$$

$$\overline{v_c o} = v_c o; \quad (4.37)$$

Una volta posta in rotazione anche questa terna se ne prende la parte reale per ottenere le tre tensioni:

$$v_a o(t) = \text{Re} \{ \overline{v_a o} e^{j\omega t} \}; \quad (4.38)$$

$$v_b o(t) = \text{Re} \{ \overline{v_b o} e^{j\omega t} \}; \quad (4.39)$$

$$v_c o(t) = \text{Re} \{ \overline{v_c o} e^{j\omega t} \}; \quad (4.40)$$

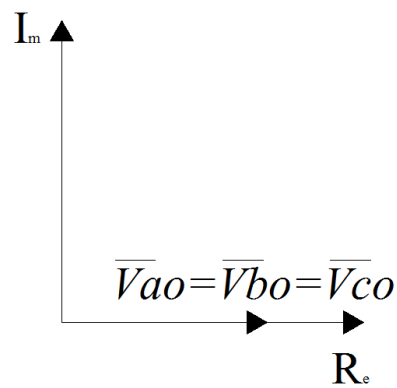


Figura 4.6: Terna omopolare.

A questo punto è possibile, agendo sul peso delle tre terne sovrapposte, realizzare una tensione trifase qualsivoglia, simmetrica o meno.

Aggiungendo poi terne a frequenze diverse è possibile generare componenti armoniche e sub-armoniche sovrapposte alla fondamentale.

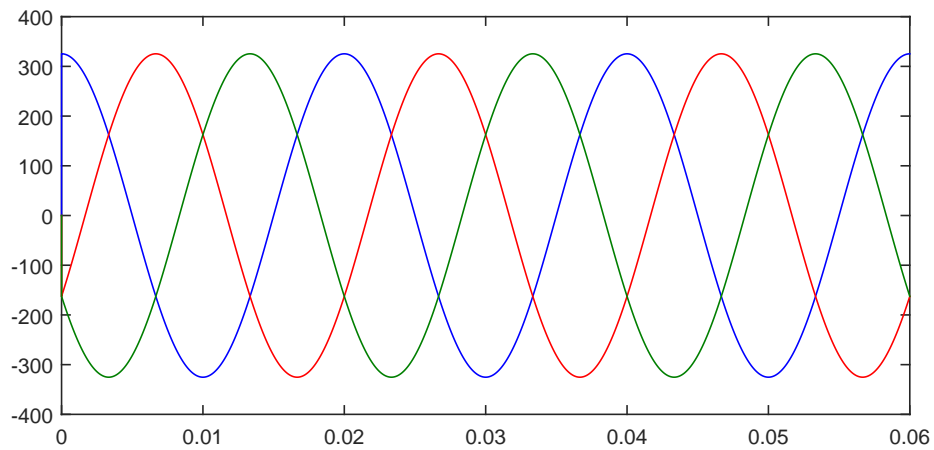


Figura 4.7: Tensione trifase simmetrica.

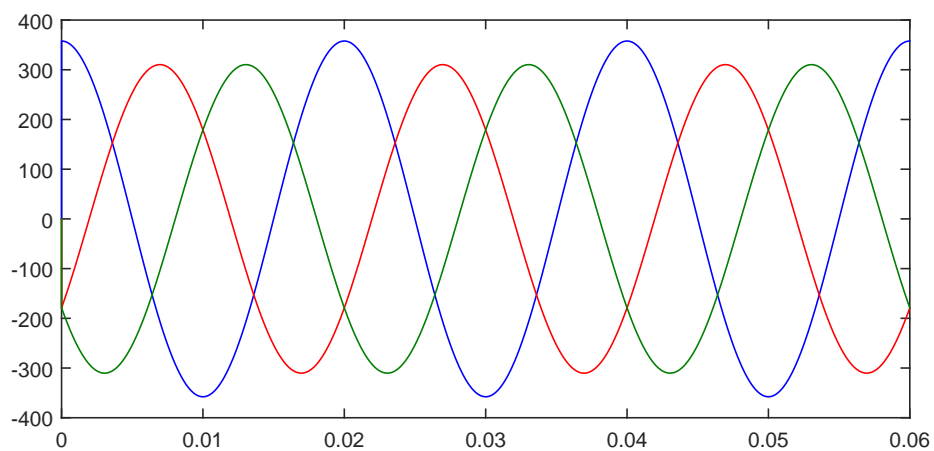


Figura 4.8: Tensione trifase con un 10% di terna inversa sovrapposta.

4.2.2 Modello di carico RL

La tensione in uscita dal modello del nodo di rete dipende non solo dalla tensione a monte del nodo ma anche dalla corrente erogata. È necessario quindi sviluppare il modello di un carico che, avendo in ingresso la tensione in uscita dal nodo, restituisca la corrente assorbita.

Si consideri un carico RL:

$$v = R_C i + L_C \frac{d}{dt} i; \quad (4.41)$$

Applicando la trasformata di Laplace se ne ricava la funzione di trasferimento:

$$V(s) = (R_C + sL_C)I(s); \quad (4.42)$$

quindi la corrente assorbita dal carico avrà espressione:

$$I(s) = \frac{V(s)}{R_C + sL_C} \quad (4.43)$$

e sarà la stessa corrente $I_{out}(s)$ da mandare in ingresso al modello del nodo (4.21).

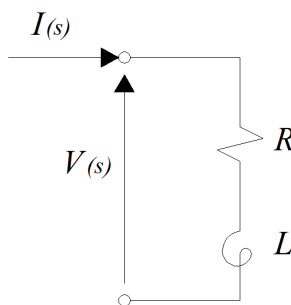


Figura 4.9: Circuito equivalente carico RL.

Ora si dispone di tutti gli elementi per poter fare le simulazioni in modo da validare il modello di nodo di rete elettrica.

4.2.3 Simulazioni di verifica

Le simulazioni di verifica verranno condotte in ambiente MATLAB/Simulink che consente di implementare, tramite schemi a blocchi, equazioni differenziali e funzioni di trasferimento e di risolverle nel dominio del tempo.

Prima di tutto bisogna implementare la funzione di trasferimento 4.21 che esprime il modello del nodo in modo che sia interpretabile dal programma. Viene implementata divisa in due parti, una relativa alla tensione a vuoto e una relativa alla corrente erogata dal nodo. All'interno dei blocchi denominati da "TF" viene inserita la relativa funzione di trasferimento che il programma provvederà ad analizzare.

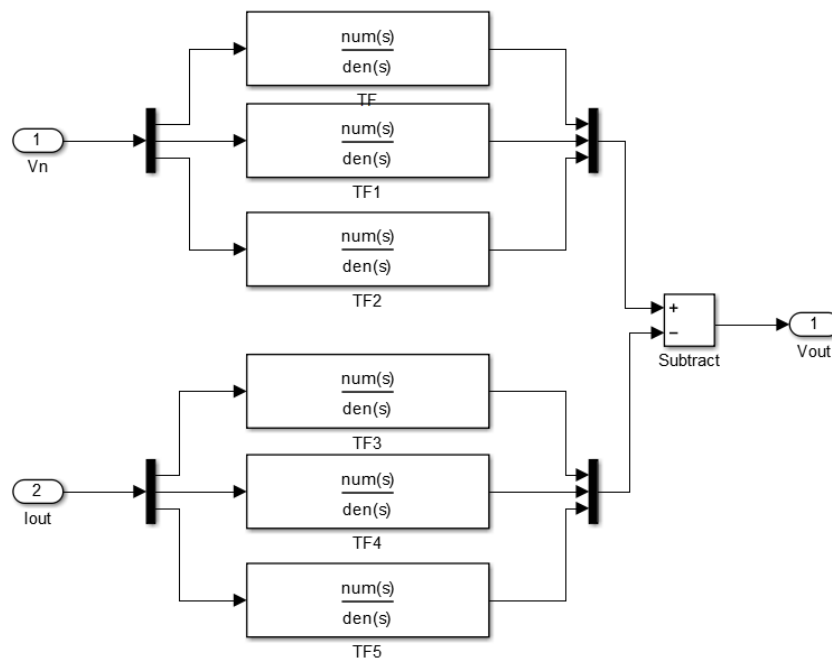


Figura 4.10: Schema a blocchi della funzione di trasferimento del nodo.

Ovviamente, essendo un sistema trifase, ogni blocco è ripetuto tre volte.

Dopodiché vengono implementate le tre terne, diretta, inversa e omopolare. Per realizzare una terna di tensioni trifase diretta si traducono in schemi a blocchi le equazioni 4.25,4.26,4.27:

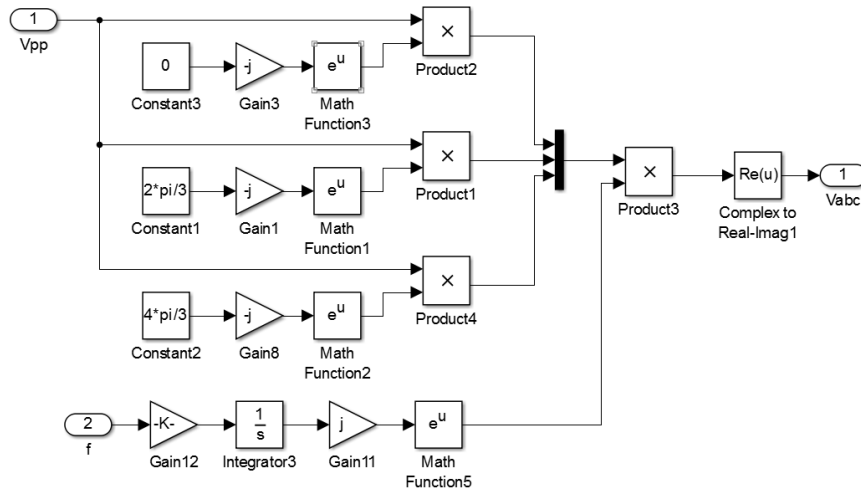


Figura 4.11: Schema a blocchi terna diretta.

Per la terna di tensioni trifase inversa si traducono in schemi a blocchi le equazioni 4.32,4.33,4.34:

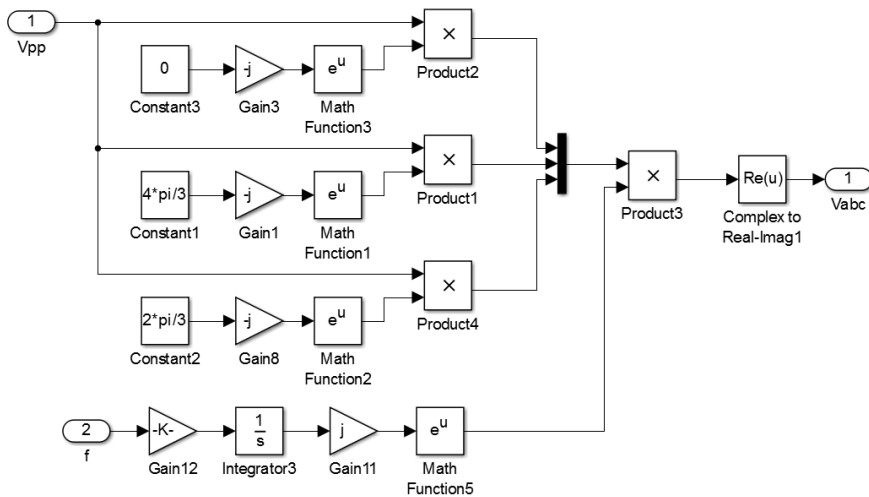


Figura 4.12: Schema a blocchi terna inversa.

e infine per la terna omopolare si usano le equazioni 4.38, 4.39 e 4.40:

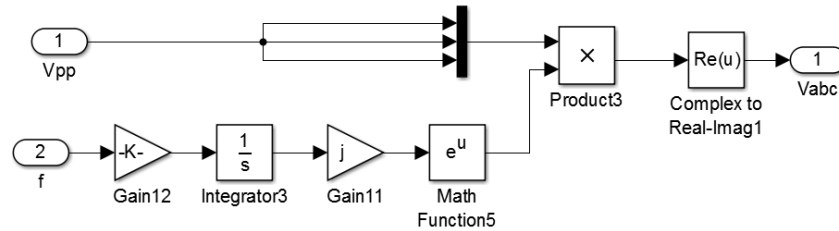


Figura 4.13: Schema a blocchi terna omopolare.

Il tutto viene riunito in un unico sistema che ricevendo in ingresso il valore efficace della tensione voluta, la frequenza e la corrente assorbita dal carico restituisce l'andamento della tensione ai capi del nodo e la corrente circolante in esso.

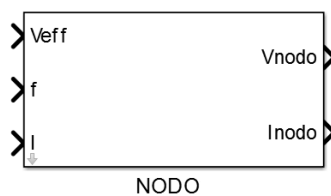


Figura 4.14: Blocco "Nodo di Rete".

Ultimo schema a blocchi da realizzare è quello del carico connesso al nodo utilizzando l'equazione 4.43:

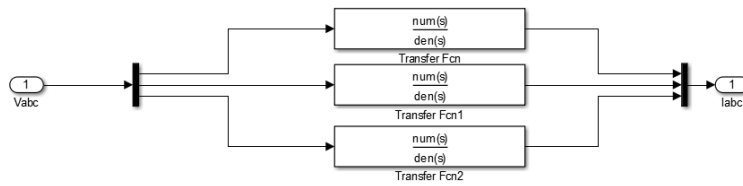


Figura 4.15: Schema a blocchi del carico.

Questi blocchi sono poi riuniti e collegati tra loro in modo da far coincidere gli ingressi in accordo con le loro equazioni costitutive.

La verifica del modello verrà fatta paragonando i risultati ottenuti con quelli

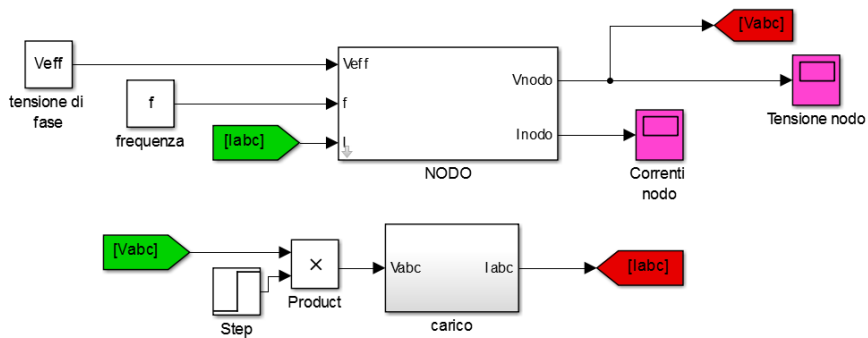


Figura 4.16: Schema a blocchi nodo di rete e carico.

forniti dai blocchi già presenti in Simulink.

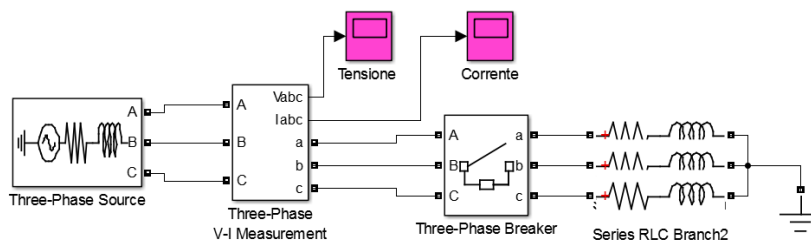


Figura 4.17: Nodo di rete realizzato con elementi Simulink.

4.2.4 Risultati

La verifica consiste nel simulare un'improvvisa inserzione di carico ai capi del nodo, e per apprezzarne bene gli effetti, il carico viene scelto in modo che abbia un elevato impatto sul nodo, cioè abbia una potenza quasi paragonabile a quella del nodo stesso.

La simulazione ha una durata di 200 ms e a metà avverrà l'inserzione del carico. I dati relativi al nodo e al carico sono i seguenti:

$$A_{cc} = 10 \text{ MVA}; \quad (4.44)$$

$$V_n = 15 \text{ 000V}; \quad (4.45)$$

$$R_C = 100 \Omega; \quad (4.46)$$

$$L_C = 10 \text{ mH}; \quad (4.47)$$

Il modello realizzato con i blocchi già presenti in Simulink restituisce l'andamento della tensione ai capi del nodo e della corrente erogata riportati nelle figure 4.18 4.19. Si può ben notare il transitorio di inserzione sia sulla tensione, di cui è apprezzabile la notevole diminuzione a causa delle cadute sull'impedenza di corto circuito, che sulla corrente dato dall'elevata potenza del carico connesso (circa 4 MVA rispetto ai 10 MVA di potenza di corto circuito del nodo).

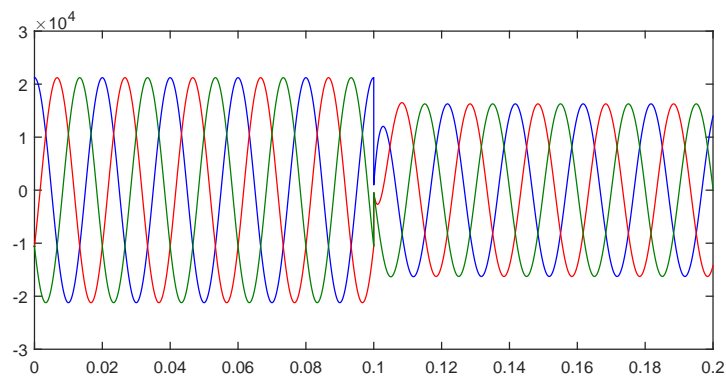


Figura 4.18: Tensione modello Simulink.

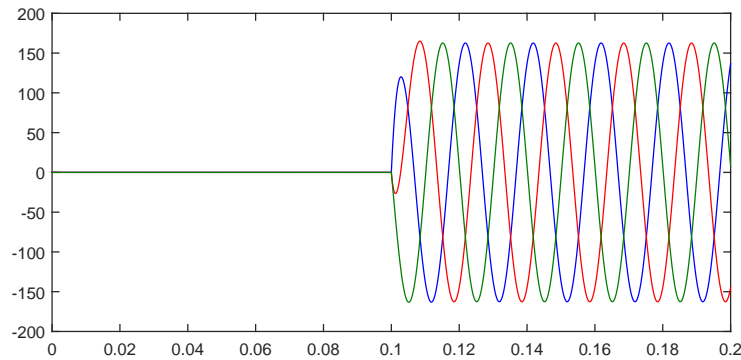


Figura 4.19: Corrente modello Simulink.

Si verifica ora che gli andamenti di tensione e corrente dati dai modelli di nodo e carico, sviluppati nei paragrafi precedenti, siano compatibili con quelli appena ottenuti.

Come si può vedere nelle figure 4.20 e 4.21, gli andamenti sono esattamente identici e se ne facessimo la sovrapposizione non si riuscirebbero a distinguere gli uni dagli altri.

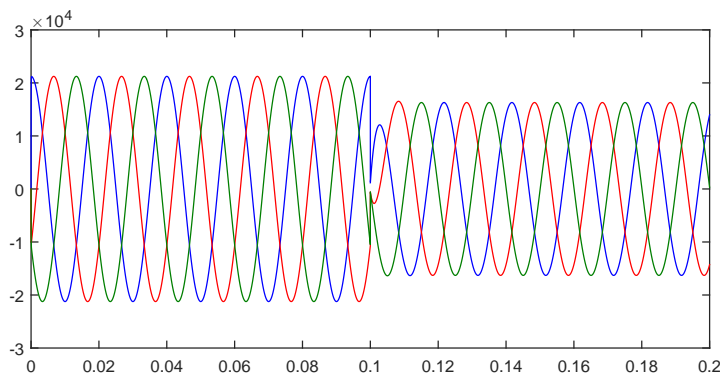


Figura 4.20: Tensione del nodo data dal modello 4.21.

Vista la perfetta congruenza tra gli andamenti di tensione e corrente con quelli dati dai modelli già presenti in ambiente Simulink, si può affermare che il modello sviluppato nei paragrafi precedenti è corretto e simula in maniera appropriata le dinamiche proprie di un nodo di rete. In più possiede l'importante caratteristica di non dover conoscere a priori le caratteristiche del carico ad esso connesso al contrario di quanto richiesto dai modelli usati come riferimento. Ciò permetterà al simulatore di rete elettrica che utilizzerà questo modello, per generare

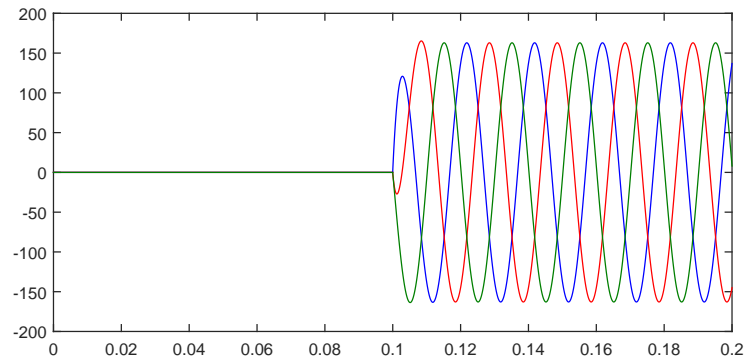


Figura 4.21: Corrente del nodo data dal modello 4.21.

una tensione ai suoi capi, di comportarsi esattamente come un nodo reale di rete elettrica generando le dovute cadute di tensione in funzione della potenza erogata.

4.3 Simulazione di guasti

Nella rete elettrica i guasti sono un evento relativamente frequente con elevate ripercussioni sia sui carichi che sugli altri nodi della rete stessa. Un guasto, ad esempio un corto circuito in un nodo, può provocare abbassamenti di tensione su tutti i nodi adiacenti a seconda dell'entità del guasto stesso.

Nella progettazione di un simulatore di rete per uso sperimentale, a meno di usare potenze elevate e infrastrutture complesse e costose, bisogna tener conto del fatto che esso non potrà erogare correnti importanti come sono quelle dovute ai corto circuiti, anche perché vi sono delle limitazioni intrinseche dovute all'elettronica di potenza dei convertitori.

Si può, però, dare al simulatore di rete la capacità di simulare le tensioni che si avrebbero ai capi di un nodo di rete elettrica se questo fosse interessato da un guasto. In questo modo il carico o generatore ad esso connesso risentirebbe di queste variazioni di tensione e si potrebbe testare la sua capacità di reagire ad un evento imprevisto.

4.3.1 Implementazione del guasto

Il tipo di guasto che il simulatore di rete sarà in grado di emulare è il guasto a terra cioè quando una o più fasi entrano in contatto, tramite un'impedenza di guasto, con il suolo creando un percorso per la corrente che si richiude nel terreno. Ciò provoca la circolazione di elevate correnti che possono essere dannose per tutti gli elementi presenti nelle vicinanze del guasto che devono essere adeguatamente protetti. Come ulteriore conseguenza di un guasto vi sono dei grandi abbassamenti di tensione nelle sue vicinanze.

Come visto nei paragrafi precedenti la realizzazione di abbassamenti di tensione e terne fortemente sbilanciate si può facilmente fare andando ad agire sul generatore di tensioni alternate trifase, ma si vuole dare al simulatore di rete la capacità di emulare le dinamiche di un corto circuito ai suoi capi e ricavare il valore la tensione in uscita in funzione della caduta di tensione sull'impedenza di corto circuito attraversata dalla corrente di guasto.

Per fare ciò, nell'istante di avvenimento del guasto, il modello del nodo di rete applica la sua tensione in uscita ai capi di una resistenza fittizia di guasto, di valore sufficientemente piccolo o al più nullo, calcolando una corrente di guasto virtuale, che non sarà realmente erogata, ma solamente utilizzata come parametro I_{out} nella funzione di trasferimento del nodo (4.21). In questo modo la tensione ai capi del nodo riceverà un brusco abbassamento e sarà proprio questa che il simulatore di rete elettrica erogherà ai suoi capi.

All'istante di estinzione del guasto, seguendo un transitorio, la tensione tornerà al suo valore corretto.

L'implementazione del guasto viene realizzata, tramite l'utilizzo di blocchi di switch, secondo lo schema presentato in figura 4.22, ovviamente ve ne sarà uno identico per ogni fase.

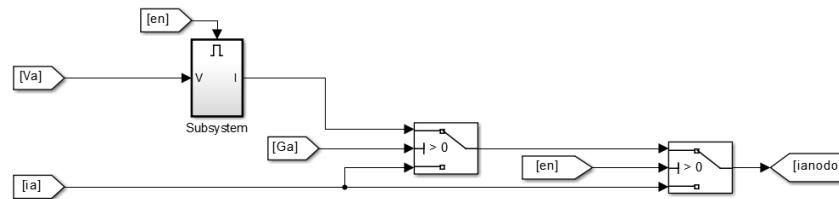


Figura 4.22: Schema a blocchi del guasto.

Lo schema possiede quattro tipi di ingressi diversi:

- la tensione di fase, in questo caso quella della fase A, Va ;
- la corrente di fase, ia ;
- un selettore della fase guasta, Ga ;
- due ingressi di *Enable* che si attivano negli istanti del guasto, En ;

Tramite un interfaccia è possibile indicare al modello gli istanti di avvenimento e di estinzione del corto circuito, indicare su quale fase simularlo e il valore della resistenza di guasto.

Durante la simulazione se non vi è alcun guasto lo schema ha come uscita la corrente circolante nella fase dovuta al carico. Negli istanti compresi tra l'avvenimento e l'estinzione del guasto, gli ingressi En si attivano e la corrente in uscita dallo schema non è più quella circolante nella fase, ma viene calcolata all'interno del blocco *Subsystem* dove si effettua il rapporto tra la tensione ai capi del nodo e la resistenza di guasto.

All'estinzione del guasto lo schema lascia passare ancora la corrente dovuta solamente al carico.

Nei grafici sottostanti sono raffigurati i risultati di una simulazione di un guasto tramite il modello di nodo di rete.

La simulazione presenta un nodo che sta alimentando un carico RL, nell'istante $t=495$ ms avviene un corto circuito a terra su tutte e tre le fasi con resistenza di guasto pari a $10\ \Omega$ il guasto viene estinto dopo 200ms.

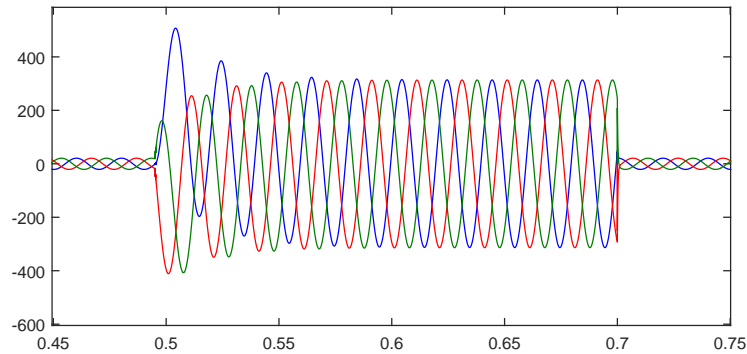


Figura 4.23: Corrente di guasto.

Come si può vedere nella figura 4.23 la corrente presenta un transitorio di guasto in cui si può notare la presenza di una componente aperiodica smorzata e una oscillante di regime esattamente come ci si aspettava. La cosa è meglio visibile in figura 4.24 dove è rappresentato l'andamento della corrente relativa a un'unica fase.

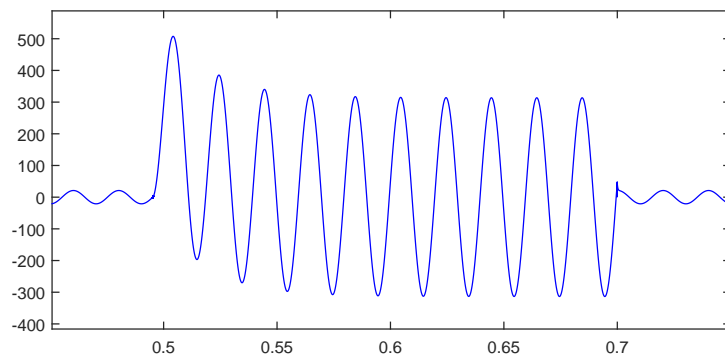


Figura 4.24: Corrente di guasto di un'unica fase.

Anche la tensione, che sarà poi la grandezza erogata dal simulatore di rete, ha l'andamento desiderato con un deciso abbassamento di tensione negli istanti del guasto per poi ritornare alle sue condizioni iniziali all'estinzione del corto circuito (fig.4.25).

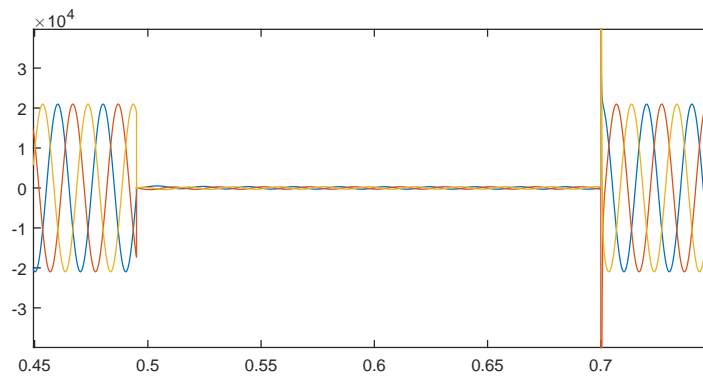


Figura 4.25: Tensione di guasto.

Il picco di tensione impulsivo visibile nel grafico nell'istante di estinzione del guasto è provocato dall'interruzione di un'elevata corrente di guasto principalmente induttiva e secondo la legge:

$$V_L = L \frac{di(t)}{dt}; \quad (4.48)$$

un'interruzione quasi istantanea di una corrente circolante in un'induttanza da origine ad un picco di tensione.

Possiamo però tranquillamente trascurare questo picco in quanto ha durata inferiore al millisecondo e quindi, una volta implementato il circuito reale, oltre ad avere ampiezze decisamente inferiori verrà totalmente assorbito dai filtri dei convertitori elettronici.

Quest'ultima simulazione ha dimostrato che il modello di nodo di rete elettrica sviluppato nei paragrafi precedenti, le cui dinamiche sono racchiuse nella funzione di trasferimento 4.21 si comporta correttamente in ogni situazione. Riesce infatti ad eseguire e realizzare in maniera adeguata le dinamiche proprie di un nodo di rete elettrica reale e il confronto con i modelli già presenti in ambiente Simulink lo ha dimostrato.

Il modello, dunque, può essere implementato in un convertitore elettronico per eseguire test e prove che riprodurranno effettivamente la situazione reale.

Capitolo 5

Analisi tipologie emulatore di rete

L'evoluzione degli ultimi anni ha portato le fonti energetiche rinnovabili a ricoprire un ruolo di prima importanza nel sistema elettrico nazionale e i loro effetti sulla rete non sono più trascurabili.

Volendo studiare quali sono le dinamiche di una turbina o parco eolico connesso alla rete elettrica in presenza di disturbi, disporre di un emulatore di rete che riproduca il comportamento della rete in funzione anche del tipo di carico ad esso connesso, permette di effettuare con facilità e accuratezza prove difficilmente realizzabili nella realtà.

Nel capitolo precedente è stato presentato e validato il modello che può emulare correttamente le dinamiche di un nodo di rete elettrica. Si può ora procedere con lo sviluppo del metodo di controllo di un convertitore elettronico che realizzerà le forme d'onda e stabilire quale sia la configurazione migliore per la realizzazione in laboratorio di un emulatore di rete.

5.1 Controllo del convertitore

Un convertitore elettronico, o *inverter*, è un apparecchio in grado, partendo da una tensione continua, di generare ai suoi morsetti una tensione alternata con forma d'onda e frequenza variabili a piacere nei limiti imposti dall'elettronica. Trattandosi di un emulatore di rete elettrica sarà necessario realizzare una terna

trifase di tensioni sinusoidali e controllarle in modo tale che si comportino come imposto dal modello di nodo di rete.

5.1.1 Principio di funzionamento di un convertitore

Lo schema di base di un convertitore elettronico è presentato in figura 5.1.

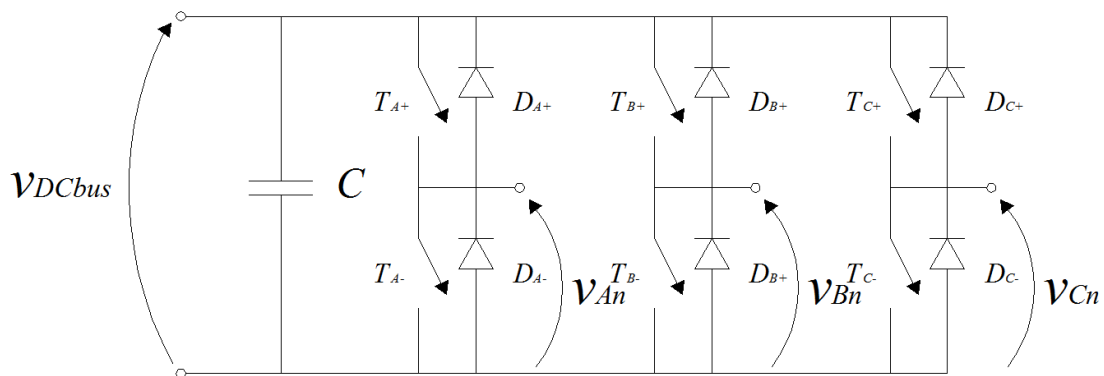


Figura 5.1: Schema convertitore elettronico.

Un DC bus fornisce una tensione continua e l'energia per alimentare il convertitore e il carico ad esso connesso, un condensatore C agisce da tampone mantenendo costante la tensione del DC bus in caso di grandi assorbimenti di energia, infine vi sono tre elementi detti *gambe*, uno per fase, costituiti da:

- due valvole controllate sia in apertura che in chiusura T_+ e T_- , MOSFET o IGBT a seconda del livello di tensione, che permettono di applicare una tensione variabile sul carico;
- due diodi di ricircolo, D_+ e D_- , che evitano sovratensioni dannose per le valvole nel caso di interruzione di correnti induttive;

Quando la valvola superiore entra in conduzione, il morsetto della gamba corrispondente, collegato al carico, si porta ad una tensione pari a quella del DC bus e quando è quella inferiore a entrare in conduzione la tensione del morsetto

si porta al valore zero.

Le valvole di una gamba operano sempre l'una opposta all'altra, cioè se una è chiusa l'altra deve essere aperta altrimenti causerebbero un corto circuito.

È possibile sfruttare le caratteristiche di funzionamenti di questo sistema per generare una tensione alternata partendo da una tensione continua e un metodo per far ciò è chiamato *Sottooscillazione sinusoidale*.

Si considerino tre sinusoidi, una per fase, di ampiezza unitaria e sfasate di 120° l'una dall'altra denominate *modulanti* e un'onda triangolare detta *portante* con frequenza molto maggiore a quella delle prime tre onde.

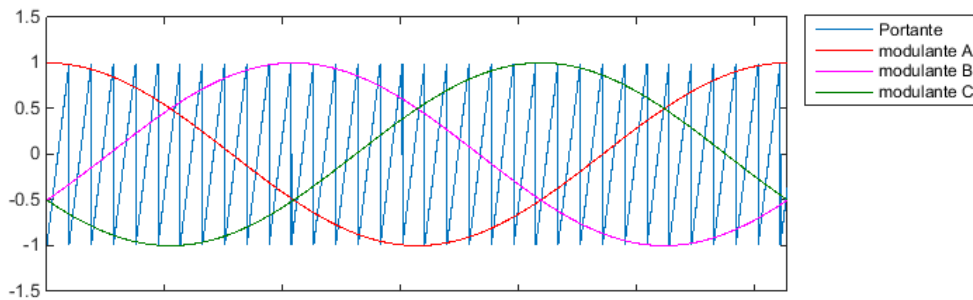


Figura 5.2: Onda portante e modulanti sinusoidali.

Ogni modulante controlla una gamba del convertitore facendo chiudere la valvola superiore, e chiudere l'inferiore, quando è maggiore dell'onda portante, e facendo chiudere l'inferiore e aprire la superiore quando è minore. In questo modo la tensione sui morsetti V_{AN} , V_{BN} e V_{CN} rispetto al conduttore (-) del DC bus ha l'andamento riportato in figura 5.3.

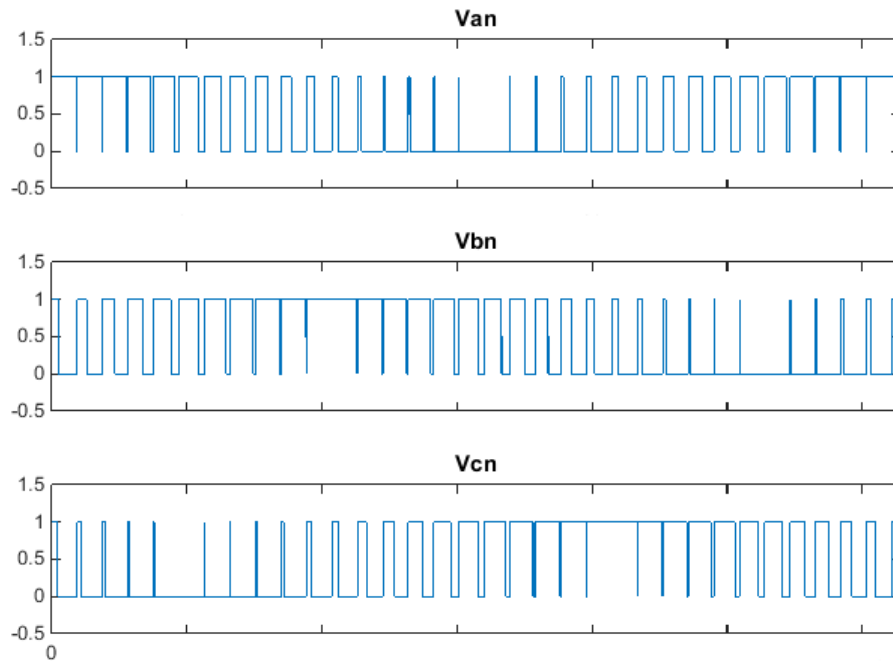


Figura 5.3: Tensioni V_{AN} , V_{BN} e V_{CN} .

Non sono tensioni alternate, ma definendo la tensione tra due morsetti consecutivi come:

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}; \quad (5.1)$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}; \quad (5.2)$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}; \quad (5.3)$$

si può vedere come questa oscilla tra valori positivi e negativi e la sua armonica fondamentale è proprio una sinusoide di frequenza pari a quella della modulate corrispondente.

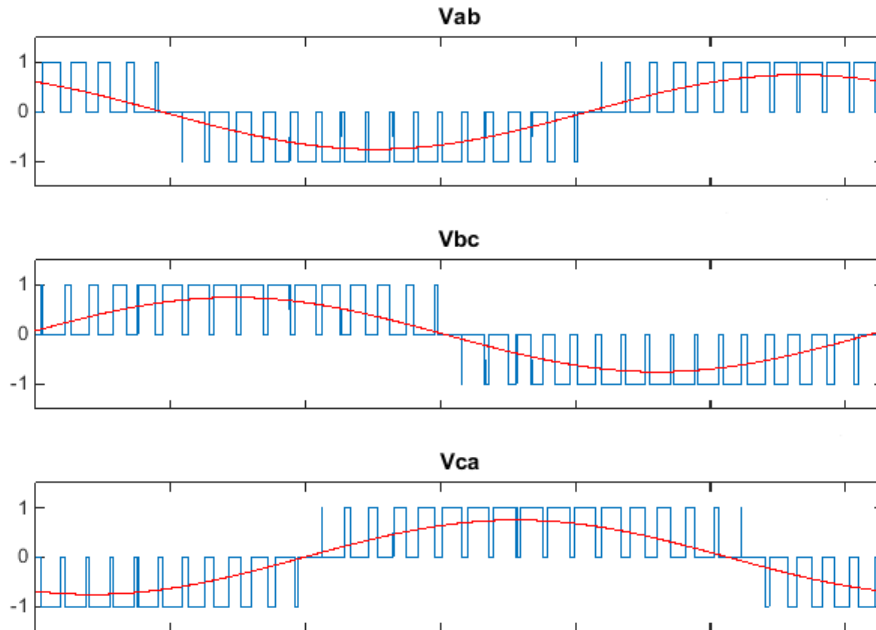


Figura 5.4: Tensioni V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} .

Quindi agendo su ampiezza e frequenza della modulante è possibile generare la tensione alternata voluta.

La risultante, però, non è una sinusoide pura ma possiede un elevato contenuto armonico, perciò è necessario porre un filtro in uscita ai morsetti del convertitore, prima del carico, per ottenere una forma d'onda più pulita.

5.1.2 Filtro LC

Come visto nel paragrafo precedente la tensione in uscita ai morsetti di un convertitore necessita di un filtro che assorba le armoniche di ordine più elevato in modo che la tensione in uscita sia la più fedele possibile al riferimento.

Il filtro scelto per la realizzazione di un emulatore di rete elettrica è un filtro LC con un'induttanza L_f in serie al carico e una capacità C_f in parallelo verso

terra. In figura 5.5 è riportato, per semplicità, l'equivalente monofase.

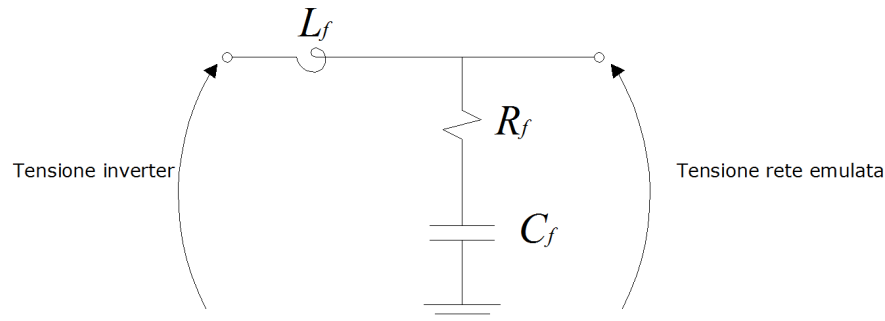


Figura 5.5: Circuito equivalente monofase filtro LC.

La scelta è ricaduta su questa tipologia perché lo scopo dell'emulatore di rete elettrica è quello di generare una tensione ai suoi capi compatibile con quella della rete e avere un condensatore come elemento finale permette di farlo con pochi problemi.

La scelta dei valori di induttanza e capacità da inserire nel filtro non è semplice e anche gli articoli presenti in letteratura danno indicazioni spesso contrastanti.

Sono state utilizzate, quindi, le formule presentate da A. Julean in [26] per ricavarne dei valori di partenza che, tramite l'utilizzo di diagrammi di Bode sono stati poi affinati per ottenere le caratteristiche volute.

Il convertitore che verrà utilizzato avrà una potenza P_n di circa 500 W, tensione del DC bus V_{DCbus} di 48 V e frequenza di switching f_s di 10 kHz.

Data una tensione di 48 V sul DC bus il valore efficace massimo di una sinusoide dato da questo convertitore sarà:

$$V_n = \frac{V_{DCbus}}{2\sqrt{2}} = 16.97 \text{ V}; \quad (5.4)$$

Viene definita un'impedenza di base:

$$Z_b = \frac{V_n^2}{P_n} = 0.576 \text{ } \Omega; \quad (5.5)$$

quindi la capacità del filtro:

$$C_f = \frac{0.05}{Z_b 2\pi f_s} = 1.38 \cdot 10^{-6} F; \quad (5.6)$$

L'induttanza del filtro è calcolata imponendo la massima oscillazione ammissibile di corrente:

$$\Delta I_{max} = \frac{1}{2\pi f_s L_f} = 0.01; \rightarrow L_f = 1,59mH; \quad (5.7)$$

Partendo da questi valori, con ripetute prove e aggiungendo una resistenza di *damping* R_f in serie al condensatore C_f , sono stati ottenuti i seguenti valori:

$$L_f = 1.5mH; \quad (5.8)$$

$$C_f = 70 \cdot 10^{-6} F; \quad (5.9)$$

$$R_f = 1.5\Omega; \quad (5.10)$$

e le caratteristiche del filtro sono quindi riassunte nel diagramma di Bode di figura 5.6 in cui si può vedere come l'attenuazione alla frequenza di switching sia di quasi $-48dB$, quindi le armoniche dovute alla commutazione delle valvole del convertitore saranno ben assorbite dal filtro e poco presenti nella tensione di uscita.

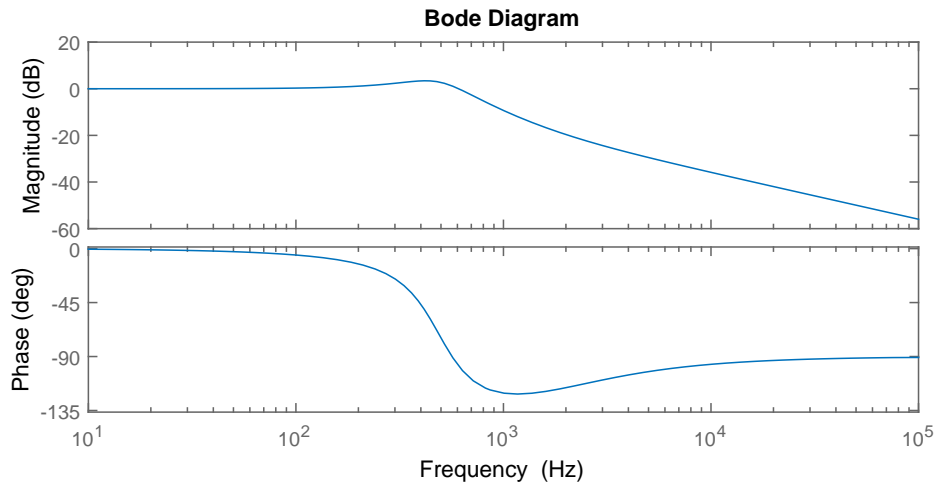


Figura 5.6: Diagrammi di Bode filtro LC.

5.1.3 Metodo di controllo

Il controllo del convertitore, per far sì che generi ai capi del filtro una tensione il più possibile uguale al riferimento dato dal modello, viene fatto utilizzando dei regolatori Proporzionale Integrale (PI) utilizzandone uno per ogni componente della tensione (diretta, quadratura e omopolare, vedi appendice C) in modo che avendo come riferimento una costante vadano facilmente a regime.

Il regolatore PI viene realizzato in questo modo:

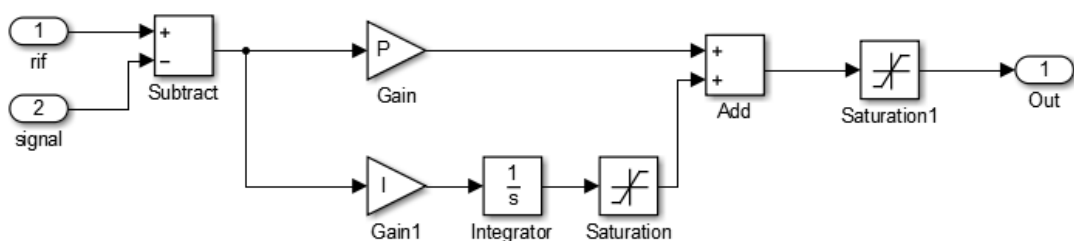


Figura 5.7: Regolatore Proporzionale Integrale.

Il segnale di riferimento viene confrontato con la grandezza in uscita, si ottiene il valore di un errore che, dopo essere stato moltiplicato per un parametro proporzionale (P) e integrato con un guadagno (I), diventa il segnale di controllo

per il convertitore che riuscirà a seguire fedelmente il riferimento.

La difficoltà nella realizzazione di un controllo proporzionale integrale risiede nella scelta dei migliori parametri P e I.

MATLAB dispone di un applicativo, "PIDtool", che consente di calcolare i valori di P e I conoscendo la funzione di trasferimento del sistema da controllare e la banda passante del regolatore.

L'emulatore di rete deve generare ai morsetti in uscita del filtro una tensione il più possibile fedele a quella di riferimento data dal modello di nodo di rete, quindi il sistema di cui bisogna conoscere la funzione di trasferimento è il filtro.

$$H_{LC}(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{sR_f C_f + 1}{s^2 L_f C_f + sC_f R_f + 1}; \quad (5.11)$$

Con banda passante si intende la massima dinamica che può avere il regolatore e, per essere sicuri di riuscire a realizzarla, la si impone una decade inferiore alla massima pulsazione di campionamento del sistema.

Si suppone che il sistema abbia una frequenza di campionamento f_s pari a $100kHz$ quindi la banda passante:

$$\omega_t = \frac{2\pi f_s}{10} = 62\,800\,rad/s; \quad (5.12)$$

Inserendo banda passante e funzione di trasferimento si ottengono, dall'applicativo di MATLAB, i seguenti valori:

$$P = 39,41; \quad (5.13)$$

$$I = 41\,400; \quad (5.14)$$

che consentono di seguire il riferimento in modo ottimale.

5.2 Configurazione ideale emulatore di rete

Ora che si dispone di tutti gli elementi per poter controllare correttamente un convertitore in modo che generi una tensione trifase sinusoidale ai capi del filtro, è possibile studiare quale configurazione sia la migliore per realizzare un emulatore di rete basato su convertitori elettronici.

Il compito di un emulatore di rete è quello di generare una tensione tale per cui gli elementi in prova a esso connessi non riescano a distinguerne la differenza rispetto alla tensione del sistema elettrico reale.

La scelta della configurazione migliore sarà, quindi, fatta valutando la qualità della tensione in termini di assenza di disturbi armonici e di rumore, ma valutando anche semplicità e versatilità delle versioni proposte.

Nell'ambito delle seguenti simulazioni non è stata considerata la realizzazione del DC bus alimentante i convertitori, non essendo argomento di tesi è stato schematizzato come un generatore ideale di tensione.

5.2.1 Emulatore di rete con convertitore singolo

La prima configurazione proposta, per la realizzazione in laboratorio di un emulatore di rete, è costituita da un unico convertitore elettronico, che realizza le dinamiche, seguito da un filtro LC, connesso al sistema in prova (fig. 5.8).

Utilizzando l'ambiente di simulazione Simulink, verifichiamo le caratteristiche della tensione generata dal convertitore e che nell'istante di inserzione del carico esso realizzi le dinamiche dettate dal modello di nodo di rete elettrica sviluppato nel capitolo 4.

La simulazione della durata di 200 ms prevede la realizzazione di una tensione a vuoto per la prima metà del tempo e l'inserzione di un carico di potenza considerevole (400VA) rispetto a quella del convertitore (500 W) dopo 100 ms dall'inizio.

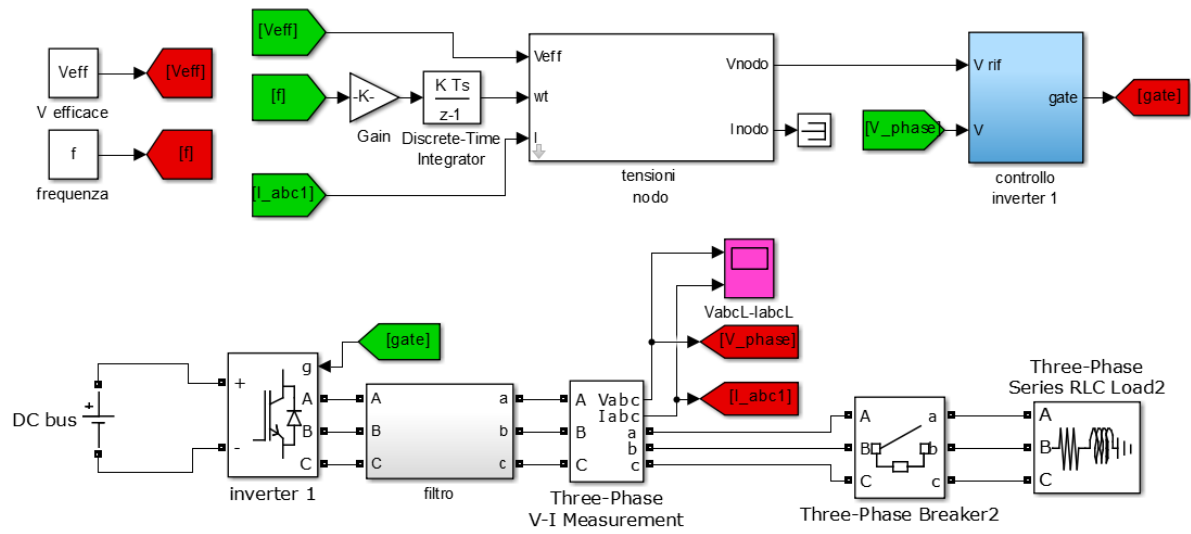


Figura 5.8: Emulatore di rete con singolo convertitore.

L'andamento della tensione in uscita dall'emulatore di rete è riportato in figura 5.9 dove si può notare come il controllo dato dal modello 4.21 agisca per realizzare le dinamiche di un nodo di rete elettrica.

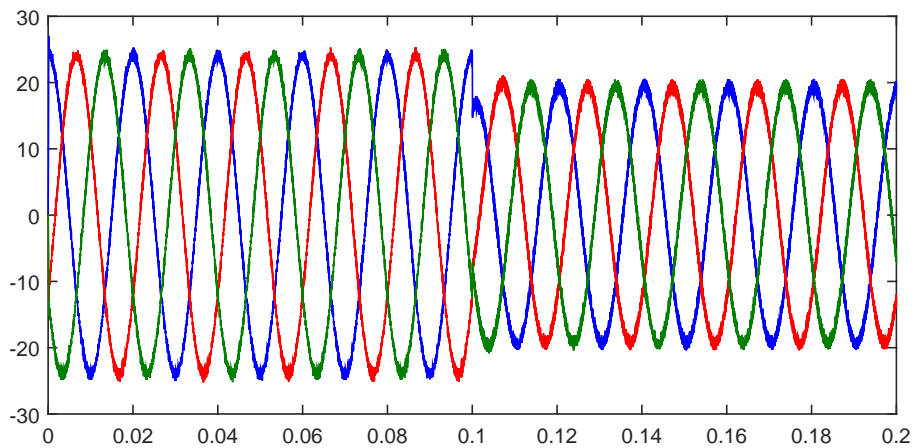


Figura 5.9: Tensione generata dall'emulatore di rete con singolo convertitore.

Per verificare che l'andamento della tensione generata dall'emulatore sia esattamente uguale a quello calcolato dal modello in condizioni ideali, cioè senza la presenza di filtri e convertitori elettronici che possono creare qualche disturbo, in figura 5.10 se ne fa il confronto osservando la tensione di un'unica fase negli istanti precedenti e successivi all'inserzione del carico:

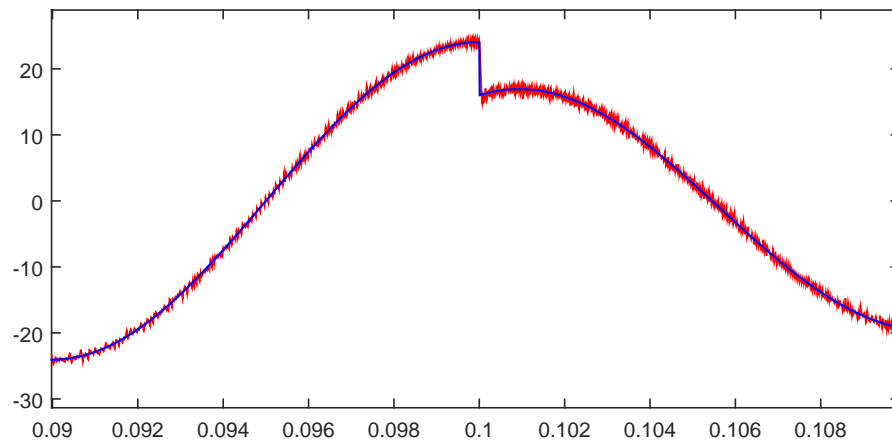


Figura 5.10: Confronto tensione convertitore e tensione modello.

Come si può notare l'andamento della tensione generata dal convertitore (in rosso) è, ad esclusione di un po' di rumore sovrapposto dato dal convertitore, totalmente identico a quello dato dal modello in condizioni ideali (in blu). Ciò conferma ancora una volta la bontà del modello di nodo di rete sviluppato nei capitoli precedenti e la sua capacità di lavorare bene anche in presenza di convertitori elettronici e filtri che possono generare disturbi.

La corrente assorbita dal carico invece è rappresentata in figura 5.11.

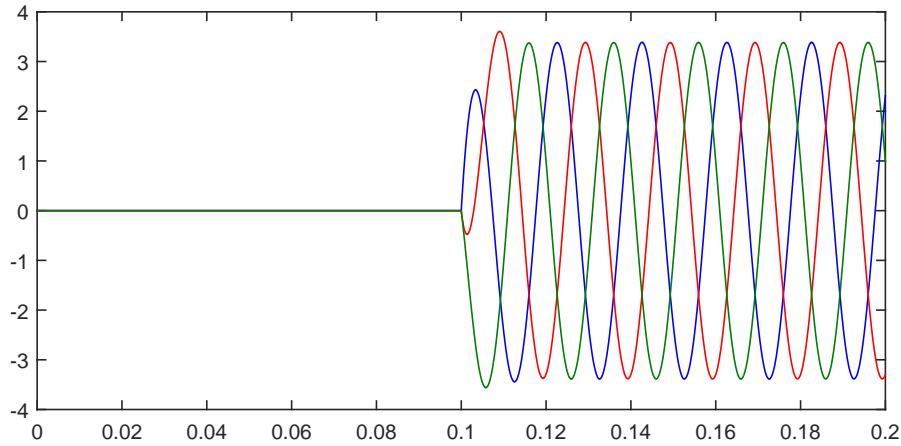


Figura 5.11: Corrente assorbita dal carico.

Per verificare la bontà della tensione generata dal convertitore ne viene effettuata l'analisi armonica in modo da valutare il peso delle componenti armoniche presenti e il THD (Total Harmonic Distortion) totale.

IL calcolo viene effettuato sia per la tensione a vuoto, cioè senza carichi connessi, sia per la tensione in seguito all'inserzione del carico considerando fino alla 40-esima armonica come indicato dalle norme.

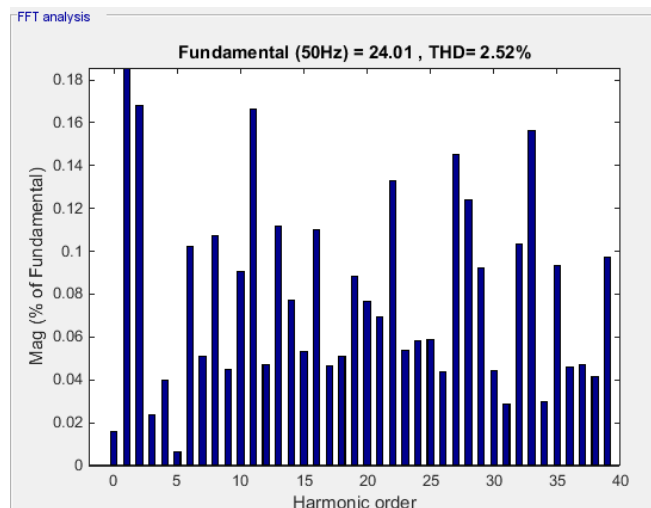


Figura 5.12: Componenti armoniche tensione a vuoto.

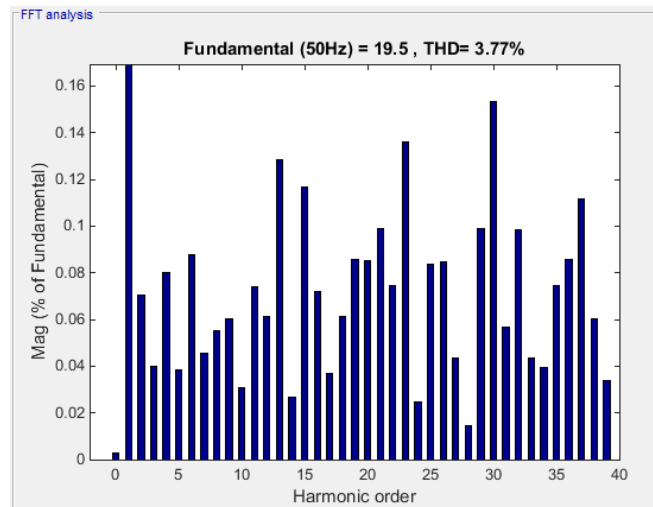


Figura 5.13: Componenti armoniche tensione a carico.

Come indicato nelle figure 5.12 e 5.13, il THD a vuoto è pari al 2.52% e a carico vale 3.77%. In entrambi in casi esso è inferiore al limite dell'8% imposto dalla norma CEI 50160, quindi la tensione generata dal convertitore ben approssima la tensione reale di una rete elettrica.

5.2.2 Emulatore di rete con convertitori multipli

La seconda tipologia proposta è un iniziale approccio alla realizzazione di un emulatore di rete basato su convertitori elettronici simile a quello presentato negli articoli [15][16][17][18]e[19]. È costituito da due convertitori elettronici controllati indipendentemente che emulano le dinamiche di due nodi rete, collegati da una linea trifase a cui è connesso un carico. Il tutto per cercare di emulare la rete di figura 5.14 applicando anche la riduzione in scala dei parametri utilizzando il metodo presentato nel capitolo 3.

I generatori $G1$ e $G2$ rappresentano due nodi di rete con pari potenza di corto circuito $50MVA$ e tensione nominale di $15kV$ (tensione di fase), i valori di induttanza e resistenza chilometriche delle linee sono stati utilizzati quelli già definiti nei modelli di linea presenti in ambiente Simulink:

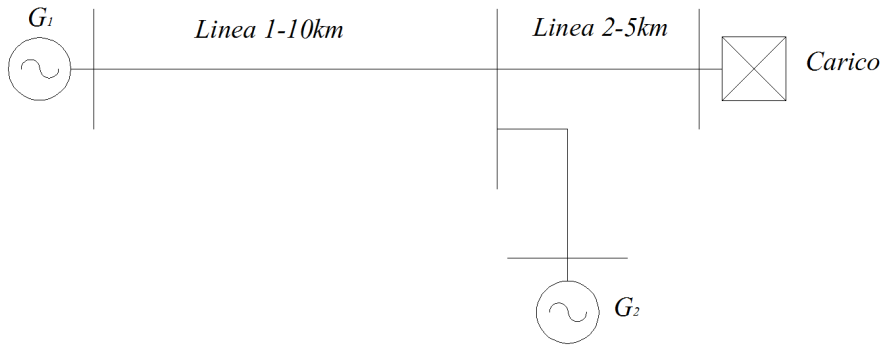


Figura 5.14: Rete di riferimento.

$$R = 0.01273 \Omega/km; \quad (5.15)$$

$$L = 0.97377 \text{ mH}/km; \quad (5.16)$$

e moltiplicandoli per le lunghezze delle linee:

$$R_{linea1} = 0.1273 \Omega; \quad (5.17)$$

$$L_{linea1} = 9.737 \cdot 10^{-3} \text{ Henry} \rightarrow X_{linea1} = 3.0589 \Omega; \quad (5.18)$$

$$R_{linea2} = 0.0635 \Omega; \quad (5.19)$$

$$L_{linea2} = 4.8685 \cdot 10^{-3} \text{ Henry} \rightarrow X_{linea2} = 1.529 \Omega; \quad (5.20)$$

Utilizzando come potenza di base quella di corto circuito dei nodi, la potenza base risulta:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{A_{base}} = \frac{15\,000^2}{50 \cdot 10^6} = 4.5 \Omega; \quad (5.21)$$

quindi i valori relativi dei parametri di linea risultano:

$$r_{linea1pu} = 0.0283; \quad (5.22)$$

$$x_{linea1pu} = 0.67975; \quad (5.23)$$

$$r_{linea2pu} = 0.014144; \quad (5.24)$$

$$x_{linea2pu} = 0.3399; \quad (5.25)$$

Riducendo in scala utilizzando un sistema con $A_{base} = 500 W$ e valore efficace della tensione di fase pari a 17 V, si ottengono i valori del corrispondente sistema scalato:

$$Z_{base}' = \frac{V_{base}^2}{A_{base}} = \frac{17^2}{500} = 0.578 \Omega; \quad (5.26)$$

$$R_{linea1}' = 0.01636 \Omega; \quad (5.27)$$

$$X_{linea1}' = 0.3929 \Omega \rightarrow L_{linea1}' = 1.251 \cdot 10^{-3} \text{ Henry} \quad (5.28)$$

$$R_{linea2}' = 8.175 \cdot 10^{-3} \Omega; \quad (5.29)$$

$$X_{linea2}' = 0.1964 \Omega \rightarrow L_{linea1}' = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ Henry} \quad (5.30)$$

$$(5.31)$$

Utilizzando questi parametri si realizza un emulatore di rete secondo lo schema presentato in figura 5.15 e ne vengono testate le sue prestazioni tramite una simulazione in ambiente Simulink. Ovviamente i due convertitori hanno due controlli indipendenti.

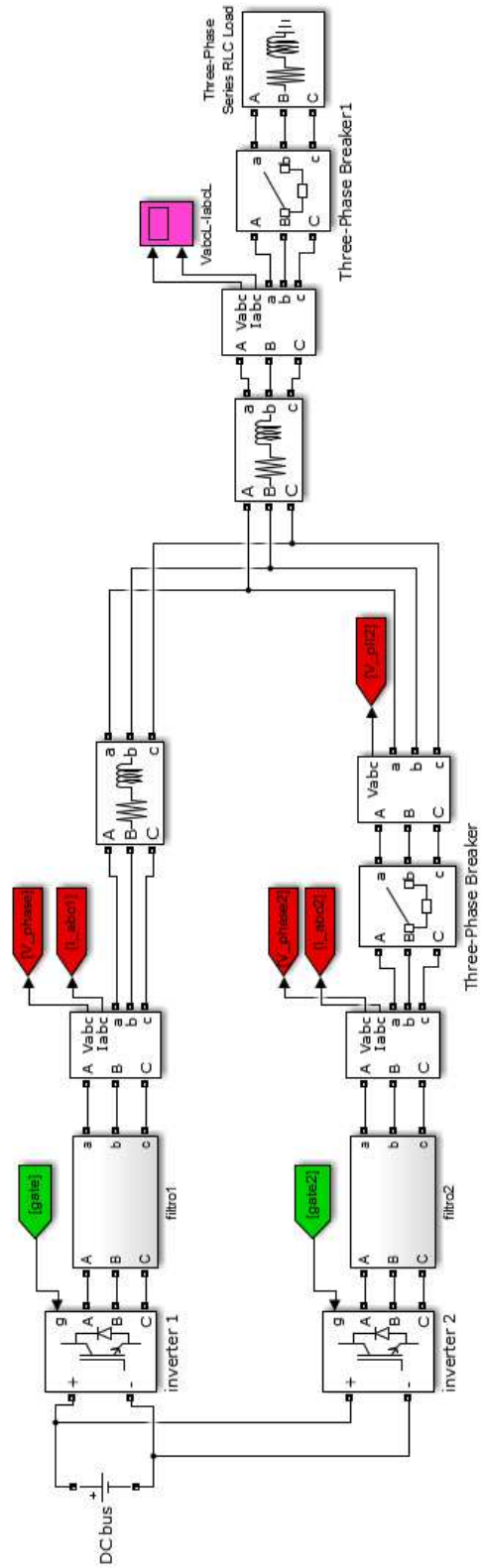


Figura 5.15: Emulatore di rete con più convertitori.

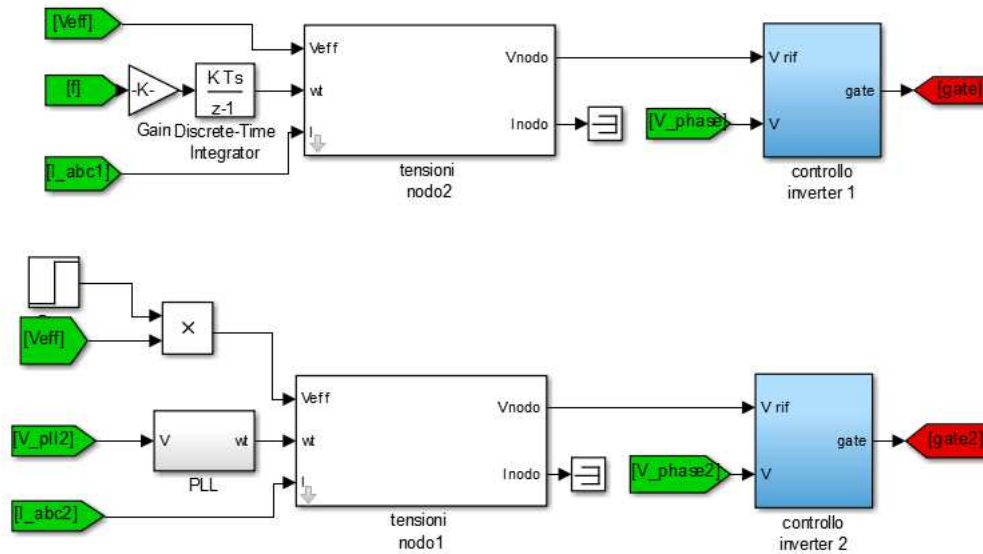


Figura 5.16: Controllo convertitori.

Per realizzare correttamente questo sistema, però, è necessario sincronizzare i due convertitori in modo che possano connettersi in parallelo senza problemi. Durante la simulazione il convertitore numero uno (inverter1 nello schema) alimenta per primo la rete mentre il secondo convertitore (inverter2 nello schema) e il carico non sono connessi alla rete. Dopodiché il secondo convertitore si sincronizza e insieme alimentano la rete.

Per poter sincronizzare tra loro due convertitori si utilizza un metodo denominato Phase Locked Loop o PLL.

L'implementazione di un PLL viene fatta applicando la trasformata di Park (vedi appendice C) alla terna di tensioni generate dal primo convertitore. Un regolatore PI agisce in modo da annullare la componente in quadratura generando un segnale (dimensionalmente una frequenza) che una volta integrato diventerà l'angolo θ con cui effettuare la trasformata di Park iniziale. Non solo, questo angolo sarà anche quello con cui il generatore di tensioni trifase, del modello di nodo di rete, genererà la terna per il controllo del secondo convertitore che risulterà a questo punto sincronizzato con il primo.

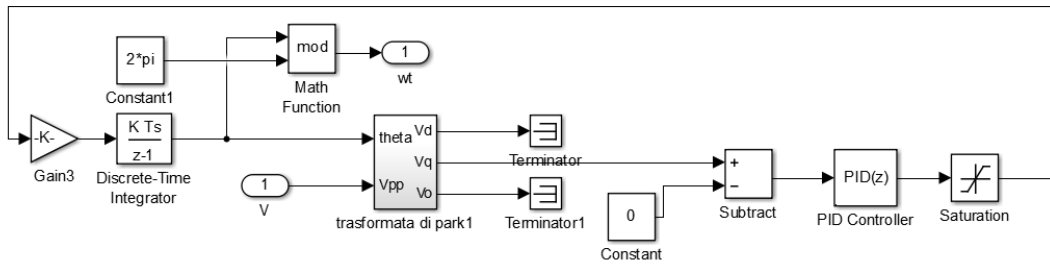


Figura 5.17: Phase Locked Loop.

La simulazione di questo emulatore di rete ha durata di 200ms, dopo 30 ms il secondo inverter si sincronizza con il primo e 20 ms più tardi si connette in parallelo alla rete. Dopo 100 ms dall'inizio della simulazione avviene l'inserzione del carico.

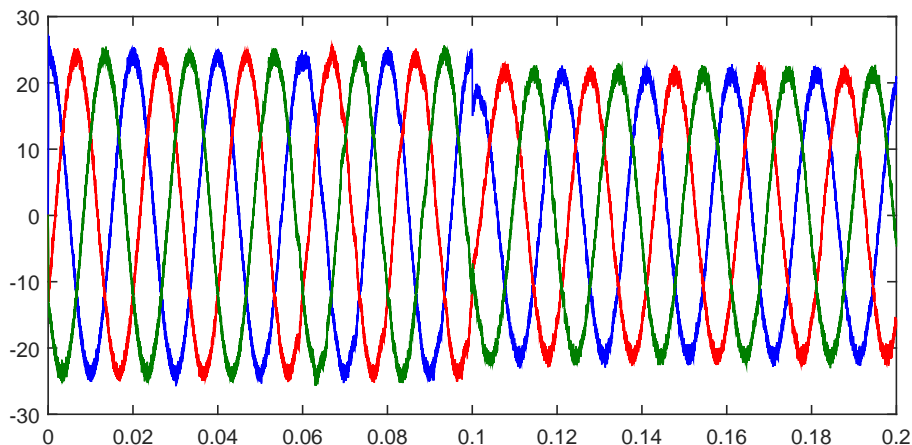


Figura 5.18: Tensione sul carico.

In figura 5.18 è possibile vedere l'andamento delle tensioni sul carico, si può notare il calo di tensione dovuto all'inserzione del carico in accordo con il modello ma si nota subito come le tensioni siano più distorte rispetto al caso precedente. Ciò è dovuto al fatto che quando il secondo convertitore si connette in parallelo al primo vi è uno scambio di correnti fortemente distorte tra i due convertitori.

Si può notare in figura 5.19, la sincronizzazione del secondo convertitore con il primo e in figura 5.20 si nota una fase tra le due tensioni dovuta alle cadute sulle linee, una volta inserito il carico.

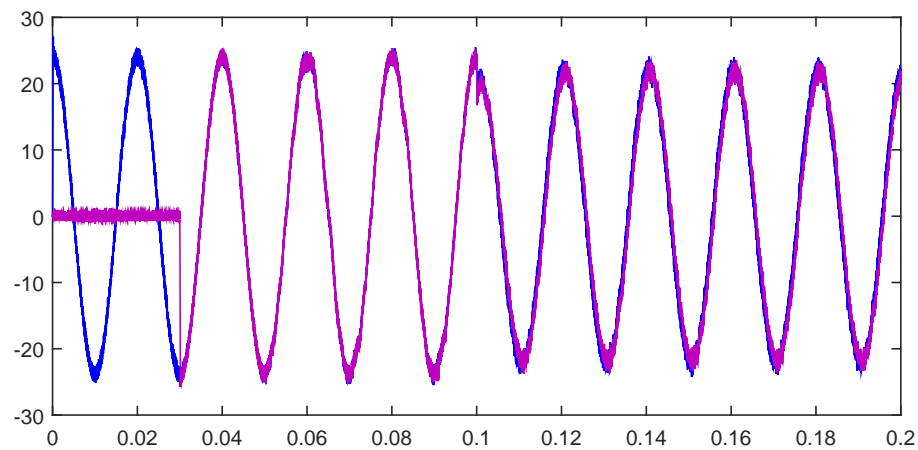


Figura 5.19: Sincronizzazione.

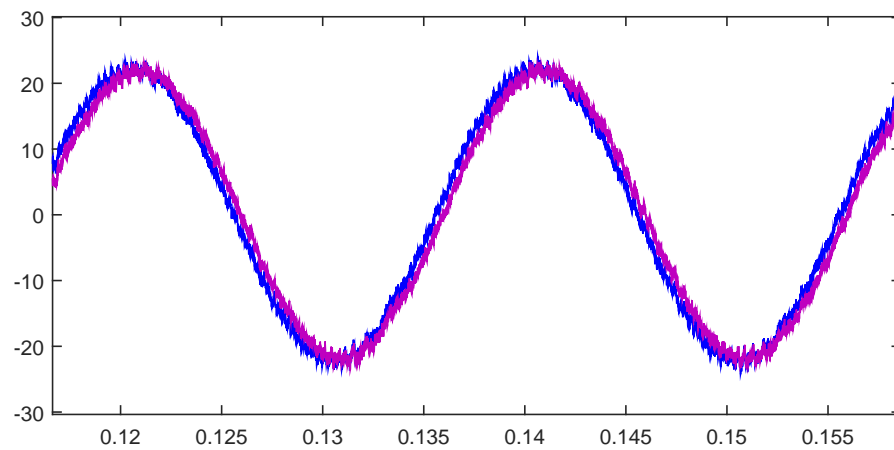


Figura 5.20: Fase tra le tensioni dei convertitori.

La corrente assorbita dal carico è rappresentata in figura 5.21:

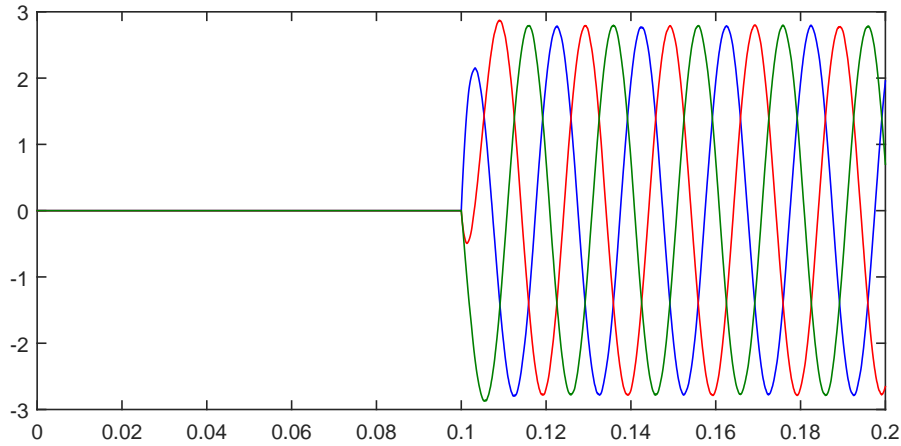


Figura 5.21: Corrente assorbita dal carico.

L'analisi armonica della tensione generata sul carico da parte dell'emulatore di rete rivela un innalzamento del THD sia vuoto 4.93%(fig. 5.22) che sotto carico 4.57%(fig. 5.23) dovuto allo scambio di correnti tra i convertitori.

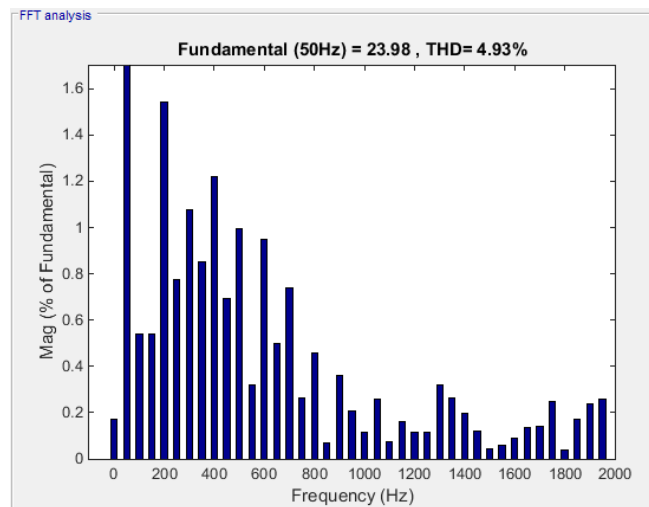


Figura 5.22: Componenti armoniche tensione a vuoto.

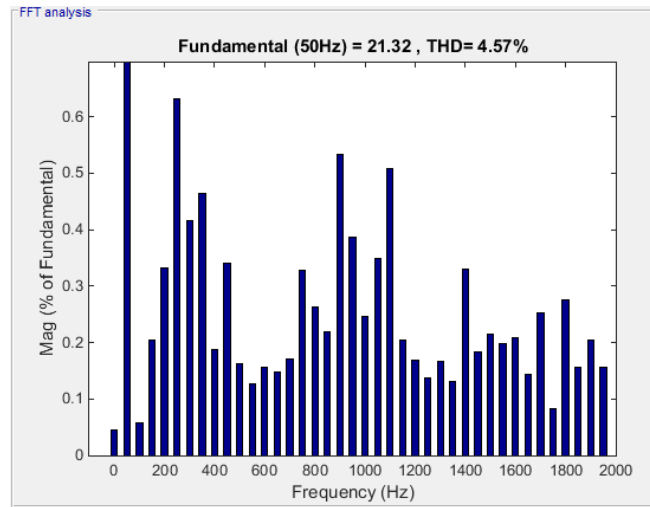


Figura 5.23: Componenti armoniche tensione a carico.

In conclusione si può affermare che la soluzione migliore per realizzare un emulatore di rete è quella che prevede l'utilizzo di un unico convertitore elettronico.

Infatti richiede un minor numero di componenti (un solo convertitore, un solo filtro e un solo strumento per la misura di tensione e corrente), la qualità della forma d'onda generata è più elevata rispetto al caso con più convertitori e il controllo risulta più semplificato dato che non è necessario fare alcuna sincronizzazione.

Inoltre, la realizzazione di linee che collegano più convertitori, riduce molto la versatilità e la flessibilità dell'emulatore di rete, senza contare che i valori, ottenuti dalla riduzione in scala dei parametri, sono molto piccoli e di difficile realizzazione fisica. L'uso di un solo convertitore ha il vantaggio di poter inserire questi valori nel modello di controllo e quindi tenerne conto ai fini della realizzazione delle dinamiche.

Capitolo 6

Attività sperimentale

Nell'ambito di questa tesi è stato possibile svolgere una, seppur breve, attività sperimentale che ha permesso di valutare la realizzabilità di un emulatore di rete. Lo scopo era verificare che il modello di nodo di rete funzionasse una volta implementato in un convertitore elettronico.

È stata scelta una scheda programmabile di prototipazione Microchip, che permettesse di generare una tensione alternata trifase e si è verificata la sua capacità di gestire un programma contenente il modello di nodo di rete elettrica.

6.1 Scheda di sviluppo dsPICDEM MCLV-2

La verifica della realizzabilità dell'emulatore di rete costituito da un unico convertitore elettronico è stata effettuata utilizzando la scheda dsPICDEM MCLV-2.

La scelta di questa scheda è stata dettata dalla sua facilità di programmazione attraverso l'uso di Simulink e Mplab, possiede già al suo interno un convertitore elettronico che può generare tensioni alternate trifase, ha la capacità di misurare la corrente erogata e permette di sviluppare soluzioni *Stand-Alone* cioè che non necessitano della supervisione da parte di un PC o calcolatore superiore, ma possono lavorare in completa autonomia.

Può erogare fino a 700 W di potenza ed è alimentata tramite un alimentatore che

fornisce una tensione continua a 48 V.



Figura 6.1: Scheda dsPICDEM MCLV-2.

6.2 Programmazione tramite Simulink e Mplab

Esistono diversi metodi per programmare la scheda dsPICDEM MCLV-2: scrivere un software in linguaggio C contenente tutte le indicazioni necessarie al suo funzionamento oppure convertire uno schema realizzato con Simulink in un modello compatibile con la scheda. In entrambi i casi il programma finale viene scritto nella memoria della scheda utilizzando l'applicativo Mplab.

È stata utilizzata proprio la seconda opzione durante l'attività sperimentale infatti Simulink possiede un comando apposito per effettuare la conversione di un suo modello in un uno compatibile con il linguaggio delle schede Microchip. Per far ciò è stato necessario aggiungere dei blocchi che inizializzassero la scheda, cioè definissero lo stato delle sue porte (ingressi e uscite) e inserire il modello di nodo di rete in modo tale che, leggendo il valore degli ingressi, aggiornasse le

uscite in accordo con le sue funzioni di trasferimento (fig. 6.4).

A questo punto è possibile effettuare la conversione dello schema Simulink, viene generato un codice che, una volta esportato in ambiente Mplab, può essere caricato nella memoria della scheda che lavorerà in accordo con esso.

6.3 Verifica del tempo di ciclo

Lo scopo di questa attività sperimentale era di assicurarsi che la scheda riuscisse a gestire, in tempi compatibili con le dinamiche di un emulatore di rete, il modello del nodo di rete elettrica. Data la presenza di funzioni di trasferimento di ordine elevato che richiedono di essere integrate, vi era il rischio che il tempo richiesto per effettuare tutti i calcoli fosse troppo elevato e quindi che la scheda non fosse adeguata per questo compito.

La scheda dsPICDEM MCLV-2 possiede un led che si accende e si spegne una volta ogni ciclo, quindi il tempo trascorso tra due successive accensioni corrisponde al tempo necessario ad effettuare tutti i calcoli.

Utilizzando un oscilloscopio è stato possibile misurare, quindi, il tempo di ciclo che è risultato pari a 400 microsecondi.

A questo punto, per verificare che il modello di nodo di rete rimanga valido anche con questo tempo di integrazione, viene ripetuta la prima simulazione effettuata nel capitolo 4.

Come si può vedere in figura 6.2 la tensione calcolata dal modello è identica, a parte la quantizzazione visibile in figura 6.3, a quella di figura 4.20, ciò significa che il modello dà ancora risultati corretti anche con un tempo di integrazione di 400 microsecondi e quindi la scheda dsPICDEM MCLV-2 può essere utilizzata per la realizzazione di un emulatore di rete elettrica.

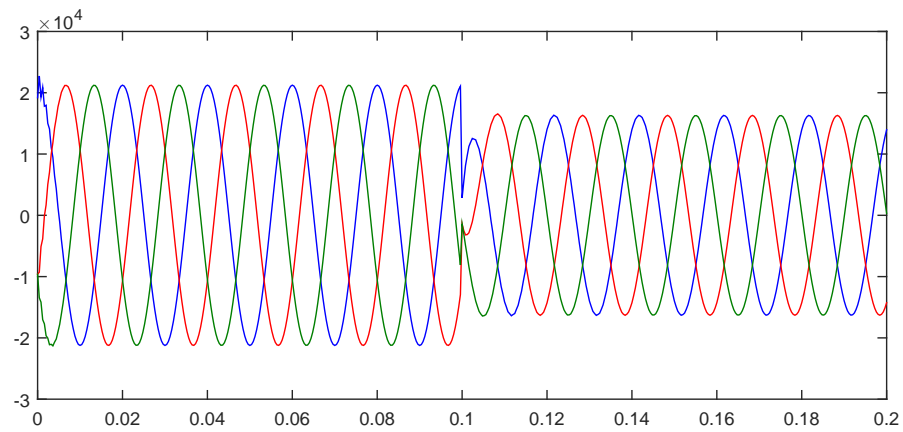


Figura 6.2: Tensione modello nodo di rete elettrica.

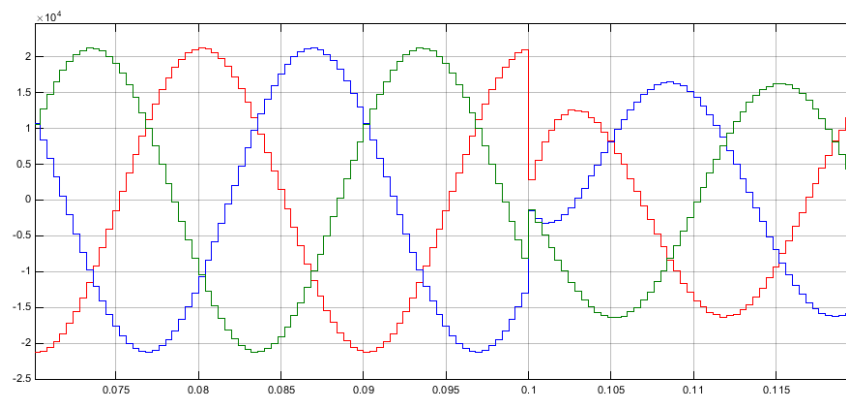


Figura 6.3: Quantizzazione della tensione data dal tempo di integrazione di $400 \mu s$.

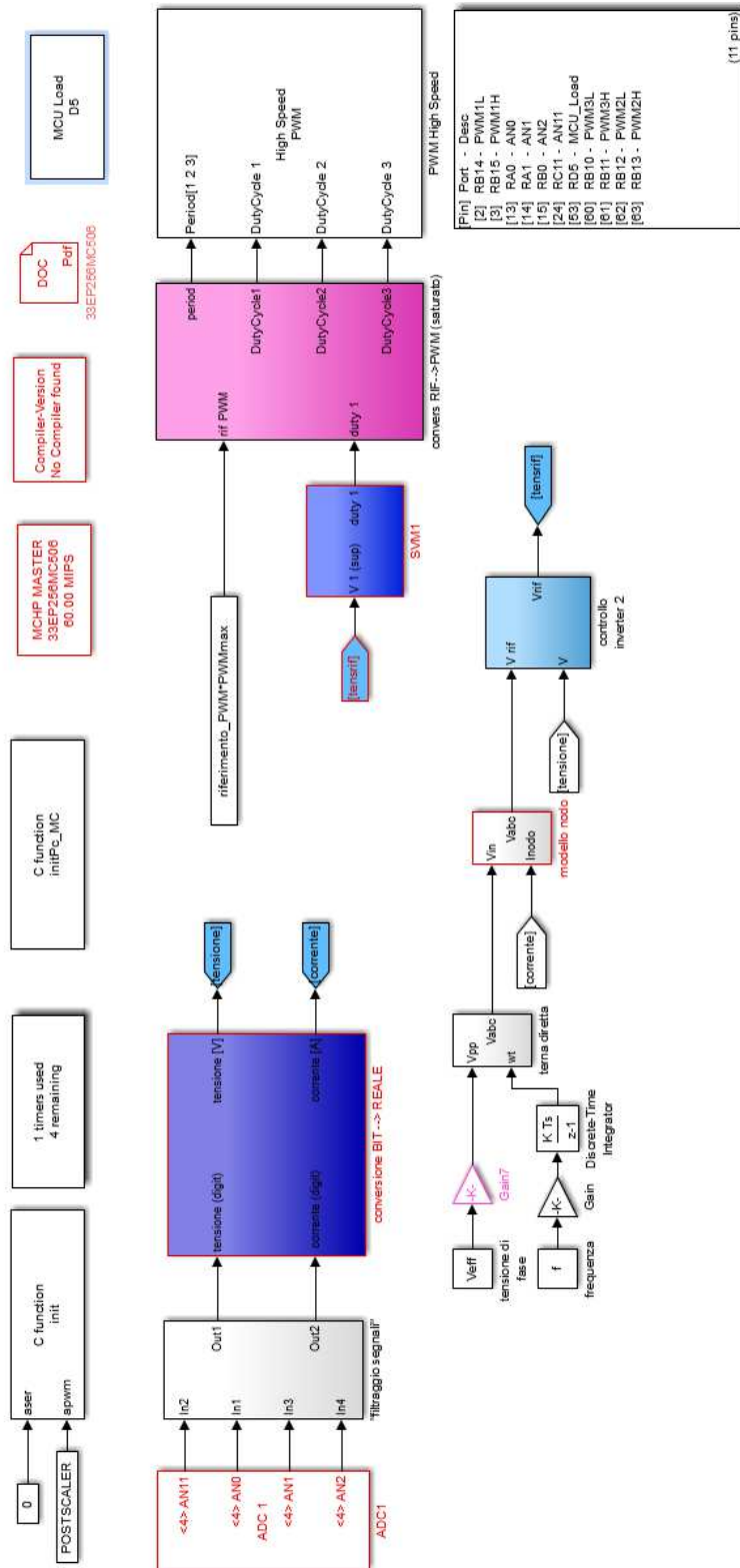


Figura 6.4: Programmazione scheda dsPICDEM MCLV-2 con Simulink.

Capitolo 7

Conclusioni

In questa tesi è stata presentata l'analisi di un emulatore di rete pensato per la realizzazione di test in laboratorio volti allo studio di impianti di generazione da fonte rinnovabile.

Si è analizzato l'impatto di questi impianti sul sistema elettrico nazionale, quali siano gli standard di qualità della tensione di rete imposti dalle norme ed è stato proposto un metodo, per la riduzione in scala di una rete elettrica, che consenta di realizzare modelli con le stesse dinamiche del sistema reale compatibili con le disponibilità di un laboratorio.

L'argomento principale, trattato in questo lavoro, è lo studio di un modello matematico in grado di replicare le dinamiche di un nodo di rete elettrica, in funzione della potenza erogata, e potesse anche emulare dei guasti.

Sono poi state effettuate simulazioni che hanno confermato la bontà del modello proposto ponendolo in paragone con altri modelli già preesistenti ma meno versatili.

È stata condotta un'analisi del metodo di controllo di un convertitore elettronico che generasse le forme d'onda volute ed è stato dimostrato come la configurazione con un unico inverter fosse la migliore per la realizzazione di un emulatore di rete elettrica.

Infine è stata presentata una scheda che potesse essere utilizzata per realizzare un emulatore di rete e si è verificata la sua idoneità al compito valutandone il tempo di ciclo.

L'emulatore di rete proposto in questa tesi, una volta realizzato, permetterà

di studiare in modo accurato impianti di generazione da fonte rinnovabile permettendo di migliorarne le prestazioni e poter farne progredire lo sviluppo futuro.

Appendice A

Trasformata di Laplace

Sia data una funzione complessa f della variabile reale t definita per $t \geq 0$; sia poi $s = \sigma - j\omega$ una variabile complessa con parte reale σ e coefficiente dell'unità immaginaria j pari a ω . Se la funzione

$$F(s) = \int_0^{+\infty} f(t)e^{-st} dt; \quad (\text{A.1})$$

esiste almeno per un valore di s , essa si dice *trasformata di Laplace* di $f(t)$.

Di solito si indica la trasformata di Laplace con la stessa lettera, però maiuscola, che indica la funzione del tempo trasformanda e si scrive $F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$ e $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)]$.

Di particolare importanza sono le *trasformate razionali*, cioè quelle in cui:

$$F(s) = \frac{N(s)}{D(s)}; \quad (\text{A.2})$$

con $N(s)$ e $D(s)$ polinomi primi tra loro. Le radici dell'equazione $N(s) = 0$ si dicono *zeri* e quelle di $D(s) = 0$ si dicono *poli*; nell'insieme poli e zeri sono definiti singolarità.

La trasformata inversa o *antitrasformata* è definita come:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} ds; \quad (\text{A.3})$$

e permette di ricavare l'equazione trasformanda a partire dalla sua trasformata di Laplace.

A.1 funzione di trasferimento

Si consideri un sistema con n variabili di stato, m variabili di ingresso e p variabili di uscita:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t); \quad (\text{A.4})$$

$$y = Cx(t) + Du(t); \quad (\text{A.5})$$

e si indichino con $U(s)$, $X(s)$ e $Y(s)$, funzioni della variabile complessa s , le trasformate di Laplace di $u(t)$, $x(t)$ e $y(t)$. Applicando la trasformata di Laplace ad ambo i membri delle equazioni A.4 e A.5 si ottiene:

$$sX(s) - x(0) = AX(s) + BU(s); \quad (\text{A.6})$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s); \quad (\text{A.7})$$

da cui risulta:

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s) + (sI - A)^{-1}x(0); \quad (\text{A.8})$$

$$Y(s) = (C(sI - A)^{-1}B + D)U(s) + C(sI - A)^{-1}x(0); \quad (\text{A.9})$$

Le equazioni A.8 e A.9 forniscono le trasformate di Laplace dei movimenti dello stato e dell'uscita.

La matrice $p \times m$:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D; \quad (\text{A.10})$$

che appare nella formula A.9 prende il nome di *funzione di trasferimento* e, moltiplicata a destra per la trasformata di Laplace dell'ingresso u , fornisce la trasformata di Laplace dell'uscita y corrispondente a stato iniziale nullo, cioè dell'uscita forzata.

per condizioni iniziali nulle il sistema A.4, A.5 può quindi essere descritto con la *rappresentazione ingresso-uscita*:

$$Y(s) = G(s)U(s); \quad (A.11)$$

Nota la funzione di trasferimento $G(s)$ di un sistema e nota la trasformata di Laplace $U(s)$ dell'ingresso, è possibile calcolare, mediante antitrasformazione della A.11, il movimento forzato y_f dell'uscita che coincide con il movimento y nell'ipotesi di stato iniziale nullo.

La funzione di trasferimento è quindi una rappresentazione *esterna* del sistema, in contrasto con la rappresentazione interna espressa dalle variabili di stato A.4,A.5.

$f(t)$	$F(s)$
$imp(t)$	$\frac{1}{s}$
$sca(t)$	$\frac{1}{s^2}$
$ram(t)$	$\frac{1}{s^3}$
$e^{\alpha t}$	$\frac{1}{s - \alpha}$
$t \cdot e^{\alpha t}$	$\frac{1}{(s - \alpha)^2}$
$sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$t \cdot sin(\omega t)$	$\frac{2\omega s}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$t \cdot cos(\omega t)$	$\frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$e^{\alpha t} \cdot sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{(s - \sigma)^2 + \omega^2}$
$e^{\alpha t} \cdot cos(\omega t)$	$\frac{s - \sigma}{(s - \sigma)^2 + \omega^2}$
$t \cdot e^{\alpha t} \cdot sin(\omega t)$	$\frac{2\omega(s - \sigma)}{((s - \sigma)^2 + \omega^2)^2}$
$t \cdot e^{\alpha t} \cdot cos(\omega t)$	$\frac{(s - \sigma) - \omega^2}{((s - \sigma)^2 + \omega^2)^2}$

Tabella A.1: Segnali e corrispondenti trasformate di Laplace

Appendice B

Trasformata Zeta

Sia data una funzione complessa f della variabile intera k ; sia poi $z = \rho e^{j\theta} \in C$ una variabile complessa con modulo $\rho \geq 0$ e fase θ . Se la funzione

$$F(z) = \sum_{k=0}^{+\infty} f(k)z^{-k}; \quad (\text{B.1})$$

esiste almeno per un valore di z , essa si dice *trasformata Zeta* di $f(k)$.

Di solito si indica la trasformata Zeta con la stessa lettera, però maiuscola, che indica la funzione discreta trasformanda e si scrive $F(z) = \mathcal{Z}[f(k)]$ e $f(k) = \mathcal{Z}^{-1}[F(z)]$.

Di particolare importanza sono le *trasformate razionali*, cioè quelle in cui:

$$F(z) = \frac{N(z)}{D(z)}; \quad (\text{B.2})$$

con $N(z)$ e $D(z)$ polinomi primi tra loro. Le radici dell'equazione $N(z) = 0$ si dicono *zeri* e quelle di $D(z) = 0$ si dicono *poli*; nell'insieme poli e zeri sono definiti singolarità.

La trasformata inversa o *antitrasformata* è definita come:

$$f(k) = \frac{1}{2\pi j} \oint F(z)z^{k-1} dz; \quad (\text{B.3})$$

e permette di ricavare l'equazione trasformanda a partire dalla sua trasformata Zeta.

$f(k)$	$F(z)$
$imp(k)$	$\frac{1}{z}$
$sca(k)$	$\frac{1}{z-1}$
$ram(k)$	$\frac{1}{(z-1)^2}$
a^k	$\frac{z-a}{z}$
$sin(\theta k)$	$\frac{z - a}{z \sin(\theta)}$
$cos(\theta k)$	$\frac{z^2 - 2\cos(\theta)z + 1}{z(z - \cos(\theta))}$
$\rho^k sin(\theta k)$	$\frac{z^2 - 2\cos(\theta)z + 1}{z \rho \sin(\theta)}$
$\rho^k cos(\theta k)$	$\frac{z^2 - 2\rho \cos(\theta)z + \rho^2}{z(z - \rho \cos(\theta))}$
	$z^2 - 2\rho \cos(\theta)z + \rho^2$

Tabella B.1: Segnali e corrispondenti trasformate Zeta

B.1 Relazione tra dominio s e dominio z

La relazione che lega un punto nel piano $\sigma - j\omega$ ad il suo corrispondente nel piano di Gauss la si ottiene tramite la discretizzazione dell'operazione di derivazione o integrazione o *integrazione trapezoidale*.

Sia data una funzione generica e si supponga di volerne calcolare l'integrale tra due istanti di tempo t_0 e t :

$$y_a = \int_{t_0}^t y_a' dt + y_a(t_0); \quad (B.4)$$

dove y_a rappresenta l'area sottesa dalla funzione fino all'istante t .
Facendo un campionamento (di periodo T_s) della funzione l'area sottesa può essere approssimata con un trapezio e quindi l'operazione di integrazione(B.4)diventa:

$$y(n) = \frac{[u(n) + u(n-1)]Ts}{2} + y(n-1); \quad (\text{B.5})$$

e applicando le regole della trasformata Zeta all' espressione B.5 si ottiene:

$$Y(z) = (1 + z^{-1})\frac{Ts}{2}U(z) + z^{-1}Y(z); \quad (\text{B.6})$$

$$(1 - z^{-1})Y(z) = (1 + z^{-1})\frac{Ts}{2}U(z); \quad (\text{B.7})$$

∴

$$H(Z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{Ts}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (\text{B.8})$$

Visto che l'operazione di integrazione nel dominio di Laplace è pari a $\frac{1}{s}$:

$$\frac{1}{s} = \frac{Ts}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (\text{B.9})$$

∴

$$s = \frac{2}{Ts} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} = \frac{2}{Ts} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (\text{B.10})$$

È detta trasformazione bilineare o di Tustin e non è un'operazione biunivoca in quanto ad ogni punto del piano $\sigma - j\omega$ corrisponde uno e uno solo punto nel piano di Gauss ma, data la periodicità della trasformata Zeta, non è vero il contrario.

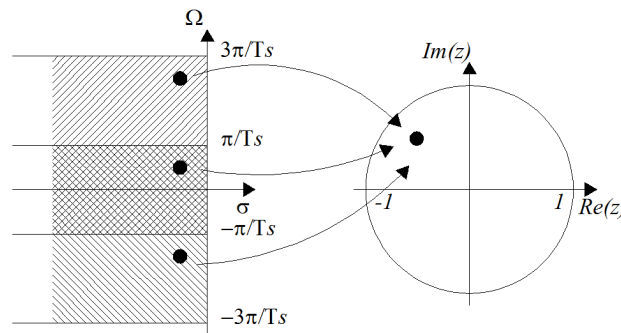


Figura B.1: Mappatura s-z.

Appendice C

Trasformata di Park

La trasformazione di Park si applica a terne di valori istantanei. Questa trasformazione, applicata ai sistemi trifase di tensioni e correnti, risulta particolarmente conveniente e significativa per l'analisi sia del transitorio che del regime sinusoidale o deformato.

C.1 Trasformata di Park su assi fissi

La trasformata di Park chiamata su assi fissi è una trasformazione lineare a coefficienti reali costanti. La matrice di trasformazione è:

$$\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

Questa, applicata ad una terna di valori istantanei di fase $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$, da origine ai tre componenti di Park: componenti sugli assi α , β e componente omopolare.

La relazione che lega il vettore delle componenti di fase a quello delle componenti di Park è definita come:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \\ v_0(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_0 \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

La C.1 è una matrice ortogonale, l'inversa è uguale alla trasposta. La proprietà di ortogonalità implica che il modulo del determinante è unitario perciò si ha anche la conservazione dei prodotti interni. Ciò assicura l'invarianza delle potenze, energie e moduli dei vettori passando da un sistema di valori di fase al corrispondente su assi di Park.

$$\mathbf{T}_0^{-1} = \mathbf{T}_0^t = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

Per l'ortogonalità della matrice la trasformazione inversa si ottiene applicando la trasposta T_0^t alle variabili di Park:

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_0^t \begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \\ v_0(t) \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

C.2 Vettore spaziale

Le componenti v_α e v_β definiscono la variabile complessa *Vettore spaziale* o vettore di Park:

$$\bar{v}(t) = v_\alpha + jv_\beta; \quad (\text{C.5})$$

Introducendo il parametro:

$$\begin{aligned}\bar{\alpha} &= e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \bar{\alpha}^2 &= \underline{\alpha} = e^{-j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2};\end{aligned}\tag{C.6}$$

l'espressione del vettore spaziale può essere riscritta come:

$$\bar{v}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}[v_a(t) + \bar{\alpha}v_b(t) + \bar{\alpha}^2v_c(t)];\tag{C.7}$$

$$v_0(t) = \frac{v_a(t) + v_b(t) + v_c(t)}{\sqrt{3}};\tag{C.8}$$

che in forma matriciale diventa:

$$\bar{v}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \bar{\alpha} & \bar{\alpha}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}\tag{C.9}$$

$$\bar{v}_0(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}\tag{C.10}$$

La variabile complessa \bar{v} vettore spaziale e lo scalare v_0 componente omopolare identificano completamente il sistema trifase.

Le variabili di fase sono a loro volta esprimibili:

$$\begin{aligned}v_a(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re}(\bar{v}(t)) + \frac{v_0}{\sqrt{3}}; \\ v_b(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re}(\bar{\alpha}^2\bar{v}(t)) + \frac{v_0}{\sqrt{3}}; \\ v_c(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re}(\bar{\alpha}\bar{v}(t)) + \frac{v_0}{\sqrt{3}};\end{aligned}\tag{C.11}$$

C.3 Trasformata di Park su assi rotanti

La trasformata di Park (C.1), chiamata su assi fissi, è un caso particolare di una trasformata più generale, detta su assi rotanti. La matrice della trasformata generale è la seguente:

$$\mathbf{T}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\text{sen}\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{C.12})$$

Questa, applicata ad una terna di valori istantanei di fase $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$, da origine ai tre componenti di Park: componenti sugli assi d , q e componente omopolare.

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_0(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}(\theta) \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{C.13})$$

e l'inversa:

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}(\theta)^t \begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_0(t) \end{bmatrix} \quad (\text{C.14})$$

Il parametro angolare $\theta(t)$ è una generica funzione del tempo. Questi e la propria derivata temporale sono interpretabili rispettivamente come posizione e velocità angolare degli assi di riferimento di Park d e q rispetto ad un riferimento fisso definito dalla posizione $\theta = 0$; nel caso particolare di assi fissi, posto $\theta = 0$ la trasformazione si riduce alla C.1.

Analogamente al caso di assi fissi, le componenti v_d , v_q definiscono la variabile complessa *vettore spaziale su assi rotanti*:

$$\bar{v}(t) = v_d + jv_q; \quad (\text{C.15})$$

La C.12 può essere espressa dal prodotto della C.1 per la matrice di rotazione $\mathbf{H}(\theta)$:

$$\mathbf{T}(\theta) = \mathbf{H}(\theta)\mathbf{T}_0; \quad (\text{C.16})$$

$$\mathbf{H}(\theta) = \mathbf{T}(\theta)\mathbf{T}_0^t = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.17})$$

La trasformazione $\mathbf{H}(\theta)$ ruota le componenti d e q dell'angolo θ , mentre lascia inalterata la componente omopolare.

La $\mathbf{H}(\theta)$ si applica a una terna di variabili trasformate con Park su assi fissi ottenendo la corrispondente terna su assi rotanti. Componendo poi i termini d e q nel vettore spaziale si riconosce che la sottomatrice:

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

equivale al termine di rotazione nel campo complesso $e^{-j\theta}$.

Vale pertanto il seguente risultato notevole. Considerato un vettore di Park \bar{v}^0 relativo ad assi fissi ($\theta = 0$), lo stesso riferito ad assi rotanti definiti da un angolo $\theta(t)$ generico risulta:

$$\bar{v}(t) = \bar{v}^0(t)e^{-j\theta(t)}; \quad (\text{C.18})$$

$$\bar{v}^0(t) = \bar{v}(t)e^{j\theta(t)}; \quad (\text{C.19})$$

mentre la componente omopolare rimane inalterata attraverso il cambiamento di assi.

La trasformazione su assi rotanti consente grandi semplificazioni nella struttura delle equazioni. Si consideri una terna sinusoidale simmetrica di sequenza diretta su assi fissi $\bar{v}^0 = \bar{V}e^{j\omega t}$. Applicata la ?? si ottiene:

$$\bar{v} = \bar{V} e^{j(\omega t - \theta)} ; \quad (C.20)$$

se si assume ora $\theta = \omega t$ (assi rotanti alla pulsazione ω), il vettore spaziale risulta costante e pari al fasore di sequenza diretta:

$$\bar{v}(t) = \bar{V}; \quad (C.21)$$

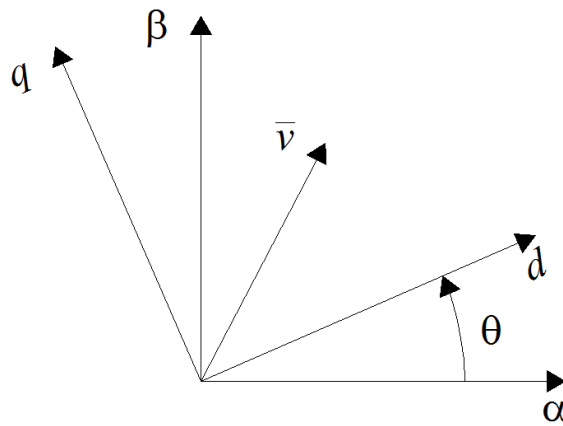


Figura C.1: Assi rotanti di Park.

Bibliografia

- [1] Terna per SISTAN, “Dati Statistici sull’Energia Elettrica in Italia, aggiornamento 2013”.
- [2] Gestore dei Servizi Energetici Divisione Gestione e Coordinamento Generale Unità Studi e Statistiche, “Rapporto Statistico Energia da fonti rinnovabili, anno 2013”, marzo 2015.
- [3] “Promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili”, Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE (Testo rilevante ai fini del SEE).
- [4] Comitato Elettrotecnico Italiano “Norma CEI 50160-Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell’energia elettrica”. 01/2011.
- [5] C. Yanbo, R. Jingding, L. Kun “Construction of Multi-Energy Micro-grid Laboratory” Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2011 4th International Conference, Publication Year: 2011 , Page(s): 1-5.
- [6] A.P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, S. Mohagheghi, Q. B. Dam, R. H. Alaileh, G. K. Stefopoulos, “A Laboratory Setup of a Power System Scaled Model for Testing and Validation of EMS Applications” in PowerTech, 2009 IEEE Bucharest Publication Year: 2009 , Page(s): 1 - 8 IEEE conference publication.
- [7] O. A. Mohammed, M. A. Nayeem, and A. K. Kaviani, “A Laboratory Based Microgrid and Distributed Generation Infrastructure for Studying Connec-

- tivity Issues to Operational Power Systems” in Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, Publication Year: 2010 , Page(s): 1 - 6 .
- [8] S. Lu, L. Wang, T. Lo and A. V. Prokhorov, “Integration of Wind-Power and Wave-Power Generation Systems Using a DC Micro Grid” in Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE, Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 8.
- [9] C. Nwankpa, K. Miu, D. Niebur, X. Yang and S. P. Carullo, “Power Transmission and Distribution System Laboratories at Drexel University” in Power Engineering Society General Meeting, 2005 IEEE, Publication Year: 2005 , Page(s): 1198 - 1205 Vol. 2.
- [10] R. S. Whitehouse, C. D. M. Oates, J. Maneiro, N. M. MacLeod, “A New Simulator Laboratory For Research And Development Of VSC HVDC Topologies And Control Algorithms” in AC and DC Power Transmission, 2010. ACDC. 9th IET International Conference, Publication Year: 2010, Page(s): 1 - 5.
- [11] X. Wang, J. Qi, Y. Hou, Y. Wang, W. Xu, D. Wang, Z. Jiao, “Studies on Fault Analysis and Protection Configuration Schemes in an Isolated Microgrid” in PES General Meeting | Conference and Exposition, 2014 IEEE, Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 5.
- [12] X. Chen and Jian Sun, “Characerization of Inverter-Grid Interactions using a Hardware-in-the-Loop System Test-Bed” in Power Electronics and ECCE Asia (ICPE and ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference, Publication Year: 2011 , Page(s): 2180 - 2187
- [13] R. Lohde, F. W. Fuchs, “Laboratory Type PWM Grid Emulator for Generating Disturbed Voltages fo Testing Grid Connected Devices” in Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on Publication Year: 2009 , Page(s): 1 - 9
- [14] A. S. Vijay, S. Doolla and M. C. Chandorkar , “Voltage Sag Emulation using Power Electronic Converters” in Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Publication Year: 2013 , Page(s): 1410 - 1415

-
- [15] L. Yang, Y. Ma, J. Wang, J. Wang, X. Zhang, L. M. Tolbert, F. Wang, and K. Tomsovic , “Development of Converter Based Reconfigurable Power Grid Emulator ” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE, Publication Year: 2014 , Page(s): 3990 - 3997
- [16] J. Wang, Y. Ma, L. Yang, L. M. Tolbert, F. Wang, “Power Converter-based Three-phase Induction Motor Load Emulator ” in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, Publication Year: 2013 , Page(s): 3270 - 327
- [17] L. Yang, X. Zhang, Y. Ma, J. Wang, L. Hang, K. Lin, L. M. Tolbert, F. Wang, K. Tomsovic, “Stability Analysis of Inverter Based Generator Emulator in Test-Bed for Power Systems ” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, Publication Year: 2013 , Page(s): 5410 - 5417
- [18] J. Wang, L. Yang, Y. Ma, J. Wang, L. M. Tolbert, F. Wang, K. Tomsovic , “Static and Dynamic Power System Load Emulation in Converter-based Reconfigurable Power Grid Emulator” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE Publication Year: 2014 , Page(s): 4008 - 4015
- [19] Y. Ma, L. Yang, J. Wang, X. Shi, F. Wang, L. M. Tolbert , “Circulating Current Control and Reduction in a Paralleled Converter Test-bed System”
- [20] Y. Ma, L. Yang, J. Wang, F. Wang, L. M. Tolbert , “Emulating Full-Converter Wind Turbine by a Single Converter in a Multiple Converter Based Emulation System” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, Publication Year: 2013 , Page(s): 5426 - 5432
- [21] W. Cao, Y. Ma, J. Wang, L. Yang, J. Wang, F. Wang and L. M. Tolbert , “Two-Stage PV Inverter System Emulator in Converter Based Power Grid Emulation System ” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, Publication Year: 2013 , Page(s): 4518 - 4525
- [22] J. Wang, Y. Ma, L. Yang, L. M. Tolbert, F. Wang, “Power Converter-based Three-phase Induction Motor Load Emulator ” in Applied Power Electro-

-
- ics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, Publication Year: 2013 , Page(s): 3270 - 3274
- [23] L. Yang, X. Zhang, Y. Ma, J. Wang, L. Hang, K. Lin, L. Tolbert, F. Wang, and K. Tomsovic, "Hardware implementation and control design of generator emulator in multi-converter system," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Mar. 2013, pp. 2316–2323.
- [24] C.M.Arturi,"Elettromagnetismo applicato e metodi di calcolo", Progetto Leonardo Esculapio Bologna 2012.
- [25] P. Bolzern, R. Scattolini, N. Schiavoni,"Fondamenti di controlli automatici", McGraw-Hill 2008.
- [26] A. Julean, "Active damping of LCL filter resonance in grid connected applications" PED10-1035 - Spring Semester, 2009
- [27] G. Superti Furga, "Modellistica dei sistemi elettromeccanici"- Marzo 2005.