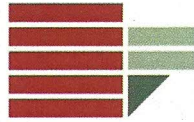


UNIVERSITÀ
DELLA CALABRIA



Dipartimento di Elettronica,
Informatica e Sistemistica

Scuola di dottorato "Archimede" in Scienze Comunicazioni e Tecnologie

Dottorato in Psicologia della Programmazione e Intelligenza Artificiale

CICLO XXV

SETTORE DISCIPLINARE: **ING-IND/33 SISTEMI ELETTRICI PER L'ENERGIA**

TESI DI DOTTORATO

UN FILTRO ATTIVO INNOVATIVO PER IL FILTRAGGIO E LA
COMPENSAZIONE DELLE ARMONICHE DI TENSIONE E PER LO
SMORZAMENTO DELLA RISONANZA ARMONICA NELLE RETI ELETTRICHE DI
DISTRIBUZIONE

Tutor

Prof. *Daniele Menniti*

Coordinatore

Prof.ssa *Eleonora Bilotta*

Candidato

Giovanni Brusco

GIOVANNI BRUSCO
DEPARTMENT OF ELECTRONICS, COMPUTER SCIENCE AND SYSTEMS
UNIVERSITY OF CALABRIA
CUBO 42C – 87036 RENDE (CS)
TEL. - FAX: (+39)(0)984.494699
gbrusco@unical.it

Si ringrazia il Prof. Daniele Menniti, tutor di questo lavoro di dottorato.

Si ringrazia il Gruppo di ricerca Universitario di Sistemi Elettrici per l'Energia (GUSEE) di Cosenza per la preziosa collaborazione.

A French Surian

... e se ci fossi stato!

INDICE

	<i>Pag.</i>
Premessa	4
Introduzione	5

Parte Prima:

Stato dell'Arte

1. La qualità dell'alimentazione elettrica.....	8
1.1 Introduzione	8
1.2 Power Quality	9
1.2.1 Autorità competenti in materia di Power Quality	11
1.2.2 Normativa di riferimento	12
1.2.3 Definizione di qualità del servizio	13
1.3 Inquinamento Armonico	13
1.3.1 Armoniche di tensione e di corrente	15
1.3.2 La Risonanza armonica nelle linee di distribuzione.....	15
1.3.3 Effetti delle armoniche sui componenti di impianto	16
1.3.4 Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica	22
1.3.5 Limiti sulle Tensioni armoniche in Bassa e Media Tensione	24
2. Soluzioni per la mitigazione della distorsione/propagazione armonica.....	26
2.1 Introduzione	26
2.2 Classici provvedimenti per la riduzione dell'Inquinamento Armonico	26
2.3 Classici provvedimenti per lo smorzamento della risonanza armonica	27
2.3.1 Uno smorzatore attivo di risonanza	29
3. Filtri Attivi di Potenza	32
3.1 Introduzione	32
3.2 Tecnologia dei filtri attivi	33

3.3	Configurazioni	35
3.3.1	Classificazione in base al tipo di convertitore.....	35
3.3.2	Classificazione in base alla topologia	36
3.3.3	Classificazione in base alla struttura del sistema di potenza.....	38
3.4	Strategie di controllo.....	41
3.4.1	Condizionamento dei segnali	41
3.4.2	Determinazione dei segnali di compensazione	42
3.5	Selezione dei componenti e delle caratteristiche addizionali dei filtri attivi.....	43
3.6	Considerazioni per applicazioni specifiche dei filtri attivi.....	44
3.6.1	Compensazione di corrente.....	44
3.6.2	Compensazione di tensione.....	45
3.6.3	Compensazione combinata di tensione e corrente	46

Parte Seconda:

Contributo del Candidato

4.	Filtraggio della tensione Vs filtraggio della corrente.....	48
4.1	Introduzione	48
4.2	Filtro attivo di corrente	48
4.3	Filtro attivo di tensione	49
4.4	Compensatore di Tensione Armonica, HVC	51
4.5	Il metodo Iterativo.....	53
4.5.1	Algoritmo del Metodo Iterativo	55
4.5.2	Convergenza del metodo iterativo	55
4.5.3	Modifica del Metodo Iterativo	57
4.6	Il Metodo Sensitivo.....	59
4.6.1	L'Analisi Sensitiva.....	59
4.6.2	L'algoritmo per il metodo sensitivo.....	61
4.7	L'HVC come smorzatore di risonanza armonica nelle reti elettriche.....	63

5. Simulazioni Numeriche	65
5.1 Introduzione	65
5.2 Efficacia del Metodo Sensitivo	65
5.3 Caso Studio n.1	67
5.4 Caso Studio n. 2	69
Conclusioni	75
Bibliografia	76

PREMESSA

Recentemente, anche in conseguenza della liberalizzazione del mercato elettrico e della prevista evoluzione dell'intero sistema elettrico verso una configurazione *smart*, le tematiche relative all'analisi della qualità dell'alimentazione elettrica hanno assunto un'importanza strategica. Le ragioni di questo crescente interesse nella Power Quality¹ (PQ) sono da riscontrarsi nei sempre più ingenti costi risultanti da una qualità dell'alimentazione non adeguata ai dispositivi connessi in rete.

Tali costi sono legati a significativi effetti che i disturbi elettrici possono comportare, quali la sospensione momentanea della produzione, l'aumento delle perdite di linea, la riduzione della vita utile delle apparecchiature, la perdita di dati informatici, il malfunzionamento, l'arresto o il danneggiamento dei dispositivi.

I Sistemi Elettrici per l'Energia utilizzati per la trasmissione e per la distribuzione dell'energia elettrica, sono progettati e costruiti per operare con tensioni e correnti variabili nel tempo con legge sinusoidale aventi frequenza assegnata (frequenza nominale).

In tali sistemi, la presenza di dispositivi - detti distorcenti - che, per loro natura, assorbono o erogano correnti aventi forme d'onda periodiche non sinusoidali (distorte) anche se alimentati con tensioni perfettamente sinusoidali, implica: (i) nei vari nodi della rete di alimentazione, la nascita di tensioni con forma d'onda distorta e (ii) nei vari rami della rete, la circolazione di correnti anch'esse distorte. Attribuendo, quindi, a tali componenti la non sinusoidalità della forma d'onda, si parla di *inquinamento armonico*.

¹ Il termine *Power Quality* indica la presenza di disturbi nella tensione di alimentazione e nelle correnti assorbite dagli utilizzatori, quali le deviazioni di tensione e corrente dalle condizioni di forma d'onda sinusoidale, frequenza e ampiezza nominali, terne simmetriche in un sistema trifase e continuità della fornitura.

INTRODUZIONE

Il tema di ricerca affrontato si colloca nell'attuale tematica relativa allo sviluppo di nuove applicazioni in ottica Smart Grids, indispensabili per poter consentire l'effettiva diffusione della Generazione Distribuita (DG) da Impianti Alimentati a Fonti Rinnovabili (IAFR) e assimilati.

In particolare l'obiettivo e la finalità della ricerca è ricaduto sull'innovazione dei Sistemi Elettrici di Distribuzione per migliorarne la qualità e l'affidabilità del servizio.

La necessità di rendere intelligenti le reti di distribuzione dei Sistemi Elettrici è legata alla crescente penetrazione della GD, ossia di generazione di piccola taglia tipicamente connessa in media e bassa tensione. Qualora l'entità della GD in rete sia molto rilevante, il carattere attivo assunto dalla rete medesima può dar luogo a diverse problematiche.

Alcune delle criticità introdotte dalla GD, per il massiccio utilizzo di interfacce basate sull'elettronica di potenza, hanno un forte impatto sulla qualità e affidabilità dell'alimentazione contribuendo ad aumentare i notevoli problemi di inquinamento armonico citato in premessa.

Per di più, nei sistemi elettrici di distribuzione, si osserva anche il cosiddetto fenomeno della *propagazione armonica* che consiste nell'amplificazione della tensione armonica nei nodi lungo la linea di distribuzione elettrica che si manifesta soprattutto nelle linee di alimentazione cosiddette ad "antenna". La propagazione delle armoniche è dovuta ai fenomeni di risonanza che si hanno a particolari frequenze. Le linee infatti sono caratterizzate dall'essere a parametri distribuiti dove si manifestano il mutuo accoppiamento induttivo tra i conduttori del sistema e il mutuo accoppiamento capacitivo tra questi ed il suolo.

Inoltre questi fenomeni possono anche essere amplificati dalla presenza di banchi di capacitori adoperati per il rifasamento.

Partendo dalle problematiche sopra evidenziate, il lavoro di ricerca si è concentrato sull'individuazione di tecniche di filtraggio e smorzamento delle armoniche mediante l'adozione di un approccio diverso da quanto proposto in letteratura.

Al contrario di quanto viene proposto in letteratura, in cui si rimette all'utente il compito di adottare provvedimenti specifici riguardanti l'inquinamento armonico e la propagazione armonica, in questo lavoro di tesi si è adottato un approccio diverso ritenuto essere di grandissima importanza attesa la grande polverizzazione della GD dovuta alla crescente presenza di piccoli e medi impianti civili ed industriali.

Nel caso di piccoli impianti, infatti, la normativa non prevede particolari provvedimenti da parte dell'utente ed in ogni caso l'utilizzo di dispositivi di filtraggio attivo per ogni singolo impianto potrebbe incidere in maniera elevata sul costo dell'intero impianto da non risultare conveniente.

La strategia in questo lavoro di ricerca è, appunto, quella di adottare un diverso approccio al fine di introdurre sistemi di filtraggio attivi che agendo sulle tensioni di rete, piuttosto che sulle correnti dei singoli carichi, possano mitigare l'inquinamento armonico in porzioni di rete più o meno grandi mediante l'utilizzo di un unico dispositivo. Questa strategia consente inoltre, con il medesimo approccio, di poter risolvere il problema della propagazione armonica nelle reti in "antenna".

Il lavoro di tesi è stato suddiviso in due diverse parti, la prima ha riguardato lo studio dello stato dell'arte investigando i vari approcci proposti in letteratura per quanto riguarda l'inquinamento armonico e la propagazione armonica nelle reti di distribuzione; mentre nella seconda parte si è dato ampio spazio al contributo che si è offerto con questo lavoro descrivendo, in dettaglio, i risultati conseguiti. Per validare la bontà dei metodi proposti, inoltre, si sono effettuate numerose simulazioni numeriche mediante reti test riportandone i risultati. Infine, tali metodi sono confrontati con altri metodi proposti in letteratura evidenziandone i vantaggi.

PARTE PRIMA:

STATO DELL'ARTE

Per qualità dell'energia si intende il grado di vicinanza delle forme d'onda reali alle forme d'onde ideali. Durante il normale esercizio si hanno variazioni a seguito di alterazioni del carico, a causa della distorsione armonica introdotta da determinate apparecchiature o a causa di guasti dovuti ad eventi esterni.

È importante osservare che qualunque alterazione in qualsivoglia nodo si propaga virtualmente in tutta la rete.

La qualità dell'energia implica, quindi, la qualità sia della tensione di alimentazione che della corrente richiesta dai carichi. In generale, per assicurare che un sistema elettrico funzioni al meglio, tutte le parti in causa devono rispettare determinate condizioni. Il fornitore deve garantire tensioni di alimentazione che non alterino il sicuro e corretto funzionamento dei carichi; gli utenti devono prelevare potenza dalla rete in modo da non iniettare in rete disturbi nocivi agli altri carichi ed alla qualità della fornitura.

Qualità della fornitura e qualità del prelievo sono quindi due fattori inseparabili nella trattazione dei problemi di PQ. Un utilizzatore può non essere totalmente responsabile per i disturbi presenti nelle correnti assorbite; un fornitore di energia può non essere totalmente responsabile per i disturbi presenti sulla tensione di alimentazione.

La liberalizzazione del mercato rende critici gli aspetti economici e legali del problema e di conseguenza si tende a rimettere all'utente finale il compito di smorzare l'inquinamento armonico e la propagazione armonica lungo le linee elettriche.

CAPITOLO 1.

LA QUALITÀ DELL'ALIMENTAZIONE ELETTRICA

1.1 INTRODUZIONE

Il Decreto Legislativo n.79 del 15 marzo 1999 [1], noto come decreto *Bersani*, ha avviato in Italia la liberalizzazione del mercato elettrico. Tale decreto, con il quale sono state recepite le indicazioni contenute nella Direttiva Comunitaria n.92 del 1996 sulla creazione del Mercato Unico dell'energia, ha segnato l'inizio del processo di liberalizzazione delle attività di produzione, importazione, esportazione, acquisto e vendita dell'energia elettrica. Il decreto *Bersani* ha previsto, tra l'altro, l'istituzione di un mercato elettrico organizzato (la Borsa Elettrica) dove si possa contrattare l'acquisto e la vendita di energia elettrica. In conformità a tale decreto ai clienti idonei viene riconosciuta la facoltà di scegliere da chi comprare, in Italia o all'estero, l'energia elettrica. Il 30 Giugno 2004, l'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG) [2], grazie al recepimento della direttiva europea 2003/54/CE, ha stabilito che dallo Luglio 2004 tutti i clienti "non domestici" possiedono la qualifica di cliente idoneo. Questo ulteriore passo del processo di liberalizzazione del settore elettrico italiano ha permesso quindi a tutti i titolari di partita IVA, intestatari di forniture di energia elettrica per "usi diversi dall'abitazione", di accedere al mercato libero dell'elettricità. La liberalizzazione è stata completata il 1° Luglio 2007 quando anche le utenze domestiche hanno acquisito la qualifica di clienti idonei.

In Italia, il passaggio da un modello di mercato di tipo monopolistico alla borsa elettrica ha comportato la nascita di un nuovo sistema di fornitura caratterizzato di una molteplicità di attori, produttori, grossisti e clienti del sistema elettrico, interagenti tra loro, con interessi tecnico-economici diversi e anche contrastanti.

In uno scenario di questo tipo appare evidente che la qualità dei prodotti e dei servizi elettrici sia un elemento distintivo sempre più richiesto e debba ricoprire un ruolo di crescente rilevanza. In particolare, in campo industriale l'energia elettrica è ormai

recepita come un prodotto industriale a tutti gli effetti e come tale deve rispettare degli standard di qualità.

La norma UNI ISO 9000 [3], definisce per un generico prodotto che *"qualità è l'insieme delle proprietà e delle caratteristiche di un prodotto o di un servizio che conferiscono ad esso la capacità di soddisfare le esigenze espresse o implicite"*.

La qualità, quindi, può esser intesa come livello di prestazione dei prodotti e servizi e come grado di soddisfazione percepito dall'acquirente. Tale definizione generale richiede adattamenti specifici per le diverse applicazioni. In particolare, è necessaria l'individuazione di metodologie per risolvere problemi come l'inquinamento armonico su citato. La liberalizzazione del mercato elettrico rende critici gli aspetti economici e legali del problema della qualità della fornitura. In questo contesto, inoltre, è necessario prevedere un sistema di attribuzione delle responsabilità per la degradazione della qualità o il mancato rispetto dei vincoli di contratto. Il tema è tuttora molto studiato e dibattuto [4], [5], [6].

Questo lavoro affronta lo studio delle principali metodologie proposte in letteratura in materia di filtraggio e smorzamento delle armoniche presenti in una rete elettrica di distribuzione. In particolare in questo capitolo vengono analizzate le caratteristiche dell'alimentazione elettrica riportando le varie problematiche presenti riguardanti appunto la *Power Quality* [7], [8], [9], [10].

1.2 POWER QUALITY

Power Quality è l'espressione Inglese ormai comunemente usata per definire l'insieme di problematiche e fenomeni legati alla qualità nella rete elettrica di alimentazione degli impianti civili ed industriali. La norma 61000-4-30 fornisce la seguente definizione per qualità della potenza: *"Caratteristica dell'elettricità in un dato punto di un sistema elettrico, valutata a fronte di una serie di parametri tecnici di riferimento"* [11]. In nota si riporta che *"questi parametri possono, in alcuni casi, essere in relazione alla compatibilità tra l'energia fornita in una rete e i carichi connessi a tale rete"*.

La definizione della norma è generale, ma la PQ presenta differenti aspetti, dipendenti dall'ottica con la quale si osserva il problema. Il fornitore può intendere la qualità dell'alimentazione come garanzia della continuità del servizio. Il gestore del sistema elettrico definisce come qualità dell'alimentazione elettrica la caratteristica di continuità e regolarità nel tempo dei valori della tensione e della frequenza dell'energia elettrica fornita, e come qualità del servizio di fornitura dell'energia elettrica la qualità delle

prestazioni tecnico-commerciali rese agli utenti e la qualità dei parametri elettrici dell'energia fornita.

Il costruttore di apparecchiature può concepire la qualità dell'alimentazione in termini di caratteristiche che devono essere garantite per il corretto funzionamento, entro le specifiche, dell'apparecchiatura fornita. Tali caratteristiche possono cambiare da dispositivo a dispositivo e per differenti produttori.

Infine è possibile guardare al problema della PQ dal punto di vista dell'utente finale. L'utente si aspetta una fornitura di un'alimentazione che risponda alle sue esigenze, secondo le caratteristiche dei propri carichi. La qualità che un generico utente ritiene necessaria per la propria attività non è un concetto assoluto, ma dipenderà dalla sensibilità tecnica dell'utente stesso verso i disturbi e dalle conseguenze economiche dei disservizi.

Le esigenze da soddisfare non sono quindi assolute ma possono variare secondo le situazioni, i soggetti e le condizioni al contorno, mutabili nel tempo. In ogni modo la qualità nel servizio di fornitura elettrica nei suoi diversi aspetti sta diventando una caratteristica sempre più rilevante e richiesta anche e soprattutto in conseguenza della liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica che consente all'utente di scegliere la fornitura più adatta alle sue necessità e alle sue possibilità economiche.

Le grandezze elettriche allo stadio della produzione sono sinusoidali e prive di distorsioni. Il fornitore quindi può garantire sulla qualità della tensione in ingresso alla rete, ma non può controllare la presenza di disturbi prodotti dall'utente finale.

Rispetto ad alcune sue caratteristiche, infatti, la qualità della fornitura elettrica dipende più dall'utente che dal produttore o distributore. L'evoluzione e la diffusione di nuove apparecchiature elettriche ed elettroniche per l'ottimizzazione dei sistemi di gestione e controllo dei processi energetici e produttivi, rendono il tema della PQ, anche nelle forniture di bassa tensione, sempre più sentito, in quanto tali apparecchiature hanno caratteristiche di comportamento non lineari e sono maggiormente sensibili ai problemi di PQ. Negli impianti industriali i carichi tradizionali, ad esempio sistemi di illuminazione e motori, hanno caratteristiche di comportamento lineari e fondamentalmente risentono poco di brevi squilibri nell'alimentazione e non provocano disturbi. I carichi elettronici per loro natura sono molto più "vulnerabili" ai disturbi rispetto ai carichi tradizionali e allo stesso tempo causano distorsioni armoniche e quindi problemi sulla rete di alimentazione. I più moderni processi energetici e produttivi pertanto richiedono una fornitura di qualità elevata, ma contemporaneamente rappresentano un'importante fonte di disturbi.

I disturbi elettrici di natura elettromagnetica possono influire in modo anche rilevante sullo svolgimento dei processi industriali continui o in attività ad elevato supporto tecnologico. Si citano ad esempio, le produzioni di fili smaltati, di fibre ottiche, di vetri temperati, le operazioni di macchine utensili automatiche ecc.

Appare quindi evidente che tutti gli attori del sistema elettrico chiedano una tensione stazionaria e non distorta, immune dalle fluttuazioni della domanda di potenza da parte dei carichi non lineari.

1.2.1 Autorità competenti in materia di Power Quality

Si riporta un sintetico richiamo sugli organismi nazionali ed internazionali competenti in materia di Power Quality:

- ✓ **IEC** - International Electrotechnical Commission: costituito fin dal 1907 è l'organismo che prepara norme tecniche su scala mondiale e raggruppa i paesi maggiormente industrializzati.
- ✓ **IECQ** - International Electrotechnical Commissions Quality Assessment System for Electronic Components: è un'emanazione della IEC che agisce in modo autonomo e alla quale partecipano i Paesi della IEC interessati alla certificazione dei componenti elettronici.
- ✓ **IEEE** - Institute of Electrical and Electronics Engineers: ha lo scopo di ricercare nuove applicazioni e teorie nella scienza elettrotecnica, elettronica ed Informatica.
- ✓ **CENELEC** - European Committee for Electrotechnical Standardization: è l'Ente europeo che ha il compito di preparare normative riguardanti il settore elettrotecnico che facilitino e rendano possibile lo scambio di mezzi e servizi.
- ✓ **CEN** - Comité Européen de Normalisation.
- ✓ **ISO** - International Organization for Standardization.
- ✓ **UNI** - Ente Nazionale Italiano di Unificazione: rappresenta l'Italia nell'ISO e nel CEN.
- ✓ **CEI** - Comitato Elettrotecnico Italiano: è il comitato nazionale che rappresenta l'Italia in sede Internazionale.
- ✓ **AEEG** - Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas: è l'autorità italiana indipendente con funzioni di regolazione e di controllo del settore dell'energia elettrica e del gas; istituita dalla Legge n.481 del 14 Novembre 1995 è diventata pienamente operativa nell'Aprile del '97.

Nel mondo i diversi Enti competenti danno però proprie definizioni in materia di PQ; spesso le terminologie usate, per indicare i vari eventi e i disturbi, risultano ambigue e

non esiste ancora uniformità. In Italia l'AEEG prende decisioni in base alla propria legge istitutiva e ai propri procedimenti e regolamenti. I suoi poteri di regolazione settoriale fanno riferimento alla determinazione delle tariffe, dei livelli di qualità dei servizi e delle condizioni tecnico-economiche di accesso e interconnessione alle reti. L'Autorità ha definito le metodologie di analisi e misura per il monitoraggio del livello di qualità della fornitura, ha stabilito i livelli minimi di qualità del servizio facendo riferimento alle Norme CEI, ha introdotto penali per incentivare il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

1.2.2 Normativa di riferimento

Si richiamano le norme di riferimento in materia di qualità della fornitura e compatibilità elettromagnetica.

Normative IEEE

- IEEE STANDARD 519-1992 “*Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems*” [12];
- IEEE STANDARD 1159. 3-2003 “*Recommended Practice for Transfer of Power Quality Data*” [13];
- IEEE TRIAL-USE STANDARD 1459-2000
“*Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*” [14].

Normativa IEC

- SERIE 61000: *Compatibilità Elettromagnetica*, Parte 4: tecniche di prova e di misura.
- NORMA IEC 61000 - 4 - 7
Class. CEI 210-70 - CT 210 - Fascicolo 6995 - Anno 2003 - Edizione *Seconda*
Compatibilità elettromagnetica (EMC)
Parte 4-7: *Tecniche di prova e misura - Guida generale per le misure di armoniche e interarmoniche e relativa strumentazione, applicabile alle reti di alimentazione ed agli apparecchi ad esse connessi* [15];
- NORMA IEC 61000-4-15
Class. CEI 210-48 - CT 210 - Fascicolo 11869 E - Anno 2012
Compatibilità elettromagnetica (EMC)

Parte 4-15: *Tecniche di prova e di misura - Flickermetro - Specifiche funzionali e di progetto* [16].

- NORMA IEC 61000-4-30

Class. CEI 210-73 - CT 210 - Fascicolo 11557 - Anno 2011

Compatibilità elettromagnetica (EMC).

Parte 4-30: *“Tecniche di prova e di misura - Metodi di misura della qualità della potenza”* [11].

Normativa CEI

- CEI EN 50160

Class. CEI 8-9 - CT 8/28 - Fascicolo 11266 - Anno 2011

“Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione della energia elettrica” [17];

Questa norma descrive i livelli minimi entro i quali gli utenti possono aspettarsi rimangano le caratteristiche della tensione.

1.2.3 Definizione di qualità del servizio

Riprendendo la definizione della norma CEI EN 50160 [17], con l'espressione *Power Quality* si possono indicare tutte le problematiche relative ai disturbi sulla tensione di alimentazione fornita da una rete elettrica o sulla corrente assorbita da un impianto elettrico quando non sono verificate le condizioni ideali di:

- costanza della frequenza;
- purezza della forma d'onda, assenza di armoniche di entità non trascurabile;
- assenza di squilibri: mancanza di componenti inverse e omopolari;
- regolarità, limitazione delle fluttuazioni della tensione nel tempo;
- continuità del servizio.

Secondo definizioni più recenti la PQ si può esprimere fondamentalmente in due concetti, qualità delle tensioni nodali e qualità delle correnti. La prima è riferita alla capacità del sistema di alimentare i carichi senza creare malfunzionamenti. Mentre la seconda definizione è riferita alla capacità dei carichi di funzionare senza creare disturbi.

1.3 INQUINAMENTO ARMONICO

Qualunque disturbo presente sulla corrente prelevata da un carico provoca una corrispondente caduta di tensione sull'impedenza equivalente della sorgente, dando

origine ad un disturbo sulla tensione di alimentazione degli altri carichi; questo causa disturbi nella corrente eventualmente prelevata a partire da questa tensione distorta, anche se l'utilizzatore è un carico lineare e bilanciato. A questo punto l'analisi di tale corrente non è più in grado di fornire informazioni attendibili circa la responsabilità per il deterioramento della PQ. In questo senso la rete si comporta da portatore sano di disturbi; è quindi necessario saper riconoscere e misurare ciò che eventualmente si sovrappone alle condizioni standard di esercizio per cercare di attribuirne le responsabilità.

Tra i disturbi di PQ assume notevole rilevanza l'inquinamento armonico, rappresentato dalla presenza non desiderata in una rete elettrica di componenti armoniche di frequenza multipla della fondamentale. In generale, negli impianti, quando si parla di armoniche ci si riferisce alle armoniche di corrente, infatti, esse causano la maggior parte degli effetti dell'inquinamento armonico e sono dunque considerate le principali responsabili di tale disturbo. Le armoniche di corrente non sono un fenomeno nuovo nelle reti di potenza. Le prime armoniche furono introdotte in rete negli anni '50 dai raddrizzatori a vapori di mercurio usati per convertire la corrente da alternata in continua per la trazione ferroviaria e per azionamenti DC a velocità variabile. In passato le cause dell'inquinamento armonico erano dovute principalmente a fenomeni transitori, come la saturazione dei nuclei dei trasformatori a causa di sovratensioni, l'inserzione e la disinserzione di carichi, l'eliminazione di guasti. Più recentemente la gamma ed il numero di unità e di apparecchiature che causano armoniche sono costantemente cresciuti, tanto che attualmente si riscontra una distorsione permanente delle forme d'onda in rete.

Nel corso degli ultimi decenni, infatti, si è verificato un significativo aumento di carichi che anche se alimentati da tensioni sinusoidali assorbono correnti fortemente deformate. Tra questi, ad esempio, sono annoverati i piccoli gruppi di continuità, gli UPS, i computer, i dispositivi elettronici di potenza utilizzati nei convertitori, gli inverter per azionamenti industriali, le lampade fluorescenti, i forni ad arco ecc. I carichi non lineari, ma soprattutto quelli tempo-varianti, rappresentano le principali cause di inquinamento armonico delle reti di media e bassa tensione.

Negli ultimi anni, inoltre, si è assistito alla crescente diffusione in rete di impianti di generazione distribuita, cioè impianti di produzione di piccola taglia, spesso alimentati da fonti rinnovabili (microturbine, impianti fotovoltaici, turbine

eoliche, celle a combustibile, ecc.) che sono spesso causa di ulteriore inquinamento armonico.

Le armoniche si propagano nel sistema di distribuzione, interessando circuiti non progettati per trasportarle. Di conseguenza, in tutte le fasi di vita del sistema elettrico, dalla pianificazione all'esercizio, sarebbe opportuno considerare attentamente le armoniche ed i loro effetti collaterali sui principali elementi degli impianti per prevenire danni e disservizi e garantire un'equa ripartizione degli oneri necessari a mantenere nel tempo un corretto funzionamento del sistema elettrico nel suo complesso.

1.3.1 Armoniche di tensione e di corrente

Un segnale è periodico nel tempo quando si ripete ogni T secondi. Se T è il periodo di ripetizione, $f=1/T$ è la frequenza fondamentale e $\omega=2\pi f$ è la pulsazione fondamentale del segnale.

Come noto la rappresentazione nel dominio della frequenza per la forma d'onda di una grandezza periodica è data dalla serie di Fourier, costituita da una componente fondamentale f da componenti sinusoidali di diversa ampiezza e di frequenza hf multipla della fondamentale, dette appunto armoniche.

Le correnti armoniche prodotte dai carichi non lineari provocano sull'impedenza di linea cadute di tensione dello stesso ordine di armonicità e di conseguenza distorcono la tensione di alimentazione, che generalmente all'origine è invece una forma d'onda molto pura, con distorsione inferiore all'1%.

1.3.2 La Risonanza armonica nelle linee di distribuzione

Un problema ancora più importante si verifica quando la distorsione in linea raggiunge valori elevati e diventa consistente il pericolo di risonanze tra il sistema di rifasamento (capacità equivalente dei condensatori) e l'induttanza equivalente della rete.

La risonanza si presenta quando la reattanza induttiva e capacitiva si eguagliano. Di conseguenza, si parlerà di circuito risonante serie se l'induttanza e la capacità sono connesse in serie oppure di circuito risonante parallelo se l'induttanza e la capacità sono connesse in parallelo. Una risonanza serie e una risonanza parallelo possono essere presenti nella stessa rete. La risonanza avviene ad una precisa frequenza, detta appunto frequenza di risonanza f_r :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$

Se si ha risonanza serie, l'impedenza totale teoricamente si annulla:

$$Z_{tot}^* = j(X_L - X_C) = 0 \quad (1.2)$$

Dualmente, in presenza di risonanza parallelo, l'impedenza totale tende all'infinito:

$$Z_{tot}^* = \frac{(X_L * X_C)}{j(X_L - X_C)} \rightarrow \infty \quad (1.3)$$

Se un circuito risonante serie è alimentato da una tensione alternata con una frequenza prossima alla frequenza di risonanza può verificarsi un'amplificazione della corrente assorbita che può provocare disturbi, sovracorrenti e anche il danneggiamento dei componenti della rete.

Viceversa, qualora un circuito risonante parallelo è alimentato da armoniche di corrente di carichi distorcenti può verificarsi una sovratensione in corrispondenza dell'armonica di risonanza. In assenza di armoniche e nell'ipotesi che la frequenza di risonanza sia sufficientemente diversa dalla frequenza fondamentale del sistema di alimentazione, non si verificano sovracorrenti nelle linee.

1.3.3 Effetti delle armoniche sui componenti di impianto

Diversi sono gli effetti che armoniche di tensione e/o di corrente possono produrre in un sistema elettrico. In particolare, nelle reti di trasmissione e distribuzione la presenza di correnti armoniche causa perdite addizionali e cadute di tensione armonica lungo le linee, nei trasformatori nei motori, nei condensatori ecc. Di seguito si illustrano caso per caso gli effetti provocati dall'inquinamento armonico [18].

Trasformatori di potenza

I trasformatori sono componenti statici e come tali non risentono in modo grave di dissimmetrie nella tensione contenute in qualche percento.

L'alimentazione con onda non sinusoidale comporta variazioni sulle perdite a vuoto, le perdite nel ferro, principalmente localizzate nel circuito magnetico. Queste ultime sono costituite da perdite per isteresi magnetica e perdite per correnti parassite che, a frequenza costante, risultano proporzionali al quadrato del valore massimo dell'induzione.

Per una valutazione approssimata delle perdite nel ferro con onda non sinusoidale si può ricorrere alla formula semplificata proposta dalle norme CEI [19], ma in generale si può affermare che, se la forma d'onda non è fortemente distorta e con valore efficace pari alla corrispondente tensione sinusoidale, le perdite nel ferro non variano di molto. Si deve anche tenere presente che in una macchina a pieno carico le perdite a vuoto rappresentano solamente il 20÷25% delle perdite totali.

Per quanto riguarda il problema delle perdite addizionali dovute al carico, l'argomento è piuttosto complesso in quanto le leggi di variazione di dette perdite dipendono da numerosi fattori quali la frequenza, la temperatura, la resistività, il tipo di costruzione degli avvolgimenti, ecc. Il CENELEC (recepita in Italia con la norma CEI EN 50541-1 [20]) ha emesso un documento che fornisce all'utilizzatore una guida per determinare la caricabilità dei trasformatori da distribuzione in olio nel caso di correnti di carico ad alto contenuto armonico. Per le macchine da distribuzione la distorsione armonica totale accettabile non deve eccedere il 5%. Con fattori armonici superiori si deve tener presente che le perdite addizionali aumentano e, di conseguenza, a parità di valore efficace della corrente, la sovratemperatura degli avvolgimenti risulta più elevata.

Per sovratemperature costanti, la valutazione della potenza equivalente può essere fatta riferendosi alla corrente sinusoidale che causa le stesse perdite di quella non sinusoidale.

In regime armonico le perdite addizionali, intese come differenza tra le perdite dovute al carico totali e quelle ohmiche, non sono proporzionali al quadrato della frequenza come normalmente considerato. Tale situazione provoca danni all'isolamento e riduzione della vita media dei dispositivi che sono progettati per lavorare in regime sinusoidale.

Motori asincroni

L'alimentazione con tensioni dissimmetriche comporta nelle macchine rotanti in genere, e quindi anche nei motori asincroni trifase, la presenza di campi rotanti prodotti dalla componente inversa delle correnti di induttore che causano sollecitazioni termiche severe, a volte non tollerabili, nonché effetti sulle coppie elettromagnetiche utili (riduzione della coppia meccanica utile all'albero). Se la macchina asincrona funziona da motore ed è presente una coppia resistente sull'albero, ne consegue che alla corrente normale di carico si sovrappone quella dovuta alla presenza del campo inverso. Si osserva che la condizione limite della

dissimmetria delle tensioni si verifica nel caso di interruzione di una fase dell'alimentazione, condizione che notoriamente non è prevista nel funzionamento del motore. In sede normativa si è introdotto il limite del 5% nel grado di dissimmetria tollerabile da un motore. Ove questo limite fosse superato, è necessario ridurre adeguatamente la potenza erogabile all'albero rispetto a quella nominale.

La presenza di armoniche nel sistema delle tensioni di alimentazione comporta la formazione di campi rotanti parassiti che influiscono sul rendimento e sulla potenza che il motore può fornire all'albero. Si faccia riferimento al caso di sistemi armonici simmetrici che danno luogo a campi rotanti diretti o inversi. Si considerino i campi di 5^a e 7^a armonica.

Il primo, di tipo inverso, tende a far ruotare la macchina in senso inverso e genera f.e.m. nel rotore che a loro volta danno luogo a correnti parassite il cui campo rotante crea una coppia frenante. Ne consegue un aumento delle perdite negli avvolgimenti e una riduzione della coppia motrice disponibile all'albero.

Il campo dovuto alla presenza della 7^a armonica è invece diretto e tende a far ruotare la macchina nello stesso verso del campo principale, ma ha velocità 7 volte maggiore. Questa coppia motrice è modesta rispetto alla principale, non riesce a portare il motore a tale velocità: quest'ultimo si comporta quindi, per l'armonica considerata, come se fosse permanentemente in fase di avviamento, con ulteriore aumento delle perdite negli avvolgimenti. Se la distorsione armonica totale della tensione non supera il 5%, il fenomeno considerato assume proporzioni relativamente modeste e influisce in modo non rilevante sul comportamento della macchina.

Motori sincroni

La presenza di campi rotanti prodotti dalle correnti di sequenza inversa prodotte dall'alimentazione con un sistema dissimmetrico di tensioni comporta sollecitazioni termiche severe, che potrebbero non essere tollerate, nonché effetti sulle coppie elettromagnetiche utili. Nei motori sincroni muniti di avvolgimenti smorzatori questi ultimi sono investiti dal flusso variabile legato al campo inverso. Le correnti indotte a frequenza doppia della nominale sono legate all'ampiezza della componente inversa e ad una reattanza assai prossima a quella sub-transitoria della macchina. Il dimensionamento termico della gabbia è previsto per sopportare in regime continuativo una modesta quota di componente inversa di corrente,

raramente superiore al 10% di quella nominale (rilevata sull'avvolgimento di indotto).

Condensatori

Per esaminare il problema delle armoniche in riferimento ai condensatori è bene ricordare che, per ogni componente armonica, vale la seguente relazione:

$$I_h = h \cdot \omega \cdot C \cdot U_h \quad (1.4)$$

dove:

- I_h : valore efficace della corrente alla h-esima armonica;
- h: ordine dell'armonica;
- ω : pulsazione alla fondamentale;
- C: capacità del condensatore;
- U_h : valore efficace della tensione alla h-esima armonica.

La (1.4) evidenzia che il rapporto U_h/I_h non è costante al variare di h e quindi, in presenza di armoniche di tensione, la corrente assorbita dal condensatore risulta più fortemente deformata. Il suo valore efficace può risultare notevolmente più elevato di quello che si avrebbe con onda sinusoidale. In conseguenza di ciò si possono rilevare distorsioni nella tensione anche in punti remoti rispetto al carico distorcente. Questo causa perdite addizionali, danni all'isolamento e riduzione della vita media dei dispositivi, eventuali risonanze serie e parallelo nelle reti provocate da capacitori per il rifasamento.

Le Norma CEI di prodotto [21] e la successiva variante [22], per tenere in conto questo fenomeno, prescrivono che i condensatori debbano poter sopportare una corrente pari a 1.5 volte quella corrispondente all'onda di tensione sinusoidale.

Cavi

La presenza di armoniche di corrente rappresenta sicuramente, fra tutti i disturbi di PQ considerati, il problema di maggiore rilevanza per i cavi. Gli effetti di tale fenomeno possono portare a condizioni di sovraccarico sia sui conduttori di fase sia sull'eventuale conduttore di neutro e al surriscaldamento dei cavi di distribuzione, che implica la necessità di utilizzare cavi di sezione maggiore. Per quanto riguarda i conduttori di fase si può osservare che tali condizioni di funzionamento provocano

l'aumento delle perdite per effetto pelle² e comportano la riduzione delle portate ammissibili. Il problema è più sentito per i cavi di sezione elevata, dove tali perdite sono proporzionalmente maggiori.

Nei conduttori percorsi da corrente alternata il rapporto tra la resistenza in alternata e la resistenza in continua dipende dalla forma del conduttore e dalla radice quadrata della frequenza. La maggiore frequenza delle correnti armoniche rispetto a quella di rete, assunta come riferimento, provoca l'aumento della componente resistiva, ma ancor più quello della componente reattiva dell'impedenza e di conseguenza si ha una crescita, anche sensibile, delle cadute di tensione sugli stessi cavi. In regime armonico queste ultime non possono più essere calcolate sulla base dei parametri indicati sui cataloghi, ma meritano di essere accuratamente valutate stimando il contenuto armonico atteso della corrente.

Per il conduttore di neutro nelle stesse condizioni risultano opportune alcune osservazioni preliminari.

In un sistema trifase collegato a stella, la corrente nel conduttore di neutro è la somma delle tre correnti di linea. In un sistema trifase di correnti equilibrate, sfasate di $1/3$ di periodo, la somma delle correnti in ogni istante è nullo e la corrente di neutro risulta quindi nulla. Normalmente nei sistemi trifase di potenza che alimentano carichi monofase si manifestano correnti di linea non equilibrate che conducono a correnti circolanti nel neutro tipicamente modeste. In presenza invece di condizioni armoniche i carichi, anche perfettamente equilibrati, possono provocare una corrente rilevante nel neutro, in quanto la somma delle tre correnti di fase non sinusoidali, anche se di valore efficace pari all'equivalente condizione sinusoidale, non è necessariamente pari a zero. Per esempio correnti equilibrate con forma d'onda quadra, daranno come risultato una significativa corrente di neutro. Nel conduttore di neutro, infatti, le armoniche di indice multiplo di tre (la terza, la sesta, la nona, ...) si sommano aritmeticamente, invece di annullarsi, dal momento che sono sfasate nel tempo di $1/3$ di periodo rispetto al periodo della fondamentale, sono cioè tra loro in fase (componenti omopolari).

Se invece il sistema trifase non è simmetrico in partenza, a ciascuna armonica corrisponderà un sistema non simmetrico scomponibile mediante il teorema di

² L'effetto pelle (in inglese *skin effect*) è la tendenza di una corrente elettrica alternata a distribuirsi dentro un conduttore in modo non uniforme: la sua densità è maggiore sulla superficie ed inferiore all'interno. Questo comporta un aumento della resistenza elettrica del conduttore ovvero comporta una maggiore dissipazione di potenza a parità di corrente applicata o una minore corrente a parità di tensione applicata.

Fortescue [23], o anche “metodo delle componenti simmetriche”, in terne di sequenza diretta, inversa e omopolare.

In tali condizioni la generazione di calore all'interno del cavo per effetto Joule risulta evidentemente maggiore rispetto alle condizioni ideali e la portata della conduttura è ridotta. L'ampiezza della corrente di neutro dovuta alla terza armonica potrebbe superare in ampiezza la corrente di fase alla frequenza di rete, in tal caso la corrente di neutro dovrebbe essere considerata ai fini del dimensionamento dei cavi del circuito. Il problema che si pone risulta, dunque, quello di dimensionare correttamente la sezione del conduttore di neutro in relazione alla corrente che lo attraverserà effettivamente in esercizio. Pur non essendo possibile determinare la corrente di neutro, in termini assoluti, se non conoscendo la forma d'onda reale o teorica delle correnti di carico, si può fare riferimento ad un valore che può essere pari a 1.61 volte la corrente di fase nel caso di carichi costituiti da computer, ma che può raggiungere il valore di 1.73 volte la corrente di fase nelle condizioni peggiori con raddrizzatori con angoli di conduzione pilotati e pari a 60° [24].

A rigore i calcoli degli effetti delle armoniche di corrente dovrebbero essere condotti anche in funzione delle dimensioni del conduttore.

La situazione risulta più onerosa quando il carico non è più equilibrato ed in particolare quando solo due fasi su tre sono caricate, in quanto in questa situazione il neutro porterà una corrente armonica in aggiunta a quella di squilibrio. Attenzione particolare deve infine essere riservata ai cavi armati o dotati di schermo metallico per i quali può non risultare trascurabile anche il contributo offerto dalla circolazione delle armoniche di corrente nello stesso schermo o armatura.

Infine, c'è da tener conto che le armoniche provocano un incremento del valore efficace della corrente; nei cavi elettrici tale effetto è maggiormente evidente alle alte frequenze poiché si verifica l'*effetto pelle* citato in precedenza.

Impianti di terra

La presenza di carichi distorcenti può provocare elevate e permanenti correnti di terra (tipicamente a frequenze multiple della fondamentale).

I filtri passivi di potenza utilizzati per migliorare le caratteristiche della forma d'onda della tensione di alimentazione possono provocare la circolazione di correnti, anche di considerevole ampiezza, nel terreno. Il fenomeno può portare, anche escludendo eventuali problemi legati alla sicurezza per le persone (elevate e persistenti tensioni di passo), a disturbi in apparecchiature di segnale. Il problema

non ammette una regola risolutiva semplice, ma può essere affrontato ricorrendo ad accurati studi degli stessi impianti e ricorrendo a conduttori di terra isolati e separati per i diversi carichi [25].

1.3.4 Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica

Sia U_n la tensione nominale di sistema, tensione che caratterizza o identifica un sistema è alla quale si riferiscono alcune caratteristiche di funzionamento. Si definisce come tensione di alimentazione il valore efficace della tensione in un dato istante ai terminali della fornitura, misurato in un intervallo assegnato [17].

Le caratteristiche della tensione e della corrente variano in modo aleatorio sia nel tempo, con riferimento ad un qualunque istante assegnato, sia nella posizione, con riferimento ad uno specifico terminale di consegna.

In Tabella 1.1 si riportano alcune delle principali caratteristiche della tensione ai terminali di alimentazione degli utenti delle reti pubbliche di distribuzione di energia elettrica in media e bassa tensione in condizioni di esercizio normale.

Ovviamente i valori espressi nella tabella non si applica in condizioni anormali di esercizio, incluse le seguenti:

- condizioni di esercizio provvisorie adottate per mantenere alimentata la rete degli utenti durante le condizioni in caso di guasto, di lavori di manutenzione e costruzione o per limitare l'estensione e la durata di un'interruzione dell'alimentazione;
- in caso di non conformità di un impianto o di un'apparecchiatura di un utente della rete alle relative norme o alle prescrizioni tecniche di connessione, stabilite dalle autorità pubbliche o dall'operatore della rete di distribuzione, compresi i limiti per l'emissione di disturbi condotti;
- in condizioni eccezionali, in particolare,
 - condizioni climatiche eccezionali e altri disastri naturali;
 - interferenze da parte di terzi;
 - atti dell'autorità pubblica;
 - manifestazioni sindacali (soggette a obblighi legali);
 - forza maggiore;
 - calo di potenza dovuto ad eventi esterni.

Tabella 1.1: Caratteristiche della Tensione e della frequenza per la Distribuzione Pubblica [17]

Parametro	Descrizione	Bassa Tensione (BT) tensione il cui valore efficace nominale è $U_n \leq 1 \text{ kV}$	Media Tensione (MT) tensione il cui valore efficace nominale è $1 \text{ kV} < U_n \leq 36 \text{ k}$
<i>Variazioni della tensione di alimentazione</i>	in condizioni normali di esercizio, esclusi i periodi con interruzioni	$\pm 10 \% \text{ di } U_n$	$\pm 10 \% \text{ di } U_n$
	forniture di elettricità in reti non interconnesse a sistemi di trasmissione o per particolari utenti lontani dalla rete	+ 10 % di U_n - 15 % di U_n	+ 10 % di U_n - 15 % di U_n
<i>Frequenza</i>	sistemi con collegamento sincrono ad un sistema interconnesso	50 Hz $\pm 1 \%$ (cioè 49,5 Hz... 50,5 Hz) durante il 99,5 % di un anno; 50 Hz + 4 % / - 6 % (cioè 47 Hz... 52 Hz) durante il 100 % del tempo.	50 Hz $\pm 1 \%$ (cioè 49,5 Hz... 50,5 Hz) durante il 99,5 % di un anno; 50 Hz + 4 % / - 6 % (cioè 47 Hz... 52 Hz) durante il 100 % del tempo.
	sistemi senza collegamento sincrono ad un sistema interconnesso (isola)	50 Hz $\pm 2 \%$ (cioè 49 Hz... 51 Hz) durante il 95 % di una settimana; 50 Hz $\pm 15 \%$ (cioè 42,5 Hz... 57,5 Hz) durante il 100 % del tempo.	50 Hz $\pm 2 \%$ (cioè 49 Hz... 51 Hz) durante il 95 % di una settimana; 50 Hz $\pm 15 \%$ (cioè 42,5 Hz... 57,5 Hz) durante il 100 % del tempo.
<i>Squilibrio della tensione di alimentazione</i>	In condizioni normali di esercizio, durante ciascun periodo di una settimana	il 95 % dei valori medi efficaci, mediati su 10 min, della componente a sequenza inversa della tensione di alimentazione deve essere compreso nell'intervallo tra lo 0 % e il 2 % della componente a sequenza diretta.	il 95 % dei valori medi efficaci, mediati su 10 min, della componente a sequenza inversa della tensione di alimentazione deve essere compreso nell'intervallo tra lo 0 % e il 2 % della componente a sequenza diretta.
<p>NOTA 1: In alcune aree, si possono avere squilibri fino a circa il 3 % ai terminali di alimentazione trifase.</p> <p>NOTA 2: Nella presente Norma sono indicati solo valori corrispondenti alla componente a sequenza inversa della tensione, perché essa è la componente rilevante per possibili interferenze ad apparecchi connessi al sistema.</p>			

1.3.5 Limiti sulle Tensioni armoniche in Bassa e Media Tensione

Come già descritto, con il termine tensione armonica si indica una tensione sinusoidale la cui frequenza è un multiplo intero della frequenza fondamentale della tensione di alimentazione. Le tensioni armoniche possono essere valutate:

- ✓ singolarmente, secondo la loro ampiezza relativa (u_h) che è la tensione armonica rapportata alla tensione fondamentale u_1 , dove h rappresenta l'ordine dell'armonica;
- ✓ globalmente, per esempio con il fattore di distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD), calcolato utilizzando la seguente formula (1.5):

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \leq 8\% \quad (1.5)$$

Tale distorsione armonica totale della tensione di alimentazione (comprese tutte le armoniche fino al 40° ordine)³ deve essere inferiore o uguale all'8% [17].

Le armoniche della tensione di alimentazione sono principalmente dovute a carichi non lineari degli utenti della rete connessi a tutti i livelli di tensione del sistema di alimentazione. Le correnti armoniche circolanti attraverso le impedenze del sistema contribuiscono ad accrescere le tensioni armoniche. Le correnti armoniche e le impedenze del sistema, e di conseguenza le tensioni armoniche ai terminali di alimentazione, variano nel tempo.

In [17], inoltre, si riporta che in condizioni normali di esercizio, durante ciascun periodo di una settimana, il 95 % dei valori efficaci di ogni singola tensione armonica, mediati sui 10 minuti, deve essere inferiore o uguale ai valori indicati nella Tabella 1.2. Le risonanze possono causare tensioni più elevate per una singola armonica.

³ La limitazione posta al 40° ordine è convenzionale. Inoltre, nel caso di MT, a seconda del tipo di trasformatore di tensione usato, la misura di armoniche di ordine superiore può non essere affidabile; ulteriori informazioni sono riportate nella EN 61000-4-30:2009.

Tabella 1.2 — Valori delle singole tensioni armoniche ai terminali di alimentazione, fino al 25° ordine, espressi in percentuale della tensione fondamentale u_1

Tensioni armoniche BT					
Armoniche dispari				Armoniche pari	
Non multiple di 3		Multiple di 3			
Ordine h	Ampiezza relativa u_h	Ordine h	Ampiezza relativa u_h	Ordine h	Ampiezza relativa u_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				
Tensioni armoniche MT					
Armoniche dispari				Armoniche pari	
Non multiple di 3		Multiple di 3			
Ordine h	Ampiezza relativa u_h	Ordine h	Ampiezza relativa u_h	Ordine h	Ampiezza relativa u_h
5	6,0 %	3	5,0 % ^a	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				
NOTA Valori corrispondenti alle armoniche superiori al 25° ordine non sono indicati, poiché essi sono generalmente piccoli, ma largamente imprevedibili a causa degli effetti di risonanza.					
^a In funzione del tipo della rete il valore della terza armonica può essere sostanzialmente più basso.					

CAPITOLO 2.

SOLUZIONI PER LA MITIGAZIONE DELLA DISTORSIONE/PROPAGAZIONE ARMONICA

2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo si affronta lo studio delle principali metodologie proposte in letteratura in materia di filtraggio e smorzamento delle armoniche presenti in una rete elettrica di distribuzione. In particolare, nel proseguo, vengono analizzate le tecniche di filtraggio tese a ridurre l'inquinamento armonico e la propagazione armonica presente nelle reti elettriche.

2.2 Classici provvedimenti per la riduzione dell'Inquinamento Armonico

Lo spettro delle tecnologie impiegabili varia continuamente, sia in funzione dell'efficienza sia dell'attrattiva economica. Passata l'era dei filtri passivi (parallelo di induttori e di capacitori, il cui scopo è quello di cancellare opportune armoniche di tensione /corrente), attualmente, trovano una forte applicazione le soluzioni basate sull'impiego dell'elettronica di potenza. A livello internazionale queste soluzioni vengono denominate “*dispositivi Custom Power*” .

Nella categoria dei dispositivi Custom Power rientrano i “filtri attivi” di corrente [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]. L'obiettivo di un filtro attivo è quello di consentire, all'insieme costituito da un carico distorto e il filtro, l'assorbimento di una corrente sinusoidale; ciò avviene misurando le correnti armoniche assorbite/iniettate dal carico nel punto di connessione alla rete, detto punto di accoppiamento comune (Point Common Coupling, PCC), e facendo in modo che il filtro assorba/inietti correnti armoniche di segno opposto (Fig. 2.1).

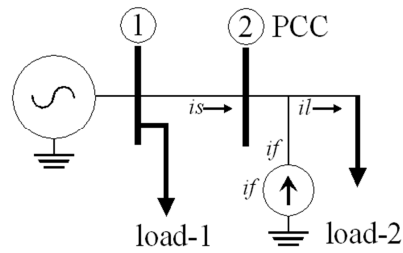


Fig. 2.1 - Filtro attivo di corrente

I Filtri attivi convenzionali, come quello mostrato in Fig. 2.1, sono filtri attivi (*Active Power Filter*, APF) di corrente e vengono impiegati affinché il contenuto armonico della corrente assorbita da un carico distorto non superi i limiti previsti dagli standard internazionali riguardanti la Power Quality.

E pertanto, con riferimento alla Fig. 2.1 dove load-2 rappresenta un carico distorto, misurata la corrente distorta i_1 assorbita dal carico distorto, il filtro attivo di corrente inietta una corrente i_f opportunamente distorta in modo che la corrente i_s sia il più possibile sinusoidale e, nel caso ideale, alla sola frequenza di rete. La metodologia utilizzata è sostanzialmente semplice e prevede che la i_f sia dedotta dalle sole componenti armoniche, multiple di quella fondamentale, della corrente i_1 .

L'efficienza di un filtro attivo di corrente ha alcuni limiti che diventano evidenti allorquando più carichi elettrici, distorti e non, sono connessi al nodo di rete PCC o quando la tensione al nodo PCC presenta una distorsione armonica causata da carichi elettrici distorti posti a monte dello stesso nodo.

2.3 CLASSICI PROVVEDIMENTI PER LO SMORZAMENTO DELLA RISONANZA ARMONICA

Il termine propagazione armonica indica il fenomeno della amplificazione della ampiezza delle armoniche di tensione o corrente lungo una linea di distribuzione [33]; detta amplificazione è causata dalla risonanza tra le induttanze di linea e i condensatori derivati in parallelo per la correzione del fattore di potenza. Le capacità relative agli accoppiamenti della linea elettrica col terreno sono solitamente trascurabili.

Come ben noto il fenomeno della risonanza ad una data frequenza si manifesta allorquando le reattanze induttive e capacitive del circuito elettrico equivalente alla linea di distribuzione sono uguali.

Nei sistemi elettrici di potenza, il fenomeno della propagazione armonica può essere così rilevante da richiedere una azione di mitigazione infatti, nel caso di una linea di distribuzione come quella illustrate in Fig. 2.2, l'ampiezza di una generica armonica di tensione al nodo 1 potrà amplificarsi tanto da risultare ben 4 volte maggiore al nodo 4. È evidente che, pur in assenza di carichi distortenti lungo la linea elettrica, le utenze che si connettono a fine linea subiranno gli effetti di una tensione di pessima qualità.

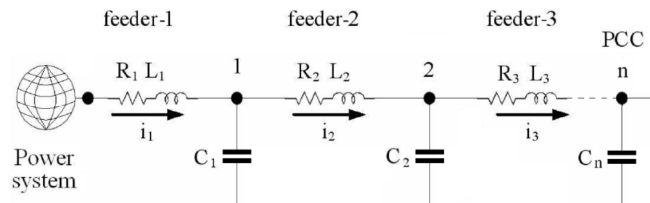


Fig. 2.2 – Rete radiale di distribuzione

Per risolvere o mitigare i problemi di Power Quality connessi al fenomeno della propagazione armonica, in letteratura sono stati proposti diversi filtri attivi operati come smorzatori di risonanza (in inglese *resonance damper*) [34], [35], [36], [37]; tra queste proposte spicca certamente quella proposta in [38] dove un filtro attivo di potenza, nominato *Active Resonance Damper (ARD)*, è posto a fine della linea di distribuzione così da smorzare la propagazione armonica lungo l'intera linea, come illustrato in Fig. 2.2.

Al fine di smorzare la propagazione armonica, *H. Akagi et alii* [38] hanno proposto un Filtro Attivo derivato in parallelo per lo smorzamento delle armoniche lungo una linea di distribuzione. Tale filtro è installato presso il punto finale della linea di distribuzione e funziona come una resistenza in parallelo per armoniche di tensioni e correnti. Il funzionamento di questo filtro, tuttavia, provoca un caso indesiderato in cui la propagazione armonica è amplificata dal funzionamento stesso del filtro attivo.

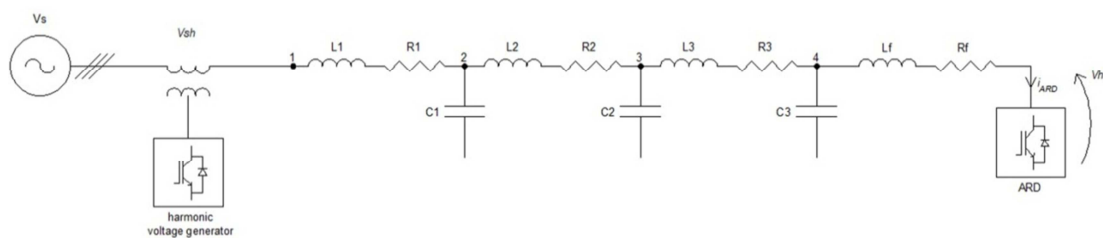


Fig. 2.3 – Modello semplificato di una rete radiale di distribuzione con lo smorzatore ARD installato a fine linea

Per superare l'inconveniente del fenomeno della propagazione armonica in [36] si propone una metodologia basata sulla teoria circuitale delle costanti distribuite, in cui un filtro attivo agisce come un terminatore di impedenza in modo da essere uguale all'impedenza caratteristica del sistema di distribuzione. Mediante questo approccio, la propagazione armonica può essere - teoricamente - soppressa.

Tuttavia, nella pratica è difficile usare questa metodologia, in quanto l'impedenza caratteristica della rete non può essere facilmente determinata.

2.3.1 Uno smorzatore attivo di risonanza

In [37] si illustra uno smorzatore attivo di risonanza, denominato ARD, il quale smorza la propagazione armonica lungo l'intera linea e riduce, inoltre, l'inquinamento armonico globale. Tale riduzione deve essere intesa come un "sottoprodotto benvenuto" - *welcome by-product* - in quanto l'ampiezza di alcune tensioni armoniche potrebbe peggiorare durante lo smorzamento di tale propagazione. L'applicazione dello smorzatore armonico attivo ARD necessita del calcolo dell'impedenza caratteristica della linea, la quale può cambiare in maniera rapida a causa della connessione/disconnessione di carichi e/o delle batterie di condensatori per il rifasamento. Il calcolo dell'impedenza caratteristica di linea non è semplice e potrebbe restituire valori inesatti pregiudicando l'efficacia dello smorzatore di risonanza attivo ARD.

Il principio di funzionamento dell'ARD si basa sul concetto del terminatore da 50Ω in una linea di segnale di trasmissione ovvero l'ARD rappresenta, alla frequenza fondamentale, un resistore con una elevata resistenza mentre alle frequenze di risonanza rappresenta una resistenza controllata. Dai lavori presenti in letteratura, al fine di smorzare il più possibile la propagazione armonica, l'ARD viene posizionato alla fine della linea di alimentazione [34], [38], ed inietta delle correnti armoniche determinate nel modo seguente:

$$I_{ARD}^h = k_v \cdot V_{PCC}^h \quad (2.1)$$

dove:

- I_{ARD}^h è la corrente iniettata alla h-esima armonica;
- k_v è il coefficiente di proporzionalità (control gain);
- V_{PCC}^h è la tensione misurata al nodo PCC alla h-esima armonica;
- h indica l'ordine dell'armonica.

Il coefficiente di proporzionalità k_v è detto control gain e l'inverso di tale valore è appunto il valore di resistenza offerta al passaggio della corrente iniettata dall'ARD all'armonica considerata; poiché l'ARD deve essere "trasparente" alla frequenza fondamentale, il relativo valore di resistenza a tale frequenza è teoricamente pari ad infinito.

Il valore del coefficiente k_v è determinato come l'inverso della impedenza caratteristica della rete di distribuzione e, nel caso ideale, tale valore di impedenza è un numero reale pari alla radice quadrata del rapporto tra l'induttanza e la capacità della linea.

Il valore del segnale di controllo k_v è pari all'inverso dell'impedenza caratteristica della linea di distribuzione come riportato nella (2.2):

$$k_v = \left(\sqrt{\frac{l}{c}} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

dove l e c rappresentano, rispettivamente, l'induttanza e la capacità della linea di distribuzione.

Poiché il valore dell'impedenza caratteristica, sopra citata, può variare nel tempo, al fine di ottimizzare le performance dell'ARD, il valore di k_v dovrebbe essere calcolato in modo adattivo sebbene, come noto, il calcolo dell'impedenza di rete non è affatto compito banale [26], [33], [37], [39].

In letteratura sono stati proposti diversi stimatori di impedenza caratteristica, tra cui lo stimatore parametrico denominato *Auto Regressive Moving Average with Integration in the noise model and eXternal input* (ARIMAX) presentato in [37] il quale richiede solo 5 cicli della fondamentale per una stima soddisfacente. Il controllo dello smorzatore armonico attivo ARD che fa uso dello stimatore ARIMAX, per il calcolo del segnale di controllo in maniera adattativa, è illustrato in Fig. 2.4.

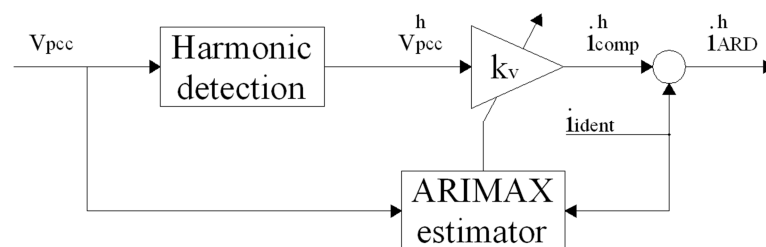


Fig. 2.4 - Controllo dell'ARD con segnale di controllo k_v adattativo

Come *harmonic detection* è stato scelto un approccio nel dominio della frequenza utilizzando la DFT implementata mediante l'algoritmo di *Goertzel* (che fa a meno di utilizzare l'aritmetica dei numeri complessi). Utilizzando la versione a finestra scorrevole si è in grado di rilevare in *real time* il contenuto armonico della tensione misurata.

Mentre con l'ausilio dello stimatore ARIMAX si è stimato il valore dell'impedenza caratteristica della rete in esame. La tecnica ARIMAX consiste nel differenziare l'output dall'ingresso n volte, dove n rappresenta il numero di integrazioni. In tal caso il tempo di convergenza è ovviamente influenzato dal numero di integratori utilizzati nel modello.

Nel lavoro proposto da Santana et al si è scelto empiricamente 2 integratori in quanto un numero elevato di integratori non miglioravano sostanzialmente la precisione della stima dei parametri necessari alla determinazione dell'impedenza caratteristica della rete.

Dalla Fig. 2.4, inoltre, si può osservare come aggiunge un rumore bianco alla corrente di compensazione per una migliore stima del k_v .

Qualora il valore di k_v è calcolato in modo adattativo allora, nel controllo dell'ARD, alla corrente di compensazione i_{comp} si sovrappone un rumore bianco (i_{ident}) necessario ad identificare l'impedenza caratteristica della linea elettrica; quindi l'estimatore cambia il valore del guadagno k_v al fine di ottimizzare lo smorzamento della propagazione armonica.

CAPITOLO 3.

FILTRI ATTIVI DI POTENZA

3.1 INTRODUZIONE

I sistemi di conversione della potenza allo stato solido in corrente alternata, che utilizzano tiristori ed altri dispositivi a semiconduttori, sono ampiamente impiegati per alimentare ad esempio i motori a velocità regolabile, i forni elettrici ed i computer. Come succede anche per i carichi non lineari, questi convertitori allo stato solido producono armoniche e potenza reattiva aggiungendo termini indesiderati alla componente fondamentale della corrente.

Inoltre, come già descritto nel capitolo precedente, nel caso di sistemi trifase, si possono avere anche squilibri ed eccessive correnti sul conduttore di neutro. Quindi, come conseguenza di tutto ciò, si hanno peggiori prestazioni del sistema ed in particolare si possono rilevare basse efficienze e bassi fattori di potenza. A causa delle armoniche, si possono inoltre provocare disturbi ed interferenze nelle linee di comunicazione situate nelle vicinanze.

Conseguentemente sono stati svolti molti studi per qualificare questi problemi e, come primo risultato, si sono ottenuti i filtri passivi. I più comuni sono i filtri $L-C$, impiegati per ridurre le armoniche, ed i condensatori, utilizzati, invece, per il rifasamento dei carichi cioè per migliorare il fattore di potenza. Tali dispositivi presentano alcuni svantaggi quali possono provvedere solo ad una compensazione fissa, non dinamica, hanno dimensioni elevate e possono essere soggetti a risonanza. A causa di tutto ciò ed al fatto che le normative sull'inquinamento armonico si sono fatte più severe, si è posta maggiore attenzione all'elettronica di potenza ed a sistemi ingegneristici per sviluppare soluzioni dinamiche e regolabili per cercare di ottenere una migliore qualità dell'energia.

In seguito a tali studi si sono ottenuti molti dispositivi, noti con il nome di filtri attivi di potenza (APF). Verranno analizzate nel seguito tutte le caratteristiche di questi filtri partendo dalla loro tecnologia per passare poi alle diverse configurazioni utilizzate, alle varie metodologie di controllo fino a giungere alle loro applicazioni.

3.2 TECNOLOGIA DEI FILTRI ATTIVI

La tecnologia dei filtri attivi è stata sviluppata per provvedere alla compensazione delle armoniche, della potenza reattiva e per ridurre la corrente sul conduttore di neutro nella linee in alternata. Essa si è evoluta negli ultimi trenta anni presentando varie configurazioni, varie strategie di controllo e vari dispositivi allo stato solido atti alla compensazione delle armoniche di tensione, alla regolazione della tensione ai morsetti dei carichi, per sopprimere il flicker e per migliorare il profilo di tensione nei sistemi trifase.

Questi obiettivi possono essere soddisfatti singolarmente oppure in appropriate combinazioni in base alle necessità, alle strategie di controllo ed alle configurazioni circuitali, le quali devono essere selezionate appropriatamente. I filtri attivi sono suddivisi in tre categorie e precisamente si hanno i filtri a 2-fili (monofase), a 3 fili ed a 4 fili in configurazioni trifase senza o con neutro che rispondono alla richiesta dei tre tipi di carico non lineare dei sistemi di potenza.

In particolare è il caso di precisare che carichi come le lampade per usi domestici, i forni, i televisori, i computer, i condizionatori, le stampanti laser, ecc., sono carichi monofase non lineari che causano problemi legati alla qualità dell'energia. I filtri attivi monofase (a 2 fili) sono stati studiati in svariate configurazioni e le strategie di controllo si sono evolute per andare incontro alle necessità dei carichi non lineari monofase.

Nel 1971 sono comparsi i primi filtri quali il filtro attivo serie, il filtro parallelo e loro combinazioni e sono stati commercializzati anche per applicazioni di gruppi di continuità (*Uninterruptible Power Supply*, UPS). Per il loro sviluppo hanno avuto grande importanza i due inverter base cioè l'inverter controllato in corrente (*Current Source Inverter*, CSI), in grado di immagazzinare potenza induttiva, e l'inverter controllato in tensione (*Voltage Source Inverter*, VSI), capace di accumulare potenza reattiva capacitiva.

Solo nel 1976 si è incominciato a parlare di filtri attivi trifase a causa del consumo sempre maggiore di potenza trifase specialmente da parte di motori a velocità variabile. Si sono così evolute combinazioni di filtri passivi e filtri attivi serie o parallelo comunemente conosciuti col nome di compensatori attivi di qualità della potenza e svariate strategie di controllo come la teoria della potenza reattiva istantanea, inizialmente sviluppata da *H. Akagi et alii* [40], la teoria di costruzione d-q sincrona, il metodo di rilevamento sincrono e il metodo del filtro a taglio.

Sui sistemi trifase a 4 fili si è evidenziato anche l'ulteriore problema legato alla corrente sul conduttore di neutro prodotta in special modo dai carichi non lineari come possono essere i calcolatori, le lampade al neon, ecc. Anche in tal caso si sono studiati

dispositivi in grado di effettuare una eliminazione/riduzione della corrente sul neutro, una compensazione delle armoniche e di potenza reattiva e una compensazione dei carichi [41].

Per poter estrarre un segnale di controllo per tali filtri sono necessarie misure e rilevazioni di varie quantità come la potenza apparente, la potenza reattiva, ecc., per cui lo sviluppo dei filtri attivi è stato seguito anche da uno sviluppo degli strumenti di misura convenzionali in modo da poter effettuare misure significative anche in caso di grandezze altamente influenzate da disturbi. Tali strumenti rilevatori sono molto importanti perché solo grazie ad essi si ha la possibilità di quantificare l'efficienza di un filtro attivo.

Uno dei maggiori fattori di avanzamento della tecnologia dei filtri attivi è stato l'avvento dei dispositivi allo stato solido a commutazione veloce. In un primo momento furono utilizzati i tiristori, i transistor a giunzione bipolare (*Bipolar Junction Transistor*, BJT) e i transistor a effetto di campo (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, MOSFET), successivamente presero il sopravvento i transistor ad induzione e i diodi controllati (*Gate Turn Off*, GTO). Al giorno d'oggi i dispositivi ideali per il controllo dei filtri attivi sono gli i transistor bipolari a gate isolato meglio noti come IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, IGBT) che, considerato anche il miglioramento della tecnologia dei sensori, hanno dato una reale spinta all'evoluzione dei filtri. Il successivo sviluppo dei filtri attivi si è avuto dalla rivoluzione della microelettronica.

Partendo dall'uso di componenti discreti analogici e digitali, la progressione è arrivata a microprocessori, microcontrollori e ai processori di segnale digitale (*Digital Signal Processor*, DSP) grazie ai quali è possibile implementare complessi algoritmi per il controllo di tali filtri attivi.

Questo sviluppo ha reso possibile l'uso di differenti algoritmi quali il Proporzionale-Integrale (P-I), il controllo a struttura variabile, la logica combinatoria e le reti neutre ottenendo in tal modo una migliore dinamica e delle migliori prestazioni.

In seguito a queste innovazioni, i filtri attivi riescono a fornire delle azioni correttive molto veloci, quasi sincrone con i cambiamenti dinamici dei carichi non lineari, provvedendo ad una quasi totale compensazione delle armoniche superiori.

3.3 CONFIGURAZIONI

I filtri attivi possono essere classificati in base al tipo di convertitore, alla topologia ed al numero di fasi. I convertitori sono di due tipi: a ponte con supporto di tensione (VSI) o di corrente (CSI); la topologia può essere parallelo, serie o una loro combinazione mentre in base alla terza classificazione si identificano filtri monofase a 2 fili oppure trifase a 3 fili o a 4 fili.

3.3.1 Classificazione in base al tipo di convertitore

La configurazione che utilizza l'inverter controllato in tensione con modulazione di larghezza d'impulso (*Pulse Width Modulation, PWM*) è mostrata in Fig. 3.1. L'elemento di accumulo dell'energia è un condensatore di grande taglia sul bus in corrente continua.

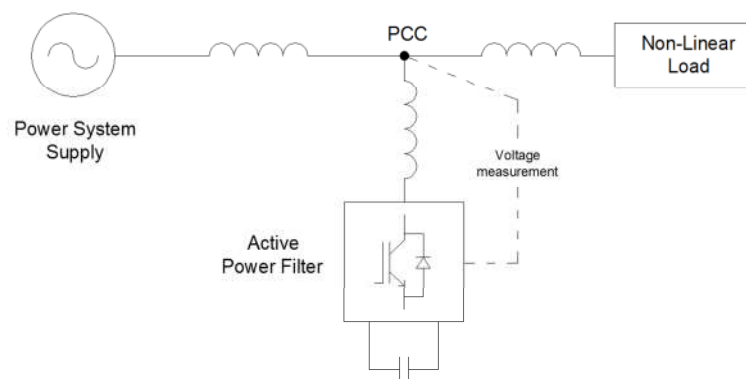


Fig. 3.1 – Filtro attivo di tensione

Questa configurazione è divenuta predominante, rispetto alla configurazione che utilizza l'inverter con supporto di corrente (CSI), grazie alle sue piccole dimensioni, alla sua economicità. Inoltre tale filtro è espandibile a più livelli, viene realizzato in versioni multistep, in modo da aumentare le prestazioni con basse frequenze di commutazione. Esso è più popolare nelle applicazioni di gruppi di continuità perché lo stesso inverter a ponte può essere usato come filtro attivo per eliminare le armoniche dei carichi non lineari.

La seconda configurazione, l'inverter con supporto di corrente (CSI), si comporta come una sorgente di corrente non sinusoidale in grado di soddisfare la richiesta di armoniche di corrente del carico non lineare. Tale configurazione può essere realizzata mediante l'utilizzo di IGBT oppure mediante dei GTO, anche se quest'ultimi presentano una ristretta frequenza di commutazione. Tali filtri sono considerati abbastanza affidabili, ma hanno alte perdite e richiedono una elevata potenza reattiva capacitiva in parallelo.

Inoltre essi non possono essere utilizzati in configurazioni in multilivello o in multistep per migliorare le prestazioni.

3.3.2 Classificazione in base alla topologia

I filtri attivi possono essere classificati in base alla topologia utilizzata; si parla in tal caso di configurazioni serie, parallelo o di una loro combinazione. Nei lavori [34], [41], [42], [43], [44] e in [45], [46], [47], [48], [49], [50], si riportano alcuni dei filtri attivi, connessi rispettivamente in serie e parallelo, presenti in letteratura.

Inoltre si può avere un'ulteriore applicazione che prevede la contemporanea presenza di un filtro attivo serie e di uno parallelo passivo; essa è comunemente conosciuta come filtro ibrido.

La Fig. 3.2 mostra un tipico esempio di filtro parallelo attivo, il più utilizzato per eliminare le armoniche di corrente, per compensare la potenza reattiva e per equilibrare il sistema di correnti. Tali dispositivi iniettano nel sistema delle correnti di compensazione le cui armoniche sono uguali e opposte in fase alle correnti armoniche prodotte dai carichi, in modo da eliminarne le armoniche e/o le componenti reattive nel punto di connessione. Possono anche essere impiegati come generatori reattivi statici nelle linee di potenza per stabilizzare e migliorare il profilo della tensione.

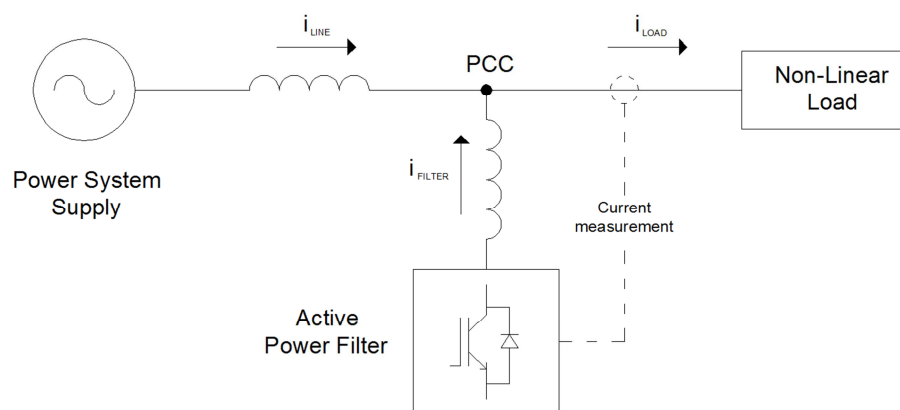


Fig. 3.2 – Filtro attivo parallelo

La Fig. 3.3 mostra un blocco base di un singolo stadio di un filtro attivo serie. Esso è collegato a monte del carico in serie con la linea principale attraverso un trasformatore di accoppiamento viene utilizzato per eliminare le armoniche di tensione, le sue componenti omopolari, per bilanciare e regolare la tensione ai morsetti del carico e per impedire la

propagazione armonica dovuta alla risonanza con le impedenze di linea e con i compensatori passivi parallelo.

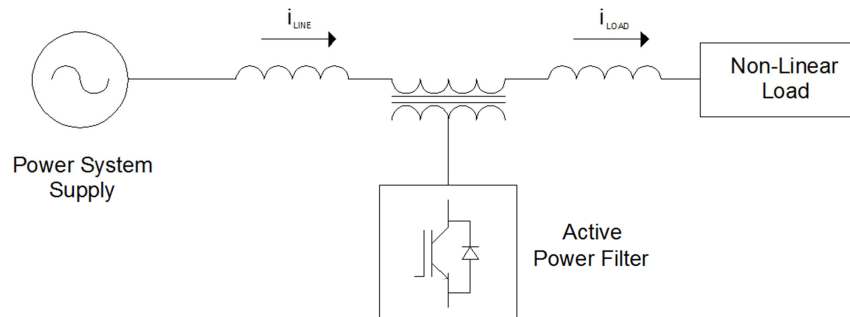


Fig. 3.3 – Filtro attivo serie

La Fig. 3.4 mostra un filtro attivo unificato (anche conosciuto come filtro attivo universale), che è una combinazione di filtri attivi serie e parallelo. Come si può vedere l'anello in continua costituito da elementi accumulatori è compreso fra due ponti generatori di corrente o di tensione funzionanti come compensatori attivi serie e parallelo.

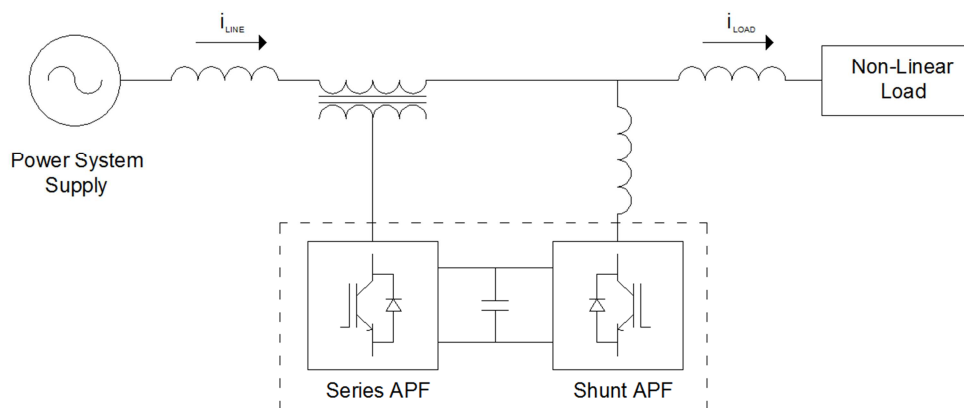


Fig. 3.4 – Filtro attivo universale

È utilizzato in configurazioni monofase o trifase. È considerato un filtro attivo ideale capace di eliminare sia le armoniche di tensione che quelle di corrente. Inoltre può essere utilizzato anche per equilibrare e regolare la tensione ai morsetti del carico e per eliminare le sequenze omopolari della corrente. I suoi principali difetti sono il costo elevato e un complesso controllo perché deve implementare un grande numero di dispositivi allo stato solido.

La Fig. 3.5 mostra un filtro ibrido che è una combinazione di filtri attivi serie e di filtri passivi parallelo. È abbastanza noto in quanto i dispositivi allo stato solido utilizzati nella sezione del filtro attivo serie possono essere di piccole taglie, quindi di basso costo. Inoltre, la maggior parte del filtro ibrido è costituita dal filtro parallelo passivo L-C che provvede all'eliminazione delle armoniche di ordine più basso. Il grande vantaggio di tale dispositivo è la capacità di ridurre le armoniche di tensione e di corrente ad un costo ragionevole.

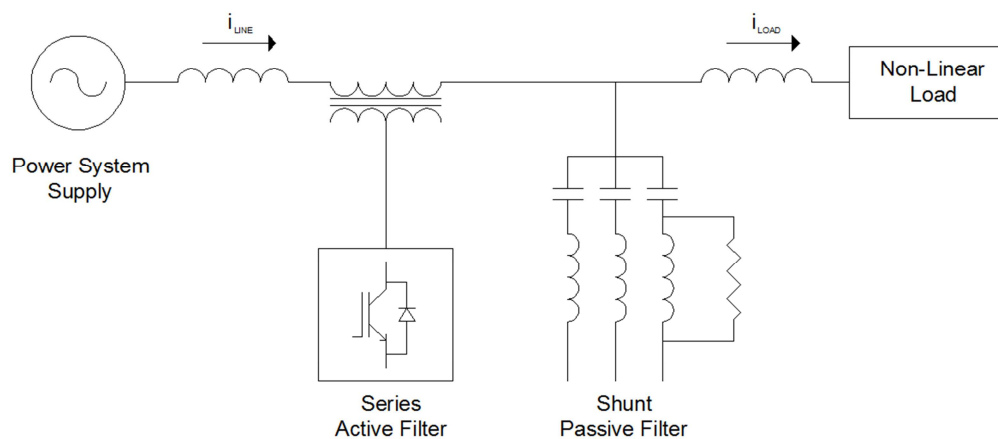


Fig. 3.5 – Filtro attivo ibrido

3.3.3 Classificazione in base alla struttura del sistema di potenza

La seguente classificazione è basata sulla potenza e/o sul sistema di carico operante in sistemi monofase (2 fili) o trifase (3 o 4 fili). Ci sono molti carichi non lineari come gli utilizzatori domestici che sono collegati a sistemi di potenza monofase. Altri, invece, sono inseriti in sistemi trifase senza neutro come ad esempio le macchine a velocità regolabile.

Inoltre esistono alcuni carichi monofase distribuiti su sistemi trifase a 4 fili come i computer, le lampade commerciali, ecc. I filtri attivi possono, dunque, essere classificati anche come tipologie a 2, 3 o 4 fili:

- ✓ Filtri attivi a 2 fili. I filtri attivi a 2 fili (monofase) sono usati in tutte e 3 le modalità cioè come serie attivi, parallelo attivi e come filtri attivi universali. In essi sono presenti entrambe le configurazioni dei convertitori cioè, convertitori a ponte controllati in corrente con modulazione PWM con immagazzinamento di energia induttiva e controllati in tensione con modulazione PWM con

immagazzinamento di energia capacitiva. In tutte e tre le configurazioni serie, parallelo e universale, è utilizzato l'inverter a supporto di corrente. Nel caso del filtro attivo serie con convertitore alimentato in tensione, a volte il trasformatore è rimosso e il carico è filtrato con componenti passivi L-C. Il filtro attivo serie è normalmente impiegato per eliminare armoniche, picchi, buchi, notch di tensione, ecc., mentre il filtro attivo parallelo è usato per eliminare le armoniche di corrente e per la compensazione della potenza reattiva.

- ✓ Filtri attivi a 3 fili. I carichi non lineari trifase che maggiormente utilizzano i convertitori allo stato solido sono gli azionamenti. Tutte le configurazioni dei filtri attivi mostrate nelle Figg. 3.1÷3.5 sono sviluppate con tre fili nel lato alternata e due fili nel lato in continua. Per i sistemi trifase si possono utilizzare anche tre filtri attivi parallelo monofase con trasformatore di isolamento per ottenere un adeguato rifasamento delle tensione, per un controllo indipendente delle varie fasi e per una compensazione affidabile nei sistemi non equilibrati. Invece, i filtri attivi serie sono sviluppati nella modalità a singolo stadio (Fig. 3.3) o in quella ibrida con filtri passivi parallelo (Fig. 3.5). La configurazione di Fig. 3.5 si è diffusa molto in quanto riduce le dimensioni del dispositivo di potenza ed il costo di tutto il sistema. Per sistemi trifase a tre fili è possibile utilizzare anche i cosiddetti filtri attivi universali (Fig.3.4).
- ✓ Filtri attivi a 4 fili. La stragrande maggioranza dei carichi monofase sono alimentati dal sistema di distribuzione trifase con neutro. Essi causano eccessive correnti sul neutro, componenti armoniche, potenza reattiva e squilibri. Per ridurre questi problemi sono stati studiati i filtri attivi a 4 fili. Tali dispositivi sono stati sviluppati come: 1) filtri attivi parallelo alimentati in corrente e in tensione, 2) filtri serie attivi e 3) modalità ibride con filtri serie attivi e parallelo passivi. Le Figg. 3.6, 3.7 e 3.8 mostrano tre tipiche configurazioni di filtri attivi parallelo. La prima configurazione è conosciuta come filtro a condensatore intermedio e viene utilizzato per piccole potenze. In questo dispositivo la totalità della corrente di neutro fluisce attraverso lo stadio in continua dei condensatori i quali sono di valore molte grande. La seconda configurazione mostra un altro filtro a 4 fili conosciuto come interruttore a 4 poli, nel quale il quarto polo è usato per stabilizzare il neutro del filtro attivo. La configurazione a ponte trifase, mostrata in Fig. 3.8, è abbastanza comune e permette un

accoppiamento adeguato della tensione per il dispositivo allo stato solido ed aumenta l'affidabilità del filtro.

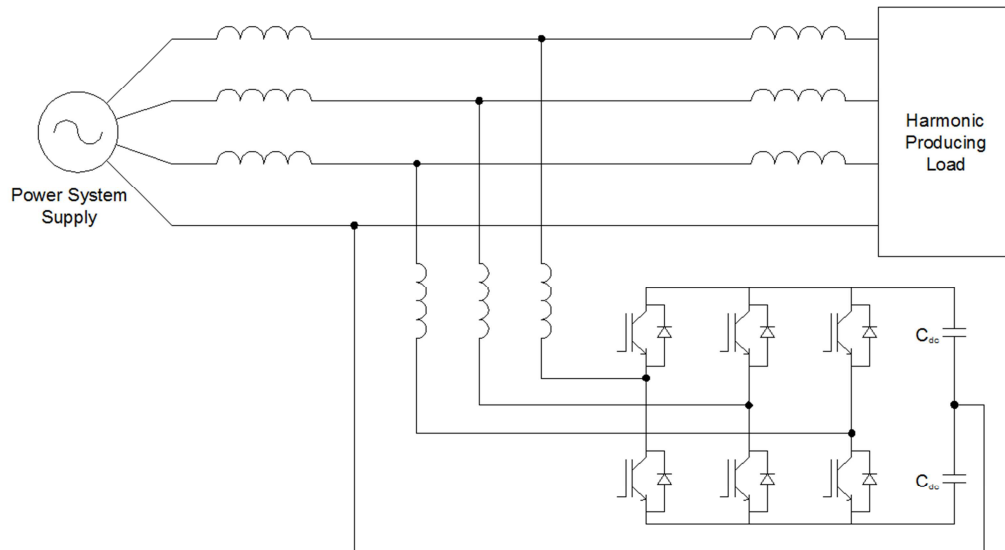


Fig. 3.6 – Filtro attivo parallelo a 4 fili con condensatore intermedio

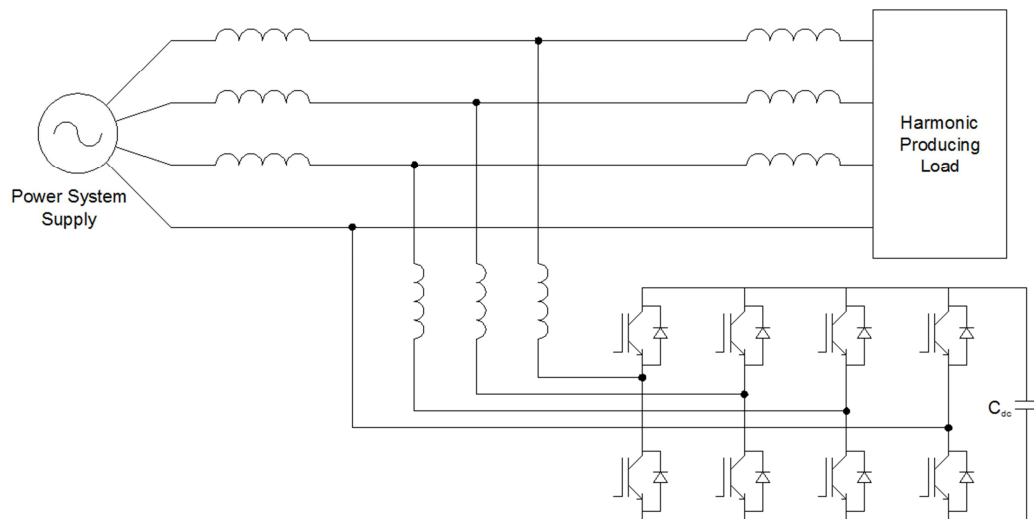


Fig. 3.7 – Filtro attivo parallelo quadripolare a 4 fili

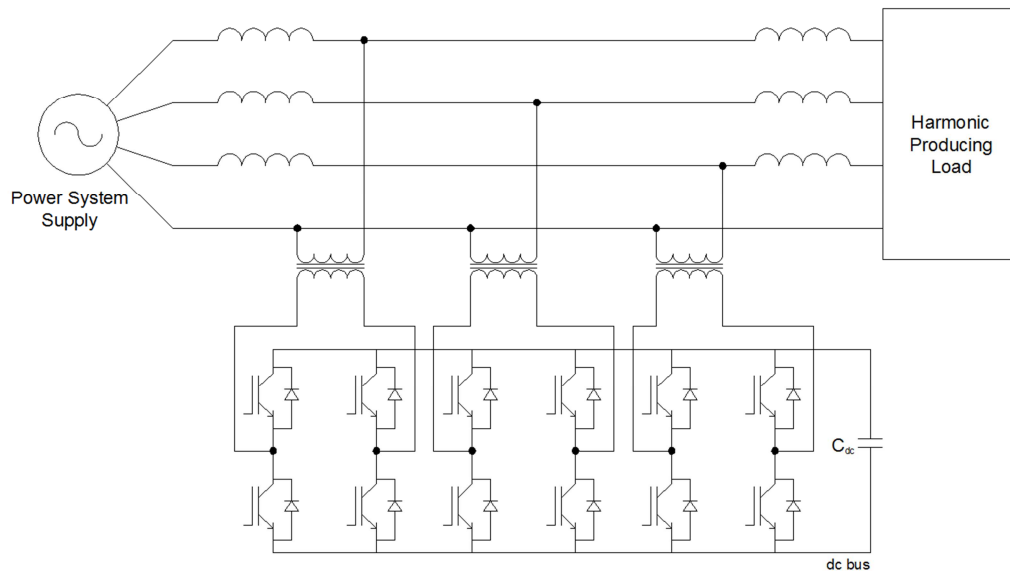


Fig. 3.8 – Filtro attivo parallelo a 4 fili con configurazione a ponte trifase

3.4 STRATEGIE DI CONTROLLO

La strategia di controllo è il cuore del filtro attivo e viene implementata in tre fasi successive. Nella prima, la tensione efficace e i segnali di corrente vengono prelevati attraverso trasformatori, sensori ad effetto hall ed amplificatori per raccogliere informazioni sul sistema. Nella seconda fase, i comandi di compensazione in termini di segnali di corrente e di tensione vengono derivati in base ai metodi di controllo ed in base alla configurazione del filtro attivo che si utilizza. Nell'ultima fase si determinano i segnali di controllo dei gate dei vari dispositivi allo stato solido utilizzando una modulazione PWM, modalità ad isteresi o tecniche di controllo basate sulla logica combinatoria.

Il controllo dei filtri attivi è realizzato attraverso dispositivi analogici e digitali o dispositivi microelettronici avanzati come i microcomputer a singolo chip, ecc.

3.4.1 Condizionamento dei segnali

Allo scopo di implementare l'algoritmo di controllo, sono richiesti segnali di tensione e di corrente. Questi segnali sono anche utili per verificare lo stato del sistema, per le misure e per la registrazione di vari indici quali il THD, il fattore di potenza, le potenze attive e reattive, il fattore di cresta, ecc. I segnali tipici di tensione sono le tensioni ai morsetti del carico, la tensione nello stadio in continua del filtro attivo e le tensioni ai capi degli elementi in serie.

I segnali di corrente, invece, sono le correnti di carico, le correnti nella rete, le correnti di compensazione e la corrente continua nell'anello interno del filtro attivo. Tali segnali,

sia di corrente che di tensione, sono poi inviati alla logica di controllo attraverso sensori ad effetto hall o attraverso fotodiodi. A volte, per evitare problemi, questi segnali vengono preventivamente filtrati prima di essere inviati alla logica.

I filtri attivi possono essere su base hardware (analogica) o su base software (digitale) con caratteristiche passa-basso, passa-alto o passa-banda.

3.4.2 Determinazione dei segnali di compensazione

Lo sviluppo dei segnali di compensazione in termini di tensione o di corrente è una parte importante del controllo dei filtri attivi ed hanno effetto sulla loro taglia e sul transitorio, come nella performance del singolo stadio. Le strategie di controllo per generare i comandi di compensazione possono essere nel dominio della frequenza o nel dominio del tempo:

- ✓ Compensazione nel dominio della frequenza. La strategia di controllo nel dominio della frequenza è basata sull'analisi di Fourier della tensione distorta o dei segnali di corrente per estrarre i comandi di compensazione. Usando la trasformata di Fourier, le armoniche sono separate dalla fondamentale, quest'ultima, a sua volta, viene scomposta nella componente attiva ed in quadratura. Le componenti armoniche e quella in quadratura della fondamentale vengono poi combinate per determinare le correnti di compensazione. La frequenza di on-off del dispositivo allo stato solido del filtro attivo è scelta generalmente maggiore del doppio della massima frequenza armonica da compensare per avere una efficace compensazione. L'unico svantaggio del controllo nel dominio della frequenza è che l'implementazione in linea della trasformata di Fourier (soluzione di un sistema di equazioni non lineari) è onerosa e necessita di lunghi tempi di calcolo.
- ✓ Compensazione nel dominio del tempo. I metodi di controllo dei filtri attivi nel dominio del tempo sono basati sulla derivazione istantanea dei comandi di compensazione dalla forma d'onda dei segnali distorti e dei segnali di inquinamento armonico di tensione o di corrente. Esistono molti metodi di controllo nel dominio del tempo fra i quali i più importanti sono la teoria istantanea p-q [51], il metodo composto di riferimento sincrono d-q [51], il metodo di misura sincrona, il controllo di flusso, il metodo del filtro notch, il controllore P-I, il controllore sliding mode, ecc. La teoria della potenza attiva e reattiva istantanea p-q è stata utilizzata a lungo ed è basata sulla trasformazione α - β dei segnali di tensione e di corrente per ottenere i segnali di compensazione. In tale teoria è molto importante conoscere i valori delle potenze attive e reattive le quali possono essere

dedotte dai segnali di corrente e di tensione trasformati. Da tali valori, poi, è possibile estrarre le potenze armoniche attive e reattive utilizzando filtri passa-basso e passa-alto. Giunti a questo punto, applicando la trasformata inversa α - β si ottengono i comandi di compensazione in termini di tensione e di corrente. Nel metodo composto di riferimento sincrono d-q e nei controllori di flusso i segnali di tensione e di corrente vengono trasformati in un riferimento rotante sincrono nel quale le componenti fondamentali di tali grandezze divengono delle quantità costanti mentre le armoniche restano oscillanti. Di conseguenza è possibile derivare i comandi di compensazione. È necessario sottolineare il fatto che nei filtri attivi alimentati in tensione viene di solito usata una retroazione per proteggere lo stadio in corrente continua. Nel metodo del filtro a notch i comandi di compensazione sono ottenuti tramite l'applicazione di filtri notch mentre nei controllori P-I e sliding mode tali segnali sono ottenuti effettuando un confronto fra i valori di riferimento di tensione e corrente con i valori reali applicati al carico.

- ✓ Generazione dei segnali di gate per i dispositivi dei filtri attivi. La terza fase del controllo dei filtri attivi consiste nella generazione dei segnali di gate per i dispositivi allo stato solido del filtro attivo derivandoli dai segnali di compensazione, in termini di tensione e di corrente. Per ottenere questo vengono implementati, attraverso hardware o software, diversi approcci come ad esempio il controllo di corrente con isteresi, il controllo di corrente e di tensione con tecnica PWM, il controllo in corrente sliding mode, il controllo basato sulla logica combinatoria, ecc.

3.5 SELEZIONE DEI COMPONENTI E DELLE CARATTERISTICHE ADDIZIONALI DEI FILTRI ATTIVI

La scelta dei componenti di un filtro attivo è un fattore importante per ottenere le migliori prestazioni. Il principale componente di un filtro attivo è il dispositivo allo stato solido. I primi furono i BJT, seguiti poi dai MOSFET, per arrivare, al giorno d'oggi, agli IGBT e ai GTO che sono i maggiormente utilizzati.

Normalmente, fra i morsetti dell'inverter ed il punto di connessione alla rete, vi è installato induttore serie posto all'ingresso del filtro attivo in configurazione a ponte controllato in tensione. Il valore di questa induttanza è cruciale per le prestazioni del filtro. Infatti, se si sceglie un piccolo valore poi si avrà un grande ripple nelle correnti di compensazione. Nel caso in cui tale valore sia troppo grande, il dispositivo non è capace di inseguire la dinamica delle correnti di compensazione ed il filtraggio ne risulta

danneggiato. Per cui una scelta ottimale dell'induttore è essenziale per ottenere prestazioni soddisfacenti.

Generalmente viene anche impiegato un filtro passivo di ripple soprattutto ai terminali dell'inverter per compensare le armoniche di commutazione e per migliorare il THD di corrente e di tensione. Il progetto di tale filtro è anch'esso importante perché l'impedenza della linea a monte potrebbe causare interazioni negative con gli altri componenti di tale filtro.

Un altro parametro importante è il valore del condensatore C_{dc} che si trova nel bus in continua. Se avesse un valore basso si otterrebbero grandi ripple nello stadio singolo e ampie fluttuazioni nel bus in continua in condizioni transitorie. Invece, nel caso in cui tale valore fosse troppo elevato, si avrebbe una diminuzione del ripple e delle fluttuazioni suddette ma aumenterebbero il costo e le dimensioni del sistema.

In generale i filtri attivi sono utilizzati per compensare armoniche di tensione e di corrente ma, in molti casi, hanno anche delle funzioni aggiuntive come la compensazione della potenza reattiva, degli squilibri di tensione e di corrente, delle correnti sul neutro, del flicker di tensione, dei picchi di tensione e provvedono anche alla regolazione della stessa.

Molte di queste compensazioni di tensione (squilibri, regolazione, flicker) sono attuate mediante l'uso di filtri attivi serie, mentre le compensazioni di corrente (potenza reattiva, squilibri, ecc.) sono effettuate attraverso filtri shunt attivi.

3.6 CONSIDERAZIONI PER APPLICAZIONI SPECIFICHE DEI FILTRI ATTIVI

La scelta dei filtri attivi per applicazioni particolari è un importante compito per utilizzazioni ed applicazioni ingegneristiche. A tal fine di seguito si descrivono i possibili utilizzi dei filtri attivi.

3.6.1 Compensazione di corrente

La compensazione di corrente si suddivide in compensazione di armoniche, di potenza reattiva, della corrente sul neutro e nell'equilibratura dei carichi sbilanciati. Queste possono essere richieste individualmente o in combinazione per un singolo utilizzatore o per gruppi di carichi.

Per la compensazione delle armoniche di corrente si utilizza il filtro attivo mostrato in Fig. 3.9.

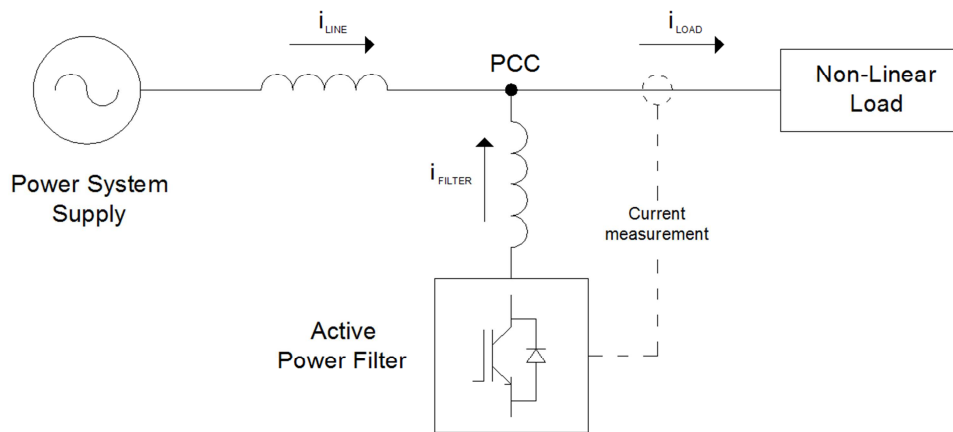


Fig. 3.9 – Filtro attivo, compensazione in corrente

Per quanto riguarda la compensazione di potenza reattiva, essa è ottenuta attraverso l'uso di filtri attivi parallelo, per carichi variabili, e attraverso l'uso di condensatori in alternata per carichi fissi. Mentre, il bilanciamento del carico nei sistema a 3 o a 4 fili e la compensazione della corrente nel neutro sono ottenuti attraverso filtri attivi parallelo.

Nel caso in cui si dovesse effettuare più di una compensazione contemporaneamente, la scelta tecnicamente più corretta ricadrebbe su un filtro attivo parallelo anche se la scelta più comune è di solito un ibrido con filtro attivo serie e parallelo passivo in virtù del suo basso costo.

3.6.2 Compensazione di tensione

La compensazione di tensione è suddivisa in compensazione di armoniche, regolazione, bilanciamento, riduzione del flicker e rimozione di buchi. In generale, queste operazioni sono assolte dai filtri attivi serie anche se, nel caso del flicker, è preferibile l'utilizzo di filtri attivi parallelo come quello mostrato in Fig. 3.10. Oggigiorno i filtri attivi possono anche apportare compensazioni di tensione in tempo reale soprattutto nel caso di buchi di tensione di durata limitata.

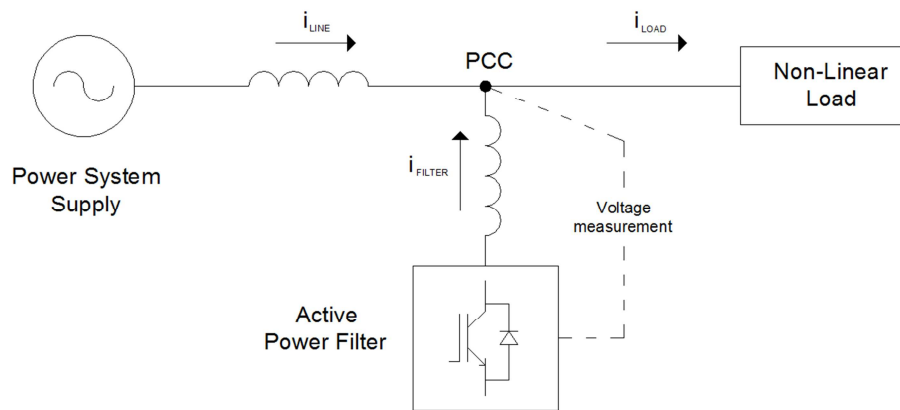


Fig. 3.10 – Filtro attivo, compensazione in tensione

3.6.3 Compensazione combinata di tensione e corrente

Molte applicazioni richiedono una compensazione combinata di corrente e tensione. Per queste applicazioni il filtro ibrido costituito da una serie attiva e da uno parallelo attivo è la scelta ideale. Inoltre si è visto che il filtro attivo ibrido, conosciuto anche col nome di compensatore universale, è appropriato anche per compensazioni individuali di tensione o di corrente. Però, a causa delle sue grandi dimensioni e del suo costo elevato, questo filtro non viene molto utilizzato e si preferiscono ad esso dei semplici filtri attivi quali ad esempio i filtri attivi serie con passivi parallelo.

PARTE SECONDA:

CONTRIBUTO DEL CANDIDATO

Si è quindi dedotta la grande rilevanza che assume la qualità dell'alimentazione elettrica. Gli strumenti il cui fine è quello di eliminare le componenti armoniche di corrente e di tensione sono i cosiddetti filtri attivi di potenza.

I filtri attivi più diffusi/convenzionali sono i filtri attivi di corrente e vengono impiegati affinché il contenuto armonico della corrente assorbita da un carico distorcente non superi dei limiti.

In questa seconda parte verrà discusso un filtro attivo non propriamente convenzionale, non un filtro attivo di corrente bensì un filtro attivo di tensione.

CAPITOLO 4.

FILTRAGGIO DELLA TENSIONE VS

FILTRAGGIO DELLA CORRENTE

4.1 INTRODUZIONE

Al fine di eliminare le componenti armoniche (ovviamente non alla frequenza fondamentale) di corrente e tensione si utilizzano i cosiddetti filtri attivi denominati con l'acronimo inglese APF (si veda Cap. 3).

Gli APF sono dispositivi elettronici di potenza capaci di modificare le grandezze fondamentali (tensioni, correnti, frequenza) da essere compatibili con la dinamica di un sistema elettrico di distribuzione reale.

L'idea della compensazione attiva e dei filtri attivi è relativamente vecchia, la sua applicazione è stata per molti anni limitata dalla effettiva impossibilità di avere una tecnologia efficace ad un prezzo competitivo/accessibile. Il riferimento è chiaramente ai dispositivi IGBT e ai DSP (Par. 3.2) grazie ai quali il rapporto costo/prestazione è enormemente diminuito da poter, oggi, discutere fattivamente della compensazione armonica.

I filtri attivi più diffusi/convenzionali sono i filtri attivi di corrente e vengono impiegati affinché il contenuto armonico della corrente assorbita da un carico distorcente non superi dei limiti.

In questo capitolo si confrontano le due tipologie di filtri attivi di potenza, in corrente ed in tensione, descrivendone i vantaggi e svantaggi.

4.2 FILTRO ATTIVO DI CORRENTE

L'efficienza di un filtro attivo di corrente ha alcuni limiti che diventano evidenti allorquando più carichi elettrici, distorcenti e non, sono connessi al nodo di rete PCC o quando la tensione al nodo-PCC presenta una distorsione armonica causata da carichi elettrici distorcenti posti a monte dello stesso nodo.

A tal proposito si consideri il sistema elettrico di Fig. 4.1, *Load-1* e *Load-3* sono due carichi distorcenti (*Harmonic Producing Loads*, HPL) mentre *Load-2* è un carico lineare

(cioè se alimentato con una tensione sinusoidale a unica frequenza allora assorbe una corrente sinusoidale a unica frequenza e pari a quella dell'alimentazione).

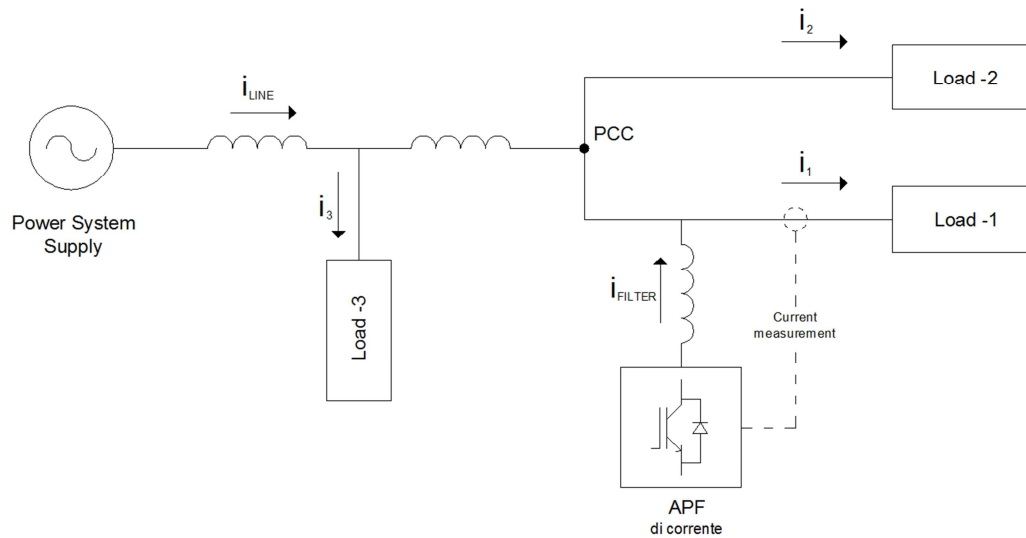


Fig. 4.1 – Rappresentazione di un filtro attivo di corrente

È facile verificare che pur installando un APF di corrente a ridosso di $Load-1$, la tensione al nodo PCC è distorta: le correnti distorte assorbite dal carico $Load-3$ implicano cadute di tensione distorte lungo la linea di alimentazione a monte.

Di conseguenza il carico $Load-2$ è alimentato con tensione distorta e distorta sarà la corrente assorbita. Al fine di eliminare completamente la distorsione armonica è necessario installare un ulteriore APF di corrente a ridosso di $Load-3$.

Se l'aspetto di maggior rilevanza è dunque la qualità dell'alimentazione dei carichi è evidente la necessità di investigare circa la correzione diretta della tensione distorta al nodo-PCC.

Di seguito sarà discusso un filtro attivo non propriamente convenzionale, non un filtro attivo di corrente bensì un filtro attivo di tensione; il suo impiego consente di limitare il contenuto armonico della tensione nel generico nodo della rete elettrica cui è connesso.

4.3 FILTRO ATTIVO DI TENSIONE

Il Filtro attivo proposto, come vedremo in dettaglio nel proseguo, può essere utilizzato sia per la compensazione della tensione armonica (*Harmonic Voltage Compensation, HVC*) [52] e sia per lo smorzamento della risonanza armonica in una rete risonante.

Con tale filtro si dimostra come sia possibile ridurre l'inquinamento armonico e al contempo smorzare gli effetti della propagazione armonica attraverso opportune correzioni della forma d'onda di tensione al PCC.

Inoltre il Filtro proposto ha il grande vantaggio di essere un dispositivo plug-and-play in quanto richiede la sola rilevazione della tensione ai morsetti della rete dove viene connesso.

I moderni compensatori elettronici di potenza (o filtri) forniscono una soluzione ai problemi di *Power Quality* [40]. Tra i vari filtri attivi presenti in letteratura la nostra attenzione ricade su quelli utilizzati come mezzo per l'attenuazione dell'inquinamento armonico nei sistemi di trasmissione e distribuzione.

Due categorie possono essere identificate:

- ✓ Filtri per la compensazione dei carichi distortenti;
- ✓ Filtri per la protezione dei carichi sensibili.

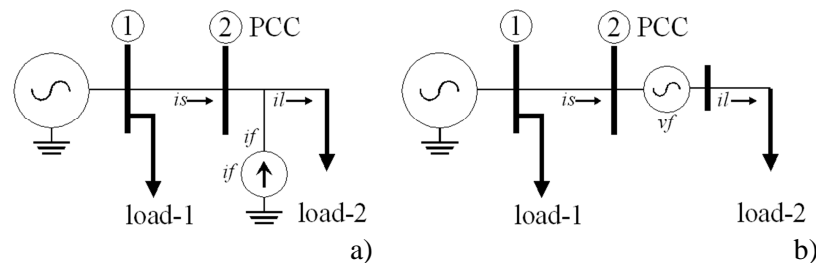


Fig. 4.2 - Filtro per a) la compensazione dei carichi distortenti e b) per la protezione dei carichi sensibili

La compensazione di un carico distortente è necessaria quando la distorsione di un carico non lineare, $load-2$ di Fig. 4.2a), assorbe correnti distorte che provoca una tensione distorta nel nodo; per ridurre questo problema, una sorgente di corrente ideale inietta correnti armoniche nel PCC per annullare le armoniche di corrente del carico. Questa operazione è definita compensazione del carico poiché il compensatore filtra la corrente del carico. La protezione di un carico sensibile è necessaria quando la corrente assorbita dal carico distortente, $load-1$ di Fig. 4.2b), provoca la distorsione della tensione di alimentazione del carico sensibile $load-2$ di Fig. 4.2b); al fine di ridurre questo problema una sorgente ideale di tensione genera tensioni armoniche in modo da annullare le tensioni armoniche presenti [53], [54].

Evidentemente, la scelta tra un filtro connesso in serie o in parallelo dipende dall'applicazione richiesta, ma generalmente è preferibile un filtro attivo connesso in parallelo in quanto si adatta al nodo della linea indipendentemente dalle singole linee collegate al nodo stesso.

4.4 COMPENSATORE DI TENSIONE ARMONICA, HVC

Si consideri un generico (k -esimo) nodo illustrato in Fig. 4.3, la tensione presente a tale nodo è affetta da distorsione armonica; si consideri inoltre che vi siano collegati sia carichi distorcenti e sia carichi sensibili e siano posizionati indistintamente sul lato sinistro e destro del nodo. Il compensatore ideale in Fig. 4.3a) può compensare la distorsione di corrente che fluisce attraverso la linea sul lato destro in modo che la corrente che scorre attraverso la linea di sinistra sarà distorta - così come la tensione al nodo - a condizione che qualsiasi carico distorcente è collegato sul lato sinistro (e viceversa).

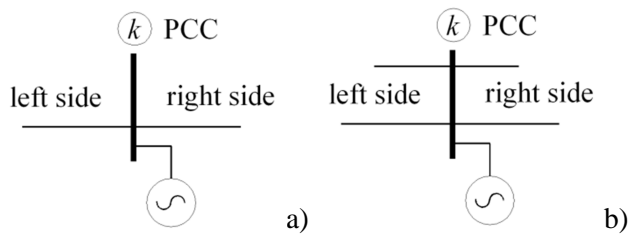


Fig. 4.3 - Un generico nodo con a) solo due linee connesse e b) con molte linee connesse

Una maggiore incertezza si verifica quando più di due linee sono collegate al k -esimo nodo come mostrato in Fig. 4.3b); in tal caso, la valutazione dell'effetto dell'azione di compensazione, da parte del compensatore ideale, implica un approfondimento. Lo schema in Fig. 4.3a) si riferisce generalmente a un compensatore ideale che agisce come regolatore di tensione [54]; nel campo delle armoniche, considerando che i carichi distorcenti e sensibili sono posizionati indistintamente su entrambi i lati, come illustrato nel diagramma schematico di un compensatore di tensione armonica (*Harmonic Voltage Compensator*, HVC), hanno l'obiettivo di eliminare le tensioni armoniche al k -esimo nodo.

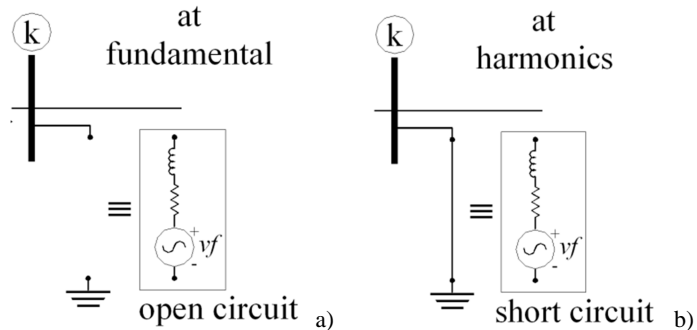


Fig. 4.4 – Funzionamento del HVC alla frequenza a) fondamentale e b) armonica

Tale HVC si comporta come un circuito aperto alla frequenza fondamentale e come un cortocircuito alle frequenze armoniche, come illustrato nella Fig. 4.4. Supponendo che il circuito HVC abbia una singola tensione di alimentazione, v_f , con in serie un'impedenza, il problema è quello di determinare la forza elettromotrice, v_f , dell'unico generatore di tensione in modo che l'HVC rappresenti un circuito aperto o un corto circuito [55], [56].

Nei paragrafi successivi si illustrerà uno studio che ha come obiettivo la determinazione del valore della tensione v_f tale che la tensione del k-esimo nodo risulti priva di armoniche; a questo proposito, due metodi - insieme con i loro algoritmi - saranno presentati. Operando in conformità con questi due metodi, il HVC ha il grande vantaggio di essere *plug and play* presentando dei vantaggi come la sola misura della tensione al k-esimo nodo senza la necessità della misura della corrente di linea.

La fattibilità *plug and play* è un grande vantaggio, anche se, purtroppo, ha un prezzo. Il HVC elimina tensioni armoniche al k-esimo nodo senza tener conto dell'origine delle armoniche, infatti il presenta lo svantaggio tipico dei filtri passivi; inoltre il limite dell'azione di compensazione da parte dell'HVC è rappresentato dalla potenza nominale dello stesso HVC.

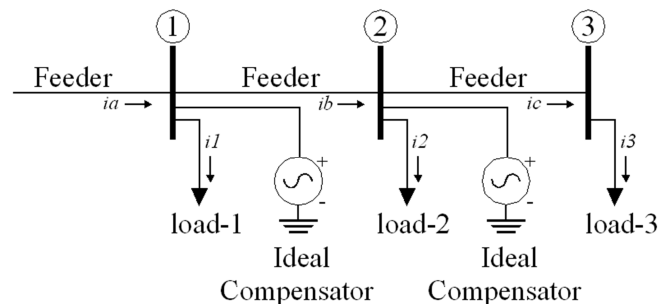


Fig. 4.5 - Sistema di distribuzione radiale

Per una migliore comprensione, si consideri il sistema di distribuzione radiale illustrato in Fig. 4.5 dove *load-1* e *load-2* sono due carichi distorcenti mentre *load-3* rappresenta un carico sensibile. In assenza di compensazione, sia la corrente i_a e sia la corrente i_b risultano distorte a causa della presenza delle due correnti i_1 e i_2 . Queste correnti provocano la distorsione delle tensioni in tutti i nodi, tra cui la tensione al nodo-3 a cui è collegato il carico sensibili, di conseguenza, la corrente i_c viene anch'essa distorta. Al fine di eliminare l'inquinamento armonico e salvaguardare la qualità della potenza fornita al carico sensibile, due compensatori ideali - rappresentati da generatori ideali di corrente - deve essere installati per compensare le distorsioni presenti sui due carichi, *load-1* e *load-2*, facendo lievitare i costi complessivi del sistema.

Inoltre è necessario sottolineare come l'installazione di questi due compensatori ideali atti a garantire una tensione non distorta al nodo-3, sottintende l'ipotesi che la tensione al nodo-1 sia priva di inquinamento armonico. Infatti se la tensione al nodo-1 è distorta a causa della presenza di carichi distorcenti posti a monte del nodo in esame, il carico sensibile (*load-3*) presenterà ai suoi capi una tensione distorta anche in presenza dei due compensatori ideali.

In alternativa a ciò si può installare un solo compensatore come HVC il quanto collegandolo al nodo-3 sarebbe in grado di eliminare le tensioni armoniche presenti appunto al nodo-3 e nel contempo portare dei benefici anche al nodo-3.

4.5 IL METODO ITERATIVO

Il metodo iterativo aggiorna iterativamente l'ampiezza e la fase della tensione generata dal filtro utilizzando solo la tensione misurata sul nodo-PCC. Il metodo iterativo può essere facilmente ed efficacemente utilizzato per eliminare le tensioni armoniche al nodo PCC in tutte le pratiche applicazioni comuni.

Si considerino i due terminali delle due reti lineari interconnesse, *GRID A* e *GRID B*, mostrate in Fig. 4.6, costituite entrambe da generatori di tensione e correnti ideali e componenti passivi lineari.

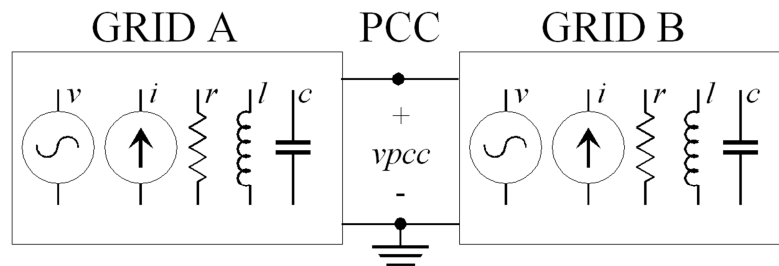


Fig. 4.6 - Due reti lineari interconnesse

Applicando il teorema di *Thevenin*, entrambe le reti possono essere sostituite da un singolo generatore di tensione con in serie una impedenza come mostrato in Fig. 4.7. La *GRID A* rappresenta il sistema di alimentazione elettrica sottoposta ad inquinamento armonico mentre la *GRID B* rappresenta il HVC utilizzato per compensare le tensioni armoniche presenti al nodo-PCC.

Quindi mediante il ricorso allo sviluppo in serie di Fourier di tutte le tensioni e correnti di lato, le due reti possono essere rappresentate, armonica per armonica, con il proprio circuito equivalente alla *Thevenin* dal nodo-PCC.

Per ogni k-esima armonica, la tensione al nodo-PCC può essere annullata se il valore di V_f^k è determinato correttamente; in questo paragrafo si illustrerà come il metodo iterativo sia capace di determinare tale valore.

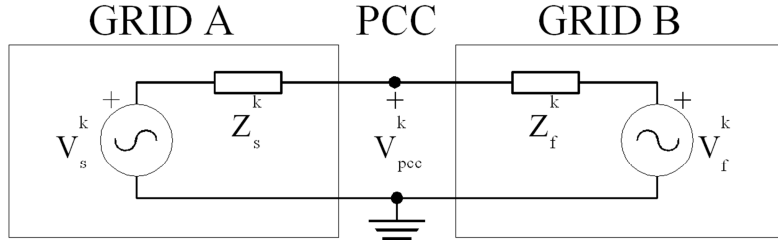


Fig. 4.7 - Circuito equivalente alla Thevenin alla k-esima armonica

Si applichi il Teorema di Millman per la determinazione della tensione al nodo-PCC alla k-esima armonica, espressa mediante la rappresentazione simbolica, la quale sarà pari a:

$$V_{pcc}^k = \beta^k V_f^k + \gamma^k V_s^k \quad (4.1)$$

dove

$$\beta^k = \frac{Z_s^k}{Z_s^k + Z_f^k} \quad (4.1a)$$

$$\gamma^k = \frac{Z_f^k}{Z_s^k + Z_f^k} \quad (4.1b)$$

$$Z_s^k = R_s^k + jX_s^k \quad (4.1c)$$

$$Z_f^k = R_f^k + jX_f^k \quad (4.1d)$$

Si vuole ottenere l'eliminazione della tensione armonica al nodo-PCC ovvero si vuole V_{pcc}^k deve essere uguale a zero per $k \neq 1$. Quindi, considerando l'Eq. (4.1), il valore di V_f^k può essere determinata come:

$$V_f^k := -\frac{z_f^k}{z_s^k} V_s^k \quad (4.2)$$

Sfortunatamente l'Eq. (4.2) non può essere utilizzata in quanto il valore di V_s^k e z_s^k non possono essere determinate nella pratica [57].

In sostituzione dell'Eq. (4.2), al fine di determinare la tensione che il HVC deve generare affinché il valore di V_{pcc}^k sia nullo, l'equazione può facilmente determinata nel modo seguente:

$$V_f^k := V_f^k - V_{pcc}^k \quad (4.2b)$$

Ovviamente il nuovo valore della tensione al nodo-PCC corrisponde a V_f^k come mostrato nell'Eq. (4.2b), tale valore non è pari a zero in quanto per raggiungere l'annullamento della tensione armonica al PCC bisogna applicare in maniera iterativa l'Eq. (4.2b).

4.5.1 Algoritmo del Metodo Iterativo

Si riporta di seguito l'algoritmo del metodo iterativo:

i:=1

WHILE THD(V_{pcc}) > THDref DO

FOR each harmonic must be compensated DO

$$V_{f_{i+1}}^k := V_{f_i}^k - V_{pcc_i}^k \quad (4.3)$$

ENDFOR

i:=i+1

ENDWHILE

dove:

- i è l'indice di iterazione;
- k è l'indice della k-esima armonica;
- $V_{pcc_i}^k$ e $V_{f_i}^k$ sono le componenti della k-esima armonica di V_{pcc} e V_f , rispettivamente, alla generica (i-esima) iterazione;
- THD(V) è una funzione che calcola la distorsione armonica totale di V;
- THDref è il valore di riferimento della distorsione armonica totale.

4.5.2 Convergenza del metodo iterativo

Per dimostrare la convergenza del metodo iterativo ovvero il decremento dell'ampiezza di V_{pcc}^k ad ogni iterazione deve valere quanto segue:

$$\left| V_{pcc_{i+1}}^k \right| < \left| V_{pcc_i}^k \right| \quad \forall i \quad (4.4)$$

Si utilizzi l'Eq. (4.1), il termine a sinistra dell'Eq. (4.4) diventa:

$$V_{pcc_{i+1}}^k = \beta^k \cdot V_{f_{i+1}}^k + \gamma^k \cdot V_s^k \quad (4.5)$$

e, utilizzando l'Eq. (4.3), l'Eq. (4.5) diventa:

$$V_{pcc_{i+1}}^k = (1 - \beta^k) \cdot V_{pcc_i}^k = \gamma^k \cdot V_{pcc_i}^k \quad (4.6)$$

In modo da soddisfare l'Eq. (4.4) quest'ultima equazione impone che sia verificata la seguente condizione:

$$|\gamma^k| < 1 \quad (4.7)$$

Utilizzando l'Eq. (4.1b), l'Eq. (4.7) può essere riscritta come:

$$|z_f^k| < |z_s^k + z_f^k| \quad (4.8a)$$

oppure, in modo più soddisfacente, come:

$$(R_f^k)^2 + (X_f^k)^2 < (R_s^k + R_f^k)^2 + (X_s^k + X_f^k)^2 \quad (4.8b)$$

Nel piano (R_s^k, X_s^k) , l'Eq. (4.8b) rappresenta il luogo geometrico dei punti al di fuori della circonferenza con raggio $r = \sqrt{(R_f^k)^2 + (X_f^k)^2}$ e centro $(-R_f^k, -X_f^k)$, come mostrato in Fig. 4.8. Tra questi, solo i punti con coordinate (R_s^k, X_s^k) appartenenti al I° o al IV° quadrante garantisce la convergenza del metodo iterativo.

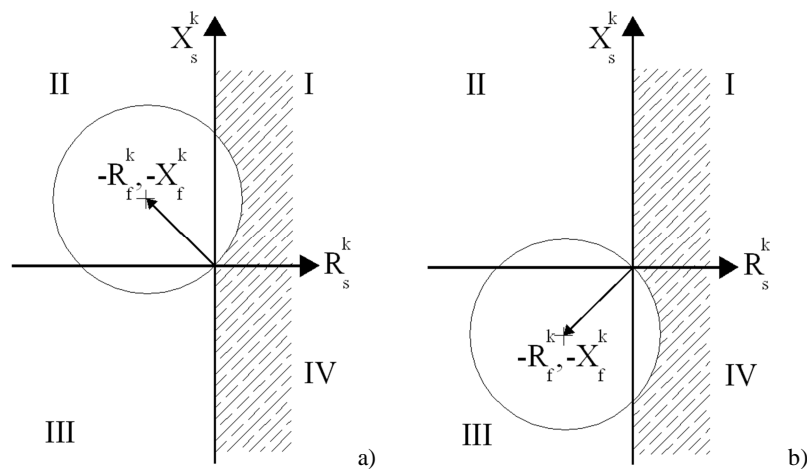


Fig. 4.8 - Regioni di convergenza (aree tratteggiate), a) per $X_f^k > 0$ e b) per $X_f^k < 0$

Quindi, utilizzando il metodo iterativo la convergenza dipende dal valore di z_s^k ovvero dai parametri del sistema di alimentazione elettrica. Dall'altra parte, questo metodo iterativo è interessante in quanto richiede solo la misura della tensione del nodo-PCC quindi è particolarmente fattibile per applicazioni pratiche. Infatti, poiché l'algoritmo di questo metodo iterativo è estremamente semplice da implementare, questo metodo offre un compensatore che è sia economico che commercialmente fattibile.

4.5.3 Modifica del Metodo Iterativo

Il suddetto metodo iterativo è stato presentato con riferimento ai circuiti elettrici lineari, in realtà tale metodo può essere applicato, con successo, nei sistemi elettrici che nella pratica sono non lineari. Tuttavia, va osservato che in alcuni sistemi di potenza non lineari la tensione, generate dal HVC, potrebbe aumentare piuttosto che diminuire la distorsione armonica totale della tensione misurata al nodo-PCC (V_{pcc}^k). Tale aumento di THD può derivare sia dalla non convergenza del metodo iterativo e/o dalla non linearità del sistema di alimentazione, è difficile determinarne la causa.

Tuttavia, indipendentemente dalla causa, tale aumento di THD può essere completamente evitato mediante modifica del metodo iterativo aggiungendo un ulteriore parametro ($0 < \delta \leq 1$). Tale parametro permette di ridurre il valore utilizzato per aggiornare la tensione generata dal compensatore:

```

0   i:=1
1   WHILE THD(Vpcc) > THDref DO
2       FOR each harmonic must be compensated DO
3            $\delta := 1$ 
4           THDprec := THD(Vpcc)
5           REPEAT
6               
$$V_{f_{i+1}}^k := V_{f_i}^k - \delta \cdot V_{pcc_i}^k \quad (4.9)$$

7                $\delta := \delta / 2$ 
8           UNTIL THD(Vpcc) > THDprec
9       ENDFOR
10      i:=i+1
11  ENDWHILE

```

La condizione di punto 1 di questo algoritmo vale quando la distorsione armonica totale di V_{pcc} è superiore al valore di riferimento THDref in modo tale, che tutte le dichiarazioni dal punto 2 al punto 9 sono reiterate fino a quando l'espressione al punto 1 non è più vera, oppure fin quando si incontra un comando di *break*. L'istruzione FOR al punto 2 fa sì che l'algoritmo iteri su tutte le armoniche che devono essere eliminate in modo che il valore di V_f^k , ovvero la tensione che il HVC deve generare, sia determinata come indicata nel punto 6 nell'Eq. (4.9). Tale equazione a differenza dell'Eq. (4.3) fa uso del parametro δ , che inizialmente nel punto 3 viene posto pari ad 1. Poiché il valore di V_f^k così calcolato potrebbe aumentare anziché diminuire il valore del THD della tensione al nodo-PCC, mediante la condizione al punto 8 si effettua una verifica ed eventualmente si invia un segnale di REPEAT. In tali condizioni, l'algoritmo riduce della metà l'ampiezza del valore che aggiorna V_f^k utilizzando il valore di δ ottenuto alla fine del ciclo di REPEAT precedente; se non si ottengono miglioramenti, il ciclo REPEAT ricalcola V_f^k utilizzando valori decrescenti di δ .

Al fine di evitare di entrare in un ciclo potenzialmente infinito, si è inserita un'istruzione che limita il numero di cicli in modo tale da stabilire che, ogni qualvolta il numero massimo di cicli viene raggiunto senza giungere a convergenza, la tensione V_f^k viene impostata pari al valore precedente e viene considerata l'armonica successiva. Il calcolo di ciascun effetto di V_f^k che ha sulla distorsione armonica totale di V_{pcc} aumenta la quantità di tempo necessario per eseguire questo metodo iterativo. Infatti al termine di ogni ciclo di REPEAT, la tensione al nodo-PCC deve essere campionata per un periodo di almeno 20msec in modo tale da calcolare la sue componenti spettrali di frequenza e il THD. Pertanto, il metodo iterativo così modificato mediante l'utilizzo del parametro δ si rende più adatto a condizioni in cui la convergenza risulta più lenta e dove i carichi variano in maniera lenta in modo da non influenzare negativamente la risposta del HVC.

4.6 IL METODO SENSITIVO

Il metodo sensitivo aggiorna l'ampiezza e la fase della tensione generata dal compensatore considerando due misurazioni consecutive della tensione sul nodo-PCC. Il metodo sensitivo è più complicato da implementare in applicazioni pratiche rispetto al metodo iterativo, ma è molto più veloce e la convergenza è garantita.

Il metodo sensitivo fornisce un'alternativa rapida e affidabile al metodo iterativo in quanto si basa sull'analisi della sensitività della tensione del *nodo-PCC* rispetto alla tensione generata dal HVC.

4.6.1 L'Analisi Sensitiva

Si consideri il circuito equivalente alla *Thevenin* mostrato in Fig. 4.6; l'analisi sensitiva valuta come la tensione al nodo-PCC vari in funzione delle variazioni della tensione generata dal HVC ovvero la derivata di V_{pcc}^k rispetto a V_f^k :

$$\frac{\partial V_{pcc}^k}{\partial V_f^k} = \frac{\partial(\beta^k \cdot V_f^k + \gamma^k \cdot V_s^k)}{\partial V_f^k} = \frac{z_s^k}{z_s^k + z_f^k} = \frac{1}{\alpha^k} \quad (4.10)$$

Come previsto, la derivata è una funzione dell'impedenza della rete, in quanto il generatore di tensione V_s^k è ideale. Quindi tenendo conto delle ipotesi di reti lineari passive e di generatori ideali l'Eq. (4.10) può essere riscritta come:

$$V_{f_{i+1}}^k - V_{f_i}^k = \alpha^k \cdot (V_{pcc_{i+1}}^k - V_{pcc_i}^k) \quad (4.11)$$

dove $V_{f_i}^k$ e $V_{f_{i+1}}^k$ sono le due tensioni generate dal HVC - una dopo l'altra- mentre $V_{pcc_i}^k$ e $V_{pcc_{i+1}}^k$ sono le due corrispondenti tensioni misurate al nodo-PCC.

Ora è possibile determinare il valore di $V_{f_{i+1}}^k$ che annulla la tensione al nodo-PCC cioè il valore che permette la completa eliminazione della tensione armonica; tale valore di $V_{f_{i+1}}^k$ è determinato sostituendo $V_{pcc_{i+1}}^k = 0$ nell'Eq. (4.11), in modo da ottenere:

$$V_{f_{i+1}}^k = V_{f_i}^k - \alpha^k \cdot V_{pcc_i}^k \quad (4.12)$$

L'Eq. (4.12) determina il valore di tensione che il HVC deve generare affinché si elimini completamente V_{pcc}^k e tale valore è ottenuto sottraendo, dalla tensione $V_{f_i}^k$, la tensione $V_{pcc_i}^k$ moltiplicata per α^k . Il fattore α^k accelera notevolmente la compensazione armonica della tensione in maniera tale che non è più necessaria alcuna iterazione.

Il valore di α^k è dato dall'Eq. (4.10) ma, coerentemente con quanto scritto per l'Eq. (4.2), tale equazione non può essere utilizzato perché il valore di impedenza z_s^k non può essere facilmente determinato [58], [59], [60], [61], [62], [63].

In sostituzione dell'Eq. (4.10), α^k è calcolato sostituendo l'Eq. (4.3) nell'Eq. (4.11), nel modo seguente:

$$\alpha^k = \frac{V_{f_{i+1}}^k - V_{f_i}^k}{V_{pcc_{i+1}}^k - V_{pcc_i}^k} = \frac{(V_{f_i}^k - V_{pcc_i}^k) - V_{f_i}^k}{V_{pcc_{i+1}}^k - V_{pcc_i}^k} = \left(1 - \frac{V_{pcc_{i+1}}^k}{V_{pcc_i}^k} \right)^{-1} \quad (4.13)$$

La convergenza del metodo sensitivo non è soggetta ad alcuna condizione e, come per il metodo iterativo, tale metodo sensitivo richiede la sola misurazione della tensione al PCC Ovvero v_{pcc} .

In aggiunta, nell'ipotesi di un circuito lineare, la completa eliminazione dell'inquinamento armonico richiede una sola iterazione:

- il primo valore di V_f^k è impostato mediante l'Eq. (4.9);
- poi, α^k viene calcolato utilizzando l'Eq. (4.13);
- infine, il valore di V_f^k è impostato nuovamente mediante l'Eq. (4.12).

4.6.2 L’algoritmo per il metodo sensitivo

Si riporta di seguito l’algoritmo in pseudo-codice del metodo sensitivo; in questo caso viene considerato oltre al parametro δ , introdotto con l’algoritmo iterativo modificato, anche l’ulteriore parametro λ che funge da “acceleratore” di convergenza:

```

Step
0      i:=1
1      WHILE THD(Vpcc) > THDref DO
2          FOR each harmonic must be compensated DO
3               $\delta := 1$ 
4              THDprec := THD(Vpcc)
5              REPEAT
6                   $V_{f_{i+1}}^k := V_{f_i}^k - \delta \cdot V_{pcc_i}^k$ 
7                   $\delta := \delta/2$ 
8              UNTIL THD(Vpcc) > THDprec
9                   $\alpha^k := \delta \cdot \left( 1 - \frac{V_{pcc_{i+1}}^k}{V_{pcc_i}^k} \right)^{-1}$  (4.14)
10              $\lambda := 1$ 
11             THDprec := THD(Vpcc)
12             REPEAT
13                  $V_{f_{i+1}}^k := V_{f_i}^k - \alpha^k \cdot \lambda \cdot V_{pcc_i}^k$  (4.15)
14                  $\lambda := \lambda/2$ 
15             UNTIL THD(Vpcc) > THDprec
16         ENDFOR
17     ENDWHILE

```

dove:

- λ è un numero reale di valore pari a $0 < \lambda \leq 1$;
- gli altri simboli corrispondono a quelli utilizzati nei paragrafi 4.5.1 e 4.5.3.

In questo algoritmo sensitivo, la condizione nel punto 1 vale quando la distorsione armonica totale di v_{pcc} è superiore al valore di riferimento THD_{ref}, in modo che tutte le assegnazioni dal punto 2 al punto 16 vengono eseguite ripetutamente fino a quando l’espressione al punto 1 non è più vera, oppure fin quando non viene invocato un *break*. L’istruzione di FOR del punto 2 costituisce un modo efficace per eseguire iterazioni su

tutte le armoniche che devono essere eliminate; il valore di V_f^k , ovvero quella che il HVC deve generare, è determinato al punto 6 sottraendo la tensione rilevata sul nodo-PCC e impostando il parametro δ uguale a 1 nel punto 3.

Come nel metodo iterativo modificato riportato in 4.5.3, nei sistemi di potenza reali, il valore di V_f^k così calcolato potrebbe provocare un aumento anziché una diminuzione della distorsione armonica totale della tensione al nodo-PCC. Pertanto, si potrebbe verificare la condizione al punto 8 e mediante il comando di REPEAT verrebbe rideterminato il valore di V_f^k utilizzando il fattore δ il quale, al termine del ciclo precedente precisamente nel punto 7, è stato a sua volta dimezzato. Analogamente, il parametro α^k che “accelera” la compensazione della tensione armonica è determinato nel punto 9 mediante l’Eq. (4.14). Al punto 13 per il calcolo del valore di V_f^k oltre ad α^k si utilizza il parametro λ il quale è posto pari ad 1 nel punto 10; nuovamente si calcola il valore del THD di v_{pcc} in modo da verificare la condizione del punto 15.

4.7 L'HVC COME SMORZATORE DI RISONANZA ARMONICA NELLE RETI ELETTRICHE

Nei sistemi elettrici di potenza, la propagazione armonica indica l'amplificazione della tensione armonica sui nodi lungo una linea di distribuzione elettrica; questo fenomeno appare di solito nelle linee di alimentazione in antenna durante la notte, quando i flussi di potenza sono fortemente ridotti. Tale propagazione armonica è dovuta alla risonanza che si ha tra gli induttori di linea l e i condensatori cp utilizzati per il rifasamento [38], [45] (Fig. 4.9).

Nel fenomeno della risonanza armonica vengono considerati solo gli effetti capacitivi dovuti ai condensatori in quanto l'accoppiamento capacitivo della linea elettrica di distribuzione con il terreno è generalmente trascurato.

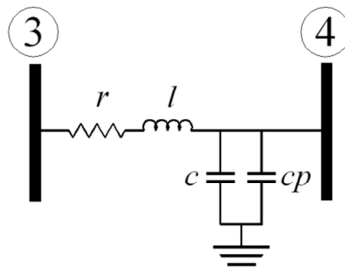


Fig. 4.9 - Circuito equivalente di un tratto di linea

La propagazione armonica potrebbe compromettere in maniera incisiva la *Power Quality* in quanto la distorsione della tensione armonica misurata alla fine della linea di distribuzione, come esemplificato in Fig. 4.10, può assumere il valore enormemente amplificato rispetto a quello all'inizio linea.

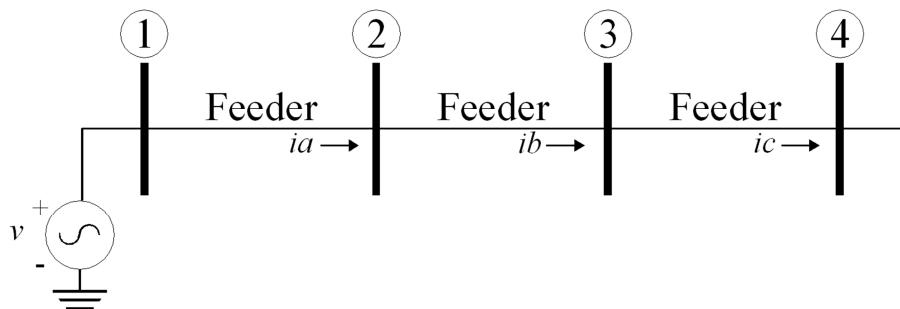


Fig. 4.10 - Linea di distribuzione a bassa tensione

A causa del fenomeno della risonanza, tutte le utenze collegate ai nodi 2÷4 di Fig. 4.10 saranno alimentati con una tensione di scarsa qualità, anche in assenza di carichi distorcenti.

I moderni compensatori elettronici di potenza utilizzati per smorzare o del tutto eliminare la propagazione armonica vengono definiti, generalmente, con il nome di smorzatori attivi di risonanza armonica (*Active Resonance Damper*, ARDs); la nostra attenzione sarà focalizzata sul ben progettato ARD riportato nella prima parte riguardante lo stato dell'arte, precisamente al paragrafo 2.3.1.

Infine, nel capitolo successivo, saranno confrontate le prestazioni di tale ARD e del HVC [64] in termini di smorzamento della risonanza. In particolare:

- HVC_{ITER} indica l'HVC implementato con il metodo iterativo illustrato al paragrafo 4.5;
- HVC_{SENS} indica l'HVC implementato con il metodo sensitivo illustrato al paragrafo 4.6.

CAPITOLO 5.

SIMULAZIONI NUMERICHE

5.1 INTRODUZIONE

Al fine di testare e dimostrare l'efficacia e l'efficienza dei metodi finora descritti, in particolar modo per lo smorzamento della propagazione armonica lungo le linee di distribuzione sono state eseguite molte simulazioni numeriche; di seguito se ne riportano solo alcune. Per tutte le simulazioni si è utilizzato il software della ANSYS *Simplorer*⁴ [65] ed il linguaggio di programmazione *Very Hardware Description Language – Analog and Mixed Signal extensions* (VHDL-AMS) [66].

5.2 EFFICACIA DEL METODO SENSITIVO

L'efficacia del metodo sensitivo come compensatore di tensione armonica in un nodo della rete è stata convalidata, oltre che dalle simulazioni numeriche svolte sul calcolatore, mediante l'utilizzo di un prototipo, illustrato in Fig. 5.1, di potenza pari ad 1kW [52].



Fig. 5.1 – Modello sperimentale: prototipo del HVC di Potenza pari ad 1kW

⁴ Il software *Simplorer*, prodotto dalla ANSYS, è un multidominio multitecnologico programma di simulazione utilizzato per simulare, analizzare, e ottimizzare i sistemi complessi, tra cui sistemi elettrici, elettromeccanici, elettromagnetici, di potenza e altri progetti meccatronici.

Tale prototipo è composto da due invertitori AC/DC/AC uguali, con due piccoli condensatori ($47 \mu\text{F}$) sul lato CC. Ciascun convertitore AC/DC è di tipo monofase con ponte raddrizzatore PWM il quale fornisce una tensione di 350 Vdc e presenta in uscita un convenzionale filtro LC ($L=1.42\text{mH}$, $C=2\mu\text{F}$). L'inverter PWM fa uso di un microcontrollore (56F8 a 16 bit Freescale) il quale pilota gli IGBT (della Infineon APT family - mod. IRG4P50F) con frequenza di switching pari a 20kHz. Uno dei due inverter viene utilizzato come sorgente, generando una tensione efficace di 230V a 50Hz, mentre l'altro convertitore è utilizzato come compensatore di tensione armonica. Oltre ai due inverter, il prototipo prevede al suo interno il circuito test della rete elettrica come mostrato in Fig.5.2.

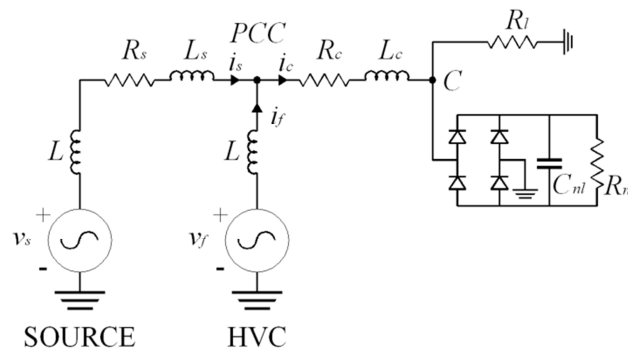


Fig. 5.2 – Circuito elettrico della rete test.

Il circuito elettrico di Fig. 5.2 rappresenta un sistema elettrico monofase in bassa tensione in cui il resistore R_1 rappresenta un carico sensibile, mentre il ponte raddrizzatore a diodi rappresenta un carico distorto che provoca correnti armoniche e distorsioni di tensione. I generatori e i carichi sono connessi mediante una rete che è divisa in due parti, il punto medio costituisce il punto in cui è collegato il HVC tramite un induttore L .

I valori dei componenti elettrici del circuito sono: $R_s=2.85\Omega$, $R_c=5.00\Omega$, $R_l=511.00\Omega$, $R_{nl}=252.00\Omega$, $L_s=0.91\text{mH}$, $L_c=1.60\text{mH}$, $L=0.32\text{mH}$ e $C_{nl}=3.50\mu\text{F}$.

In particolare, con riferimento alla Fig. 5.1, lo schermo di sinistra visualizza le misure (analisi in frequenza delle tensioni al nodo PCC e al nodo C e delle correnti che scorrono lungo i tratti di linea), mentre sullo schermo a destra è possibile visualizzare e/o modificare il codice di controllo dell'algoritmo del HVC. Inoltre, sul pannello frontale del prototipo tra i due schermi sono posti degli interruttori in grado di variare i valori delle impedenze dei tratti di linea e dei valori di R_l , C_{nl} e R_{nl} .

5.3 CASO STUDIO N.1

In assenza della compensazione della tensione/corrente armonica, il circuito di Fig. 5.2 è soggetto ad inquinamento armonico. Utilizzando il compensatore HVC, implementato con il metodo sensitivo, la distorsione di tensione al nodo PCC si riduce notevolmente e l'inquinamento armonico viene mitigato con una significativa riduzione della ampiezze della tensione ed una conseguente riduzione della distorsione armonica totale nei nodi PCC e C (si veda la Tabella 5.1).

Tabella 5.1 – Armoniche prima e dopo la compensazione (% della fondamentale)

Armonica	Prima			Dopo		
	V _{pcc} [%]	V _c [%]	Is [%]	V _{pcc} [%]	V _c [%]	Is [%]
1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3	2.98	4.52	57.08	0.27	1.55	11.71
5	0.76	1.88	17.88	0.46	1.55	10.13
7	0.63	0.75	5.52	0.14	0.09	3.17
THD [%]	3.30	5.10	60.20	1.10	4.26	16.00

Pertanto, utilizzando il compensatore HVC (con il metodo sensitivo) si ottiene una efficace compensazione della distorsione armonica di tensione, diminuendo non solo la distorsione armonica totale di V_{PCC} da 3.30% a 1.10% (vedi Fig. 5.3), ma diminuendo anche il THD di V_c da 5.10% a 4.26%.

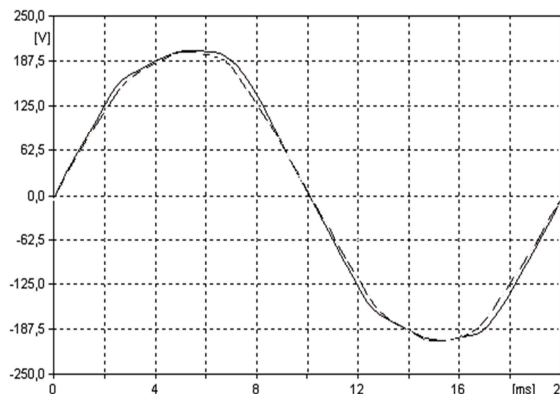


Fig. 5.3 - V_{PCC} prima (linea continua) e dopo (linea tratteggiata) la compensazione armonica

In aggiunta a ciò, il THD della corrente di alimentazione è anch'esso mitigato da 60.20% a 16%, come illustrato nella Fig. 5.4 la quale mostra l'andamento della corrente prima e dopo la compensazione della tensione armonica.

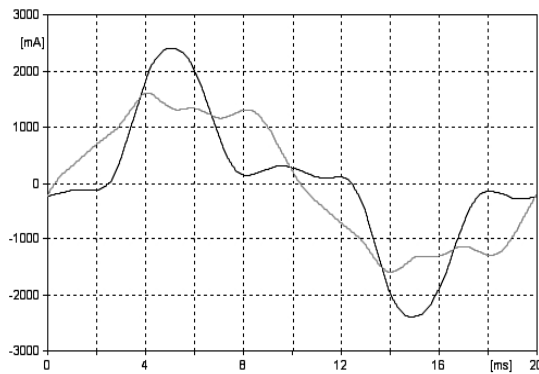


Fig. 5.4 – Corrente di alimentazione prima (linea nera) e dopo (linea grigia) la compensazione armonica

La Fig. 5.5 illustra la corrente dell’HVC, in un periodo di 20msec, dopo la compensazione della tensione armonica.

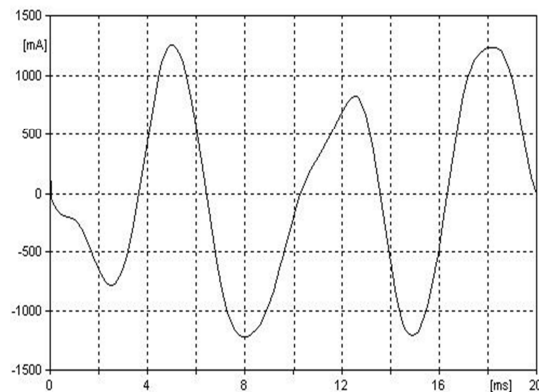


Fig. 5.5 - Corrente del compensatore armonico di tensione HVC

Nelle Tabelle 5.2 e 5.3 si riportano i valori delle potenze misurate nella rete test prima e dopo la compensazione; tali valori sono stati calcolati in base a quanto riportato in [67], [68], [69]. La diminuzione significativa della potenza armonica apparente di alimentazione da 6.00VA a 0.23VA dimostra ulteriormente l’efficacia del compensatore HVC.

Tabella 5.2 – Potenze prima della compensazione

	Source	HVC	Carichi
S_1 [VA]	319.80	41.20	308.60
V_H [V]	6.96	6.96	10.52
I_H [A]	0.87	0.03	0.89
$V_1 I_H$ [VA]	192.00	7.20	190.50
$V_H I_1$ [VA]	10.10	1.30	15.30
$V_H I_H$ [VA]	6.00	0.30	9.40
S [VA]	373.20	41.90	363.10

Tabella 5.3 – Potenze dopo la compensazione

	Source	HVC	Carichi
S_1 [VA]	329.10	58.40	310.10
V_H [V]	1.20	1.20	1.20
I_H [A]	0.23	1.06	0.97
$V_1 I_H$ [VA]	50.50	229.60	209.70
$V_H I_1$ [VA]	1.80	0.30	1.70
$V_H I_H$ [VA]	0.23	1.30	1.20
S [VA]	332.90	236.90	374.40

5.4 CASO STUDIO N. 2

Consideriamo una linea di distribuzione in bassa tensione come quella mostrata in Fig. 5.6, la quale rappresenta il circuito monofase equivalente di una linea di distribuzione in bassa tensione funzionante alla frequenza fondamentale di 50Hz.

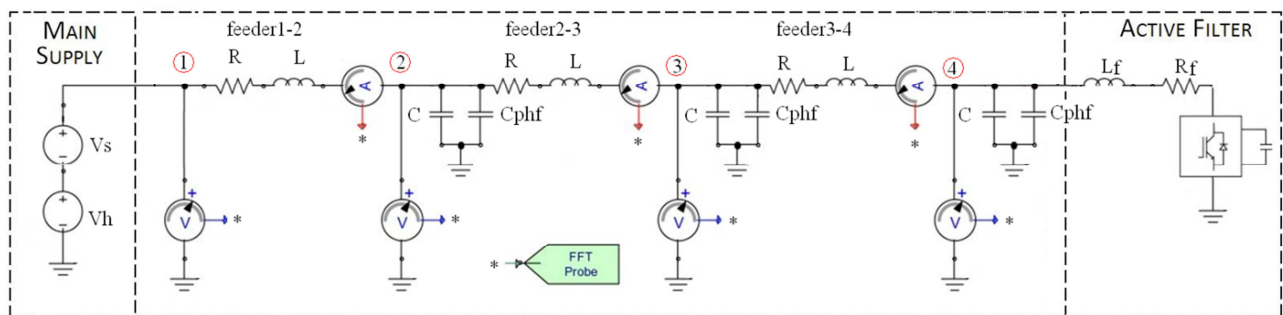


Fig. 5.6 – Rete test implementata mediante il software di simulazione Simplorer

La tensione all'inizio della linea è imposta da una sorgente di tensione ideale operante alla frequenza fondamentale, alla 5^a, 7^a e 11^a armonica; l'ampiezza della tensione alla frequenza fondamentale è pari a 200V, mentre le ampiezze delle armoniche 5^a, 7^a e 11^a sono impostate al 2% dell'ampiezza della tensione alla frequenza fondamentale.

Al fine di porci nelle condizioni in cui si ha una massima propagazione armonica non vengono presi in considerazione i carichi, lineari o distorcenti che siano; inoltre, per l'ordine delle armoniche considerate si può trascurare l'effetto. Per il circuito in esame si considerino i valori riportati in Tabella 5.4.

Tabella 5.4 – Valori dei parametri utilizzati per la simulazione

	Ampiezza [V]	Frequenza [Hz]
V_s	200.00	50
V_h	4.00	250
	4.00	350
	4.00	550
<hr/>		
R	0.05 Ω	
L	0.22 mH	
C	350.00 μF	
C_{phf}	1050.00 μF	
R_f	0.028 Ω	
L_f	0.183 mH	

Il circuito è stato inizialmente studiato senza considerare la presenza di alcun compensatore armonico e in Tabella 5.5 si riportano i valori di ampiezza delle tensioni e del fattore di amplificazione (F.A.) misurati ai nodi 1÷4 rispetto al valore misurato al nodo 1.

Tabella 5.5 – Ampiezze delle tensioni armoniche

Ordine Armonica	Nodo 1		Nodo 2		Nodo 3		Nodo 4	
	Amp. [V]	F.A.	Amp. [V]	F.A.	Amp. [V]	F.A.	Amp. [V]	F.A.
1	200.00	1.00	219.83	1.10	233.88	1.17	241.14	1.20
5	4.00	1.00	2.58	0.64	0.93	0.23	3.49	0.87
7	4.00	1.00	13.31	3.32	5.35	1.34	10.41	2.60
11	4.00	1.00	3.90	0.97	2.92	0.73	1.08	0.27

Dalla Tabella 5.5 si evince facilmente il fenomeno della propagazione armonica, infatti il fattore di amplificazione del nodo 4 alla 7^a armonica è 2.60; al contrario è 1.20 alla frequenza fondamentale (per effetto Ferranti) ed è inferiore ad 1.00 per la 5^a e 11^a armonica.

Quindi si osserva come in tale circuito è richiesto uno smorzamento/compensazione della sola 7^a armonica, mentre per la 5^a e 11^a non vi è necessità, ragion per cui non verranno prese in considerazione nel proseguo.

L'ARD è installato alla fine della linea di distribuzione in quanto questo è l'allocazione ottimale [33].

Tabella 5.6 – Fattore di amplificazione (F.A.) della 7^a armonica

	Nodo1	Nodo2	Nodo3	Nodo4	I _p [%]
Senza Compensatore	1.00	3.32	1.34	2.60	--
ARD	1.00 (0.00%)	1.12 (66.46%)	1.05 (21.64%)	0.74 (71.53%)	53.21
HVC _{ITER}	1.00 (0.00%)	0.72 (78.44%)	1.31 (2.24%)	0.005 (99.81%)	60.16
HVC _{SENS}	1.00 (0.00%)	0.72 (78.44%)	1.31 (2.24%)	0.005 (99.81%)	60.16

In Tabella 5.6 sono riportati i valori dei fattori di amplificazione della sola 7^a armonica in seguito alla presenza dei due filtri ARD ed HVC, dove quest'ultimo viene adoperato mediante l'implementazione dei due diversi metodi, iterativo e sensitivo. Inoltre i numeri indicati tra parentesi nella Tabella 5.6 rappresentano le percentuali di riduzione rispetto ai valori riportati nella Tabella 5.5.

In particolare, l'ARD diminuisce il fattore di amplificazione al nodo 2 del 66.46%, al nodo 3 del 21.64% e al nodo 4 del 71.53%. Tali valori indicano chiaramente che l'ARD permette un buon smorzamento della risonanza armonica per tutti i nodi della rete elettrica analizzata.

Per il calcolo dello smorzamento totale su tutti i nodi della rete in esame, si è adottato un indice di prestazione I_p ottenuto come [64]:

$$I_p = \sum_{i=2}^n \left(100 - \frac{m_i}{M_i} \cdot 100 \right) \quad (5.1)$$

dove:

- i è l'indice del nodo;
- n è il numero di nodi;
- m_i è il fattore di amplificazione al nodo prima della compensazione;
- M_i è il fattore di amplificazione al nodo dopo la compensazione.

Come riportato nella Tabella 5.7, il valore di I_p, corrispondente alla prestazione dell'ARD, è pari al 53.21% dimostrando così che l'ARD è un valido mezzo per lo smorzamento totale della propagazione armonica.

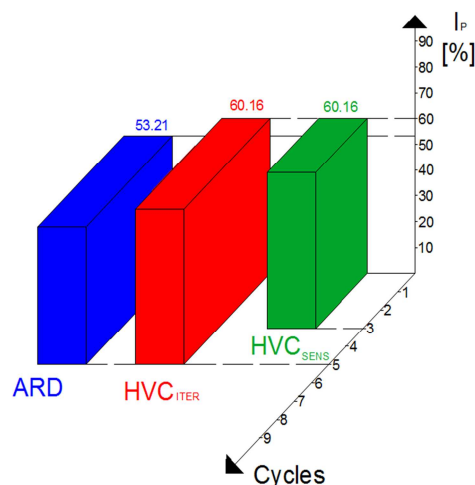
Tabella 5.7 – Fattore di amplificazione (F.A.) della 7^a armonica

	I_p [%]
Senza Compensatore	--
ARD	53.21
HVC _{ITER}	60.16
HVC _{SENS}	60.16

Si consideri ora la presenza al nodo 4 del HVC in sostituzione dell'ARD.

Il compensatore HVC che utilizza il metodo iterativo viene indicato con HVC_{ITER} mentre viene indicato con HVC_{SENS} quando utilizza il metodo sensitivo. I valori di I_p per HVC_{ITER} e HVC_{SENS} sono identici e pari al 60.16% (si veda Tabella 5.7) in quanto i due algoritmi, iterativo e sensitivo, differiscono essenzialmente in termini di velocità nel raggiungere lo smorzamento massimo.

Come si può osservare dalla Fig. 5.7, in termini di valori di I_p , mediante il compensatore HVC si ottiene uno smorzamento complessivo della propagazione armonica migliore rispetto a quella ottenuta mediante l'ARD; tale risultato è dovuto principalmente al fatto che il compensatore HVC annulla completamente il fattore di amplificazione al nodo 4.

Fig. 5.7 - Confronto tra i filtri in termini di indice di prestazione I_p

Inoltre, sempre in Fig. 5.7, è riportato il confronto tra i diversi compensatori in termini di tempo ovvero quanti cicli della frequenza fondamentale sono necessari per smorzare la risonanza armonica lungo la linea di distribuzione.

Come illustrato in Fig. 5.7, per smorzare l'effetto di risonanza armonica nella rete in esame il compensatore ARD necessita di cinque cicli della fondamentale ottenendo un indice di prestazione pari al 53.21%; nello stesso periodo, il compensatore HVC_{ITER} effettua lo smorzamento della risonanza armonica ottenendo, però, un indice di prestazione pari al 60.16%. In ugual modo il compensatore HVC_{SENS} presenta lo stesso indice di prestazione, anch'esso pari al 60.61%, ma l'azione di smorzamento dura solo tre cicli di fondamentale.

In Fig. 5.8 è riportato il fattore di amplificazione dell'ampiezza della tensione presente in fondo alla linea al nodo 4, alla 7^a armonica, dopo lo smorzamento della risonanza armonica. È evidente come il compensatore HVC azzeri, quasi, l'ampiezza della tensione alla 7^a armonica mentre l'ARD decrementa tali ampiezza solo a 2.96V.

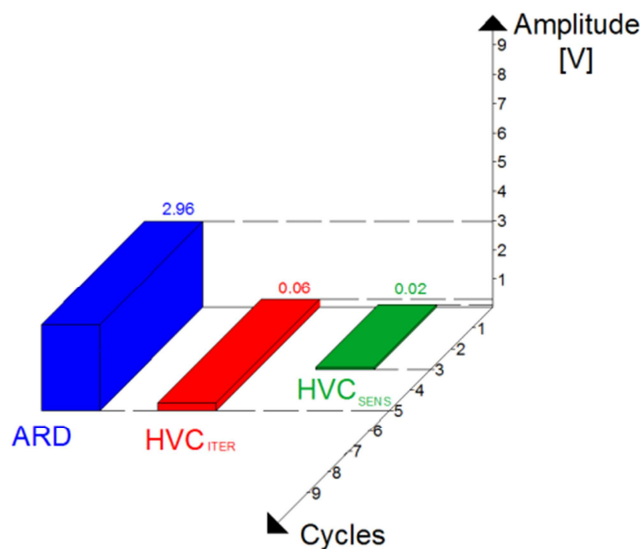


Fig. 5.8 - Confronto tra i filtri in termini di Ampiezza della 7^a armonica al nodo 4

Inoltre il compensatore HVC rispetto al compensatore ARD non necessita della stima dell'impedenza caratteristica e richiede la sola rilevazione della tensione ai suoi capi.

Perdite di potenza lungo la linea

È interessante discutere ulteriormente il valore della tensione al nodo in cui sono collegati i compensatori. Nella rete test di Fig. 5.6 il fattore di amplificazione della 7^a armonica calcolato alla fine della linea di distribuzione è 2.60 (si veda Tabella 5.6) quindi tutte le utenze collegate al nodo 4 saranno interessate da una tensione di alimentazione profondamente distorta essendo l'ampiezza della settima armonica pari a 10.40V. L'ampiezza della 7^a armonica della tensione misurata al nodo 4 dopo lo smorzamento

armonico della risonanza ottenuti dalle tre compensatori è illustrato in Fig. 5.8, è evidente il vantaggio di utilizzare l'HVC come tale ampiezza è prossima a zero.

Per una trattazione esaustiva l'ultimo punto, su cui si vuole far ricadere l'attenzione del lettore, è quello relativo alla valutazione delle perdite di potenza lungo la linea di alimentazione prima e dopo lo smorzamento della risonanza armonica. Per semplicità, per la valutazione delle perdite di potenza, si considerino le seguenti ipotesi:

- a) sono prese in considerazione solo le correnti che scorrono lungo le impedenze longitudinali;
- b) si assumano pari ad 1 i valori di tali impedenze longitudinali tutte uguali tra loro.

Tenendo presenti tali ipotesi a) e b), in Tabella 5.8 si riportano le perdite di potenza valutate calcolando la somma dei quadrati delle ampiezze delle correnti longitudinali alla 7^a armonica.

Dalla Tabella 5.8 è possibile osservare come l'ARD diminuisca le perdite di potenza lungo la linea da 1.94 a 0.45 kVA, ovvero ottiene una riduzione delle perdite del 75.56%, mentre il compensatore HVC diminuisce le perdite di potenza lungo la linea al valori di 0.31 kVA, cioè una riduzione del 83.61%.

Tabella 5.8 – Ampiezza alla 7^a armonica della corrente nel tratto di linea₁₋₂ e perdite in potenza

	Linea ₁₋₂ [A]	Linea ₂₋₃ [A]	Linea ₃₋₄ [A]	Perdite in Potenza [kVA]
Senza Compensatore	25.03	17.09	32.10	1.94
ARD	15.46	5.53	13.72	0.45
HVC	13.43	5.20	10.57	0.31

CONCLUSIONI

Prototipi di filtri attivi nelle varie configurazioni sono stati introdotti nel mercato gradualmente fra il 1971 ed il 1990. Di queste configurazioni solo alcune ebbero successo perché all'epoca i costi erano ancora abbastanza elevati e la loro tecnologia non era ancora bene sviluppata. Per ridurre i costi si sono introdotti i filtri passivi applicati in combinazione con quelli attivi. Con le tecnologie moderne si è arrivati a progettare filtri attivi capaci di compensare armoniche di ordine molto elevato. Ancora oggi, nonostante la riduzione di costo dei componenti attivi, uno dei problemi principali in sede di progettazione sono le considerazioni economiche. Oltre a questo è necessario anche che i filtri attivi siano progettati in modo da soddisfare le normative di settore.

In questo lavoro di tesi è stato presentato un filtro attivo innovativo capace non solo di effettuare la compensazione della tensione armonica in un nodo delle rete elettrica [52], ma in grado di smorzare la risonanza armonica lungo tale linea [64], [70]. Il principale vantaggio di utilizzare tale filtro è grande fattibilità ed economicità che esso comporta in quanto risulta come un dispositivo *plug-and-play*. Per il suo funzionamento, a differenza di quanto viene proposto in letteratura, richiede solo la rilevazione della tensione ai morsetti. Il filtro, che agisce da compensatore/smorzatore, filtra tutte le tensioni armoniche nel punto di accoppiamento comune e, non ultimo, smorza la risonanza armonica lungo una linea elettrica di distribuzione. In particolare sono stati presentati due metodi, iterativo ed sensitivo, per la compensazione della tensione armonica e lo smorzamento della risonanza armonica. Infine per validare la bontà dei metodi proposti sono state effettuate numerose simulazioni numeriche le quali mostrano i vantaggi [64] nell'utilizzare il filtro attivo proposto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Lgs. n° 79 del 15 Marzo 1999, "Recepimento della direttiva comunitaria 96/92/CE del Parlamento e del Consiglio Europeo del 19 dicembre 1996," (Ministro proponente P. Bersani).
- [2] Legge Istitutiva, "Legge n. 481 del 14 NOVEMBRE 1995," Norme per la concorrenza e la regolazione dei servizi di pubblica utilità. Istituzione delle Autorità di regolazione dei servizi di pubblica utilità,.
- [3] UNI EN ISO, "Sistema di gestione della qualità," 9000, 2005.
- [4] N. Locci, C. Muscas, and S. Sulis, "Investigation on the Accuracy of Harmonic Pollution Metering Techniques," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurements*, vol. 53, no. 4, pp. 1140-1145, Aug 2004.
- [5] N. Locci, C. Muscas, and S. Sulis, "On the measurement of power quality index for harmonic distortion in the presence capacitors," in *IEEE IMTC*, 2005.
- [6] C. Muscas, L. Peretto, S. Sulis, and R. Tinarelli, "Implementation of multi-point measurement techniques for PQ monitoring," *Trans. on Instrumentation and Measurement*, pp. 1626-1631, Oct 2006.
- [7] J. Arillaga, D.A. Gradley, and P.S. Bodger, *Power system harmonics.*: Wiley Interscience, 1985.
- [8] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, and H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality (2nd ed.)*.: McGraw-Hill, 2004.
- [9] De La Rosa, *Harmonic and power system.*: CRC Press, 2006.
- [10] J. Arrillaga and N.R. Watson, *Power System Harmonics*, Second Edition ed.: John Wiley & Sons, 2003.
- [11] CEI EN, 61000-4-30, 2003, Class. CEI 210-73 - CT 210 - Fascicolo 11557 - Anno 2011 - Compatibilità Elettromagnetica.
- [12] IEEE, "Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems ," 519, 1992.
- [13] IEEE, "Recommended Practice far Transfer of Power Quality Data," 1159.3, 2003.
- [14] IEEE, "Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," 1459, 2000.

- [15] CEI EN, 61000-4-7, 2002, Class. CEI 210-70 - CT 210 - Fascicolo 6995 - Anno 2003 - Edizione Seconda "Compatibilità elettromagnetica (EMC)".
- [16] CEI EN, Class. CEI 210-48 - CT 210 - Fascicolo 11869, 2012, Tecniche di prova e di misura - Flickermetro - Specifiche funzionali e di progetto.
- [17] CEI EN, 50160 - Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica, 2011-05.
- [18] IIR. Istituto Internazionale di Ricerca. [Online]. <http://www.ecd.it/iir/>
- [19] CEI, 14-4/8 , 2001, CT 14 - Fascicolo 6242 E - Edizione Prima - "Trasformatori di Potenza".
- [20] CEI EN, 50541-1, 2011, Class. CEI 14-44 - CT 14 - Fascicolo 11602 E - Trasformatori trifase di distribuzione di tipo a secco a 50 Hz, da 100 kVA a 3150 kVA e con una tensione massima per il componente non superiore a 36 kV.
- [21] CEI EN, 60831-1, 1997, Class. CEI 33-9 - CT 33 - Fascicolo 3937 - Edizione Seconda - Condensatori statici di rifasamento di tipo autorigenerabile per impianti di energia a corrente alternata con tensione nominale inferiore o uguale a 1000V.
- [22] CEI EN, 60831-1/A1, 2003, Class. CEI 33-9;V1 - CT 33 - Fascicolo 6992 - Condensatori statici di rifasamento di tipo autorigenerabile per impianti di energia a corrente alternata con tensione nominale inferiore o uguale a 1000V.
- [23] C.L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," in *34th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers*, Atlantic city, Giugno 28 giugno 1918.
- [24] T.M. Gruz, "A survey of neutral currents in three-phase computer power systems," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 26, no. 4, July-August 1990.
- [25] CEI, 64-8/5 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1.000 V in corrente alternata e a 1.500 V in corrente continua, 2012, CT 64 - Fascicolo 11960 - Parte 5: Scelta ed installazione dei componenti elettrici.
- [26] P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita, and S. Ogasawara, "Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout a power distribution system," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 39, no. 02, pp. 556-564, March/April 2003.
- [27] L.A. Morán, J.W. Dixon, J.R. Espinoza, and R.R. Wallace, "Using active power filters to improve power quality", 1999, In 5th Brazilian Power Electronics Conference, pp. 501-511.

- [28] GD. Marques, "A comparison of active filter control methods in unbalanced and non-sinusoidal conditions", 1998, Proc. IECON.
- [29] Al-Haddad, Chandra Singh, "A review of active filter for power quality improvement," *IEEE Transaction Industrial Electronics*, vol. 46, October 2001, IEEE Transaction Industry Electronics.
- [30] D. Rivas, L. Moran, J.W. Dixon, and J.R. Espinoza, "Improving passive filter compensation performance with active techniques," *IEEE Transaction Industrial Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 161-170, February 2003.
- [31] Akagi, Nabae, and Atoh, "Control strategy of active power filter using multiple voltage-source PWM converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA, no. 22, pp. 460 - 465, May 1986.
- [32] A. Ghosh and A. Joshi, "A new approach to load balancing and power factor correction in power distribution system," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, pp. 417-422, Jan 2000.
- [33] P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita, and S. Ogasawara, "Implementation and performance of automatic gain adjustment in a shunt-active filter for harmonic damping throughout a power distribution system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, pp. 438-447, May 2002.
- [34] H. Fujita and K. Wada H. Akagi, "A Shunt Active Filter Based On Voltage Detection For Harmonic Termination Of A Radial Power Distribution Line," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 35, pp. 638-645, May/June 1999.
- [35] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 1312-1322, Nov./Dec. 1996.
- [36] K. Wada, H. Fujita, and H. Akagi, "Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 1123-1130, July/Aug. 2002.
- [37] W.C. Santana, K. Al-Haddad, and L. Borges Da Silva, "Design and Control Strategy of an Active Resonance Damper," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Nov. 2009.
- [38] H. Akagi, "Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, pp. 354-363, Jan 1997.
- [39] R.A. Inzunza and H. Akagi, "A 6.6-kV transformerless shunt hybrid active filter for

- installation on a power distribution system," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 20, pp. 893-900, 2005.
- [40] H. Akagi, E. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning.*: Wiley Interscience, 2007.
- [41] A. Chandra, B. Singh, and K. Al-Haddad, "An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, pp. 495 - 507, 2000.
- [42] M. Routimo, M. Salo, and H. Tuusa, "Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, pp. 636 – 643, 2007.
- [43] T.A. Chaer, J.P. Gaubert, L. Rambault, and M. Najjar, "Linear feedback control of a parallel active harmonic conditioner in power systems," *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 24, pp. 641–653, 2009.
- [44] Mishra M.K., Ghosh A. Uyyuru K.R., "An optimization-based algorithm for shunt active filter under distorted supply voltages," *IEEE Trans on Power Electronics*, vol. 24, pp. 1223–1232, 2009.
- [45] A. Ghosh and A. Joshi, "A new approach to load balancing and power factor correction in power distribution system," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, p. 417, 2000.
- [46] W.Q.W. Zhaoan, Y. Weizheng, and J. Liu, "A series active power filter adopting hybrid control approach," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, pp. 301 – 310, 2001.
- [47] S. Fukuda, T. Kanayama, and K. Muraoka, "A current control method for active filters without detecting current harmonics," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, p. 519, 2002.
- [48] J.H. Marks and T.C. Green, "Predictive transient-following control of shunt and series active power filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, pp. 574-584, 2002.
- [49] Lee D C, Seok J K Lee G M, "Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics," *IEEE Trans. on Industry Electronics*, vol. 51, pp. 132–139, 2004.
- [50] Kim J S, Ko S H Kim Y S, "Three-phase three-wire series active power filter, which

- compensates for harmonics and reactive power," *IEE Proc. Electronic Power Application*, vol. 151, pp. 276–282, 2004.
- [51] F. Ewald and A.S. Mohammad, *Power Quality in Power System and Electrical Machines.*: AP, Marzo 2008.
- [52] D. Menniti, A. Burgio, N. Sorrentino, and A. Pinnarelli, "Implementation of the shunt harmonic voltages compensation approach," *Electric Power Systems Research n.81 - Elsevier*, p. 798, 2011.
- [53] Gyugyi Hingorani, *Understanding facts.*: Wiley Interscience, 2000.
- [54] A. Gosh and G. Ledwich, *Power quality enhancement using custom power devices.*: KAP, 2002.
- [55] D. Menniti, A. Burgio, N. Sorrentino, and A. Pinnarelli, "A Voltage Harmonic Compensation Approach," in *IEEE International Conf. on Harmonics and Quality of Power – ICHQP*, 2006, pp. 1-6.
- [56] D. Menniti, A. Burgio, N. Sorrentino, and A. Pinnarelli, "Grid-Interfacing Active Power Filters to Improve The Power Quality in a Microgrid," in *IEEE International Conf. on Harmonics and Quality of Power – ICHQP*, 2008, pp. 1-6.
- [57] Ahmed, Zhang, Liu Xu, "Measurement of Network Harmonic Impedances: Practical Implementation Issue and Their Solutions," *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 17, p. 210, 2002.
- [58] J.C. De Oliveira, J.W. Resende, and M.S. Miskulin, "Practical approaches for AC system harmonic impedance measurement," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 6, pp. 1721-1726, 1991.
- [59] M. Nagpal, W. Xu, and J. Sawada, "Harmonic impedance measurement using three-phase transients," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 13, pp. 272-277, 1998.
- [60] W.W. Xu and Liu Yilu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804-811, 2000.
- [61] M. Sumner, B. Palethorpe, D.W.P. Thomas, P. Zanchetta, and M.C. Di Piazza, "A technique for power supply harmonic impedance estimation using a controlled voltage disturbance," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 17, pp. 207-215, 2002.
- [62] Ahmed, Zhang, Liu Xu, "Measurement of Network Harmonic Impedances: Practical Implementation Issues and Their Solutions," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 17, pp. 210-216, 2002.

-
- [63] C. Chen, L. Xiuling, D. Koval, Xu Wilsun, and T. Tayjasant, "Critical impedance method-a new detecting harmonic sources method in distribution systems," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 19, pp. 288-297, 2004.
- [64] D. Menniti, A. Burgio, and G. Brusco, "A Comparison of Two Active Resonance Dampers," in *IEEE ENERGYCON*, Florence, 2012.
- [65] ANSYS. Software SIMPLORER. [Online]. <http://www.ansys.com/Products/>
- [66] IEEE, "Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions," 1076.1, 1999.
- [67] Working Group on Nonsinusoidal Situations IEEE, "Practical Definitions for Powers in System with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, p. 79, 1996.
- [68] IEEE, "Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," 1459, 2010.
- [69] E. Emanuel, "Summary of IEEE Standard: Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions," *IEEE Trans. On Industry Application*, vol. 40, pp. 869-876, 2004.
- [70] G. Brusco, Burgio A., Menniti D, Pinnarelli A., and N. Sorrentino, "An Active Resonance Damper which avoid the estimation of the Line Characteristic Impedance," *Proposed to Electric Power Systems Research*, 2012.
- [71] D. Menniti, A. Burgio, N. Sorrentino, and A. Pinnarelli, "A Voltage Harmonic Compensation Approach," in *IEEE ICHQP*, 2006.
- [72] H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, pp. 638–645, May/June 1999.